

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

Tóth Zsolt



Pannon Egyetem

2025

Autóelektronikai szerelvények tisztítási folyamatának hatékonyság és megbízhatóság növelése

DOI:10.18136/PE.2025.946

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Tóth Zsolt

okleveles természettudomány-kommunikációs szakember

Témavezető:

Dr. Szalai István

egyetemi tanár

Készült a Pannon Egyetem

Vegyésmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében

2025

Autóelektronikai szerelvények tisztítási folyamatának hatékonyság és megbízhatóság növelése

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a
Pannon Egyetem
Vegyésszmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében
Anyagtudományok és technológiák tudományágban

Írta: Tóth Zsolt

Témavezető: Dr. Szalai István

Elfogadásra javaslom (igen / nem)
Dr. Szalai István
témavezető

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve:igen /nem
.....
(bíráló)

Bíráló neve:igen /nem
.....
(bíráló)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján%-ot ért el.

Veszprém,
.....
(a Bíráló Bizottság elnöke)

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

Veszprém,
.....
(az EDHT elnöke)

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	1
1.1	Tisztaság az autó elektronikai gyártástechnológiában.....	1
1.2	A kutatás motivációja és célkitűzése	5
2.	Irodalmi áttekintés.....	6
2.1	Forrasztási folyamat és hozzájárulása a felületi szennyeződéshez.....	6
2.1.1	Újraömllesztés forrasztás (Reflow soldering).....	7
2.1.2	Hullámforrasztás (és szelektív forrasztás)	10
2.1.3	Folyasztószerek	11
2.2	Az elektronikai szerelvények tisztítási módszerei.....	14
2.2.1	Elektronikai termékek ipari mosása	15
2.2.2	Mechanikai eltávolítás	16
2.3	Szárazjeges tisztítás	18
2.3.1	A szárazjég-havas tisztítási eljárás mechanizmusa.....	19
2.3.2	A technológia főbb előnyei	21
2.3.3	A berendezés általános felépítése.....	22
2.3.4	Szárazjég-fúvás paraméterei	25
2.3.5	Hatékonyság.....	26
2.4	Az elektronikai szerelvények szennyezettség monitorozási módszerei	27
2.4.1	Optikai képfeldolgozás.....	27
2.4.2	Helyi ionos szennyezettség vizsgálat	28
2.4.3	Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR)	29
2.4.4	Felületi szigetelési ellenállás (SIR).....	31
2.5	Impedancia spektroszkópia	34
2.6	Az ionmigráció mechanizmusa és hatása a termék élettartamra	35
2.7	Tudáshiány meghatározása.....	37

Kutatási rész

3.	Szárazjeges tisztítás hatékonyság vizsgálata.....	39
3.1	Kísérleti elrendezés	39
3.2	Szárazjég-havas tisztítás	42
3.2.1	Elektrokémiai mérések.....	42
3.2.2	Tisztított ENIG felületek optikai analízise.....	43
3.2.3	Fourier Transzformációs Infravörös Spektroszkópia (FTIR) elemzés..	45
3.3	Nedvesíthetőség vizsgálat CO ₂ kezelt paneleken	47
3.4	A szárazjeges tisztítás hatásmechanizmusának vizsgálata	49

3.4.1	Szennyezett felületek tisztítása	49
3.4.2	Mérési eredmények és értékelésük.....	50
3.5	Összefoglalás	55
4.	Tesztpanel	56
4.1	TTC tesztpanel kialakítása	56
4.2	A tesztpanel geometriájából meghatározható felületi kapacitás	59
4.2.1	Többlemezes kondenzátor modell.....	60
4.2.2	Az IDS kapacitásának analitikai értékelése többretegű rendszerekben	61
5.	Folyasztószer maradványok detektálása impedancia méréssel.....	64
5.1	Vizsgálati módszerek.....	64
5.1.1	Elektromos mérések	65
5.2	Mérések kiértékelése	70
5.2.1	Impedancia spektroszkópia vizsgálatok	70
5.2.2	Impedancia konverter IC mérések	75
5.2.3	„Klasszikus” vizsgálati módszerek	77
5.2.4	Összefoglalás.....	79
6.	Dendritképződés szimulációs vizsgálata.....	80
6.1	Modell és szimuláció	80
6.1.1	Geometria és kölcsönhatások.....	80
6.1.2	Brown Dinamikai szimuláció.....	81
6.1.3	A dendritek rács modellje	82
6.2	Eredmények.....	82
6.3	Összegzés	86
7.	Tézisek	87
8.	New scientific results, theses	91
9.	Az értekezéshez kapcsolódó publikációk.....	95
10.	Irodalomjegyzék.....	96
	Köszönetnyilvánítás	107
	Függelék.....	108
I.	A kutatás során alkalmazott eszközök	108
II.	Kapacitás meghatározás az impedancia konverter IC adatai alapján.....	111
III.	A TTC tesztpanel kialakítása.....	112

Jelölések és rövidítések jegyzéke

$R\%$	Maradékanyag arány
T_0	Tisztítás előtti szennyezett terület
T_1	Tisztítás utáni szennyezett terület
η	Tisztítási hatékonyság
t	Idő
S	Út
D	Átmérő
E_{kin}	Mozgási energia
m	Tömeg
v	Sebesség
ρ	Sűrűség
C	Kapacitás
R	Ellenállás
ϵ_0	Vákuum dielektromos állandó
ϵ_r	Relatív dielektromos állandó
s	Fegyverzetek közötti távolság
A	Fegyverzet felülete
N	Lemezek, elektródák száma
L	Hosszúság
w	Szélesség
T	Vastagság
$K(k)$	Elsőfajú teljes elliptikus integrál
e	Egységtöltés
z_i	Vegyérték
R_i	Ion sugara
$\mathbf{R}(t)$	Véletlen erő
γ_i	Súrlódási együttható
U	Feszültség
H	Elektróda távolság
D_i	Diffúziós állandó
c	Koncentráció
E	Elektromos térerősség
k_B	Boltzman állandó

<i>NyÁK</i>	Nyomtatott áramköri kártya
<i>SMT</i>	Felületszerelt technológia (Surface Mount Technology)
<i>SMD</i>	Felületre szerelhető eszköz (Surface Mount Device)
<i>THT</i>	Furatszerelt technológia (Through Hole Technology)
<i>WOA</i>	Gyenge szerves sav (Weak Organic Acid)
<i>VOC</i>	Illékony szerves vegyület (Volatile Organic Compound)
<i>CFC</i>	Klór-fluorkarbon (chlorofluorocarbon)
<i>IDS</i>	Interdigitális struktúra
<i>LCO₂</i>	Folyékony szén-dioxid
<i>IPA</i>	Izopropil-alkohol
<i>FTIR</i>	Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia
<i>DC/AC</i>	Egyenáram/váltakozó áram
<i>EIS</i>	Elektrokémiai impedancia spektroszkópia
<i>ECM</i>	Elektrokémiai migráció
<i>WD</i>	Vízcsepp (teszt)
<i>MTTF</i>	Meghibásodásig eltelt átlagos idő
<i>PNP</i>	Poisson-Nernst-Planck
<i>ENIG</i>	Kémiai nikkelt/galván arany
<i>ImSn</i>	Immerziós ón /vegyi ón
<i>HASL</i>	Tűzi ón (Hot Air Solder Leveling)
<i>OSP</i>	Szerves védőbevonat (Organic Solder Preservative)
<i>C3/C.I.</i>	Helyi ionos szennyezettség vizsgáló rendszer
<i>C.I.</i>	Korrozivitási index
<i>ROSE</i>	Oldószerkivonat ellenállása (Resistivity of Solvent Extract)
<i>SIR</i>	Felületi szigetelési ellenállás (Surface Insulation Resistance)

Kivonat

A dolgozat az autóiipari elektronikai szerelvények gyártása során keletkező „mosást nem igénylő”, no-clean folyasztószer eredetű ionos maradványok tisztítási és detektálási lehetőségeivel foglalkozik. Az autógyártás átalakulása miatt a beépített elektronika komplexé vált és ezzel együtt a megbízhatósági elvárások is fokozódtak. A gyártás során keletkező szennyeződések kontrollálásán túl, a nem megfelelő terméktisztaságból adódó meghibásodások, mint az elektrokémiai migráció okozta dendrit növekedés megértése, szintén kulcsfontosságú a biztonságkritikus rendszerek kockázatának minimalizálása érdekében.

A dolgozat első részében egy alsó infrafűtéssel ellátott szárazjég-havas tisztítórendszer hatékonyságát vizsgálok képfeldolgozó, spektroszkópiai és helyi ionos szennyezettség alapú módszerekkel. Megmutatom, hogy a folyasztószer maradványok hatékonyan eltávolíthatók mesterségesen szennyezett, hőkezelt és valós gyártási környezetből származó panelfelületekről egyaránt, ugyanakkor a felület kezdeti nedvesíthetősége a tisztítás hatására sem változik szignifikánsan. Vizsgáltam a CO₂-havas tisztítórendszer hatásmechanizmusát, és becslést adtam az egyes részecskék kinetikus energiájára.

A következő részekben bemutatom a folyasztószer detektálás egy nem destruktív és ismételhető módszerét. A vizsgálatokhoz többcélú tesztpanelt terveztem, és az azon kialakított interdigitális struktúrák (IDS) kapacitását elméleti úton megbecsültem. A váltakozó áramú felületi impedancia (kapacitás) mérésen alapuló módszer széles frekvenciatartományon kimutatta az IDS elektromos tulajdonságainak változását folyasztószer szennyezés hatására. Kidolgoztam egy költséghatékony és gyors eljárást, mely impedancia konverter IC-re épülő áramkört használ a kapacitás meghatározására. Az állandó frekvencián működő, egyszerűbb, IC-alapú rendszer hatékonyan detektálta a folyasztószer maradványok okozta kapacitás változásokat, és ezzel megalapozta az ipari alkalmazhatóság lehetőségét. A kapacitás mérésen alapuló módszer eredményeit összevettem az iparban eddig alkalmazott szennyezés vizsgálati módszerekkel, mint az egyenáramú felületi szigetelési ellenállás, illetve a helyi ionos szennyezettség vizsgálat.

Végezetül bemutatásra kerül egy hibrid szimulációs módszer, mely az elektrokémiai migráció okozta dendritnövekedés dinamikáját írja le. A modellben a dendritek a növekedés során egy előre definiált rácsra épülnek, de az ionok elektrodifúzióját Brown dinamikai részecske módszer szimulálja, ahol az ionok súrlódva mozognak a mozgásegyenletek szerint.

Abstract

In this thesis, I summarize my results about the cleaning and detection of ionic residues originating from “no-clean” fluxes generated during the production of automotive electronic assemblies. Due to the transformation of automotive manufacturing, the built-in electronics have become complex and this progress, the reliability expectations have also increased. In addition to control of the contaminants generated during production, understanding the failures resulting from inadequate product cleanliness, such as dendrite growth caused by electrochemical migration, is also crucial in order to minimize the risk of safety-critical systems.

In the first part of the thesis, I introduce the effectiveness of a dry ice-snow cleaning system equipped with a bottom infrared heater using image processing, spectroscopy and local ionic contamination-based methods. Flux residues can be effectively removed from both artificially contaminated, heat-treated and real-world panel surfaces without significantly changing the subsequent wettability of the surface. I investigate the mechanism of action of the CO₂-snow cleaning system and estimate the kinetic energy of individual particles.

In the following sections, I present a non-destructive and repeatable method for flux detection. For these tests, I designed a multipurpose test panel and theoretically estimated the capacitance of the interdigital structures (IDS). The method based on AC surface impedance (capacitance) measurement revealed the change in the electrical properties of the IDS over a wide frequency range due to flux contamination. Based on the results, I compared a cost-effective, agile alternative that uses an impedance converter IC-based circuit to determine the capacitances. The simpler IC-based system operating at a constant frequency effectively detected the capacitance changes caused by flux residues and thus established the possibility of industrial applications. I compared the results of the capacitance measurement-based method with the contamination testing methods used in the industry so far, such as DC surface insulation resistance or local ionic contamination testing.

Finally, a hybrid simulation method is presented to describe the dynamics of dendrite growth caused by electrochemical migration. In the model, the dendrite is built on a lattice. In contrast, the electrodiffusion of ions is simulated by a Brownian dynamic particle method, where the ions move as particles with friction according to the equations of motion.

Auszug

Die Arbeit beschäftigt sich mit den Reinigungs- und Detektionsmöglichkeiten ionischer Rückstände aus „No-Clean“-Flussmitteln, die bei der Produktion von elektronischen Baugruppen im Automobilbereich entstehen. Durch den Wandel im Automobilbau ist die verbaute Elektronik komplexer geworden und damit auch die Erwartungen an die Zuverlässigkeit gestiegen. Neben der Kontrolle der während der Produktion entstehenden Verunreinigungen ist es auch von entscheidender Bedeutung, die aus unzureichender Produktreinheit resultierenden Fehler, wie z. B. durch elektrochemische Migration verursachtes Dendritenwachstum, zu verstehen, um das Risiko sicherheitskritischer Systeme zu minimieren.

Im ersten Teil der Arbeit untersuchte ich die Effizienz eines Trockeneis- und Schneereinigungssystems, das mit einer Infrarot-Unterheizung ausgestattet ist. Flussmittelrückstände lassen sich sowohl von künstlich verunreinigten, wärmebehandelten als auch von realen Plattenoberflächen effektiv entfernen, ohne die spätere Benetzbarkeit der Oberfläche wesentlich zu verändern. Ich habe den Wirkmechanismus der CO₂-Schneereinigung untersucht und eine Abschätzung der kinetischen Energie der einzelnen Partikel abgegeben

Im nächsten Abschnitt habe ich eine zerstörungsfreie und wiederholbare Methode zur Flusserkennung vorgestellt. Für die Tests habe ich ein Mehrzweck-Testpanel entworfen und die Kapazität der darauf gebildeten Interdigitalstrukturen (IDS) theoretisch geschätzt. Die Methode, die auf der Messung der Impedanz (Kapazität) mit Wechselstrom basiert, offenbarte die Veränderung der elektrischen Eigenschaften von IDS aufgrund von Flussmittelverunreinigungen über einen weiten Frequenzbereich. Das einfachere IC-basierte System, das mit einer konstanten Frequenz betrieben wird, konnte auch durch Flussmittelrückstände verursachte Kapazitätsänderungen wirksam erkennen und eröffnete damit die Möglichkeit einer industriellen Anwendbarkeit. Ich habe die Ergebnisse der Kapazitätsmessverfahren mit den bisher in der Industrie eingesetzten Schadstofftestverfahren verglichen.

Abschließend wird eine hybride Simulationsmethode zur Beschreibung der Dynamik des Dendritenwachstums zwischen zwei Elektroden vorgestellt. In dem Modell wachsen Dendriten in einem Gitter, aber die Elektrodifusion von Ionen wird mit der Brownschen dynamischen Teilchenmethode simuliert, bei der sich die Ionen durch Reibung bewegen.

1. Bevezetés

1.1 Tisztaság az autó elektronikai gyártástechnológiában

A „tisztá” meghatározása valójában bonyolultabb, mint amilyennek hangzik. A tisztaság egyesek szemében szubjektív fogalom lehet, de a megfelelő apparátussal akár kiszámítható és precízen kezelhető is. Az elektronikai gyártásban használt nyomtatott áramkörtáblák és szerelvények tisztaságával kapcsolatos problémák évtizedek óta meghatározó szerepet játszanak a mindennapi gyártás során. Ezzel összhangban a tudományos diskurzus is egyre intenzívebb a témában.

Az ionos szennyeződések a kezdetektől gondot jelentenek az elektronikai szerelvények gyártói számára. A maradványok könnyen rövidzárlathoz vezethetnek a panelek áramköreiben, de a fő probléma az, hogy az ilyen típusú szennyeződések vizsgálati módszerei korlátozottak. A szennyezett területek egyértelmű meghatározása bizonytalan. A maradványok mennyiségének pontos meghatározása problémákba ütközik, mert az extrakciós módszerek megváltoztatják a felület szennyezettségi állapotát. Ez reprodukálhatósági problémákat eredményez, valamint a módszerek általában érzéketlenek a mérés során éppen nem ionos állapotú szerves anyagokra is.

A tisztaság kulcsfontosságú az elektronikai szerelvények kiszámítható működéséhez, mert:

- fokozza a felületkövető bevonatok tapadását;
- biztosítja, hogy nem szorulnak be rosszindulatú maradványok a bevonat vagy alkatrész alá;
- növeli a megbízhatóságot a meghibásodás veszélyeinek (például a rövidzárlatot okozó dendrites növekedések) megszüntetésével.

A valóban tiszta felület értékeléséhez fontos megérteni, hogy hol tart most a tisztasági problémakör kutatása. A következőkben röviden áttekintem ennek történetét, kitérve arra, hogy a tisztítási és vizsgálati módszerek hogyan fejlődtek az idők során.

Az 1970-es évektől a katonai és gyártási szabványügyi testületek elkezdték felismerni az elektronikai termékek tisztaságának fontosságát. Ezért az *IPC[1]* előírásokat dolgozott ki a gyártási szennyezettség csökkentése érdekében. Ezek elsősorban a folyasztószer-maradványok, azaz a lapokra felvitt „védőréteg” maradékának eltávolításával foglalkoztak. Ezen kívül a szabványok az akkoriban elfogadható ionos tisztaság szintjeit is definiálták.

A folyasztószer maradványainak eltávolítása azért kiemelten fontos, mert megkötheti a nedvességet és a tapadást akadályozó szennyeződések, illetve rövidre zárhatja az áramkörü lapon egymáshoz közel elhelyezkedő kivezetéseket. Ez utóbbi az elektronika méretének csökkenésével és az alkatrészek kompaktabbá válásával kifejezetten égető problémává vált.

Úgy tűnt, hogy az utólagos tisztítást nem igénylő (no-clean) folyasztószer megjelenése számos tisztasági problémát megoldott, és észszerűsítette a gyártási folyamatokat. Ugyanakkor a bevonatok problémái és a rövidzár eredetű meghibásodások továbbra is olyan mértékűek maradtak, amely elfogadhatatlan a biztonságkritikus alkalmazásokban. Az elvárt megbízhatóság elérése fokozott kihívást jelent, ezért nagyobb hangsúlyt kap a folyasztószer-maradványok eltávolítása. A terméktisztaság a modern rendszerek esetében napról napra válik egyre fontosabbá.

Az elektronikai egységek tisztításának új korszakát éljük, ahol egyaránt kulcsfontosságú a panelen lévő szennyeződések összességének mérése és tisztítása.

Számos lehetőség áll rendelkezésre a folyasztószer és a termékeken található más inkonzisztens bevonatokat okozó, vagy dendritek növekedését elősegítő szennyeződések eltávolítására. A legáltalánosabban és leggyakrabban választott tisztítási módszer az ipari mosás, azaz a vizes/oldószeres fürdő és öblítés. Ezzel a módszerrel gyakorlatilag minden törmelék el lehet távolítani, továbbá olyan oldható szennyeződések is, mint például az ionos anyagok vagy a visszamaradt folyasztószer-maradványok. Néha, bár ritkábban, mechanikus tisztításra van szükség ahhoz, hogy a kemencékben még képlékenyebb, de idővel rögzült maradványokat eltávolítsák [2].

A forrasztás utáni tisztítás 1989 előtt az egész iparágra kiterjedő gyakorlat volt. A vízbázisú folyasztószer eltávolítására használt durva oldószerek azonban környezetvédelmi aggályokat ébresztettek, így az iparnak el kellett távolodnia a jelentős maradékanyagot tartalmazó folyasztószerektől és a megszokott tisztítási eljárásoktól. Szerencsére a kutatók azon voltak, hogy új és alacsony maradékanyag-tartalmú folyasztószereket vezessenek be, amelyek állítólag „nem igényelnek tisztítást”. Akkoriban az elektronikai szerelvények jóval nagyobbak voltak, és olyan alkatrész szerelési eljárásokat alkalmaztak, amelyek relatíve nem voltak hajlamosak a termék felületén maradt kismértékű maradványokból adódó sérülékenységekre. Úgy tűnt, hogy az elektronikai gyártó világ nagy része biztonságos és megbízható, az oly régóta megszokott tisztítás nélkül is.

A nagy megbízhatóságú alkalmazások magukban foglalják az elektronikai eszközök katonai és védelmi felhasználását, az orvosi eszközöket, a kereskedelmi repülőgéprendszereket és természetesen az autóiipari elektronikai eszközöket is. A technológia folyamatos fejlődésével ezeken a területeken felmerült, hogy amit korábban tisztának fogadtak el, az mégsem tekinthető elégségesnek. A felületkövető bevonatok leválása, az elektrokémiai migráció (ECM) jelensége, vagy a panelfelület bármilyen szennyeződése, amely veszélyezteti a szerelvényt, már nem fogadható el.

Az úgynevezett „no-clean” folyasztószerrel kapcsolatos probléma része, hogyha nem tisztítjuk le a folyasztószer maradványait, akkor mást sem tisztítunk le. A panelfelületek minőségét a folyasztószer maradványokon kívül más szennyezőanyag is ronthatja. Az ionos és szerves szennyeződések számos forrásból származhatnak, és a gyártási folyamat során több alkalommal is a panelre juthatnak. A szennyeződések összességének letisztítása nélkülözhetetlen a kiszámítható teljesítmény eléréséhez.

A tisztítási szabványok nem változtak drasztikusan az évek során. Ha ionos szennyeződésről beszélünk, az IPC-TM-650 szabvány az általános alkalmazáshoz, történeti okokból nátrium-klorid (NaCl) egyenértékben megadott $1,56 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ értéket nem meghaladó szennyezettségi szintet ír elő [3]. A megbízhatósági elvárások emelkedésével viszont egyéb szigorítások is szükségessé váltak, pusztán az ionos szennyeződések tisztítása nem elegendő a meghibásodások megelőzéséhez. Így például a részecske természetű szennyeződések kontrollja is egyre nagyobb teret kapott az elmúlt években, és az uralkodó „tisztítást nem igénylő” módszerek sem felelnek meg már a komolyabb megbízhatósági követelményeknek.

A vizes, oldószeres mosás gyakran nem kivitelezhető, mivel az alkatrész tokozás sérülését vagy bizonytalan működést okozva károsíthatja a modern termékek nedvességkritikus rendszereit. Ezért lehetnek praktikusak a vízmentes, de nem roncsoló tisztítási módszerek, mint a sűrített levegős tisztítás, a plazmatisztítás, vagy a dolgozatban részletesen tárgyalt szárazjég-havas lefúvás.

A bővülő szabványok és a tisztaság átfogóbb meghatározásának következtében, a közelmúltban felerősödött a vita arról, hogy mely tisztítási szabványt és tisztaságvizsgálati módszert alkalmazzuk. Az ionkromatográfia (IC), az oldószerkivonat ellenállás (ROSE) vagy a felületi szigetelési ellenállás (SIR) vizsgálata és a vizuális tesztek mind értékes eszközök annak meghatározására, hogy az egység tiszta-e, azonban mindegyiknek vannak előnyei és hátrányai is. [4]

Bár a ROSE tesztelés továbbra is messze a legnépszerűbb és legelérhetőbb tisztasági vizsgálati módszer, ez sem hibamentes. A ROSE teszterek népszerűek gyorsaságuk és viszonylag kedvező árak miatt, de nem képesek minden lehetséges szennyeződést kimutatni, és az általuk észlelt ionos szennyeződést a teljes felületre átlagolják. Tehát ha a teszt egyáltalán bármilyen szennyeződést észlel, akkor nem tudja megmondani, hogy hol van a felületen. Azt feltételezi, hogy az összes észlelt szennyeződés egyenletesen oszlik el a panelen.

Az elektronikai összeszerelők által megfogalmazott legveszélyesebb feltételezések a következők:

- minden, a gyártótól származó eredeti panel tiszta;
- a panelre kerülő összes alkatrészt tisztán, szennyeződésmentesen szállítják.

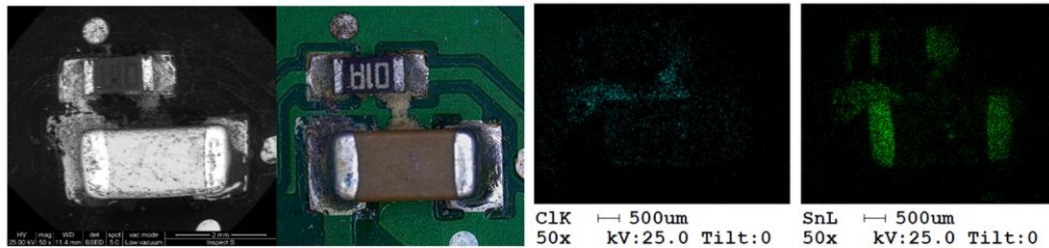
Jelenleg a legtöbb gyártónak vállalnia kell ezeket a dolgokat, mert nincs megbízható módszer az ellenkező ellenőrzésére. Az új, modern tisztasági mérések fejlesztésekor, azt is figyelembe veszik, hogy a mérések elvégezhetőek lehessenek közvetlenül a soron egy automatizált eszközzel, vagy az ellátásilánc-menedzsment eszközöként használhatók lehessenek a minőségellenőrzésre a termék vagy a folyamat vizsgálatához.

A felületkövető bevonat hibáit, rövidzárlatot vagy elektrokémiai migrációt (ECM) okozó maradékok összességének ellenőrzése érdekében, meg kell határozni a „tiszta” definícióját, azaz, hogy milyen mérési eredmények mellett fogadjuk el a vizsgált terméket. A vizsgálatok során lehetőség szerint detektálni kell az összes terméket veszélyeztető esetleges szennyeződést.

Egyre nagyobbak az elvárások a megbízhatósággal szemben, és ehhez a tisztítási módszereknek igazodniuk kell. A tisztítás hatékonyságának legjobb módja a mérés. A tisztaság mérésének leghatékonyabb formája az összes érintett anyag értékelése minden egyes lépésben, ahol lehetséges a szennyeződés, és ahol tisztítás történik. Ezeket a kritikus szabályozási pontokat adatvezérelt tesztrendszerrel kell felügyelni. Egyértelmű visszacsatolást kell biztosítani ahhoz a döntéshez, hogy a felület tiszta és megbízható, vagy sem.

1.2 A kutatás motivációja és célkitűzése

A doktori kutatásom célja, hogy megvizsgálja a modern elektronikai gyártás során keletkező ionos természetű szennyeződések csökkentő eljárás, a szárazjég-havas tisztítás hatékonyságát. Továbbá feltérképezem, hogy a jelenlegi tisztaságra vonatkozó iparági előírások kritériumai, milyen mértékben alkalmazhatóak a modern autóiipari termékek gyártása esetén.



1.1. ábra: Esettanulmány: Nem megfelelően tisztított panelek használata során fejlődött ólomszennyező és klor tartalmú vegyület meghibásodást okozott (Fotó: Flex Zalaegerszeg AME Hibaelemző Laboratórium)

Fontosnak tartom, hogy a doktori kutatás során a munkámmal megalapozzam és bővítssem azt a tudást, ami elősegíti az ionos szennyeződések okozta problémák tudományos megértését, és olyan technológiai módszereket vizsgáljak, melyek segítik a meghibásodási kockázat felmérését és hozzájárulnak annak csökkentéséhez. Ehhez részletes vizsgálatokat folytattam arról, hogy az iparban számos területen már sikerrel alkalmazott módszer, a szárazjég-havas szórás autóelektronikai szerelvények esetében milyen mértékben alkalmazható.

Ahhoz, hogy az ionos szennyeződések kockázatait felmérjem, elengedhetetlen a maradványok mértékének ismerete. Ezért választottam egy nem roncsoló, reprodukálható eredményeket biztosító, felületi impedanciamérésen alapuló technológia fejlesztését, mely gyors, ipari környezetben használható és jó ár-érték arányú módszer a folyasztószer maradványok mennyiségének meghatározására.

Fontos azoknak a mechanizmusoknak a megértése is, amely az esetleges meghibásodásokért felelős lehet, ezért az ionmigráció alternatív szimulációs modellezése is jól kiegészítheti a kutatási témát.

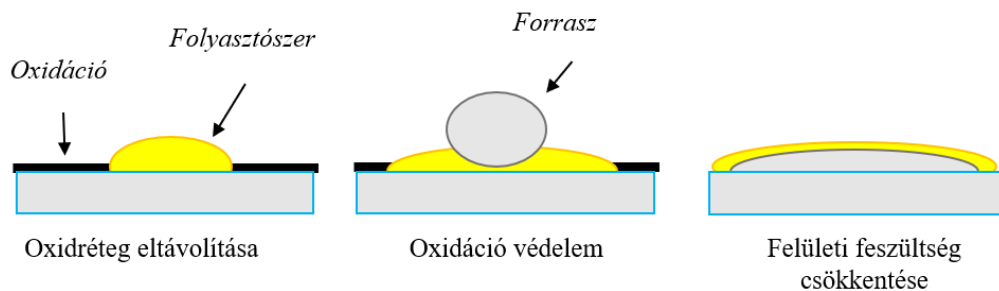
Ezen felül alapvetőnek tartom, hogy a doktori képzés, valamint a hibaelemző mérnöki munkám során megszerzett tapasztalatok, folyamatosan hasznosíthatók legyenek mind a kutatás, mind az autóelektronikai gyártástechnológia területén.

2. Irodalmi áttekintés

2.1 Forrasztási folyamat és hozzájárulása a felületi szennyeződéshez

A forrasztás általános fogalma: egy könnyen olvadó és megszilárduló fém (forrasztóötvet) felhasználása kötőanyagként fémrészek összekötésére, amelyek az elektronikai szerelvények esetében az alkatrészek kivezetései, illetve az áramköri lapok forrasztási felületei.

A forrasztó ötvözet fizikai és kémiai tulajdonságai az elektronikai eszközök gyártásának kulcsát képezik, mivel ezek közvetlenül befolyásolják a kész eszköz gyártási minőségét, élettartamát, valamint általános szerkezeti és elektromos megbízhatóságát. A fémek összekapcsolásakor az alacsonyabb olvadáspont elengedhetetlen a gyors és hatékony kötési folyamathoz, mivel minimálisra csökkenti az áramköri lapok és az alkatrészek anyagának (gyakran alacsonyabb olvadáspontú polimerek) károsodását. Az olvadt forrasztóanyag gyorsan meg kell szilárdulnia, mivel a lassú megszilárdulási folyamat során nagyobb koncentrációjú szennyeződés juthat a kész kötésbe, ami rontja a szerkezeti megbízhatóságot. A forrasztóanyag ideális esetben nem képezhet galvanikus korróziós összeköttetést a csatlakozó anyagokkal, vagy más reakcióvegyületet a nyomtatott áramköri kártya (NyÁK) hordozóval. A forrasztó ötvözetek ezen tulajdonságai kritikusak a folyamat sikeres végrehajtásához.



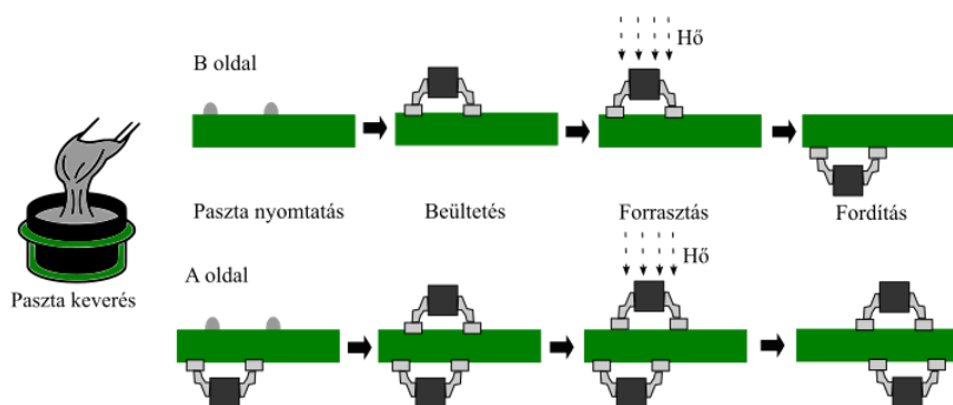
2.1. ábra: Folyasztószer hatásmechanizmusa

A forrasztó ötvözet, az ón és a réz hajlamosak a felületi oxidációra, ami közvetlen gátolja a hatékony forrasztási kötések kialakulását, mivel az oxidrétegek megakadályozzák a forrasztási felületek olvadt forrasztóanyag általi nedvesedését, ami gyengébb vagy hiányos kötések eredményez. Ezeknek a felületi oxidoknak a forrasztási kötés elősegítése érdekében történő eltávolítása az oka a folyasztószer használatának. A folyasztószer hatásmechanizmusát a 2.1. ábra mutatja. Forrasztáskor feloldja a felületi oxidokat és a szennyeződéseket a felület nedvesíthetőségének javítása érdekében, valamint elősegíti a hőátadást, ezzel segítve a megfelelő minőségű kötés kialakulását és

időtállóságát. Ezek a folyasztószer rendszerek szénhidrogén oldószerek (például észterek, éterek, alkoholok és víz), aktivátorok (gyenge szerves savak, aminok, szerves és szervetlen halogenidek), kötőanyagok (poliolok, gyanta/műgyanta) és további módosítók összetett keverékei. Az adalékok befolyásolják a kötés minőségét és hozzájárulnak a rendszer robusztusságához is. Azonban a kialakult kötések jellegét, és a forrasztott rendszer esetleges klimatikus megbízhatóságát, befolyásolja a forrasztás módja is, mint a kézi forrasztás, a hullámforrasztás, a szelektív forrasztás és az újraömlasztéses forrasztás. A következő alfejezetek áttekintést adnak ezekről a forrasztási eljárásokról, részletes betekintést nyújtva a forrasztási technikákba, mivel a dolgozatban végzett kutatómunka a forrasztás utáni ionos maradványokat tanulmányozta.

2.1.1 Újraömlasztéses forrasztás (Reflow soldering)

A gyorsabb ciklusidők és a nagyobb gyártási hozam igénye, a felületre szerelhető technológia és az újraömlasztéses forrasztás bevezetéséhez vezetett az 1960-as években, hogy részben kiváltsa a lassabb és kisebb alkatrész sűrűsége képes furatszerelt-összeszerelési folyamatot. Az 1970-es és 1980-as években a technológiát integrálták az elektronikai gyártásba [5]. A felületszerelt technológia (SMT) lehetővé tette az alkatrészek rögzítését az áramköri lap mindkét oldalára, ami növelte a beültethetőség mértékét. Ez további előrelépést hozott az alkatrészek méretének és csatlakozóhosszának miniaturizálásában. Az újraömlasztéses forrasztás ma az elektronikai tömeggyártás vezető technikája. A forrasztástechnológia folyamatát a 2.2. ábra mutatja be melynek lépései a következők:

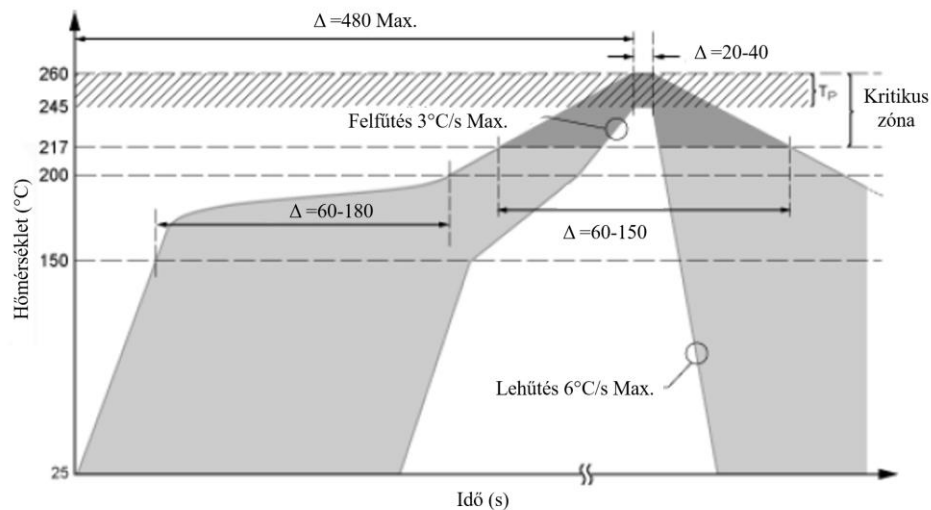


2.2. ábra: Az újraömlasztéses (reflow) forrasztás folyamata

1. Forrasztópaszta keverése: A forrasztópaszta különböző szilárd és folyékony vegyszerek keveréke, amiknek a sűrűsége és az oldhatósága eltérő. A gravitáció hatására a nehezebb összetevők (főleg forrasztópor) felhalmozódnak a tárolóedény alján. Ezért fizikai keverés szükséges, hogy homogén paszta keveréket kapjunk [6], [7]. A forrasztópaszták tárolása 1-10°C közötti hőmérsékleten történik, hogy elkerüljük az oldószer elpárolgását, ami befolyásolja a pasztanyomtatás folyamatát. Ugyanakkor kritikus fontosságú, hogy a forrasztópasztát hagyjuk szobahőmérsékletűre melegedni a keverés és az azt követő felhordás előtt, mivel az optimális felhordási hőmérséklet biztosítja a megfelelő reológiai tulajdonságokat [8].

2. Nyomtatás és beültetés: A leggyakrabban a szitanyomást használják [9]. A modern gyártástechnológiában stencilként a hagyományos dróthálós szita helyett, a megmunkált lemez alacsonyabb hajlékonysága miatt, lézervágott fémsablont használnak. Ez lehetővé teszi a paszta jobb áramlását a tervezetten kialakított [10] nyílásokon keresztül, amelyek illeszkednek a szükséges forrasztási helyekhez a panelen. Az egyes helyeken lerakódott forrasztópaszta mennyisége jelentősen befolyásolja a végső forrasztási minőséget azáltal, hogy meghatározza a maradványok mértékét és az alkatrész magasságát. Az alkalmazott nyomóerőt a gumiból, műanyagból vagy fémből [11] készült lehúzólapát (kés) mozgatásával lehet szabályozni a sablon felületén. A kés előre meghatározott, de állítható nyomóerővel, szöggel és sebességgel mozog, ami a nyílásokon keresztül a panelfelületre hordja fel a pasztát [12]. A pasztázás ellenőrzését követően az SMT beültetőgépek úgynevezett nozzle-k, vagyis vákuum szipkák segítségével veszik fel, illetve ültetik be az alkatrészeket. Mivel egy-egy panelre meghatározott számú, de különböző kialakítású és tokozású SMD alkatrész kerül, több nozzle típust kell egy SMT beültető gépen belül használni.

3. Forrasztás: Ebben a lépésben a NyÁK-szerelvényt kemencében melegítik. A hőátadástól függően az infra, a konvekciós és a gőzfázisú kemencék a legelterjedtebbek. Egyes esetekben nitrogénatmoszférát használnak a forrasztás során bekövetkező oxidáció megelőzésére. A fűtés a különböző hőmérsékleti szintek programozott profilját követi az optimális folyasztószer-hatás és olvadás biztosítása érdekében [13], [14], [15]. A fűtési hőmérséklet fokozatokat meghatározott ideig kell tartani, hogy a NyÁK felület egyenletes felmelegedése biztosítható legyen, mivel az egyenetlen melegítés a kialakult kötésekben hibákat okozhat [16]. A megfelelő forrasztott kötés érdekében jól definiált hőprofil alkalmaznak melynek részeit a 2.3. ábra mutatja be.



2.3. ábra: Toleranciasávok ólommentes forrasztás esetén [17]

*Felfűtés*kor (150-200°C) a forrasztópasztával ellátott panelt fokozatosan a forrasztóötvtözet szolidusza alatti hőmérsékletre melegítik. Ez „aktiválja” a forrasztópasztá folyasztó részét az oxid eltávolításához. Ekkor történik a folyasztószer adalékanyagok termikus lebontási folyamata savakká, amelyek feloldják a felületi fém-oxidokat és lehetővé teszik a jobb kötés képződést. Ezenkívül a melegítés csökkenti a kötőanyag és az alkatrész közti felületi feszültséget, lehetővé téve, hogy a paszta elkezdjen szétterülni a fémfelületen.

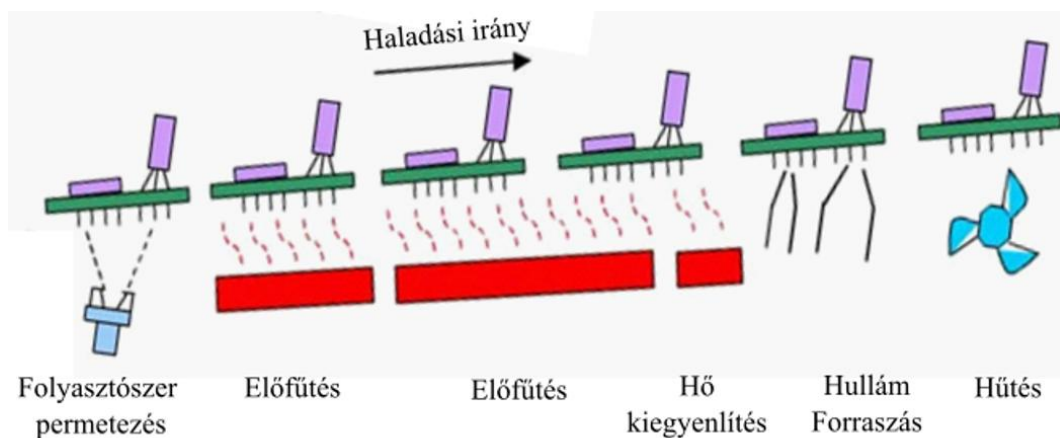
Az *újraömlés*tés fázisában a kemence a forrasztóötvtözet likviduszpontján (~217°C) túl melegszik. Ez megtöri a kötőanyag felületi feszültségét, és a megolvadt forrasztópor szabadon nedvesíti az újonnan folyósított felületet. A forrasztási felületeken lévő fém-oxidok feloldódnak a folyósító savakban és leégnek vagy elpárolognak. A hőmérséklet megválasztása kritikus, mivel a likviduszhoz közeli hőmérséklet akadályozhatja a nedvesítést, a nagy hőmérséklet pedig nagyobb mennyiségű rideg intermetallikus fázis képződését válthatja ki, ami gyengíti a forrasztási kötések.

*Hűtés*kor a fűtőelemek ki vannak kapcsolva, miközben a panelt továbbra is a kemencében tartják, mivel a gyors lehűlés a forrasztási kötések deformálódását és megrepedését okozhatja a hősokk miatt. Ebben a szakaszban a folyasztószer kötőanyag elkezd megszilárdulni, és bezárja az el nem párologtatott aktivátorsav maradékokat.

A folyamat során gyakran nem közvetlenül az adott szerelvény pasztázásakor felvitt folyasztószer okoz tisztasági problémát. A kemencében keringetett levegő füstjéből származó folyasztószer olyan helyeken rakódik le, ahol a hőmérséklet alacsony (a megszilárdulási pont alatti) és visszaszennyezheti a panelt. Ezért modern rendszerekben a füstöket/gőzöket csatornákon át folyasztószer-gyűjtő rendszerekbe vezetik [18], [19].

2.1.2 Hullámforrasztás (és szelektív forrasztás)

A hullámforrasztást olyan esetekben alkalmazzák, amikor nagyobb méretű alkatrészek forrasztására vagy nagyobb áteresztőképességre van szükség, mint az újraömlesztéses forrasztásnál. Amint azt a 2.4. ábra mutatja, ezt furatszerelt (Through Hole) alkatrészek használatával érik el, amelyek kivezetései átmenő furatokon keresztül az áramköri alkatrésszel ellentétes (forrasztási) oldalra nyúlnak. A folyékony folyasztószert egy tartályból permetezik az alkatrész alsó oldalára, majd a panelet egy olvadt forrasztóötvozet „hullámán” vezetik át, hogy megnedvesítsék a lábakat és a furatot. A forrasz megszilárdult kötéseket alakít ki, amint a panelek elhagyják a forrasztóberendezést.

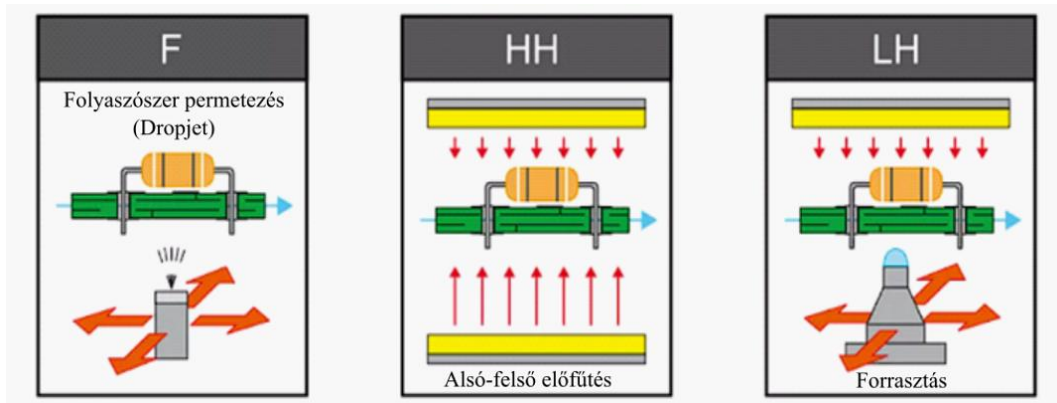


2.4. ábra: Hullámforrasztás folyamata[20]

A szelektív forrasztás (2.5. ábra) gyakorlatilag a hullámforrasztás egy modern „lokalizált” formája. Fúvókát használ az olvadt forrasztóanyag felhordására a meghatározott átmenő furatokon, anélkül, hogy más hőmérséklet-érzékeny alkatrészeket a forrasztáskor túlzott hőterhelés érne. A panelet előmelegítik és „dropjet” adagolóval (helyileg) folyasztószertel permetezik, majd meghatározott területen forrasztást végeznek [21], [22].

Mivel a folyasztószert a hullámforrasztási folyamatban egyenletesen a panel felületének alsó részére permetezik, az a szerelvény teljes forrasztási oldalán eloszlik. A panel felületén a hőmérséklet-eloszlástól függően különböző helyeken maradnak folyasztószer maradványok. Forrasztókeretek alkalmazásával egyes területek elkülöníthetők, de a „zsebek” környékén a maradványok felhalmozódhatnak. Permetezés közben a folyasztószer az átfolyási oldalra is átjuthat a viákon és furatokon keresztül. Míg a panel felső része csak 170 °C körüli, ami lényegesen alacsonyabb hőmérséklet, mint a

forrasztási oldalon, így itt nagyobb mennyiségű csak részben aktivált folyasztószer maradvány halmozódik fel.



2.5. ábra: A szelektív forrasztási folyamat sematikus ábrája[23]

Összességében a hullámforrasztási eljárás lényegesen nagyobb mennyiségű maradékot tartalmaz, mint az újraömllesztési eljárás, és a panel nagyobb részben kitett a szennyezésnek.

2.1.3 Folyasztószer

A forrasztási folyamatoknál a folyasztószer két fő típusát használják, mégpedig a vízzel mosható folyasztószereket és a tisztítást nem igénylő, úgynevezett „no-clean” folyasztószereket. Mindkettő elérhető újraömllesztési és szelektív forrasztóanyagként is. A következő leírás az utóbbira fog összpontosítani, mivel ez áll a kutatás fókuszában:

A vízzel mosható folyasztószerek savakból, hordozóból és oldószerből összeállított agresszív folyasztószerek. A szerelvényeket forrasztás után vízzel vagy más vizes oldószerrel le kell mosni, hogy eltávolítsuk a savmaradványokat [24], [25].

A tisztítást nem igénylő „no-clean” folyasztószer a jelenlegi ipari megoldás a forrasztás utáni tisztítási lépés kiküszöbölésére, mivel úgy tervezték, hogy a forrasztási folyamat során a veszélyes anyagok termikusan lebomoljanak, illetve a maradékot polimer mátrixba kapszulázzák, így elvileg elkerülhető az utókezelés szükségessége. Lehet gyanta, műgyanta vagy alkohol alapú.

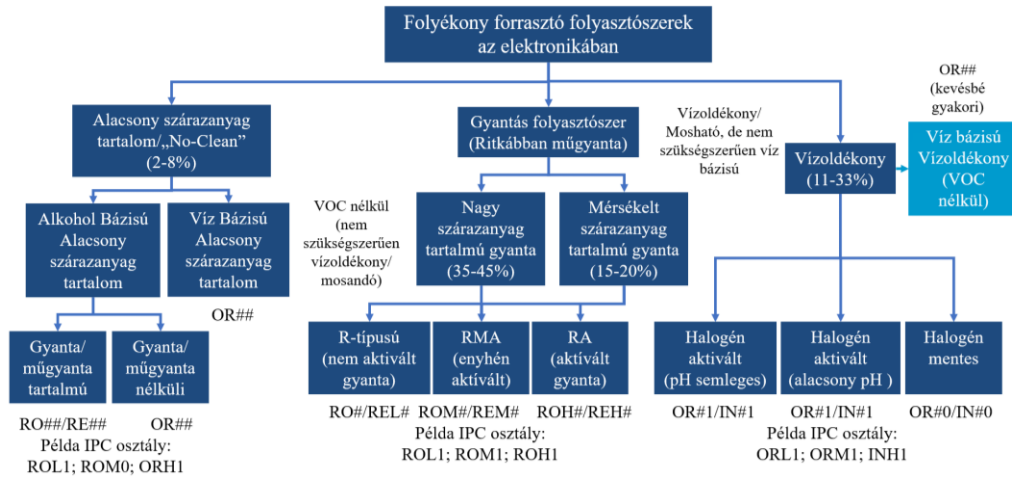
A no-clean folyasztószerek összetevői a következők[26]:

1. *Aktivátor*: Az aktivátor a folyasztószer központi eleme. Az aktivátorok vagy egykomponensűek, vagy különféle gyenge szerves savak (WOA) kombinációi. Ezek a savak várhatóan teljesen lebomlanak vagy elpárolognak a forrasztás során. Ez viszont ritkán tökéletes, így gyakran higroszkópos felületi maradványok maradnak.

2. *Filmképző*: Ez arra szolgál, hogy alapot biztosítson a folyasztószer szétterítéséhez és szállításához. A gyanta a legelterjedtebb anyag, de gyakran szintetikus gyantákat vagy más szerves anyagokat használnak helyettesítőként, hogy csökkentsék a természetes gyanta felhasználását, miközben megtartják a hasonló funkcionalitást. Ez a hidrofób hatás várhatóan csökkenti a korrózió előfordulását, mert a filmképző anyag nagy eséllyel befogja a le nem bomlott aktivátor maradványokat, és megakadályozza a nedvesség bejutását. Folyósító hatása azonban nem elegendő, és aktivátorokra, például szerves savakra és aminokra van szükség a reakcióképesség és a folyósító hatás fokozásához. A filmképző anyag és a páratartalom hosszú távú kölcsönhatása jelentős szerepet játszik a termék klimatikus megbízhatóságában.
3. *Oldószer*: Az oldószer szobahőmérsékleten megfelelő állagban tartja a folyasztószert, viszont a forrasztási folyamat során melegítéskor el kell párolognia. Erre a célra különféle szerves oldószereket használnak.
4. *Egyéb adalékok*: Ezeket adják a folyasztószerekhez, hogy a jellemzőiket a felhasználási körülményekhez igazítsák:
 - a. Adalékokat adnak a forrasztópasztához a folyósító hatás javítása érdekében. Ilyen például a trietanol-amin, amely javítja a szerves sav aktivátorok nedvesíthetőségét, mivel a (-NH₂) reakcióképes csoport WOA-kal együttműködve redukálja a felületi fémoxidokat [27].
 - b. A reológiai adalékok növelik a forrasztópaszta kohézióját és adhézióját. Általában tixotróp anyagok, amelyek viszkozitása csökken nyíróerő hatására, így javítva a jobb szitanyomtatási minőséget.
 - c. A hordozó rendszer feladata, hogy ideiglenes ragasztóként funkcionáljon az elhelyezett alkatrészek megtámasztására a forrasztás előtt, és meghatározza a paszta folyási jellemzőit és szitanyomtatási képességét. Ilyen anyag például a poli(izobutilén) gumi, amelyet a folyasztószer területi képességének javítása érdekében adalékolnak. Ezek az anyagok befolyásolják a kötőanyag páratartalom-kölcsönhatási viselkedését is.

Az IPC J-STD-004D szabvány a folyasztószer rendszereket az alábbi 2.6. ábrán bemutatott módon osztályozza, ahol az első két karakter a filmképzőt RO/RE/IN/OR (Rosin (gyanta), resin (műgyanta), inorganic (szervetlen), Organic (Szerves)) jelképezi. A harmadik karakter pedig az oxid eltávolítási tevékenység/agresszió fokát határozza

meg, mint alacsony/közepes/magas (L/M/H). A halogén tartalom az utolsó numerikus karakterrel (0 - <0,05 tömeg% / 1 – 0,5-2 tömeg% [28].

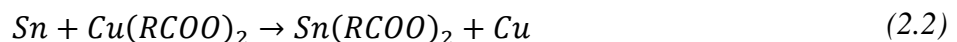
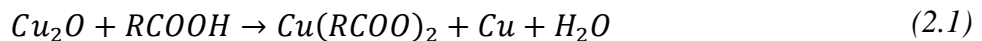


2.6. ábra: A folyasztszerek osztályozása

Az újraömllesztés és a hullámforrasztó folyasztszerek összetevői meglehetősen hasonlóak. A hullámorrasztó-folyasztszereknek permetezhető folyadéknak kell lennie, kis szárazanyag tartalommal, ami hasonló a folyékony WOA keverékhez. Ez csökkenti a komplexitást, de növeli a korróziós problémákra való hajlamot, mivel a panel forrasztási és átfolyási oldalát is szennyezheti a felvitel során.

A no-clean forrasztási eljárást és a kapcsolódó vegyületeket úgy tervezték, hogy minimálisan zavarják jelenlétükkel az termék normál működését. Ezt az aktivátor-dikarbonsav (WOA) tartalom jelentős részének lebontásával, valamint a maradék aktivátor és egyéb anyagok kapszulálásával próbálják elérni.

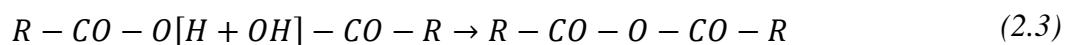
A modern folyasztszerek aktivátorai gyenge szerves savak (WOA), általában a karbonsavak. Ez annak köszönhető, hogy a szerves savakhoz képest kisebb a reakciókészségük és alacsonyabb az ion disszociáció mértéke [29]. Az oxid eltávolítása a fém felületéről egy sav-bázis reakció, amelyben só képződik (a (2.1) és (2.2) egyenlet szerint), amely elpárolog, de a karbonsavtól függően maradékot hagyhat maga után. R egy a karbonsav típusától függő hosszúságú szénhidrogén láncot jelzi.



A gyanta alapú folyasztszereknél a karbonsavhoz gyantát vagy műgyantát is hozzáadnak, hogy megakadályozzák a felület újraoxidációját. Azt is megfigyelték, hogy a gyanták és műgyanták nagyobb mennyiségű szilárd maradékot hagynak maguk után,

ezáltal csökkentik a felületi szigetelési ellenállást (SIR) [30]. A gyanta alapú folyasztószer tisztítása körülményes és összetett folyamat.

Mindezek a kérdések ipari érdeklődést váltottak ki a gyantamentes folyasztószer kifejlesztése iránt. Ezek alkalmazásakor a karbonsav reakcióba lép a fém-oxiddal. Némi sav azonban reagálatlanul marad, amely magasabb hőmérsékleten kétféleképpen bomolhat le. Az egyik esetben az el nem reagált karbonsav víz felszabadulásával és anhidrid képződésével dehidratálódik, majd az anhidrid visszaalakul karbonsavvá és vízzé. A másik bomlás a dekarboxilezés, amely szén-dioxidot és vizet képez a (2.3) és (2.4) egyenletekben bemutatott reakciók szerint [31].



Az anhidrid képződése súlyos probléma, mivel a karbonsav anhidridje nagymértékben higroszkópos, így vastag vízréteget képezhet, ami növelheti a panelfelület vezetőképességét és a szivárgási áramok kockázatát.

2.2 Az elektronikai szerelvények tisztítási módszerei

Az elmúlt 10 évben az autóipar komoly koncepcionális átalakuláson ment keresztül és elektronika központúvá vált. Ami manapság szabványos működés és minőségi elvárás az autóelektronikai szerelvények összeszerelési folyamatában, korábban még csak laborokban elérhető technológia volt, sőt csak kevesen gondoltak rá, hogy milyen tisztasági követelmények és technológiák lehetnek szükségesek az autóiparban.

A rendszerek biztonság kritikussága jobb szigetelési tulajdonságokat követel meg a termékektől. A legkritikusabb helyek, vagyis azok a területek, amelyek a legjobban szennyeződnek az összeszerelés és a forrasztás során, az alkatrészek kivezetései között vannak. A „no-clean” forrasztás alapja, hogy gyenge szerves savas aktivátort használnak a folyasztószerben, amelyeket erősen hígítva (1,5-3,5% szilárdanyag tartalommal) alkalmaznak hullám- és szelektív forrasztáshoz, vagy nagyon korlátozott mértékben aktiválják a szinte semleges szerves anyagot, amelynek ki kell töltenie a forrasztópasztas golyói közötti teret. Mind a folyékony, mind a pasztaszerű folyasztószer egyre inkább szintetikus gyanta alapúak, amelyek jobb hőmérsékleti stabilitást mutatnak a forrasztás során.

A kockázatok elkerülése érdekében egyes szerelvénygyártók a forrasztás után úgynevezett konform bevonattal védik a NyÁK-ot. (A felületkövető bevonatok azon az elméleten alapszanak, hogy egyes védőlakkok képesek integrálni a maradék folyasztószeret és jó minőségű védelmet nyújtani.) A sok rossz tapasztalat, és többek között Yoo és társainak tanulmánya [32], azt mutatta, hogy az ilyen védőréteg alatti folyasztószer maradványok ugyanolyan hibákat okozhatnak, mint védőréteg nélküli esetben. Minden szerves bevonat legalább egy kicsit átereszti a vízgőzt, különösen magasabb hőmérsékleten. Ha a gőz behatol a réteg alá, megindulhat az elektrokémiai migrációs vagy oxidációs folyamat.

A tisztítási technikák gyorsan fejlődnek, még akkor is, ha sok felhasználó nem veszi észre. Ha valaki bevezet egy tisztítási eljárást, és az problémamentesen megy, általában senkinek nincs oka a folyamatos fejlesztésre. A folyasztószer tisztítási módszer kiválasztásakor nemcsak a folyasztószer eltávolítási tulajdonságait kell megérteni, hanem a módszer előnyeit és hátrányait is, így a környezetre gyakorolt hatását, a biztonságot, a dolgozókra nehezedő terhelést (gyakori folyadékcsere és szennyezett folyadék kezelése), valamint az üzemeltetési költségeket is.

2.2.1 Elektronikai termékek ipari mosása

Annak ellenére, hogy számos gyártó cég keresi a módot arra, hogy a természet- és környezetvédelmi okokból problémás tisztítási módszereket környezetbarát megoldásokkal helyettesítse, az elektronikai gyártás területén a mai napig elterjedten alkalmaznak ipari vegyszeres mosást. A legjellemzőbb mosási módszereket a 2.1. táblázatban gyűjtöttem össze.

2.1. táblázat: Forrasztás utáni mosási módszerek jellemzői

<i>Tisztítás</i>	<i>Öblítés</i>	<i>Szárítás</i>
Brómozott és alternatív CFC	Tiszta mosószer gőz	Természetes szárítás
Szénhidrogén alapú tisztítószer	Tisztított tisztítószer vagy tisztítószer gőz	Dekompresszió és a vákuum kombinációja
Tisztítószer, felületaktív anyagok és víz, szappanosítók adnak oldószerhez, glikol-éter	Tiszta, desztillált víz	Forró levegős szárítás. A szárítási tulajdonságok sokkal gyengébbek, mint az IPA
Glikol-éter alapú (magas forráspontú) tisztítószer	Víz tartalmú alkohol	Az IPA-val egyenértékű száradási tulajdonságok

Brómozott és alternatív CFC-tisztító rendszerek: Számos zsírtalanító alkalmazásban és eutektikus forrasztó-folyasztószer tisztításban használták a módszert, de a CFC-k oldhatósága ólommentes forrasztó folyasztószerekben alacsony. Az ilyen típusú

tisztítószer nem gyúlékonyak, ipari alkalmazásuk nagyon biztonságos, és ugyanabban a létesítményben használhatók, mint más CFC-k. Magas illékonysága miatt általában sok veszteséget okoz, ami magasabb működési költségeket eredményez. Ezenkívül a tisztítószerek az emberi szervezetre és a környezetre gyakorolt káros hatásáról (globális felmelegedés) is beszámoltak.

Szénhidrogén tisztító rendszerek esetén a tisztítószereket gyakran magas hőmérsékleten használják, mely fokozza a gyulladás veszély kockázatát, így a berendezéseket minden esetben robbanásbiztosítással kell ellátni. A szénhidrogén alapú tisztítószerek jól oldódnak a gyantakomponensekben, így a folyasztószerben lévő gyantában is, de nem távolítják el tökéletesen az ionos maradványokat. A panelfelületen szennyeződés maradhat. A gyantára gyakorolt erős oldhatóság miatt ellenőrizni kell a tisztítószert alkotórészekre gyakorolt esetleges roncsoló hatását is.

A *félvizes (Semi-Aqueous) rendszerekben* használt tisztító-, és öblítőszer nem tűzveszélyesek, és nagyon biztonságosak. Ugyanakkor a tisztítószert víz tartalmaz, és a tisztítórendszer nedvességszabályozást igényelhet. Ezenkívül, a tisztítószert összetétele a megnövekedett szennyezettség miatt megváltozhat, a feldúsult szennyeződés pedig visszatapadhat a tisztított felületekre. Mivel sok szennyvíz keletkezik, szennyvíztisztító berendezésre van szükség.

Vízmentes alkohol alapú tisztítórendszerek zárt rendszerben működtethetők jelentősebb szennyvíz keletkezése nélkül. Emellett az öblítőszer, ami vízmentes alkohol, folyamatosan újrahasznosítják egy beépített lepárlóban. Mivel nem használnak vizet az öblítéshez, nincs vízvezetés és nincs szükség szennyvíztisztító berendezésekre.

2.2.2 Mechanikai eltávolítás

A tisztítóoldat oldó ereje mellett fizikai erő alkalmazásával a tisztítás hatékonysága is javítható. A legtöbb jelenlegi folyasztószer-tisztító rendszer az alábbi módszerek valamelyikét használja.

A *merítés* olyan eljárás, amelyben a tisztító munkadarabot tisztítószertbe merítik, és a folyasztószer a tisztítószert oldó erejével eltávolítja. A munkadarab tisztítószertbe való egyszerű bemerítése nem diffundálja szét az oldott folyasztószer, ezért gyakran használják fizikai erőhatással, például dörzsöléssel együtt.

A *Áramoltatás (jet)* során egy szivattyúval vagy hasonló eszközzel keringtetett tisztítószert áramoltatnak a folyadékba merített munkadarabra. Ezzel a módszerrel viszonylag egyenletes eredmények érhetők el az egész tisztítótartályban. A turbulens áramlás hatását a diffúzió hatékonyabb elősegítésére lehet használni.

Ultrahang alapú berendezésekben a szennyeződések eltávolítását kavitációval és nagy teljesítményű ultrahanghullámok tisztító oldaton keresztül történő sugárzásával érik el. Nagyon hatékony a forraszgolyók eltávolítására. Az ultrahang hullámok képesek károsítani a tisztítandó munkadarabokat, de a frekvencia és a teljesítmény beállításával javítható a folyaszttószer eltávolíthatósága, miközben minimalizálják a károsodást.

Spray tisztítás során a tisztítószert zuhany szerűen porlasztják a munkadarabra. Ennek a rendszernek az az előnye, hogy a legtöbb nem lobbanékony tisztítószerszerrel használható, és a folyaszttószer eltávolítása javítható a befecskendezési nyomás növelésével. Ugyanakkor erősen illékony tisztítószerek esetén külön figyelmet kell fordítani a berendezés tömítésére. A befecskendezési nyomás növelése nagy hatással van a megtisztított munkadarabra; a tisztítószert porlasztódik, ami párolgási veszteséghez vezet, és a tisztítási teljesítmény is gyengébb a permetnek nem közvetlenül kitett területeken.

Gőztisztítás esetén a tisztítószert gőze cseppfolyósodik (kondenzáció), így a cseppfolyós tisztítószert lefolyik a munkadarab felületén, miközben feloldja az azon lévő folyaszttószert. Ezt a tisztítási módszert klórozott (triklór-etilén, metilén-klorid stb.), fluorozott (hidrofluor-éter, HFC stb.), szilikon vagy brómozott oldószerek és alkoholok felhasználásával alkalmazzák. Szénhidrogén alapú tisztítószerekkel is használható vákuum környezetben.

A *súrolás* elterjedt tisztítási módszer, melynek során az elektronikai szerelvény felületét fizikailag dörzsölik kefével vagy szivaccsal a szennyeződés eltávolítása érdekében. Aggodalomra adhat okot a túlzott erőhatás okozta felületi sérülés, valamint a lehullott rostok és forgácsok általi újraszennyeződés. Azok a területek, ahol a fizikai érintkezés nem lehetséges, mint például az érzékeny területek és az alkatrészekkel takart részek, ily módon nem tisztíthatók.

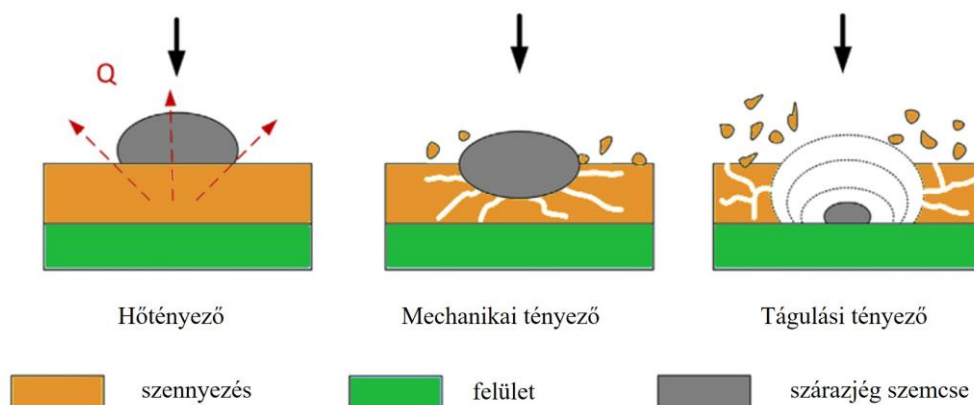
2.3 Szárazjeges tisztítás

A szárazjég szemcseszórás hasonló a homokfúváshoz, vagy a műanyag gyöngyszóráshoz. A közeget nagynyomású levegőáramban (vagy más inert gázban) felgyorsítják, hogy kölcsönhatásba lépjen a tisztítandó vagy előkészítendő felülettel. Szárazjégfúvás esetén a felületre ható közeg szilárd szén-dioxid (CO₂) pelletekből áll [33]. A szárazjég részecskék szóróközegként való használatának egyik egyedi jellemzője, hogy a részecskék a felülettel való ütközéskor szublimálnak (légneművé válnak). Az ütközési energia disszipáció során a rendkívül gyors hőátadás a pellet és a felület között, illetve a szilárd CO₂ robbanásszerű térfogatnövekedésével járó szublimáció együttesen fejt ki a hatását a felületre. A szén-dioxid pár ezredmásodperc alatt a részecske térfogatának közel nyolcszázszorosára tágul, ami gyakorlatilag egy „mikrorobbanás” az ütközési ponton, amely elősegíti a felületi szennyeződés eltávolítási folyamatát. A CO₂ szublimációja miatt a szárazjégfúvás során nem keletkezik másodlagos hulladék [34]. Már csak az eltávolított szennyeződés marad vissza, amit a hajtóközeg „seper” le a felületről.

Szárazjeges tisztításnál kétféle fúvókát alkalmaznak. A szimpla csöves fúvóka esetén a fúvóka bemeneténél a szilárd pellet és a hajtógáz kétfázisú állapotban van jelen. A dupla csöves megoldásnál a két csőben egy-egy fázis van jelen (száraz, nagynyomású levegő és szárazjég-részecskék), melyek később fognak keveredni. Végezetül a keverék eléri a szennyezett felületet.

A szárazjég-fúvás a hagyományos fúvásos tisztítási eljárástól eltérően, három tényezőn alapszik [35] (2.7. ábra):

- Hőtényező: a szennyeződés és a tisztítandó felület lehül a -78,5°C [36] hőmérsékletű szárazjég-szemcsékkel való érintkezés során.
- Mechanikai tényező: a lehült szennyeződés feltöredezik, majd a nagysebességű gáz eltávolítja.
- Tágulási tényező: gyors térfogatnövekedés következik a szén-dioxid rögök szublimációja során, mely szintén segít a szennyező részecskék eltávolításában.

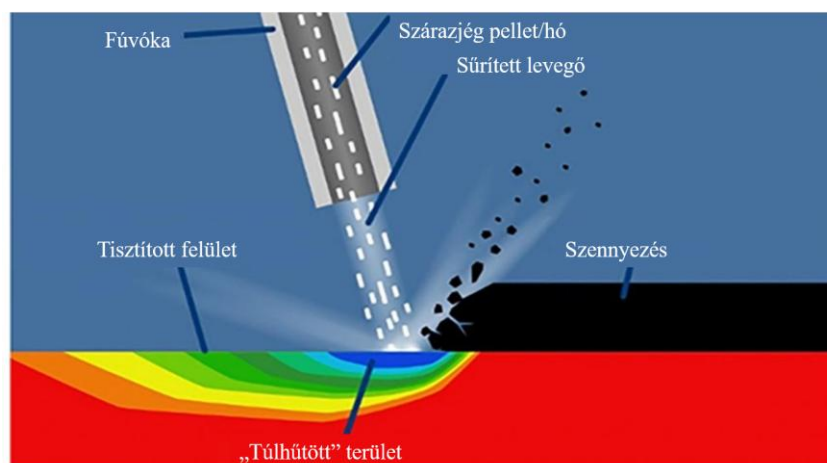


2.7. ábra: Szárjéges tisztítás során fellépő fizikai jelenségek

2.3.1 A szárjég-havas tisztítási eljárás mechanizmusa

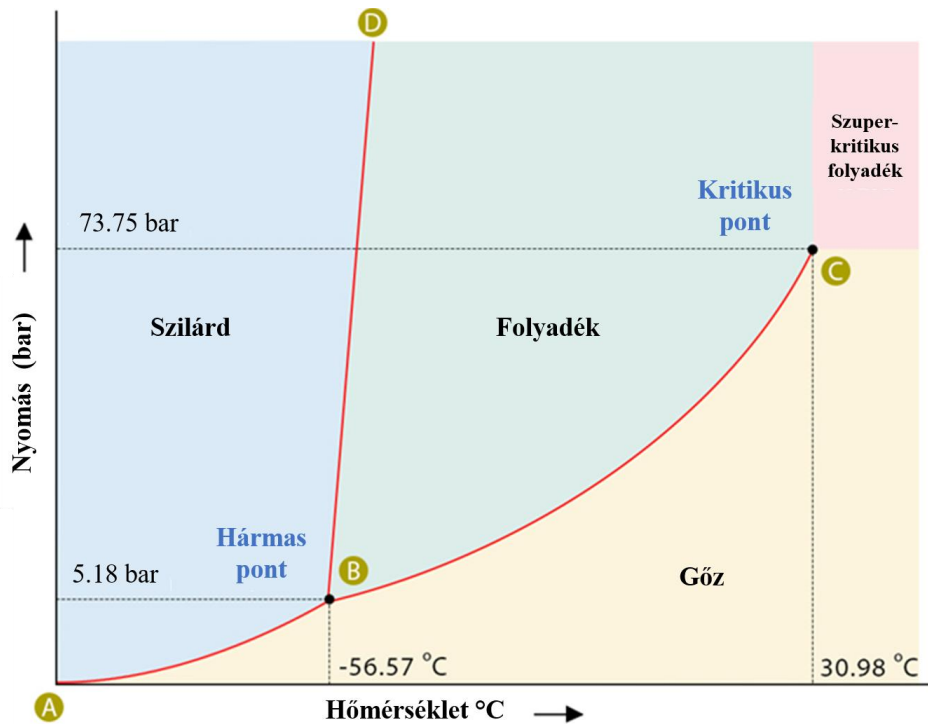
A CO₂ tisztítás során a szén-dioxid hó szemcsék rendkívül nagy sebességgel érkeznek a tisztítandó felületre. A szennyeződés eltávolításának a mechanizmusa négy fő lépés kombinációja:

- Ridegülés, töredezés: A szerves anyagok a lehülés hatására felkeményednek, rideggé válnak. Ez nem csak a szennyeződés szerkezetét gyengíti, de a tisztítandó felületünket is befolyásolja. Csökken az anyag rugalmassága és a tapadóképessége, ezáltal könnyebben leválasztható a felületről a szennyeződés. A felületen húzófeszültség, a felszín alatt pedig nyomófeszültség jön létre, ezáltal az anyagban hajsza-repedések keletkeznek. Ahogy terjednek a repedések, úgy kezd el feltöredezni a szennyeződés. A húzófeszültség a rugalmassági modulus, a hőtágulási együttható, a Poisson-arány, a felületi hőmérséklet és a belső hőmérséklet függvénye.
- Hősokk: A felület hirtelen lokális lehülése nyírófeszültséget hoz létre, mivel a zsugorodás mértéke a felületen egyenletes. Ez tovább javítja a tisztítás hatékonyságát, mivel a szennyeződés felső rétege több hőt ad le, mint az alatta lévő hordozó, így könnyebben leválik a felületről. Emiatt a tisztítás eredményessége függ a szennyezőanyag és a hordozó hővezető képességétől is; a legjobb eredményt akkor kapjuk, ha a szennyeződés hővezető képessége a lehető legalacsonyabb, a szennyeződés hordozójának a hővezető képessége pedig a lehető legnagyobb [37].



2.8. ábra: Szárjazeges tisztítás mechanizmusa

- Becsapódás: A pelletek mozgási energiája is szerepet játszik a szennyeződés eltávolításában. Ez függ a szárazjég-részecskék kinetikus energiájától, amit a sebességük és tömegük határoz meg. Mikor a becsapódáskor a pellet mozgási energiája meghaladja azt a mértéket, mely a szennyeződés felülethez való tapadásához szükséges, a szennyező részecskék elszakadnak a felülettől (2.8. ábra). Előny továbbá, hogy a pelletek mozgási energiájából rendkívül kevés hat a hordozó felületre, így az a felületet csak elenyésző mértékben koptatja [37].
- Szublimáció: A becsapódáskor a pellet szinte azonnal elszublimál. A rendkívül alacsony hőmérsékletű pellet és a viszonylag meleg felület között hőátadás történik. Ennek során a szárazjég szinte azonnal gáz halmazállapotú szén-dioxiddá válik. Ezt a folyamatot nagyságrendileg 800-szoros térfogatnövekedés kíséri. A CO₂ pelleteknek ezen parányi robbanásai mikroszkopikus méretű lökéshullámokat idéznek elő, amik lerobbantják a felületről szennyeződéseket, melyek ezután a sűrített levegővel kerülnek eltávolításra. Ugyanakkor a becsapódáskor a pelletek olyan magas nyomást érnek el, melynek köszönhetően egy rövid időpillanatig folyékony halmazállapotúvá válnak [38] (2.9. ábra). A folyékony szén-dioxid pedig a szerves anyagokat rendkívül hatékonyan oldja. Ez a jelenség leginkább a porózus felületek tisztításában játszik nagy szerepet [37].



2.9. ábra: : A szén-dioxid (CO_2) fázisdiagramja. Olvadási görbe (BD), párolgási görbe (BC) és szublimációs görbe (AB). A B pont a hármaspont, a C pont a kritikus pont [39]

Ezeknek a termodinamikai körülményeknek köszönhetően a szén-dioxid részben újra megszilárdul, így magával ragadja a maradék szennyeződést a felületről.

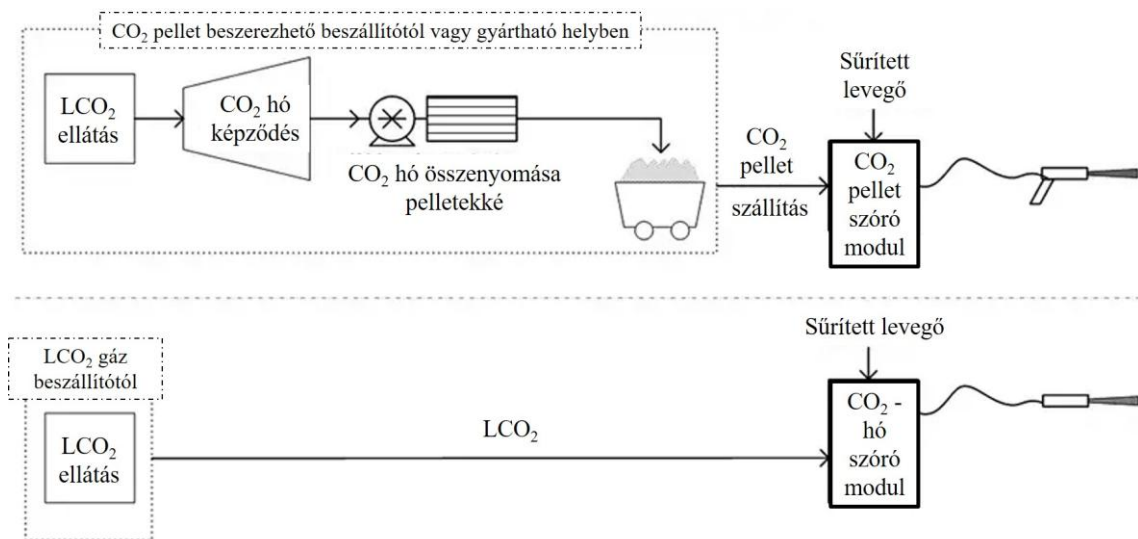
A fentebb taglalt mechanizmust számos szerves vegyületen tesztelték [40]. Azon szerves anyagok, amelyek jobban oldódnak folyékony szén-dioxidban, könnyebben távolíthatók el. Az oldhatóság csökkenésével a tisztítás hatékonysága is csökkent.

2.3.2 A technológia főbb előnyei

A szárazjeges tisztítás az összetett hatásmechanizmusának köszönhetően kombinálja más tisztítási módszerek előnyeit, úgy, hogy azok hátrányai nem, vagy csak minimálisan mutatkoznak. A homok és gyöngyszórás erősen abrazív hatású, a mozgási energia és az ütközés hatására a tisztított felület nem kívánt kopása jelentős. A szilárd CO_2 részecskék szemcseméretének optimális megválasztásával ez a hatás minimális [41]. A szárazjég maradéktalanul „eltűnik” a szublimáció során a környezeti hő hatására, ezért nem lesz semmilyen tisztítószer maradvány a felületen. Mivel az eltávolított szennyezésen kívül más maradvány nem keletkezik, így ezzel a módszerrel olyan felület is tisztítható, melyre később újabb rétegek kerülnek a gyártás során [42]. Emellett a használata során gyakorlatilag nem keletkezik szennyvíz, ezért kimondottan környezetbarát alternatívának számít [43]. Tehát a mérgező vegyi folyamatok CO_2 -fúvó berendezésekkel való

helyettesítésével lényegesen csökkenthető vagy teljesen kiküszöbölhető a munkavállalók veszélyes anyag kitettsége, illetve a veszélyes vegyi tisztítószer használatából adódó felelősség. Mivel a CO₂ gáz nehezebb a levegőnél (a CO₂ gáz kiszorítja az oxigént), ezért zárt térben való alkalmazáskor nagyon körültekintően kell eljárni, de helyes használat mellett ez a kockázat is egyszerűen minimalizálható. Amellett, hogy tiszta és biztonságos, azt is fontos megjegyezni, hogy a szárazjég más ipari folyamatok melléktermékeként keletkezik – azaz újrahasznosított CO₂-ből készül. A gyártási folyamat és a felhasználás nem termel CO₂-t, és nem ad CO₂-t a légkörbe, ezért nem járul közvetlenül hozzá az üvegházhatáshoz [44].

2.3.3 A berendezés általános felépítése

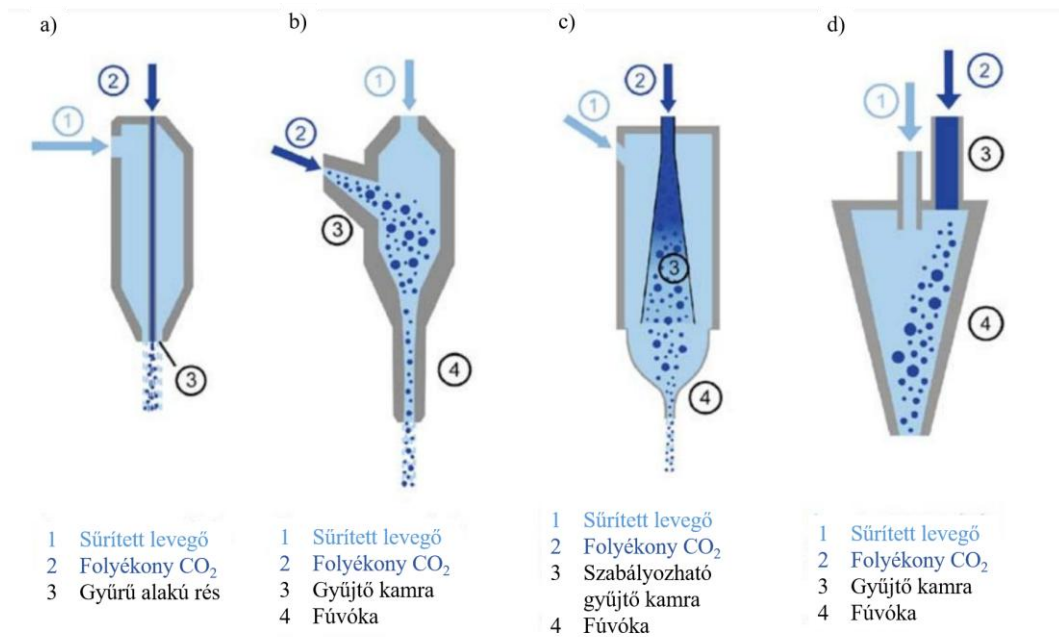


2.10. ábra: Szárazjég szórás és a CO₂-hó fűjás sematikus ábrája[45]

A szén-dioxiddal végzett tisztítás alapvetően két eljárás változatra osztható az alapján, hogy a szóróközeget szilárd szárazjég vagy folyékony CO₂ biztosítja, ahogy a 2.10. ábrán látható.

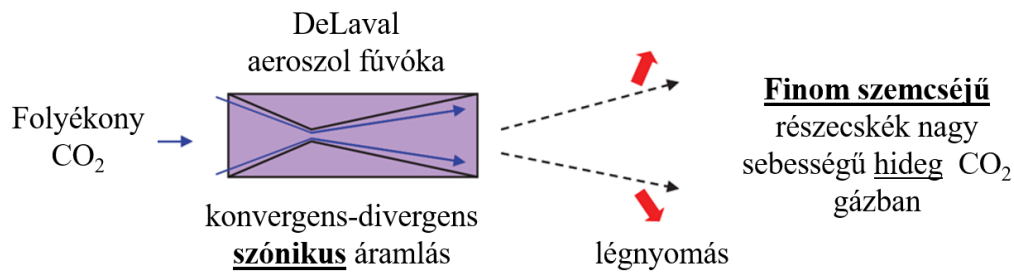
Az első esetben előformázott szárazjég-pelleteket használnak, amelyeket külön eljárással állítanak elő, és szóróberendezésekkel adják a sűrített levegőáramhoz. A pelleteteket, mielőtt a megmunkálandó felületre érne a fűvókákon belül gyorsítják fel.

A folyékony CO₂ ellátással kialakított szórásnál a CO₂ folyékony állapotban kerül a rendszerbe. A CO₂ a nyomásváltozás miatti tágulása következtében a Joule-Thomson effektus hatására lehűl, így egy bizonyos része szilárd állapotba kerül, amit CO₂-hónak nevezünk. A CO₂-hóat ezután a szórófejben lévő sűrített levegő felgyorsítja [46].



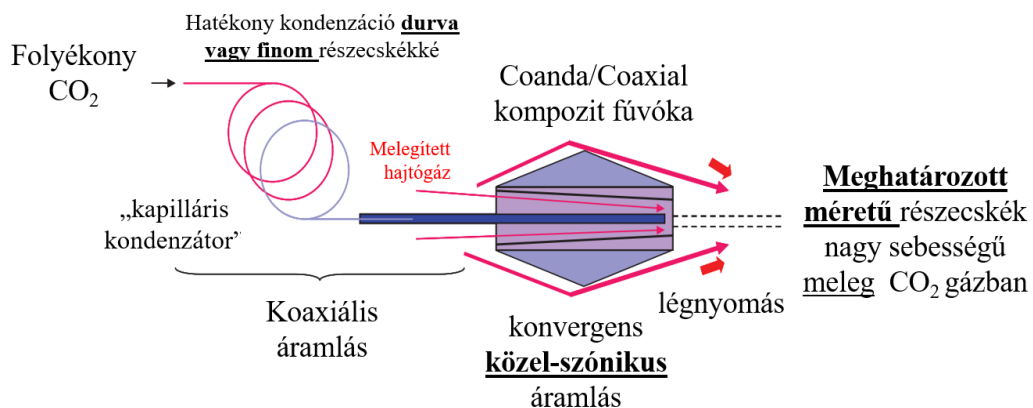
2.11. ábra: A CO₂ hó szórás folyamat változatai. Kétkomponensű koncentrikus fúvóka (a), Agglomerációs kamra (b), Szabályozható agglomerációs kamra (c), Légáram gyorsított részecskék az agglomerációs kamrában (d)[46]

A CO₂-hó szórás folyamat legáltalánosabb fúvóka változatainak működését a 2.11. ábra mutatja be. Kétkomponensű koncentrikus fúvóka esetén a folyékony CO₂ tágulása és a hó szemcsék keletkezése elkülönítve történik (2.11.a. ábra). A folyékony szén-dioxid a fúvóka kimeneténél a hirtelen nyomáscsökkenés hatására halmazállapotot vált, majd CO₂-hó kristályok képződnek és felgyorsulnak a sűrített levegős kúp alakú sugár hatására. A második esetben a folyékony CO₂ hajtó nyomásra való expanziója a szórófej előtti gyűjtő (agglomerációs) kamrában történik (2.11.b. ábra). Ezzel a módszerrel nagyobb részecskék állíthatók elő, mivel megnő a szemcsék összetapadásának esélye. Ezért a korábban említett eljáráshoz képest a részecskék nagyobb koptatóképességgel is rendelkeznek. A fúvóka állítható agglomerációs kamrával is rendelkezhet, amit a 2.11.c. ábra mutat. Ilyenkor a tágulás a szórófej belsejében, de a hajtó nyomástól elválasztva történik, így a szemcsék tulajdonságai jobban szabályozhatók. A keletkezett részecskéket koncentrikus légsugár szállítja a szórófejhez. A 2.11.d. ábrán bemutatott változat fontos eleme, hogy az agglomerációs kamrában a CO₂-hó részecskék mérete megnő. Az így „megerősödött” CO₂-hó szemcséket a szórófejen belüli sűrített levegő gyorsítja fel és juttatja nagyobb kinetikus energiával a kezelendő felületre.



2.12. ábra: DeLaval típusú (konvergens-divergens) permetezőfúvóka [47]

A kriogén permetező tisztítási eljárásokban hagyományosan szuperszonikus DeLaval típusú (konvergens-divergens) permetezőfúvókákat alkalmaznak (2.12. ábra). A DeLaval kriogén permetező fúvókák fő hátránya, hogy a folyadékáram a fúvóka kimeneténél kiegyensúlyozatlan. Emiatt a folyadékcseppek vagy a szublimálható szilárd részecskék gyorsan kitágulnak. Ez jelentős tisztítószer-veszteséget (szilárd részecskék) eredményez a csóva kiszélesedése, vagy számos elhanyagolhatóan kisméretű szilárd részecske képződése miatt. Ebből adódik az a hátrány, hogy a hatékonyság érdekében a szórófejet a hordozófelület közvetlen közelében kell elhelyezni.



2.13. ábra: Coaxial-Coanda kétfázisú fúvóka[47]

A 2.13. ábra egy újabb fejlesztést mutat, amely általánosságban kiküszöböli a hagyományos „hó” szóró rendszerek és különösen a DeLaval CO₂ fúvóka kialakításának számos hiányosságát. Itt a CO₂ kompozit szórófejet Coaxial vagy kétfázisú kompozit Coaxial-Coanda kialakítás segítségével állítják elő [47]. A 2.13. ábrán látható koaxiális kompozit fúvókák hatékonyan állítanak elő tisztító permetet, amelyek szabályozható méretű, sűrűségű, koncentrációjú, hőkapacitású és mozgási energiájú szilárd CO₂-részecskéket (tisztítószer) tartalmaznak. Szilárd szén-dioxid részecskék előállításához kapilláris kondenzátor szerelvényt használnak, amely hőszigetelt poliéter-éterketon (PEEK) kapilláris csövet tartalmaz. A kapilláris kondenzátor egység hatékony eszközt

biztosít a túlhűtéshez (forraláshoz) és kis mennyiségű folyékony szén-dioxid kis sebességű, de sűrű szilárd fázisú részecskékké történő kondenzálásához. A kapilláris kondenzátor hosszának és belső átmérőinek változtatása, különböző szemcseméret-eloszlású és sűrűségű részecskéket eredményez. Közvetlenül a kialakulás után, a CO₂-részecskéket befecskendezik és örvény szerűen keverik a fűtött hajtógázba, például nitrogénbe vagy tiszta-száraz levegőbe (CDA), amely koaxiálisan áramlik a kapilláris kondenzátor rendszerben. Ilyen elven működő berendezést használtam kutatásaim során.

2.3.4 Szárazjég-fűvás paraméterei

Számos kutatás foglalkozott a szárazjég-fűvás és a szárazjég havas tisztítás kérdéskörével.

Számos kutatás foglalkozik a szárazjég-fűvás és a szárazjég havas tisztítás kérdéskörével. Mivel a módszer különböző területeken egyaránt sikeresen alkalmazható az élelmiszeripartól [48] a textil és papír restauráción át [49] az autóiipari folyamatokig [42], a szakirodalomban publikált paraméterek is változatosak. A publikációkban közölt alkalmazott beállításokat 2.2. táblázatban mutatom be.

2.2. táblázat: A CO₂ fűvás paraméterei a szakirodalomban

	<i>Nyomás [bar]</i>	<i>Szárazjég tömegáram [kg/h]</i>	<i>Fűvás szöge</i>	<i>Fűvás távolság [mm]</i>	<i>Fűvóka típusa</i>	<i>Rendszer típusa</i>
[50]	55 (levegő)	5,04-17,64	45°	20 (axiális irány)	-	Szárazjég-fűvás
[51]	4-12 (levegő)	60	78°- 90°	10-220	-	Lézer támogatott szárazjég fűvás
[52]	5 (levegő)	30-150	-	100-600	-	Szárazjég-fűvás
[53]	6,9-24,1 (levegő)	-	-	-	-	Szárazjég-fűvás
[54]	7-7,5	40	-	-	szuperszónikus 40×3 mm	Szárazjég-fűvás
[55]	-	0-21,6	45°	20	50 mm ABS cső	CO ₂ -hó fűvás
[56]	0,7-24,1 1-10,3	-	-	-	Konvergens- divergens cső	Szárazjég-fűvás
[57]	max 7,6	-	-	-	Konvergens	Szárazjég-fűvás
[58]	5,5	max 100	-	-	-	Szárazjég-fűvás

Természetesen az ipari alkalmazások miatt több gyártó is fejlesztett és forgalmaz tisztítóberendezéseket, melyek szintén próbálnak igazodni a vevői igényekhez. Így számos szabadalom és fejlesztés után, a szárazjeges tisztítóberendezések feladathoz optimalizált és szabályozható paraméterekkel érhetőek el a piacon (2.3. táblázat).

2.3. táblázat: A CO₂ fűvás ipari berendezéseknél használt paraméterei

<i>Forrás</i>	<i>Gyártó</i>	<i>Hajtógáz nyomás [bar]</i>	<i>Szárazjég tömegáram [kg/h]</i>	<i>Fűvóka típusa</i>	<i>Rendszer típusa</i>
[59]	Norton	3,4-17,2	0-193	Konvergens-divergens, konvergens, egyszerű	Szárazjég-fűvás
[60]	DISs	0-16	0-75/90	Szimpla-duplacsöves, Konvergens-divergens, divergens lapos, kerek, 45°, 90°	Szárazjég-fűvás
[61]	Linde Cryoclean	2-16	-	Kétsöves/Konvergens-divergens, egyéb	Szárazjég-fűvás
[62]	Red-D-Arc Welderentals	5,5/6,9	30-162	Konvergens-divergens, divergens lapos, kerek, 45°, 90°, 135°	Szárazjég-fűvás
[63]	White Lion	0,5-16	0-250	Divergens lapos, kerek egyszerű	Szárazjég-fűvás
[64]	Ice Tech	2-16	30-100	Szimpla/dupla csöves, divergens lapos, konvergens divergens	Szárazjég-fűvás
[65]	Cleanlogix	2-9	~5/fűvóka	Coaxial, Coanda	CO ₂ hó-fűvás
[66]	cryosnow	2-16	24-90	Szimpla csöves kerek, lapos	CO ₂ hó-fűvás
[67]	acp-systems	2-16	4.2-9/fűvóka	Coaxiális	CO ₂ hó-fűvás

2.3.5 Hatékonyság

A szárazjég-fűvás hatékonyságát a CO₂ áramlás sebessége adja, melyet általában a fűvókától maximum 30 cm-es távolságban vizsgálnak. Az áramlás sebességét többnyire a fűvóka kialakítása, valamint az alkalmazott hajtógáz (levegő) nyomása határozza meg. A két tényező közül a fűvóka kialakítása játszik nagyobb szerepet a hatékonyság mértékében. További befolyásoló tényező a kiáramló szárazjég mennyisége is. [43]

A tisztítási sebességet több tényező alakítja:

- a légnyomás,
- a fűvóka távolsága a tisztítandó felülettől,
- a CO₂ sugár beesési szöge a tisztítandó felülethez képest,
- a tisztítandó felület anyagi minősége,
- a befűvott szárazjég mennyisége,
- és a szórófej és a felület egymáshoz viszonyított sebessége.

2.4 Az elektronikai szerelvények szennyezettség monitorozási módszerei

Az elektronikai szerelvények szennyezettség monitorozása egy fontos lépés a minőségellenőrzésben, különösen az autóiipari területen, ahol a tiszta és pontos munkavégzés kulcsfontosságú a megbízhatóság és teljesítmény szempontjából. Szennyezettség alatt általában azokat a maradványokat értjük, amelyek nem kívánatosak az áramkörökben. Ilyenek például a por, a zsír, az ionos szennyeződések vagy a fémes részecskék, amelyek negatív hatással lehetnek a szerelvények teljesítményére. Az alábbiakban bemutatok néhány módszert az elektronikai szerelvények ionos szennyezettségének monitorozására.

2.4.1 Optikai képfeldolgozás

A szennyeződések egyik legalapvetőbb detektálási módszere a vizuális analízis. Ez az elektronikai szerelvények elfogadhatóság vizsgálatában sincs másképp. Az IPC-A-610 szabvány [68] egy egész fejezetet szentel a tisztaságnak. A szemrevételezéses vizsgálat azonban szubjektív lehet és nehezen definiálható, összehasonlítható. Ezért célszerű olyan automata eljárások alkalmazása, melyek ismételhetők és független eredményt tudnak adni, például az elektronikai szerelvény felületén található fehér maradványok mértékéről.

Az *Otsu-módszer* egy automatizált, hisztogram-alapú küszöbérték meghatározási algoritmus, amelyet Nobuyuki Otsu fejlesztett ki 1979-ben [69]. Az algoritmus célja a kép pixeleit két osztályba (háttér és előtér) sorolni úgy, hogy a két osztály közötti variancia maximális legyen. Ez a módszer különösen hasznos binarizálási problémák megoldására, ahol a cél a képek egyszerűsítése és a releváns információ kiemelése.

Az Otsu-módszer alapja a diszkrét szürke-árnyalatú hisztogram elemzése, amely a kép intenzitásértékeit reprezentálja [70]. Az algoritmus a következőképpen működik:

Hisztogram elemzése: Az algoritmus létrehozza a kép intenzitásértékeinek eloszlását (hisztogramját), amely megmutatja, hogy az egyes intenzitásértékek milyen gyakran fordulnak elő.

Küszöbérték kiválasztása: Minden lehetséges küszöbértékhez kiszámítja az osztályokon belüli és az osztályok közötti varianciát.

Optimalizálás: Az algoritmus megkeresi azt a küszöbértéket, amelynél a két osztály közötti variancia maximális.

Képbinarizálás: Az optimális küszöbérték alapján a képet két osztályba sorolja: az egyik osztályba a küszöb alatti intenzitásértékeket, a másikba pedig a küszöb felettieket.

A cél, hogy a két osztály minél jobban elkülönüljön, így létrehozva a legnagyobb kontrasztot. Az optimális küszöbérték az, amely maximalizálja az osztályok közötti varianciát. Az Otsu-módszert széles körben alkalmazzák a képfeldolgozás különböző területein, mint objektumok detektálása, vagy az előtér és a háttér szétválasztása. Alkalmazzák sejtenyészetek monitorozására és orvosi képalkotó eljárásokhoz, például TC/MRI kiértékelésére is. Ipari felhasználása is elterjedt, mivel kitűnően alkalmas hibák vagy eltérések azonosítására a gyártósorokon készült képeken. Chang és munkatársai [71] elektronikai panelek hibáinak automata ellenőrzésére fejlesztettek egy hisztogram elemzésen alapuló módszert.

2.4.2 Helyi ionos szennyezettség vizsgálat

A C3 berendezés a szerelvény felületéről gyűjtött extraktumban kialakuló szivárgási áramok mérése alapján határozza meg a helyi ionos szennyezettség mértékét. A C3 teszt elvégezhető a gyártási területen vagy laborkörülmények között is, annak megállapítására, hogy egy kritikus területen található maradvány korrozív vagy jóindulatú-e, és azonnali választ ad a panel tisztasági állapotáról. Ezt a tesztet arra tervezték, hogy felmérje a folyamat tisztaságát a kritikus területeken oldatba vihető maradványok szintjéhez viszonyítva, akár forrasztási felületek vagy furatok között is. Az extrakciós eljárást úgy tervezték meg, hogy az ionos maradékok hatékony eltávolítását érje el egy fűtött oldószeradagoló rendszer segítségével. A folyamat három lépésből áll:

1. Oldat melegítése és eljuttatása az extrakció helyére.
2. Áztatási és ionizációs idő.
3. Az oldat felszívása egy gyűjtőcellába.

Ezt az extrakciós ciklust kilencszer meg kell ismételni, hogy hatékonyan eltávolítsák a felületi maradványokat egy $0,64 \text{ cm}^2$ -es ($0,1 \text{ in}^2$) területről, amely körülbelül 2,0 ml extrakciós oldatot eredményez a tesztelés során. Az extraktumot bármilyen további elem- vagy iontartalom elemzéshez fel lehet használni.

A felületen maradt korrozív maradványok miatti áramszivárgás az elektromos tesztelés során detektálható. Az extrakciós oldatba merített Y-mintázatú elektródát használva 10 V-os előfeszítést alkalmaznak az elektródán, és egy belső időzítőt indítanak el, hogy mérjék a szivárgási esemény eléréséhez szükséges időt. A C3 teszter méri a szivárgási áram változását az elektródák között, amelyet az extrakciós oldatban lévő

oldott maradványok okoznak. Az áramszivárgás határát a 250 μA -es küszöbértéknél határozták meg, amelyet a Foresite kutatásából [4] származó SIR és ion kromatográfiai adatok kombinációjával állítottak be és validáltak. Az ionos szennyeződés-észlelő mechanizmus azon az elméleten alapul, hogy minél korrozívabb vagy vezetőbb a maradék, annál gyorsabban fordul elő az áramszivárgás jelensége, és fordítva. Mivel a korrozív vagy vezetőképes maradványok rövid működési (teszt) időt eredményeznek, de a jóindulatú vagy szigetelő maradványok esetén a jelenség kialakulása hosszabb ideig tart, ezért a 120 másodpercnél rövidebb elektromos tesztfutásokat azonosítja a módszer „piszkos” mintaként.

2.4.3 Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR)

Napjainkban a modern elektronikai eszközök gyártása nagyon összetett folyamat. A Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia megfelelő eszköz lehet arra, hogy az alapanyagok vagy alkatrészek összetételét roncsolásmentesen ellenőrizzük, összehasonlítsuk. Ezért gyakran alkalmazzák a módszert gyártás során előforduló nemmegfelelések gyökérok meghatározására is.

A FTIR spektroszkópia olyan analitikai mérési módszer, melynek segítségével szilárd, folyékony vagy gáz halmazállapotú anyagok abszorpciós, emissziós infravörös spektrumát határozzák meg. Az FTIR-spektrométer széles frekvenciatartományban gyűjt egyidejűleg spektrális adatokat.

A közép-infravörös tartomány (analitikai tartomány), melynek hullámszáma 4000–400 cm^{-1} , a rotációs-vibrációs rezgések vizsgálatára alkalmas. A molekulákat alkotó atomok a molekulán belül is állandó mozgásban vannak: rezegnek a kovalens kötések mentén, forognak, és a hosszabb molekulák elhajlanak. Ezek a mozgások meghatározott (kvantált) energiával rendelkeznek.[72]

Infravörös fényrel a molekulában található kötések és funkciócsoportok rezgési átmenetei gerjeszthetők. Ezek meghatározott kvantált értékek, de a besugárzás hatására a forgási energia megváltozik és ezért a különálló rezgési átmenetekhez tartozó spektrum vonalak kiszélesednek. Ezeket a „csúcsokat” az infravörös spektroszkópiában abszorpciós sávoknak nevezzük. A fotonok energiája növekszik a fény hullámszámának (frekvenciájának) növekedésével. A hullámszám függvényében ábrázolt intenzitását (abszorbancia/ transzmittancia) nevezzük spektrumnak.

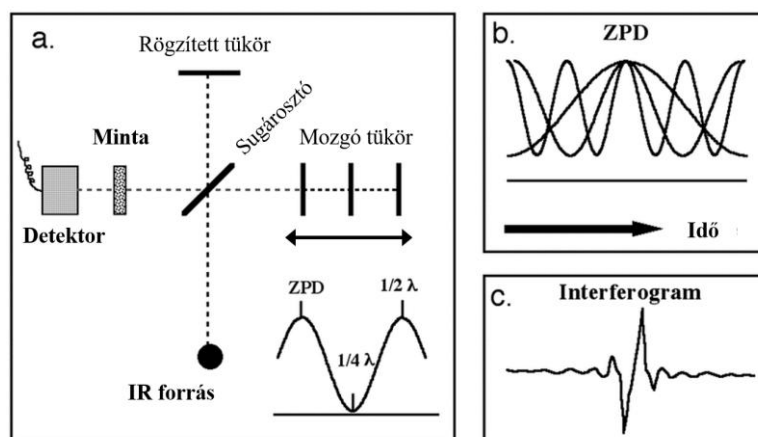
A vegyértékrezgések esetén a kovalens kötések hossza a kötés irányában, periodikusan változik. Szimmetrikus vegyértékrezgésnél az atomok egy irányba mozdulnak el, míg aszimmetrikus vegyértékrezgésnél ellenkező irányba történik az atomok mozgása.

2.4. táblázat: Az infravörös spektrum jellegzetes tartományai

3700 – 2300 cm^{-1}	X-H kötések vegyértékrezgései,
2250 – 2000 cm^{-1}	hármaskovalens kötés és kumulált kettős kötés vegyértékrezgései
1900 – 1600 cm^{-1}	a kettős kötés, mint pl. C=O, C=N és C=C kötések vegyértékrezgései
1600 cm^{-1} alatt	ujjlenyomat tartomány

Amennyiben a vizsgálandó mintáról nincsenek előzetes ismereteink, akkor a felvett spektrumban megkeressük a legintenzívebb sávokat, s az azokhoz rendelhető kötések, csoportokat azonosítjuk. Ezt többnyire a kevésbé intenzív sávok analízise követi. [61]

A FTIR-spektrométerekben általában Michelson-interferométert használnak. Az eszköz fényforrása polikromatikus infravörös, kollimált fényt bocsájt ki. Ezt egy sugárostón vezetik át, amin keresztül ideális esetben a beeső fény fele a rögzített tükörrre, a többi a mozgó tükörrre vetül. A két tükörről visszavert fény ismét a sugárostóra kerül, így ideális esetben az eredeti fény fele jut a mintára. A mintán áthaladva vagy arról visszaverődve a fény a detektorba jut [73]. Az interferométer két karja közti optikai útkülönbséget retardációnak nevezik. Az interferogram a retardáció változtatásával jön létre a különböző retardációs értékekhez tartozó detektorjel regisztrálásával (2.14. ábra). A nyers adatokat Fourier-transzformáció segítségével alakítják spektrummá [74].



2.14. ábra: Egy FTIR spektrométer vázlatos rajza. (a) A szaggatott vonalak a nyaláb pályáját jelölik. Az elmozdulás nullpontján (ZPD) a rögzített és a mozgó tükör nyalábjának úthosszai egyenlőek, és minden hullámhossz koherens. (b) Ahogy az úthossz változik, az IR hullámhosszak széles tartománya kódolódik az időtartományba. (c) A jel összege egy interferogram. Ezt az időtartományban kódolt jelet matematikailag alakítják Fourier-transzformációval frekvencia spektrummá [75]

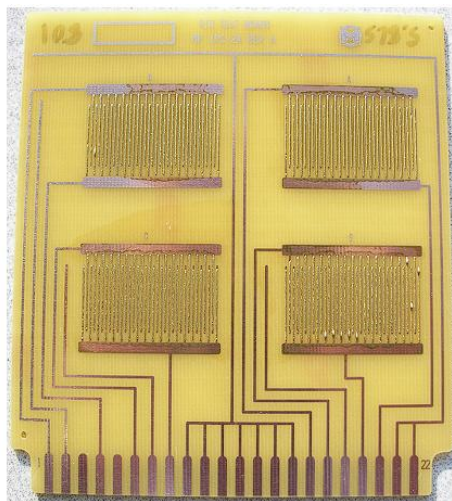
A termék felületén található szennyeződések in situ FTIR vizsgálata lehetőséget teremt ahhoz, hogy a szennyeződések összetétele összehasonlítható legyen a gyártási folyamat során felhasznált anyagokkal. A vizsgálatok alapján meghatározható és kontrollálható lehet a szennyezés forrása.

Shrivastava és munkatásai [64] elektronikai szerelvényeken FTIR analízis segítségével találták meg alumínium kondenzátorok sérüléséből származó elektrolit nyomait, ezáltal egyértelműen beazonosították a meghibásodás gyökérokát.

Piotrowska és társai cikkükben [76] folyasztószer rendszerekben lévő WOA típusát FTIR technika segítségével határozták meg, amely lehetővé teszi a különböző diagnosztikai sávok észlelését az infravörös spektrumban. A sav azonosítása a transzmittancia csúcsok megfigyelésén alapult az adott spektrális tartományokban. A mérést a folyasztószer maradványain végezték, miután az oldószert szobahőmérsékleten elpárologtatták.

2.4.4 Felületi szigetelési ellenállás (SIR)

Sok elektronikai gyártó végez egyenáramú (DC) felületi szigetelési ellenállás (SIR) tesztet a forrasztóanyagok értékelésére, és néha az általuk kapott eredmények jelentősen eltérnek a forrasztóanyag-szolgáltató által megadottaktól. Az eredmények különbsége jellemzően a SIR kupon készítésének és a tesztek elvégzésének különbségeiből adódik. Az egyik leggyakrabban használt IPC-B-24 típusú SIR kupon a 2.15. ábrán látható. A továbbiakban bemutatom, hogy az elmúlt időszak milyen módon kezeli a SIR tesztpanel elkészítésének kérdését, a panel tisztítási technikákat és azt, hogy a panel tisztasága hogyan befolyásolja közvetlenül a SIR eredményeket.



2.15. ábra: IPC-B-24 tesztpanel forrasztásgátló maszk és bevonat nélküli réz forrasztási felületekkel

A SIR-teszt elsődleges célja annak megértése, hogy a maradványok milyen hatással vannak az eszköz elektromos megbízhatóságára, különös tekintettel a maradék vezető- és korrozív jellegére, függetlenül attól, hogy a maradékot eltávolítják-e, vagy hagyják, hogy a panelen maradjon a forrasztás után.

A SIR-t kissé nehéz megérteni, mert a maradék vezetőképességét „ohm per négyzetben” méri. Ez az elektronok mozgásával szembeni ellenállás mértéke az anyag felületének egy meghatározott részén, egységnégyzetre normalizálva (2.16. ábra). Ez a mérés alapvető anyagparaméterként szolgál, és nem függ az abszolút területtől, hosszról vagy vastagságtól.

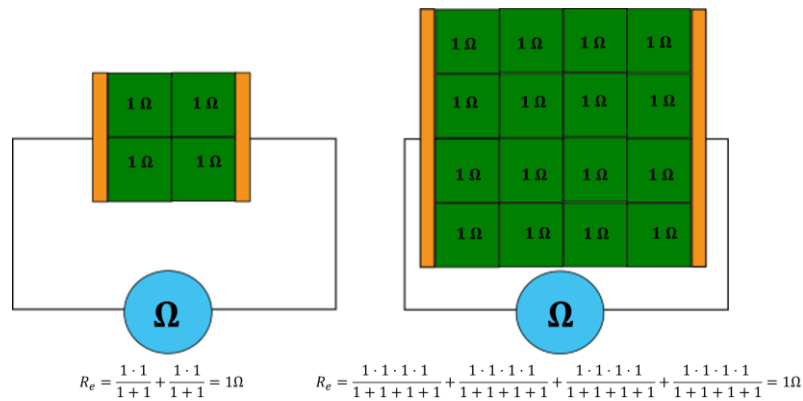
Ellenállások soros kapcsolásban:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N \quad (2.5)$$

Párhuzamos ellenállások:

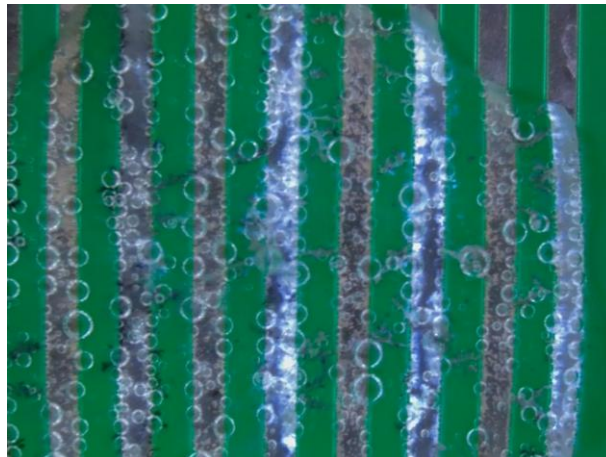
$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (2.6)$$

A 2.16. ábra bemutatja, hogy ezek az egyenletek hogyan működnek a SIR esetében, és miért nincs hatása a terület méretének ebben a mérésben.



2.16. ábra: SIR területegység értelmezése

A SIR a dendritképződés dinamikájának vizsgálatával méri a maradék korrozív hatását is (2.17. ábra). A jelenség kialakulásával és a működési mechanizmusával a dolgozat 2.6. fejezetében, valamint a szimulációs vizsgálatával a 6. fejezetben részletesen foglalkozom.



2.17. ábra: Dendritképződés

Ha a dendrit elég nagyra nő ahhoz, hogy áthidalja a pozitív és negatív töltésű vezetősávok közötti rést, elektromos zárlat keletkezik. A SIR vizsgálat során nem szükséges, hogy a dendrit zárlatot képezzen, de mivel a dendritek hatékonyan csökkentik a vezetők közötti rést, negatívan befolyásolhatják az adott áramkörben elért SIR értéket. Ezért a képződött dendritek mérete fontos a sikeres vagy sikertelen SIR-teszt meghatározásában.

Egy tökéletes világban ez a fajta tesztelés nagyon egyszerű lenne. Vigyen fel forrasztópasztát vagy folyasztószert a megfelelő teszt szerelvényre, végezzen rajta forrasztási próbát, helyezze környezeti kamrába, kapcsoljon rá feszültséget, és végezzen méréseket. Világunk azonban hajlamos a szennyeződésekre, és ez ellen a SIR-teszt sem védett.

Az elektronikai iparban számos vizsgálati szabvány terjedt el és sok tesztpanel van forgalomban, ezt a 2.5. táblázat is mutatja. Belátható, hogy a modern gyártás során felmerülő kérdések megválaszolásában a SIR teszt önmagában nem elégséges megoldás.

2.5. táblázat: Leggyakoribb SIR szabványok paramétereit

Szabvány	IEC 61189-5	ISO 9455-17	J-STD- 001C	IPC-TM-650	IPC- TM-650 2.6.3	Bellcore 2.6.3.3
Hőmérséklet / Páratartalom	40°C/93% RH (No Clean) 85°C/85% RH (Clean)	85°C/ 85%RH	85°C/ 85%RH	Class1-35/90°C 98%RH, 4 nap Class2-50/90°C 98%RH, 4 nap Class3-25/65°C 90/98%RH, 7 nap	85°C/ 85%RH	35°C/ 85%RH
Teszt időtartam	min 72h	168 h	168 h	168 h	168 h	120 h
Mérési gyakoriság	20 percenként	napi kétszer	24h, 94h, 168h	naponta	24h, 94h, és 168h	25h és 120 h
Teszt feszültség előfeszültség	5V +5V	50V +50V	100V -50V	100V -50V	100V -50V	100V -50V
Teszt panel	IPC-B-52	IPC-B- 24	IPC-B- 36	IPC-B-25A	IPC B- 24	IPC-B- 25-A

2.5 Impedancia spektroszkópia

Az elektrokémiai impedancia spektroszkópia (EIS) különféle elektrokémiai rendszerek kinetikai és mechanikai adatainak meghatározására ad lehetőséget. Széles körben használják többek között a korróziós vizsgálatokban, a félvezető-tudományban, az energiaátalakítási és tárolási technológiákban, a kémiai- és bioérzékelésben, illetve a noninvazív diagnosztikában.

Az EIS egy egyensúlyi vagy állandósult állapotban lévő elektrokémiai rendszer perturbációján alapul: szinuszos bemenő jel hatására kapott választ széles frekvenciatartományon elemezve megérthetjük a vizsgált rendszer viselkedését [77].

A módszert NyÁK esetében a felületek elektromos (impedancia/dielektromos) tulajdonságainak tanulmányozására használják [78]. Kiterjedt rendszerek esetén általában párhuzamos lemezes (interdigitális) elektródageometriát alkalmaznak kis szinuszos feszültséget kialakítva az elektródák között. A minta impedanciáját (a rezisztív és reaktív tagokat egyaránt) egy meghatározott frekvenciatartományban mérik, jellemzően 20 Hz és 1 MHz között. Az EIS előnye az állandó frekvenciájú technikákkal szemben, hogy bonyolult rendszerek esetében az egyes komponensek elkülöníthetők és jellemezhetők a különböző relaxációs idejük/frekvenciáik szerint.

Verdignovas és munkatársai [79] SIR tesztek és AC méréseket végeztek különböző gyenge szerves savakkal (WOA), és megállapították, hogy összefüggés figyelhető meg a maradványok és a kialakuló vízréteg higroszkópos tulajdonságai között. A klímatesztek során a nedves és meleg környezet hatására, valamint a WOA-k tulajdonságaitól függően nő a meghibásodások valószínűsége. Piotrowska és Ambat [80] váltóáramú és egyenáramú elektrokémiai mérésekkel vizsgálta a maradványok okozta vízréteg kialakulását változó klímaviszonyok mellett, hasonló eredménnyel. Tolla [81] rámutatott arra, hogy a komplex SMD alkatrészek az ionmigráció szempontjából a szabványos FR4 tesztmintáktól eltérően viselkednek, ezért speciális SIR tesztek végeztek, ahol a tesztpanelt az SMD alkatrészeknek megfelelő mintázatokkal látták el. QFN alkatrész tokozás esetén a szabványos SIR- és ECM-megbízhatósági teszt szerint minősített, tisztítást nem igénylő (no-clean) paszták és folyékony folyasztószeres több nagyságrenddel alacsonyabb SIR-értéket mutattak, mint az *IPC J-STD-004B* [82] által előírt 100M Ω -os határérték. Zou és munkatársai [83] az alacsony frekvenciájú AC impedancia technikát tanulmányozva arra a következtésre jutottak, hogy a módszer a SIR alternatívjaként használható.

2.6 Az ionmigráció mechanizmusa és hatása a termék élettartamra

Az összetettebb, kompaktabb elektronikai termékek megjelenésével és a miniatürizálás iránti növekvő kereslet következtében az elektronikai ipar új kihívásokkal néz szembe. Az elektrokémiai migráció (ECM) a nyomtatott áramkörü lapok szerelvényeinek egyik leggyakoribb meghibásodási oka.

Az ECM jelensége úgy írható le, mint két különböző potenciállal rendelkező, közeli elektróda, mely adszorbeált folyadékfilmen vagy kondenzvízen keresztül kapcsolódik egymáshoz. A fémionok az anódról oxidáció útján beoldódnak a vékony folyadék rétegbe, majd az ionok diffúzióval és migrációval a katódra kerülnek. A katód elérésekor a fémionok redukálódnak és kristályos dendriteket képeznek. Amikor egy növekvő dendrit köti össze a két elektródát, hirtelen áramlökés lép fel, és az ebből eredő elektromos rövidzárlat az elektronikus áramkör hibás működését vagy meghibásodását okozhatja. Gyakran dendrites növekedés figyelhető meg a szabadon álló vagy nem forrasztott vezető felületek között, sőt még az alkatrésztokozásokon is [84].

Az ECM kinetikai aspektusát általában a meghibásodásig eltelt átlagos idő (MTTF) jellemzi, amely egyszerű vízcsepp (WD) tesztekkel határozható meg. A WD módszer alapja annak az időnek a megmérése, amely szükséges ahhoz, hogy két elektróda között – amelyeket egyetlen vízcsepp borít – az elektromos áram ugrásszerűen megnövekedjen állandó feszültség hatására. Számos kísérleti munka kimutatta, hogy az ECM-et (és így az MTTF-et) számos rendszerparaméter befolyásolja, beleértve az elektromos térerősséget, a környezeti feltételeket (azaz a hőmérsékletet és a páratartalmat), az elektródák anyagösszetételét, a forrasztóötvozetet [85], [86], és a felületi fémbevonatot [84], [87]. Az egyik kulcsfontosságú tényező, amely jelentős hatással van az ECM-re, a különböző szennyeződések jelenléte a környezetből (pl.: por), vagy a gyártási folyamatból (folyasztószer-maradványok). A szennyeződés típusa és mennyisége különösen fontos az ECM elősegítése vagy gátlása szempontjából [88]. Például a forrasztási eljárásban használt folyasztószer-maradékokban lévő komponensek (kloridionok, gyenge szerves savak stb.) általában fokozzák az ionvándorlást és a dendrites szerkezetek kialakulását nedvesség és feszültség hatására. [89] Ezért fontos gyakorlati és gazdasági szempontból a forrasztás utáni tisztaság és a folyasztószer maradványok kimutatása [89], [90], [91] az elektronikai termékek gyártási folyamatában a meghibásodás kockázatának csökkentése érdekében.

A kísérleti munkák mellett segítséget nyújtanak modellezési vizsgálatok is, amelyek segítségével betekintést nyerhetünk a dendritképződés dinamikájába. A teljes folyamatnak számos összetevője van, amelyek mindegyike hozzájárul a rendszer leírásához. Az elektrolitban lévő töltött részecskék diffúzióval (a kémiai potenciálgradiens hatására) és migrációval (elektromos potenciálgradiens eredményeként) transzportálódnak. A nettó transzportfolyamatot gyakran elektrodifúzióknak nevezik, amelyet az elektrokémiai potenciál gradiense hajt.

Ez a jelenség hatékonyan tanulmányozható a Poisson-Nernst-Planck (PNP) elmélettel, amely a Nernst-Planck transzport egyenlet és a Poisson-Boltzmann egyenlet alkalmazását jelenti [92], [93]. Ez egy átlag-tér elmélet: az elektrolitot ideális oldatként kezelik, és az ionok közötti kölcsönhatást (a többlet kémiai potenciált) kizárólag az átlagos elektromos térrel való kölcsönhatáson keresztül veszik figyelembe.

Az elektróda/elektrolit határfelületeken végbemenő kémiai reakciók sem elhanyagolhatók a folyamat szempontjából. Illés és munkatársai [93] munkájukban feltérképezték a folyamat helyi dinamikáját. Például kimutatták, hogy a fejlődő dendritek felemészik a környező Cu^{2+} -ionok nagy részét, ami megmagyarázza, hogy egy adott területen csak néhány domináns dendrit fejlődhet ki.

A PNP-vizsgálatokat általában véges elemes keretrendszerben végzik, közelítve az érintett függvények (koncentrációk, elektromos potenciál) folyamatos eloszlását. A rácsmodellek az ilyen modellek speciális esetét képezik, amelyek nagymértékben leegyszerűsítik a numerikus eljárást, miközben szemléletes eredményeket adnak. [94] Gépi tanulási algoritmusok is használhatók a modellek paramétereinek optimalizálására [95].

Látható, hogy mind a kísérleti, mind a modellezési módszerek hozzájárulnak a dendritnövekedés folyamatának megértéséhez. Dolgozatomban egy szimulációs módszer eredményeit vizsgáljuk. A dendritnövekedési folyamatokra és a meghibásodásig tartó időre (TTF) vonatkozó szimulációs eredményeket WD tesztekkel nyert kísérleti adatok egészítik ki.

2.7 Tudáshiány meghatározása

A szárazjég-havas tisztítást széles körben alkalmazzák, de az elektronikai szerelvények ionos maradványainak csökkentésére nem terjedtek ki áttekintő vizsgálatok. Az ipari és kutatási céllal készült tisztítási hatékonyság vizsgálatok és publikációk főként a részecske szennyeződések, a festékek és a lakkok eltávolíthatóságával foglalkoznak. A paneltisztító berendezéseket általában mindössze vizuális vizsgálatokkal validálják, olykor azokkal sem. A reprodukálhatóság szintén kérdéses terület, ezért a gyorskamerás vizsgálatok és az általános, eszközfüggetlen paraméterek (tömegáram, kontaktidő pásztázási sebesség és ismétlésszám, részecske átlagos energia) definiálása szintén segíthet a tisztítási folyamat megértésében és standardizálásában.

A gyártástechnológiában számos elektronikai tesztpanel van forgalomban, de ezek általánosságban egy-egy célfeladat végrehajtására készülnek. A kutatás során kialakított többcélú tesztpanel a teljes gyártási folyamat során tud információkat adni a gyártás képességeiről (nedvesíthetőség, furatkitöltés, szennyezettség) és úgy lett kialakítva, hogy kutatási alkalmazások mellett ipari célokra is felhasználható legyen, mint például a tisztítási folyamatok hatékonyságának vizsgálata.

A „no-clean” folyasztószerekkel történő forrasztás után általánosan nem alkalmaznak utólagos tisztítást, ezért elengedhetetlen a felületen maradó szennyezések mértékének meghatározása. Az iparban jelenleg alkalmazott technológiák időigényesek és általában destruktívak. A vizsgált termékek nem, vagy csak korlátozott mértékben felhasználhatóak a teszt után. A ROSE, SIR, C3/C.I. tesztek során a termék nedvességnek van kitéve, ezért ezek a nedvességkritikus alkatrészek esetleges sérülései miatt nem értékesíthetők. Az extrakciós folyamat, vagy maga a mérés, ellehetetleníti az ismételhetséget. A kutatás megalapoz olyan alkalmazási módszereket, ahol kisméretű IDS mintázatok kialakításával más funkciójú panelek esetében is lehetségessé válik a felületi kapacitás meghatározása. Ez lehetővé teheti az ionos szennyezések gyors in-line monitorozását anélkül, hogy a termék értékesíthetősége csökkenne. A bemutatott, felületi kapacitásra visszavezethető szennyezettség meghatározás lehetővé teszi a gyors és folyamatos mérést akár gyártási környezetben is, a nedvességből származó hátrányok megjelenése nélkül.

A kutatás az uralkodó PNP alapú modellek helyett egy új Brown-dinamikai szimulációs megközelítéssel vizsgálja az elektrokémiai migráció jelenségét. A szimuláció eredményei kísérleti adatokkal összevetve minőségi egyezést mutatnak.

Kutatási rész

3. Szárazjeges tisztítás hatékonyság vizsgálata

Az autóelektronikai gyártástechnológiában kiemelkedő szerepet játszik a termékek megbízhatóság és tisztaság fejlesztése. Kutatásaim egyik fókuszja egy forrasztás utáni felülettisztítási technológia a szárazjég-havas tisztítás hatékonyságának vizsgálata volt, ami innovatív megoldás lehet az ionos szennyeződések eltávolításában.

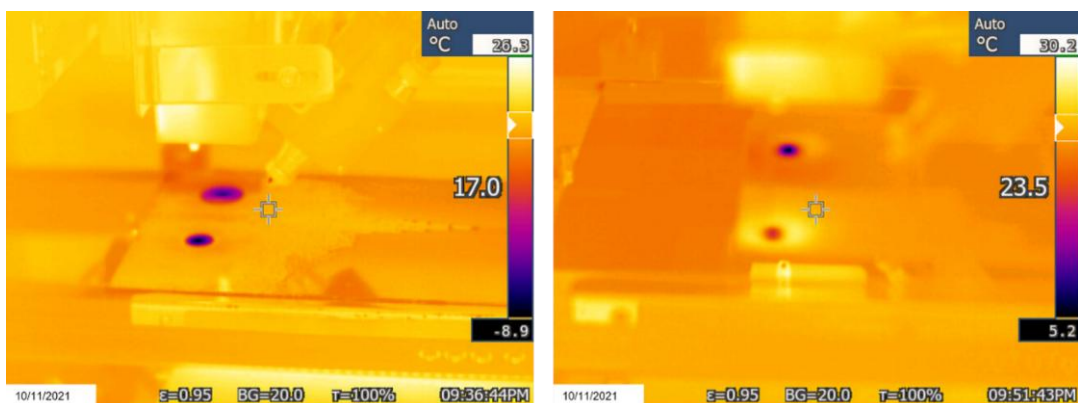
3.1 Kísérleti elrendezés

A szárazjég-havas tisztítórendszer működési paramétereit a 3.1. táblázatban mutatjuk. Forrasztás utáni mosási módszerek jellemzői mutatja:

3.1. táblázat: A szárazjég-havas tisztítórendszer (kezdeti) működési paramétereit

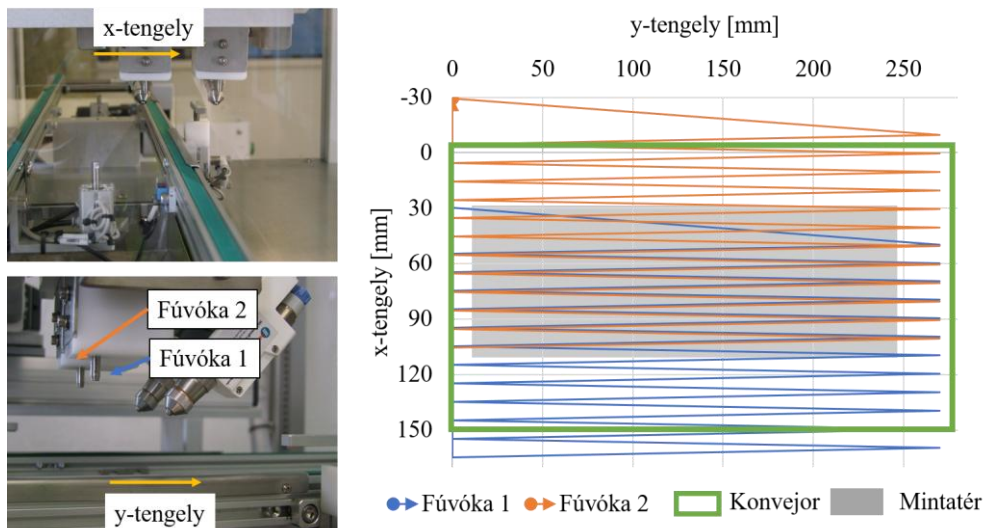
Paraméter	Érték	Mértékegység
CO ₂ nyomás	55	bar
CO ₂ sugár átmérő	5	mm
sűrített levegő nyomás	6	bar
fúvóka-felület távolság	47	mm
CO ₂ sugár/felület szög	90	°
CO ₂ abszolút tömegáram	23,4	kg/h

Gondosan mérlegelni kell a tisztítandó anyag fajlagos hővezető képességét és a hőmérséklet csökkentésére adott reakcióját is. A légköri nedvesség a nagy fajlagos hővezető képességű anyagok esetén hajlamos gyorsan lecsapódni a felületen, ha a hőmérséklet a harmatpont alá csökken. Ez a kondenzáció mérsékelhető lehet száraz fedőgáz használatával [96]. A tesztfelületet alulról melegítettem, hogy minimalizáljam a páralecsapódás mértékét (lásd az 3.1. ábra).



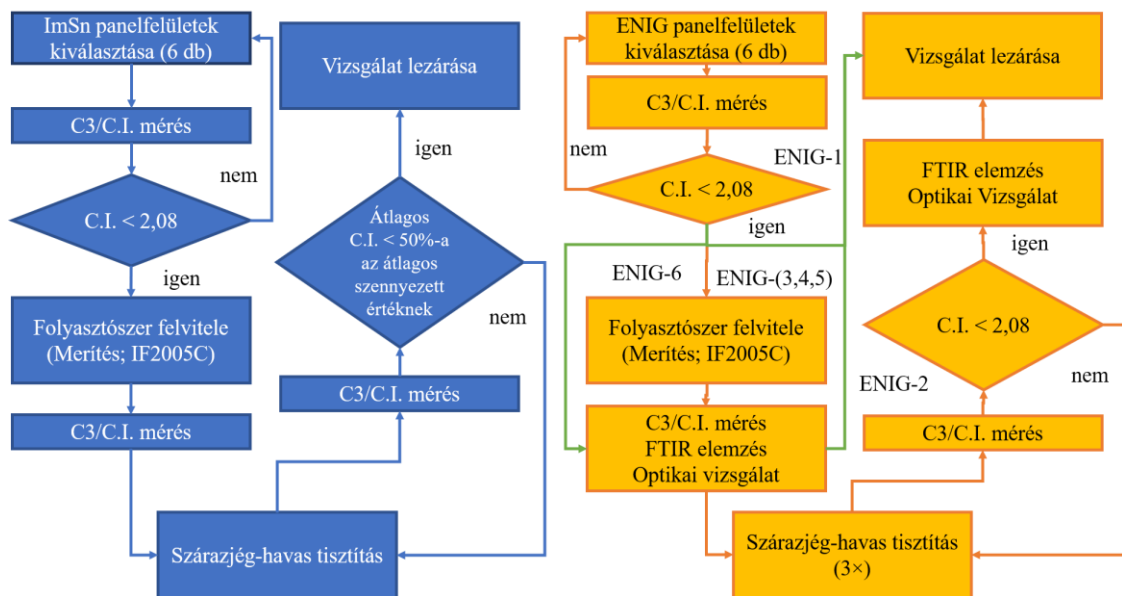
3.1. ábra: A harmat megjelenését minimálisra csökkenti a szabályozott felületfűtés. Kondenzáció a felületi hőmérséklet szabályozása nélkül (balra) és hőmérséklet szabályozással (jobbra)

A vizsgálatok során, immerziós ón (ImSn) és kémiai nikkal/galván arany (ENIG) bevonatú, OR/L0 kategóriájú folyasztószerrel szennyezett nyomtatott áramköri lapokat használtam tisztítandó mintaként. A kísérletben különböző kezelési paraméterek mellett tanulmányoztam a szárazjég-havas tisztítás hatásait, és elemeztem az IF 2005C [97] típusú „tisztítást nem igénylő” (no-clean) folyasztószerből származó szennyeződések. Ezt a folyasztószer típust azért választottam, mivel széles körben használják az autópárhazban elektronikai szerelvények forrasztásakor. A tisztítás során a két fúvóka együttesen működött a szórófejen, ami oszcilláló pályát írt le egy ciklus alatt (3.2. ábra)



3.2. ábra: A szórófej mozgása a pásztaási ciklus során. ($v = 30 \text{ mm/s}$)

A kísérlet során alkalmazott panelek valós gyártási folyamatban alkalmazott véletlenszerűen kiválasztott darabok, amik a panelbeszállítótól származó eredeti csomagolásban voltak tárolva a tesztek megkezdéséig.



3.3. ábra: Az imSn (kék) és az ENIG (sárga) paneleken végzett kísérlet folyamatábrái

A kísérletsorozat első lépéseként 6 ön bevonatú panellel végeztem méréseket. Az önbevonatú (imSn) felületet azzal a céllal vizsgáltam, hogy a folyasztószer eredetű maradványok hatékonyan eltávolíthatók-e szárazjég-havas tisztítással. Másképp megfogalmazva: a szennyezés mértéke hány ismétlési ciklus után csökken a felére. A kísérletek menetét a 3.3. ábra szemlélteti, a kísérleti mátrixa a 3.2. táblázatban látható.

3.2. táblázat: Ön bevonatú panelekkel végzett kísérlet vizsgálati mátrixa

Panelfelület	Eredeti imSn	IF2005C	imSn CO ₂ tisztított 1 ciklus	imSn CO ₂ tisztított 2 ciklus
1A		C3/C.I.		C3/C.I.
1B	C3/C.I.		C3/C.I.	
2A			C3/C.I.	C3/C.I.
2B	C3/C.I.	C3/C.I.		
3A		C3/C.I.		C3/C.I.
3B	C3/C.I.		C3/C.I.	
4A			C3/C.I.	C3/C.I.
4B	C3/C.I.	C3/C.I.		
5A			C3/C.I.	C3/C.I.
5B	C3/C.I.	C3/C.I.		
6A	C3/C.I.	C3/C.I.		
6B			C3/C.I.	C3/C.I.

A panelek felületére IF2005C típusú folyasztószert (flux) vittem fel, amit beszárítottam. Ezt követően adott pozícióban meghatároztam a korrozivitási indexet. A felületeket a 3.1. táblázat szerinti paraméterekkel CO₂ tisztítottam. Ezt követően ismét, a korábbi méréstől távoli területeken megmértem a korrozivitási indexet. Ezt addig ismételttem míg a C.I. átlagos értéke a tisztítás előtti érték 50%-a alá csökkent. Ehhez 2 ismétlésre volt szükség.

3.3. táblázat: ENIG bevonatú panelekkel végzett kísérlet vizsgálati mátrixa

Panel	Minta állapota	Helyi ionos szennyezettség (átlag)	Optikai analízis	FTIR
ENIG-1	eredeti ENIG	C3/C.I.	N/A	N/A
ENIG-2	IF2005C	C3/C.I.	N/A	Board 0
ENIG-3	ENIG+IF2005C+CO ₂	C3/C.I.	A (1; 2)	Board A
ENIG-4	ENIG+IF2005C+CO ₂	C3/C.I.	B (1;2)	Board B
ENIG-5	ENIG+IF2005C+CO ₂	C3/C.I.	C (1;2)	Board C
ENIG-6	IF2005C+CO ₂	C3/C.I.	Referencia	N/A

Az ENIG kísérletben limitként meghatározott 2,08-as korrozivitási index CO₂ tisztítással való elérhetőségét vizsgáltam. Az ENIG bevonatú panelek esetén a kezdeti

paraméterként a 3 ismétlési ciklust a korábbi önbevonatú panellel végzett mérések eredményei alapján várható exponenciális lecsengés alapján választottam (3.4. ábra). Ez összhangban van a részecske szennyezettség műszaki tisztaságvizsgálatánál alkalmazott validációs módszerrel is. A vizsgált kísérleti mátrixát a 3.3. táblázat mutatja.

Az extrakciót, valamint a későbbiekben tárgyalt optikai, és FTIR vizsgálatokat, minden esetben korábban más módszerrel nem vizsgált panelfelületeken, a korábbi mérésektől távol végeztem.

További 6 esetben ImSn és ENIG bevonatú paneleken a forrasztási felületek szárazjég-havas kezelésének nedvesíthetőségre gyakorolt hatását vizsgáltam. Itt folyasztszert nem alkalmaztam és az ImSn és ENIG felületeket 3 cikluson keresztül kezeltem.

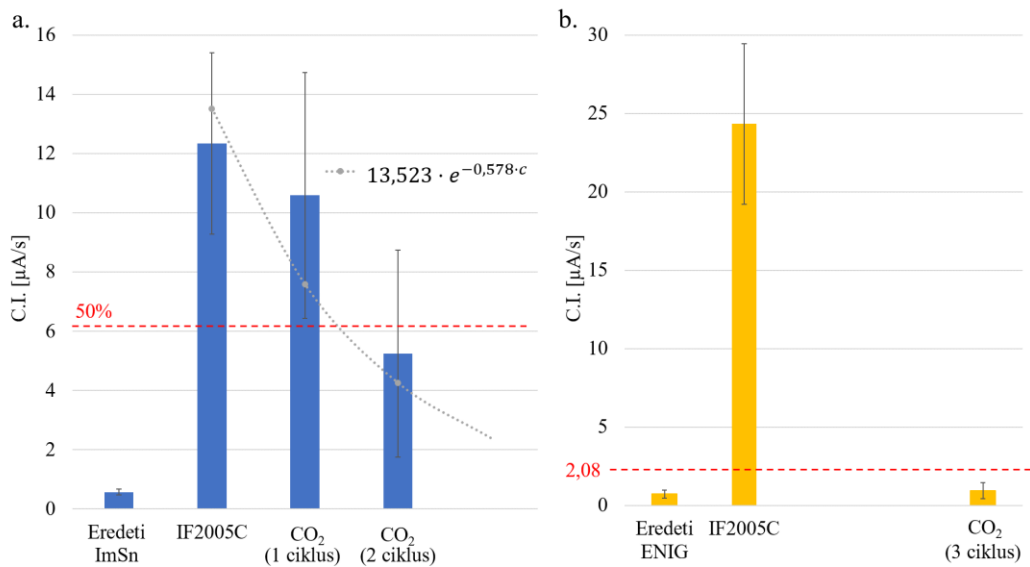
3.2 Szárazjég-havas tisztítás

3.2.1 Elektrokémiai mérések

Ami az ionvándorlást illeti, az ionok jelenléte a folyasztszert maradványokban a legkritikusabb. A CO₂ tisztítási hatékonyság meghatározásához az érintett felületekről gyűjtött vizes extraktum vezetését mértem. A felület helyi ionos szennyezettségének mértéke könnyen kifejezhető a korrozivitási index (C.I.) segítségével [98]. Élhetünk azzal a feltételezéssel, hogy a C.I. egyértelműen jellemzi a felület ionos szennyezettségi állapotát. Az iparban ezt a feltételezést általánosan elfogadják [99].

A minták folyasztszerttel mesterségesen szennyezett önbevonatú panelek voltak. A mérési eredményekből kitűnik, hogy a tisztítatlan minták (IF2005C) átlagosan szennyezettebbek, mint a CO₂ kezelték. A tisztaság tovább javítható a pásztázás ismétlésszámának, és a tisztítás teljes időtartamának növelésével (3.4. ábra bal oldala). Bár a méréseknél tendenciák megfigyelhetőek, a kezdeti folyasztszert szennyezés mennyisége és a tisztítás után megmaradó mennyiség ugyanazon a területen a mérési elvek miatt nem határozható meg pontosan. Ezért az eredményeket azonos beállítások mellett is nagy szórás jellemzi.

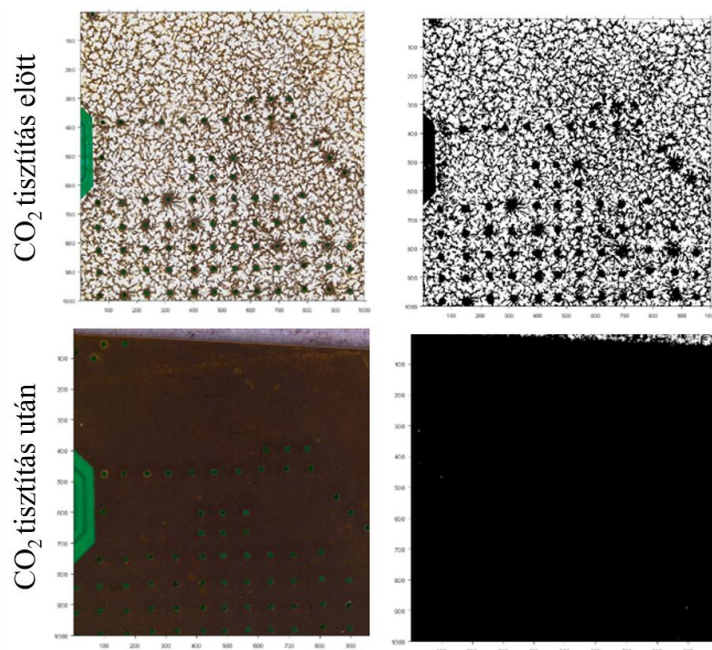
A méréseket ENIG paneleken is elvégeztem, ebben a kísérleti elrendezésben a tisztítási ciklust háromszor ismételttem. Ezekben az esetekben a 3. tisztítási ciklus utáni C.I. értékek megközelítették a folyasztszerttel nem szennyezett minták referencia eredményeit. (3.4. ábra jobb oldala)



3.4. ábra: CO₂-havas-tisztítás csökkentette a korrozív index mértékét

3.2.2 Tisztított ENIG felületek optikai analízise

A kísérletekben vizsgáltam a folyasztószer felvitele és szárítása után az ENIG bevonat felületén megjelenő fehér „kristályos” maradékot [100]. A fehér maradvány a folyasztószer gyenge szerves savainak (karboxil savak) kristályosodott formája. A szennyeződés optikai mikroszkóp alatt, polarizált fénnel könnyen kimutatható.



3.5. ábra: Példa: videomikroszkópos (balra) és algoritmussal feldolgozott felületek (jobbra)

A vizsgált területek képeit MATLAB környezetben megvalósított Otsu-féle küszöbérték módszeren [69] alapuló képfeldolgozó algoritmussal elemezve számszerűsíthetővé vált a szennyezett területek mértéke (3.5. ábra). A kezelés hatását az

alábbi összefüggések szerint összehasonlítva, egyfajta szermaradék arányt határoztam meg. A „kisebb-jobb” minőségi jellemzőként a mintán folyasztószer maradékarányt definiáltam. Az R% maradékanyag-arányt a következőképpen fogalmazták meg [101]:

$$R\% = \frac{T_1}{T_0} \cdot 100\% , \quad (3.1)$$

ahol T_0 a tisztítás előtti és T_1 a tisztítás utáni szennyezett terület nagysága a fehér pixelek számával kifejezve. A tisztítási hatékonyság (η) ebből meg határozható az alábbi összefüggés szerint:

$$\eta = \frac{T_0 - T_1}{T_0} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

3.4. táblázat: Az optikai analízis eredményei

Panel	Folyasztószer szennyezés	Állapot	Teszt 1	Teszt 2	
Referencia	nem	tisztítás előtt (T_0)	66706	17762	
		tisztítás után (T_1)	54696	12642	
		<i>Tisztítási hatékonyság (η)</i>	<i>18,00%</i>	<i>28,83%</i>	
A	1	igen	tisztítás előtt (T_0)	478806	717044
			tisztítás után (T_1)	5137	47565
			<i>Tisztítási hatékonyság (η)</i>	<i>98,93%</i>	<i>93,37%</i>
	2	igen	tisztítás előtt (T_0)	502478	749777
			tisztítás után (T_1)	4043	52451
			<i>Tisztítási hatékonyság (η)</i>	<i>99,20%</i>	<i>93,00%</i>
B	1	igen	tisztítás előtt (T_0)	536729	530327
			tisztítás után (T_1)	8113	7781
			<i>Tisztítási hatékonyság (η)</i>	<i>98,49%</i>	<i>98,53%</i>
	2	igen	tisztítás előtt (T_0)	596993	635480
			tisztítás után (T_1)	7415	17352
			<i>Tisztítási hatékonyság (η)</i>	<i>98,76%</i>	<i>97,27%</i>
C	1	igen	tisztítás előtt (T_0)	538740	831004
			tisztítás után (T_1)	120	20808
			<i>Tisztítási hatékonyság (η)</i>	<i>99,98%</i>	<i>97,50%</i>
	2	igen	tisztítás előtt (T_0)	598219	639448
			tisztítás után (T_1)	7343	20496
			<i>Tisztítási hatékonyság (η)</i>	<i>98,77%</i>	<i>96,79%</i>

Ahhoz, hogy a CO₂-havas tisztítás hatékonyságát vizsgáljam a mérések kiértékelése során, az alábbi nullhipotézist állítottam fel:

H_0 : A folyasztószerrel mesterségesen szennyezett ENIG bevonatú panelfelületeken kialakult fehér maradványok maximum 95%-a eltávolítható a 3 ciklusban végzett szárazjég-havas tisztítással.

Ahhoz, hogy a nullhipotézist elfogadhassuk hipotézistesztelés szükséges. Ehhez egymintás Wilcoxon-féle előjeles rangpróbát választottam, mivel a rendszer normalitása és linearitása sem triviális.

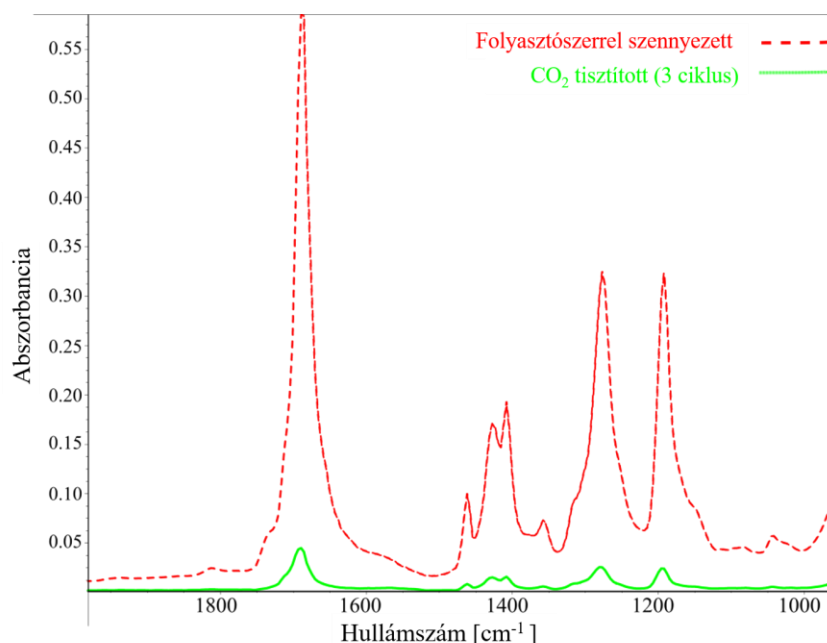
A 3.4. táblázat alapján megállapítható, hogy a tisztítási hatékonyság mért értékeit tartalmazó csoport magasabb értékeket mutatott, mint a meghatározott érték.

A nullhipotézist teszteltem, miszerint a tisztítási hatékonyság kisebb vagy egyenlő értékű az elvárt 95%-os értékhez képest. Az eredmény statisztikailag nem szignifikáns ($p = 0,003$). A nullhipotézist tehát 0,01 szignifikancia szint mellett elvethetjük. Ezek alapján az alternatív hipotézist kell lefogadnunk, miszerint:

H_1 : A folyasztószerrel mesterségesen szennyezett ENIG bevonatú panelfelületeken kialakult fehér maradványok több mint 95%-a eltávolítható a 3 ciklusban végzett szárazjég-havas tisztítással.

3.2.3 Fourier Transzformációs Infravörös Spektroszkópia (FTIR) elemzés

A tisztítás hatékonyságának meghatározására spektrometriai vizsgálatokat is végeztem. A beszárított, folyasztószerrel szennyezett és a CO_2 -vel tisztított ENIG felületek infravörös spektrumait reflexiós üzemmódban gyűjtöttem (3.6. ábra).



3.6. ábra: Folyasztószerrel szennyezett és CO_2 -vel kezelt felületek FTIR spektruma. A karboxil- ($\text{C}=\text{O}$) csoport (WOA) jellegzetes csúcsa tisztítás után lényegesen gyengébb

Saját méréseim [102] és Huang tanulmánya [103] alapján gyenge szerves savakra lehetett következtetni az 1690 cm^{-1} körüli csúcs intenzitásából. Lineáris összefüggést feltételezve a koncentrációkra és a maradékanyagok mennyiségére lehet becslést adni. Az eredmények alapján a meghatározott tisztítási hatékonyság 95% feletti volt.

Az elemzés során elvégzett elektrokémiai, spektrometriai és optikai vizsgálatok alapján az eredmények azt mutatják, hogy a szárazjég-havas tisztítás a vizsgált minták esetében a folyasztószer szennyezés több, mint 95%-át eltávolította (lásd 3.5. táblázat). A vizsgálatok egyértelműen kimutatták, hogy a szárazjég-havas tisztítási módszer hatékony.

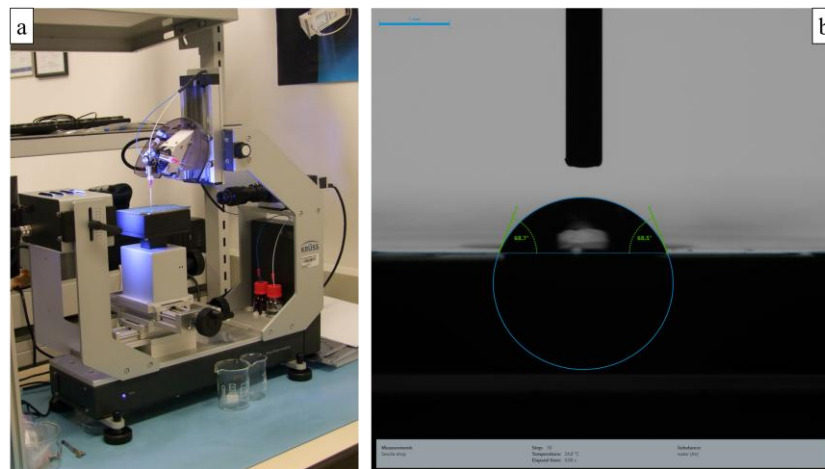
3.5. táblázat: A szárazjég-havas tisztítás hatékonysága „no clean” folyasztószerrel szennyezett ENIG bevonató felületek esetében

Módszer	Elektrokémiai	Spektroszkópiai	Optikai
Tisztítási hatékonyság	97%	96%	95%

3.3 Nedvesíthetőség vizsgálat CO₂ kezelt paneleken

A tisztítási hatékonyság mellett fontos kérdés lehet a szárazjég-havas tisztítás NyÁK forrasztható felületeire gyakorolt hatása. A kísérlet célja az volt, hogy megtudjuk, hogy a szárazjég-havas kezelés csökkenti-e a fémfelületek nedvesíthetőségét. Ennek tisztázása, olyan esetekben lehet fontos, amikor a tisztítás után is történik nem folyasztószer szennyezett, de CO₂ tisztított területen forrasztás a gyártási folyamat során. A mérések során a folyasztószerrel, illetve szárazjég-hó szórással kezelt nyers fémfelületek felületi szabad energiáját (SFE) mértem meg. Ón (imSn) és arany (ENIG) bevonattal ellátott nyers paneleket vizsgáltam, amiknek a kezdeti felületi nedvesíthetőségét és a felületi szabadenergiáját (SFE) egy Krüss DSA 30 rendszerrel határoztam meg.

A vizsgálat első szakaszában eredeti állapotú sík fémfelületeken ülőcsepp módszerrel mértem a felület-víz-levegő és fémfelület-dijód-metán-levegő rendszerek peremszögeit (3.7. ábra). A kiértékeléshez a Krüss Advance szoftvert használtam. A szoftverben Young-Laplace illesztést választottam és OWRK modell alapján határozta meg a felületi szabadenergiát.

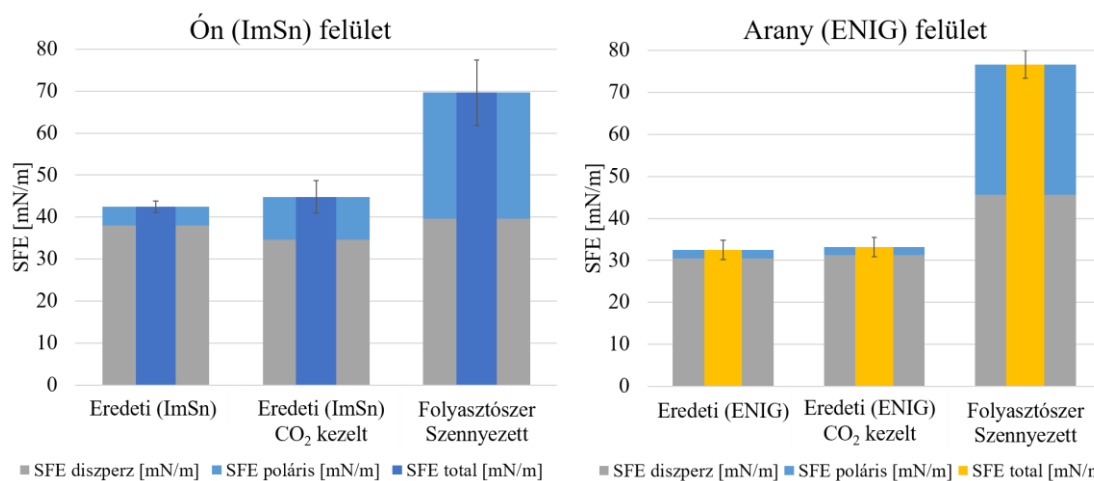


3.7. ábra: Ülőcsepp módszer:mérési összeállítás (a), peremszög mérés(b)

Ezek után CO₂ kezelés következett. A paraméterek megegyeztek a 3.1. fejezet elején beállított értékekkel és 3 ciklust alkalmaztam. A kontaktszög méréseket a fémfelületeken más pontokon újra megmértem és a meghatározott SFE-t ábrázoltam. A panelekre folyasztószer (IF2005C) vittem fel, amit szobahőmérsékleten hagytam megszáradni. A folyasztószer nedvesíthetőség fokozó hatása az SFE növekedésével egyértelműen látszott.

A kezeletlen ImSn és ENIG felületek egyértelműen rosszabb nedvesíthetőséget mutatnak a folyasztószerrel kezeltékhez képest. Vizsgálataim azt is kimutatták, hogy az

SFE poláris komponense változott meg jelentősen. Az eredeti nyers felületek szárazjeges kezelése után az SFE értékekben nem tapasztaltam jelentős változást a kezeltelen körülményekhez képest (3.8. ábra).



3.8. ábra: A mért felületi szabadenergiák. Az ImSn és az ENIG minták hasonló viselkedést mutatnak. A CO₂-havas tisztítás önmagában nem rontja a nyers (eredeti) forrasztási felületek nedvesítési tulajdonságait

Ahhoz, hogy megállapítsam, hogy a CO₂-hó tisztítás önmagában nem gátolja a nedvesíthetőséget a két vizsgált fémbevonat esetében 2-mintás Welch próbákat végeztem. Feltételezhető, hogy az ülőcsepp módszerrel meghatározott felületi szabadenergia mérési adatai egymástól függetlenek, és Shapiro-Wilk teszt alapján normál eloszlásúnak tekinthetők.

3.6. táblázat: Welch próba eredményei vegyi ón (imSn) bevonat esetén

mérés neve	SFE total [mN/m]	Szórás	Mérés szám (n)
eredeti vegyi ón bevonat	42,49	1,37	5
vegyi ón CO ₂ kezelés után	44,83	3,90	11
2-mintás Welch próba ón bevonat esetén	$t = -1,76$	p -érték (két oldali) = 0.1	szabadsági fok = 13

3.7. táblázat: Welch próba eredményei arany (ENIG) bevonat esetén

mérés neve	SFE total [mN/m]	Szórás	Mérés szám (n)
eredeti ENIG bevonat	32,46	2,31	10
ENIG CO ₂ kezelés után	33,16	2,26	10
2-mintás Welch próba ENIG bevonat esetén	$t = -0.69$	p -érték (két oldali) = 0.5	szabadsági fok = 17

A Welch-próba nem mutatott ki 0,05 szignifikanciaszint mellett egyik esetben sem szignifikáns különbséget az ón (3.6. táblázat) és az arany (3.7. táblázat) panelek felületi szabadenergiáinak átlagai között.

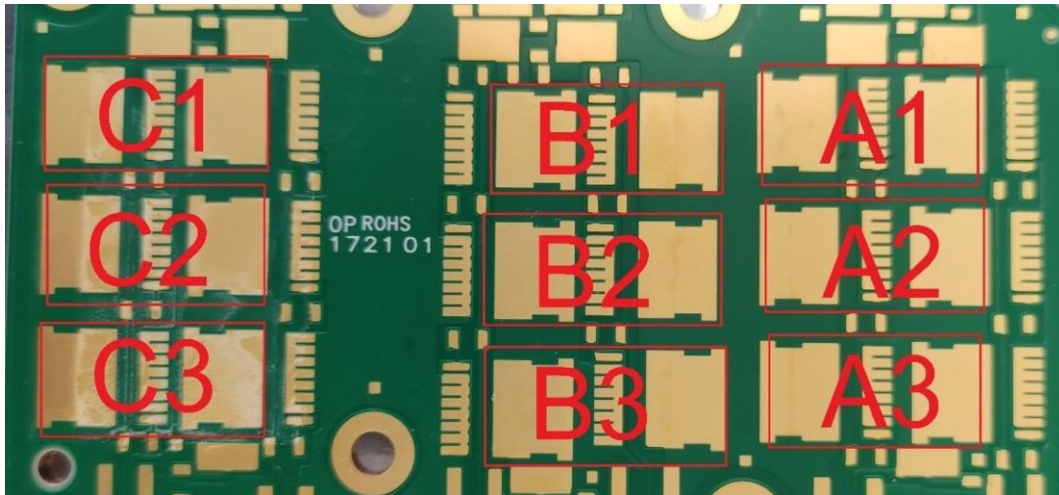
3.4 A szárazjeges tisztítás hatásmechanizmusának vizsgálata

Az 3.2 fejezetben bemutatott eredmények alapján egyértelmű, hogy a szárazjég-havas tisztítás hatékony lehet idealizált körülmények között, de annak bizonyítására, hogy valóságban miként szerepel újabb kísérleteket terveztem. Az előbbi esetben egy ideális „legrosszabb esetben” történtek a mérések, ahol szennyezett, nem hőkezelt folyasztószer maradványok eltávolításának hatékonyságát és az ionos maradványok detektálási módszereit vizsgáltam.

A hatásmechanizmus vizsgálatok a korábbi fejezetben bevezetett módszerekkel törekedtem a hatásmechanizmus felderítésére. Ebben az esetben már ismert és meghatározott mennyiségű (felületi koncentrációjú) folyasztószer okozta szennyezés tisztítását vizsgáltam. Igazoltam, hogy hőkezelés után is hatékony az eljárás. Az utóbbi alfejezetben került sor a gyártásból származó, maradványokkal szennyezett termék tisztításának leírására is, ami igazán életszerű kísérleti elrendezés volt. Így a gyorskamerás vizsgálatok segítségével lehetőség nyílt a módszer rendszerfüggetlen fizikai tulajdonságainak becslésére is.

3.4.1 Szennyezett felületek tisztítása

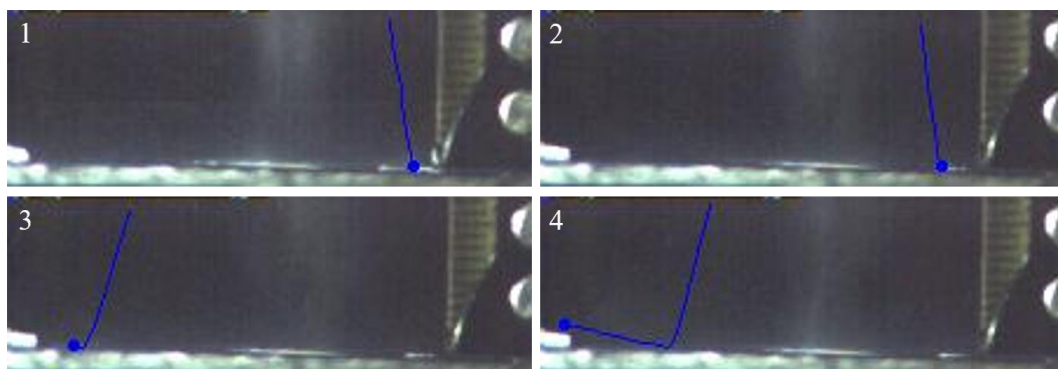
A vizsgálatokhoz tiszta felületű, arany bevonatú (ENIG) paneleket $21 \mu\text{l}/\text{cm}^2$ mennyiségű Interflux 2005C típusú gyenge szerves savakat tartalmazó „tisztítást nem igénylő” folyasztószerrel szennyeztem. Az egyik szennyezett panelt $140 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra hevítettem, majd egy percen keresztül ezen a hőfokon tartottam, ezzel szimulálva a gyártási folyamatban alkalmazott hőmérsékletet, amely már elégséges lehet a savak aktiválásához, forrasztás során. Egy másik panelt nem hevítettem, így modellezve a forrasztástól távoli környezetet. Ezt követően a szárazjeges tisztító berendezéssel háromszor megtisztítottam a mintákat $16,4 \text{ kg/h CO}_2$ tömegárammal, 2 bar nyomáson, 167 mm távolságból, majd a Foresite C3/C.I. berendezéssel 18 helyi ionos szennyezettség mérést végeztem, panelként 9 helyen. (3.9. ábra)



3.9. ábra: Vizsgált mintapanel

Valós termelési környezetből származó furatszerelt alkatrészekkel beültetett szerelvényeken levő szelektív forrasztás eredetű maradványok eltávolítását három ismétlés mellett pásztázó üzemmódban 30 mm/s sebességgel, 16,4 kg/h CO₂ tömegárammal, 4 bar nyomáson, 50 mm távolságból végeztem. Minden ismétlést követően mértem helyi ionos szennyezettséget.

A kísérletek során alacsony felbontás és erős megvilágítás mellett sikerült közel 20000 képkocka/másodperc sebességgel rögzítenem a tisztítási folyamatot egy I-SPEED 210 típusú kamera segítségével (3.10. ábra). Vizsgáltam a szén-dioxid fő sugarát, a fúvókából kilépő szárazjég-szemcséket, valamint ezek becsapódását, és sebességét.

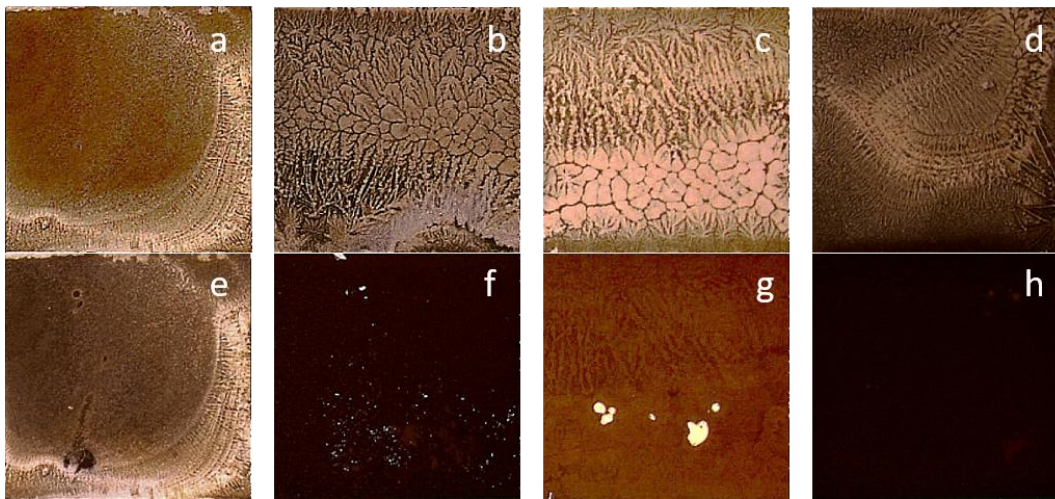


3.10. ábra: A szárazjeges tisztítóberendezés CO₂ sugaráról készült gyorskamerás felvételek

3.4.2 Mérési eredmények és értékelésük

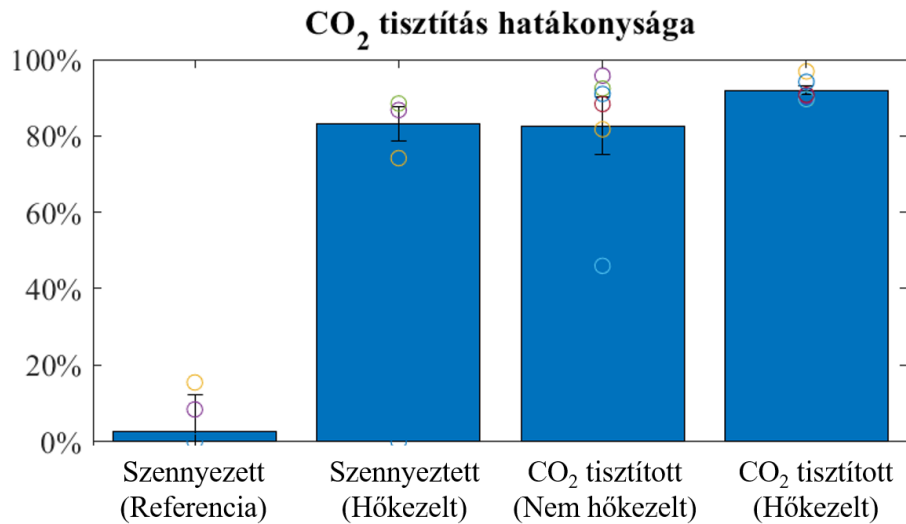
A folyasztószerrel mesterségesen szennyezett minták vizsgálatánál a képek analízise a 3.2.2 fejezetben leírtak szerint történt. Az elemzés alapján kiderült, hogy a szennyezett állapothoz viszonyítva, a megfelelő CO₂ tisztítás hatékony a szobahőmérsékleten kialakult és a hőkezelt (részben már elaktiválódott és molekulárisan átalakult)

maradványok esetében is. Ezt a 3.11. ábra példa képei bemutatják, hogy a folyasztószerrel szennyezett, kiindulási állapot (a-d) és a kezelés után készült felvételek (e-h) ugyanazonokon a területeken milyen eltéréseket mutatnak. A referencia (a; e) esetben nem történt hőkezelés, sem tisztítás, ezért a maradványok mennyisége és eloszlása csak minimális mértékben változott a két felvétel között eltelt idő során. A nem hőkezelt esetben (b; f) látható, hogy a maradványok jelentős része el lett távolítva a tisztítással. A hőkezelt mintán (c; g) egyértelműen látszik, hogy a maradványok részben aktiválódtak és bomlásnak indultak, de ezzel egyidőben a felületen egy egyenletes réteg alakult ki. Abban az esetben amikor a hőkezelést CO₂ tisztítás követte (d, h) egyértelműen a legkevesebb maradvány volt tapasztalható a kiindulási állapothoz képest.



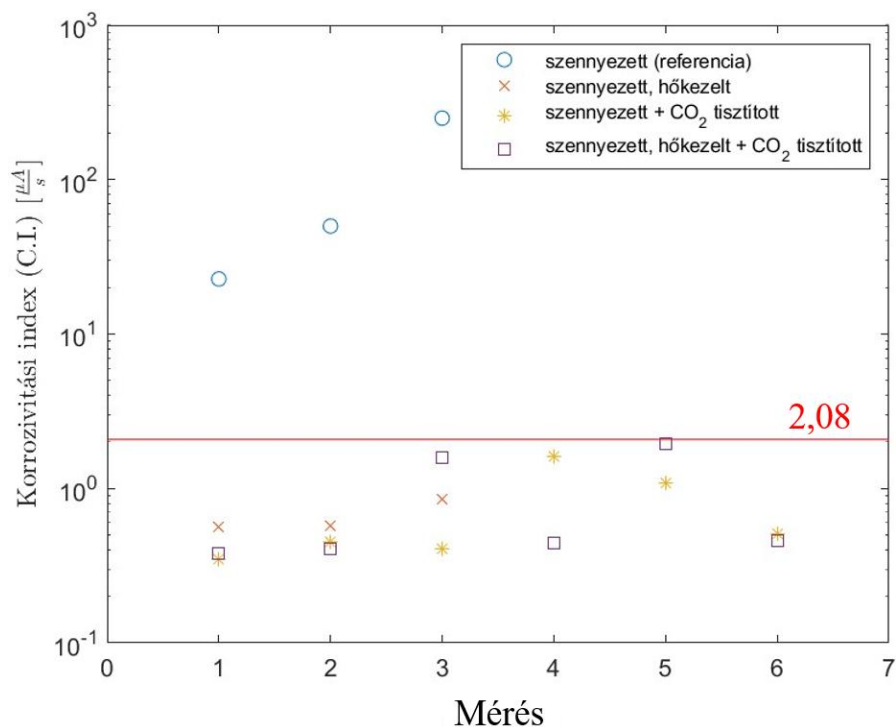
3.11. ábra: Polarizált fényben készült videómikroszkópos felvételek. Szennyezett (a; b; c; d; e), CO₂ tisztított (f), Hőkezelt (g), Hőkezelt és CO₂ tisztított (h) minták

Ezt a képfeldolgozó algoritmussal meghatározott tisztítási hatékonyság (3.12: ábra) is mutatja. A referencia panelek esetében az átlagos „tisztítási hatékonyság” definíció szerint 0 lenne, az ettől való eltérés abból adódhat, hogy a két felvétel közötti minimális különbségekre is érzékeny a képfeldolgozó rendszer. Az is jól látható, hogy a hőkezelés hatására a szennyezettség eloszlása egyenletesebb, így optikai módszerekkel nehezebben észlelhető, ennek ellenére a CO₂-hó szórás tisztítási hatékonysága egyértelmű.



3.12. ábra: Szárazjég-havas tisztítás hatékonysága mesterségesen szennyezett mintákon

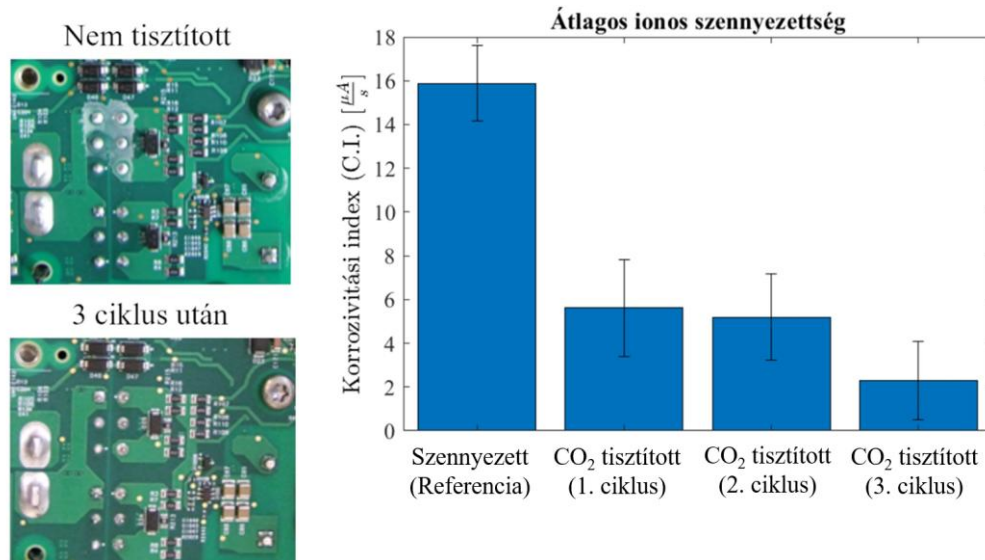
Fontos megemlíteni, hogy az ionmigrációért javarészt felelős ionos maradványok nem különíthetők el egyértelműen vizuálisan a kevésbé kártékonyaktól, ezért érdemes volt a felületeket helyi ionos szennyezettség szempontjából is vizsgálni (3.13. ábra). Megállapítható, hogy a CO₂-tisztítás jelentősen csökkentette a szennyezett felületen mért korrozívítási index értékét.



3.13. ábra: Mesterségesen szennyezett és tisztított mintákon mért C.I. értékek. Minden szárazjég-havas tisztításon átesett minta mért eredménye a meghatározott 2,08-os határérték alatt van

A készterméken forrasztás után előforduló folyaszószert maradványok eltávolítására vonatkozó vizsgálatokból látható, hogy a CO₂-havas tisztítás szintén eredményes volt. A

szennyezett felület többszörös kezelése során az ionos szennyezettség mértéke 3 ismétés után már elfogadható szintet ért el a helyi ionos szennyezettség vizsgálaton és vizuálisan sem volt megfigyelhető szennyeződés a furatszerelt alkatrész környezetében (3.14. ábra).



3.14. ábra: Vizuálisan és korrozivitási index mértékében is jól kimutatható, hogy a szárazjég-havas tisztítás hatékonyan csökkenti a maradványok mennyiségét

Ahhoz, hogy a tisztítási folyamat során alkalmazott ütköző közeg, a szárazjég-hó szemcsék mozgási energiáját megbecsüljem, gyorskamerás felvételeket készítettem 19223 képkocka/másodperc sebesség mellett. A pelletek sebességének méréséhez egy milliméter skálát helyeztem függőlegesen a fúvóka mellé. A pelletek mozgását Fiji (ImageJ) szoftverrel követtem le képkockánként, majd a szemcse útvonalát kirajzolva számoltam ki a pályát. A felvétel sebességéből, a megtett képkockákból és a 10 mm-es skálából tudtam számítani a pelletek sebességét. A felvételeken 1 pixel mérete a 1/6 milliméternek felelt meg. Az időt 1 képkocka, a hosszúságot 1 pixel pontossággal tudtam leolvasni a részecskék nyomon követése során.

3.8. táblázat: A felvételek alapján leolvasott mennyiségek

felvétel	1	2	3	4
képkockaszám	19223	19223	19223	19223
menetidő (képkocka)	7	5	3	4
idő (t [s])	$3,64 \times 10^{-4}$ (7%)	$2,60 \times 10^{-4}$ (10%)	$1,56 \times 10^{-4}$ (17%)	$2,08 \times 10^{-4}$ (13%)
út (pixel)	58	54	48	59
út (S [m])	$9,67 \times 10^{-3}$ (0,9%)	$9,00 \times 10^{-3}$ (0,9%)	$8,00 \times 10^{-3}$ (1,0%)	$9,83 \times 10^{-3}$ (0,8%)
pellet átmérő (pixel)	3	2	2	2
pellet átmérő (D [m])	5×10^{-4} (17%)	3×10^{-4} (25%)	3×10^{-4} (25%)	3×10^{-4} (25%)

A 3.8. táblázat mutatja be a kamera felvételekről a „szemcsék” nyomkövetése során leolvasott értékeket a leolvasási pontosságból adódó relatív hibákkal.

A „szemcsék” méretéből (tömegéből) és sebességéből következtetni lehetett a rendszer elemeinek mozgási energiájára.

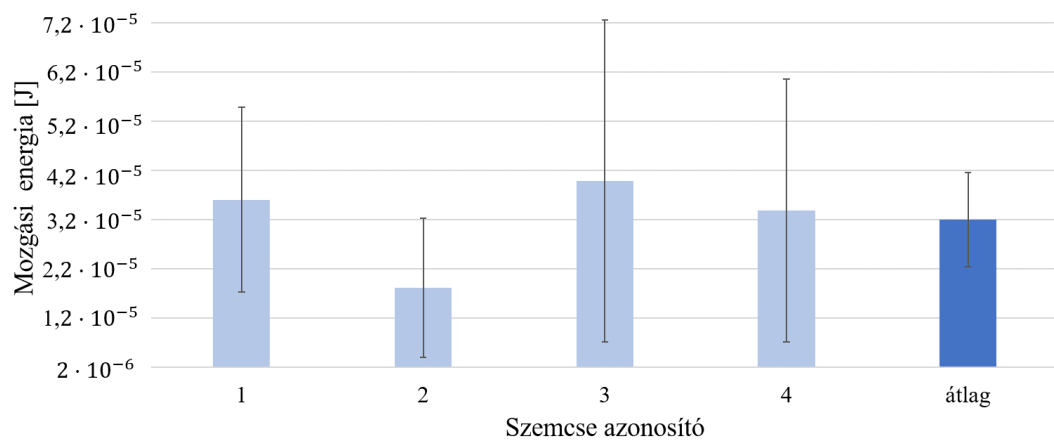
$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2, \text{ ahol} \quad (3.3)$$

$$m = \frac{4}{3} \left(\frac{D}{2} \right)^3 \rho_{CO_2}, \text{ és} \quad (3.4)$$

$$v = \frac{S}{t} \quad (3.5)$$

A vizsgált részecskék különböző méretű pelletek, de az S, D, t paramétereket a 3.8. táblázat alapján behelyettesítve a rendszer mechanikai energiáját meg lehet becsülni. Az aggregálódott részecskék alakját gömbbel közelítettem és szilárd halmazállapú CO₂ sűrűségét (ρ_{CO_2}) 1562 kg/m³ [104] értékkel számoltam. A hibaterjedést figyelembe véve szükség szerint Gauss féle hibaterjedési törvényt használtam.

Vizsgált szemcsék becsült mozgási energiája



3.15. ábra: A vizsgált szemcsék becsült mozgási energiája és átlaga

A 3.15. ábra alapján látható, hogy a vizsgált szemcsék különböző méretei ellenére, az egy részecskére becsült mozgási energia (átlaga és szórása) alapján következtetni lehet a tisztítóközeg mechanikai viselkedésére.

3.5 Összefoglalás

Igazoltam, hogy a szárazjeges tisztítás hatékonyan használható a folyasztószer maradványok, gyenge szerves savak (WOA) és egyéb, a forrasztásnál általánosan használt ionos szennyeződések eltávolítására.

A minta hőmérsékletének szabályozásával és a harmatpont felett tartásával csökkenthető a kondenzáció, így az ionos maradékok nem szennyeznek vissza a felületet. Ezért alsó infrafűtéssel rendelkező rendszert készítettem és többciklusos pásztázást dolgoztam ki. A tesztek elemzése során végzett elektrokémiai, spektrometriai és optikai vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a CO₂-havas tisztítás a vizsgált mintákról származó mesterséges folyasztószer szennyezés körülbelül 95%-át eltávolította.

A CO₂ tisztítás önmagában (folyasztószer hiányában) nem befolyásolja a fémfelületek nedvesíthetőségét.

Megállapítottam, hogy korábbi eredményeinkkel összhangban a CO₂ tisztítás eredményesen távolítja el a panelek felületére mesterségesen felvitt folyasztószer maradványokat abban az esetben is, ha az oldószer már elpárolgott. Sőt a hőközlést követően csak részben aktiválódott szennyező ionos maradványok letisztítására is hatékonyan alkalmazható az eljárás.

Vizsgáltam a szárazjeges tisztítás hatékonyságát gyártási környezetből származó ionos maradványok esetében is, és megfigyeltem, hogy a furatszerelt alkatrészek környezetében szennyezett szerelvények ismételt szárazjeges kezelés után, mind vizuálisan, mind korrozivitási indexük alapján tisztábbak lettek.

Az általam összeállított elektronikai szerelvények tisztítására alkalmas szárazjeges berendezés gyorskamerás felvételeinek segítségével, az ionos szennyeződések és maradványok eltávolítása során vizsgáltam a módszer hatásmechanizmusát szempontjából fontos jellemzőit.

A fejezetben bemutatott eredmények megalapozhatják, hogy egyes kritikus termékek szelektív forrasztását követően rendszerszinten alkalmazásra kerüljön a szárazjég-havas tisztítási technológia a közeljövőben.

4. Tesztpanel

4.1 TTC tesztpanel kialakítása

Az elektronikai ipar régóta küzd, hogy egyetlen ideális tesztpanelt találjon a nyomtatott áramköri lapok felületi szigetelési ellenállásával kapcsolatos problémák értékelésére. Ezért terveztem egy többcélú tesztpanelt az alábbi szempontok figyelembevételével:

- Nyers panel/alapanyag tisztaság:

Megfelelő a bejövő nyomtatott áramköri lapok tisztasága? Az összeszerelés megkezdése előtt fel kell mérni azt a megbízhatósági kockázatot, ami a panel vagy az alapanyag szennyezettségéből adódhat.

- Anyag minősítés:

Ha egy új SMT forrasztópasztát, hullámforrasz folyasztószert, stb. veszünk számításba, akkor annak meg kell felelnie ionmigrációs és SIR kritériumoknak. Ha az új anyagokat összekeverik más folyasztószerekkel, amelyeket az összeszerelési folyamat során alkalmaznak, az eredmények továbbra is elfogadhatók?

- Folyamat minősítések:

Maguk az anyagok önmagukban ugyan megfelelő felületi szigetelési ellenállást mutathatnak, de amikor a szerelvény gyártója elvégzi az alkatrészek összeszerelését és utómunkálatait ez változhat. Elengedhetetlen megtudni, hogy a tisztításmentes „no-clean” folyasztószerek teljesen aktiválódtak, vagy a maradványok eltávolítása hatékonyan megtörtént-e? Ha nem, akkor előfordulhat, hogy a SIR teszt eredménye már nem elfogadható.

- Termék modellezése:

A tesztpanel alkatrészkiosztása és rögzítési technológiai megfelelnek-e a szerelvény gyártók számára annyira, hogy az eredmények reprezentatívak legyenek a tényleges termékekre?

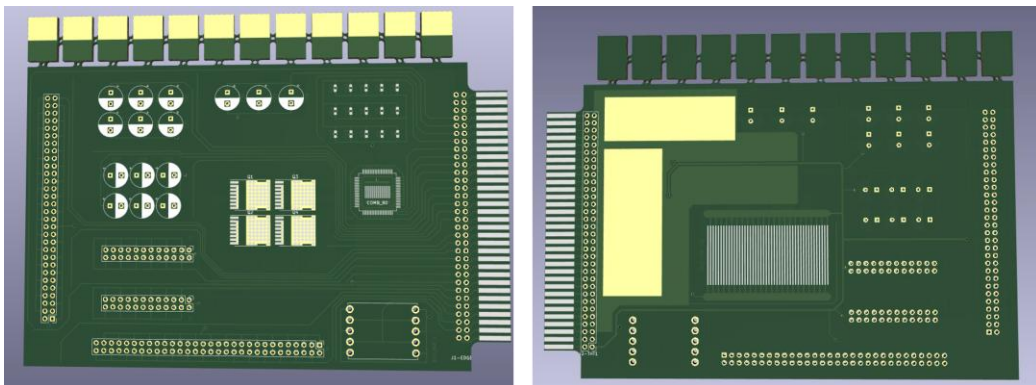
A szabványos SIR tesztpanel IPC B-24 már nem modellezi megfelelően a modern paneleken előforduló forrasztási felületek közötti távolságokat. A forrasztásgátló maszk nélkül kialakított IPC B-24 tesztpanel és a kezeletlen, felületi fémbevonat nélküli réz kivezetések nem illeszkednek a modern gyártástechnológiában alkalmazott módszerekhez. A szabványok az utóbbi években gyakran változtak, de a SIR teszt 2008 óta nem módosult. Így a szabványnak megfelelő folyasztószerek és paszták már kérdésesen, vagy egyáltalán nem felelnek meg a modern tisztasági követelményeknek.

Az IPC arra törekszik, hogy az IPC-B-52-t szabványos tesztpanelként alkalmazza a J-STD-0013 folyamat minősítés esetén. Azonban fontos megállapítani azt, hogy az IPC-B-52 tervezése sem felel meg legjobban az iparági igényeknek abból a szempontból, hogy mit értekel, mennyire gyártható, és mennyire reprezentatív a termékekre.

A termék-ciklusidők lerövidülésével és a költségkihívások növekedésével egyre nehezebbé vált a termékspecifikus SIR tesztpanel tervezése és beszerzése, ezért volt célszerű egy multidiszciplináris tesztpanel fejlesztése, mely kutatási és innovációs feladatokra, valamint gyártástechnológiai folyamatok monitorozására is egyaránt megfelelő.

Az általam fejlesztett többcélú tesztpanel szükséges eleme volt – és remélhetőleg lesz – számos anyagtudományi és gyártástechnológiai kutatásnak. A panel tervezése a kutatócsoport és a támogató vállalat igényeit felmérve történt. A Gerber fájlok készítésében a Flex munkatársai támogattak, a gyártással külső panelgyártó vállalatokat bízunk meg. Egy effektív és költséghatékony tesztpanelnek képesnek kell lennie arra, hogy széles körben felhasználható legyen.

Az új panel (4.1. ábra) kialakításának célja nem egyetlen vizsgálati módszer alkalmazását, hanem a gyártási folyamat során felmerülő számos kérdés megválaszolását tűzte ki célul. Ilyen például a nedvesíthetőség, a forraszthatóság, a furatkitöltés, és az adhéziós viszonyok vizsgálata. Alapvető cél volt az is, hogy a tisztítási módszerek hatékonyságának mérése, az interdigitális struktúrák, a valamint valós alkatrész geometriájú területek SIR elemzése is lehetségessé váljon ugyanazon a darabon.



4.1. ábra: A TTC tesztpanel

- A panel mérete: 159,5 mm × 116,8 mm
- A panel kétoldalú és nem tartalmaz belső vezető rétegeket
- 72 db élcsatlakozó
- 72 db átfémezett furat

- 9 db átmenő via
- 15 db furatszerelt ELKO kondenzátor (Soros és párhuzamos kapcsolásban)
- 15 db felületszerelt (SMD) chip kondenzátor (soros és párhuzamos kapcsolásban)
- 4 db tűskesor aljzat ($2 \times (2 \times 30)$; $2 \times (2 \times 15)$)
- 1 db LQFP-80_12x12mm_P0.5mm, fésűs mintával az alkatrész alatt a folyasztószer bezáródás értékeléséhez
- 4 db PG-HSOF-8-1 hővezető felülettel ellátott alkatrész
- 1 db Áramvezető sín (2×5 láb)
- 12 db eltávolítható „zászló” forraszthatósági és bevonat vizsgálatokhoz
- 2 db kiterjedt szabad terület forrasztásgátló maszk nélkül. adhéziós tesztekhez és kontaktszög méréshez.
- 1 db nagyméretű SIR tesztmintázat, interdigitális struktúra (Nagy IDS)

A teljes SIR tesztelhetőség alkatrészekkel vagy anélkül is lehetséges. A teljesen beültetett állapot modelljét a 4.2. ábra mutatja. Ezt a tesztpanelt, amely lehetőséget ad a forrasztási kötés folytonosságának mérésére, használhatjuk a vegyi anyagok keverékének mérésére, és az összeszerelési folyamatok megfelelőség értékelésére is.

A tesztpanel kialakítása több különálló régiót tartalmaz:

1. SIR Mintázat – SIR mérés, impedancia analízis (Nagy IDS)
2. SIR mini mintázat – SIR mérés, impedancia analízis (Kis IDS)
3. A tesztpanelnek nincs belső vezető síkja. Az alkatrészek a nyomtatott áramköri lap alsó és felső oldalán található, ezért, ahogy a legtöbb mai termékhez hasonlóan a tesztpanelen is kétoldalas újraömlésztéses tesztek végezhetőek, de a hátoldal minimálisan beültetett, mindössze SIR mintázattal ellátott. Ezen kívül a panel átmenő furatokkal és forrasztható SIR vizsgálatokhoz kialakított csatlakozókkal is rendelkezik.

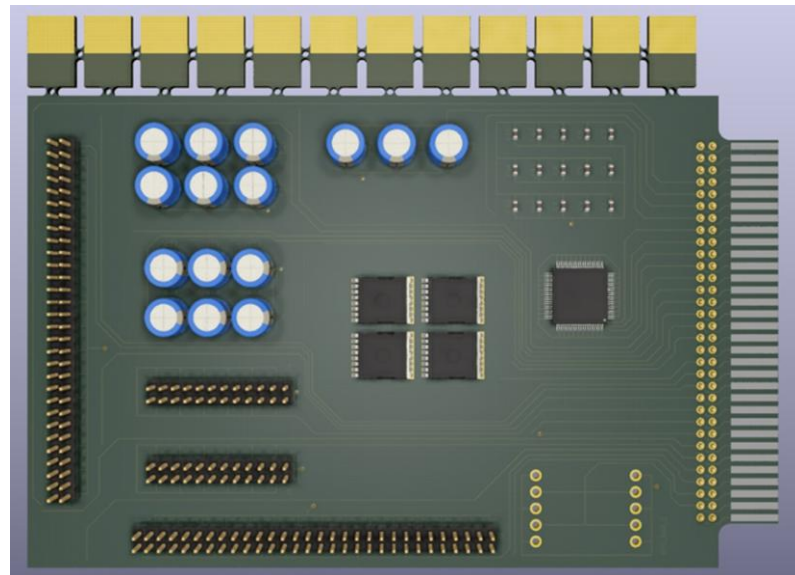
A SIR tesztelés komponensek nélkül is elvégezhető. Az alkatrészek nélküli tesztelés az IPC-B-24 anyagminősítési célját emulálja.

A tesztpanel ugyanattól az elektronikai panel beszállítótól rendelhető meg, mint a rendes gyártás esetén, így a laminált anyagok, fémezés és a forrasztómaszk illeszkedhetnek a meglévő gyártástervezési pontokhoz. A vizsgálatokhoz vegyi ón (ImSn), tűzi ón (HASL), kémiai nikkel/galván arany (ENIG), vegyi ezüst (ImAg), szerves (OSP) bevonatú verziók kerültek legyártásra.

A fejlesztett tesztpanel alapesetben szabványos élcsatlakozást használ a SIR tesztelés összeállításához. Ezért egyszerűen élcsatlakozó ellenpárral bármilyen más

mérőállomáshoz csatlakoztatható és könnyen eltávolítható a mérés után, de furatszerelt kivezetésekkel is rendelkezik arra az esetre, ha stabil forrasztott kötések szükségesek a vizsgálathoz. A csatlakozókonceptió lehetővé teszi az újrahasznosíthatóságot is.

Az utómunkálatok felülettisztasági aggályokat okozhatnak, ezért tanácsos gondoskodni arról, hogy a tesztpanel a termékek legkritikusabb utómunkálati állapotát is reprezentálni tudja. A folyasztószer esetében ez akár a legrosszabb forgatókönyvet is jelentheti úgy, hogy szándékosan túlzott mennyiségű folyasztószeret helyezünk a felületre, hogy értékeljük a tisztító eszközöket és a folyamat paramétereit. Ha „no-clean” folyasztószeret használunk, továbbra is a legrosszabb forgatókönyvet kell modellezni ugyanezzel az eszközzel annak meghatározására, hogy a hőközlés megfelelő-e az esetlegesen túlzott mennyiségű folyasztószer teljes aktiválásához, vagy tisztítás szükséges.



4.2. ábra: A TTC tesztpanel beültetési ábrája

4.2 A tesztpanel geometriájából meghatározható felületi kapacitás

A tesztpanel kialakításból adódóan lehetőség van az interdigitális struktúrák kapacitásának, valamint a szennyezés hatására történő kapacitás változásának becslésére.

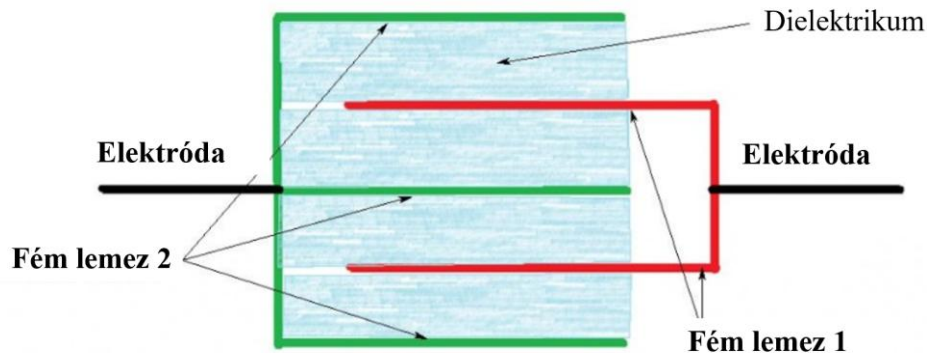
A szivárgóáram-méréshez használt SIR mintázatok névleges méretei a következők voltak:

- „Nagy IDS”: 20 mm × 41,2 mm, a elektróda távolság mérete 0,73 mm
- „Kis IDS”: 4 mm × 8,5 mm és a elektróda távolság mérete: 0,15 mm

Az aktuális méretek SIR-mintájára számított névleges négyzetszám 1233 (Nagy IDS) és 720 (Kis IDS).

4.2.1 Többlemezes kondenzátor modell

A 4.3. ábra a többlemezes kondenzátor kialakítását mutatja, amelyben négy kondenzátor van egy architektúrában. Az ilyen típusú kondenzátorokban két lemez van összekapcsolva az 1. kivezetésnél, és három lemez van összekapcsolva a 2. kivezetésnél. A fémlemezek össze vannak kötve, és a kondenzátor elektródáit alkotják. Az összes lemez között ugyanazt a dielektromos anyagot feltételezzük.



4.3. ábra: Többlemezes kondenzátor sematikus rajza

Két dielektromos anyaggal kitöltött lemez kapacitás az alábbi módon határozható meg:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{s}, \quad (4.1)$$

ahol ϵ_r a dielektrikum, ϵ_0 a vákuum dielektromos állandója, A a fegyverzet felülete és s a fegyverzetek távolsága. Mivel a fenti az esetben négy kondenzátor egy architektúrában van kialakítva, a 4.3. ábra szerint a kondenzátorban a lemezek száma összesen öt. Ezért a lemezek között csak négy terület található. Így a fenti többlemezes kondenzátor kapacitását a következőképpen adjuk meg:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 4A}{s} \quad (4.2)$$

Általános esetben ez a számolás az alábbi formában értelmezhető:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 (N - 1)A}{s} \quad (4.3)$$

ahol N a lemezek száma.

Ebből a levezetésből a legegyszerűbb közelítésben meghatározható a tesztpanel interdigitális struktúráinak kapacitása, ha élünk azzal az egyszerűsítéssel, hogy a lemezek közötti teret homogén dielektromos állandójú anyag (forrasztásgátló maszk) tölti ki.

4.1. táblázat: Az interdigitális mintázatok nominális adatai

Paraméter	Nagy IDS	Kis IDS	Megjegyzés
L	20 mm	4 mm	hosszúság
T	0,035 mm	0,035 mm	vastagság
w	0,480 mm	0,15 mm	szélesség
s	0,73 mm	0,15 mm	távolság
ε_r	3,75	3,75	forrasztásgátló maszk[105]
N	46	28	lemezek száma

A 4.1. táblázat értékeit felhasználva és a legegyszerűbb párhuzamos többlemezes kapacitás modellt alkalmazva az alábbi eredményeket kapjuk a kis ($C_K^{(MP)}$) és a nagy ($C_N^{(MP)}$) mintázatok kapacitására:

$$C_K^{(MP)} = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot (N - 1) \cdot L \cdot T}{s} = \dots = 8,37 \cdot 10^{-13} F = \mathbf{0,837 pF} \quad (4.4)$$

$$C_N^{(MP)} = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot (N - 1) \cdot L \cdot T}{s} = \dots = 1,43 \cdot 10^{-12} F = \mathbf{1,433 pF} \quad (4.5)$$

4.2.2 Az IDS kapacitásának analitikai értékelése többretegű rendszerekben

Az Olthuis és munkatársai [106] által kidolgozott elmélet egy realiztikusabb modellt használ az egysíkú interdigitális struktúrák vizsgálatára. Cikkükben a rendszer cellaállandóját írják le a geometriai paraméterek felhasználásával. Számítási módszerüket alkalmaztam a TTC tesztpanel mintázataira. Az impedancia spektroszkópiai mérések során általában a teljes impedancia kerül meghatározásra, azonban az 5. fejezetben bemutatott mérések alapján megfigyelt viselkedésmintázatokra támaszkodva a struktúrák kapacitás vizsgálatával foglalkozom.

Bármely két vezető közötti kapacitás meghatározható, ha ismert a potenciáeloszlás a közbenső tér minden pontjára. Ha a vezetőket körülvevő közegben nincs töltéstároló, akkor a potenciálnak meg kell felelnie a Laplace-egyenletnek, és elvileg ennek

megfelelően számítható. A gyakorlatban azonban ez a közvetlen megoldás túl bonyolult ahhoz, hogy analitikus kifejezést adjon az itt leírt síkelektrod-konfigurációra.

A potenciáeloszlás analitikus megoldásának egyszerűbb módja a konform transzformáció (leképezés) módszere [107]. Ezzel a módszerrel a valós világ (x, y) síkján minden egyes görbét görbévé vagy alakzattá alakíthatunk át, például egy (u, v) síkon. Ha ez a geometriai transzformáció teljesíti azt a feltételt, hogy az (x, y) síkot derékszögben metsző görbék az (u, v) síkon is így maradnak, a módszert konform leképezésnek nevezzük. Nyilvánvalóan az az oka egy ilyen transzformáció végrehajtásának, hogy a koordináta-transzformáció után viszonylag könnyen megtalálható legyen a potenciáeloszlás analitikus kifejezése.

A valós világ koordinátaiban a „két-fegyverzetes” kondenzátor ábrázolható és az egységnyi hosszra jutó kapacitás származtatható. Némi integrálszámítás [108] után az alábbi összefüggés adódik:

$$C_l = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{2} \frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)} \quad (4.6)$$

ahol $K(k)$ az elsőfajú teljes elliptikus integrál:

$$K(k) = \int_{t=0}^1 \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}} \quad (4.7)$$

A k változó a mintázat geometriai paramétereiből meghatározható és többelektrodás rendszerben az alábbi módon fejezhető ki:

$$k = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{w}{s+w}\right), \quad (4.8)$$

ahol w az elektródák szélessége és s az elektródák közötti távolság. Így a teljes kapacitás egy $N > 2$ elektródából álló mintázat esetében:

$$C^{(Olt.)} = (N-1)LC_l = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (N-1)L}{2} \cdot \frac{K\left(\sqrt{1-\left(\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{w}{2s+w}\right)\right)^2}\right)}{K\left(\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{w}{2s+w}\right)\right)}, \quad (4.9)$$

ahol L az elektródák hossza. Amennyiben a kis $C_k^{(Olt.)}$ és nagy $C_N^{(Olt.)}$ mintázatok paramétereit behelyettesítjük a 4.9 egyenletbe az alábbi eredményekre juthatunk:

$$C_k^{(olt.)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (N-1)L}{2} \frac{K\left(\sqrt{1 - \left(\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{w}{s+w}\right)\right)^2}\right)}{K\left(\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{w}{s+w}\right)\right)} = \dots = 1,8 \text{ pF} \quad (4.10)$$

$$C_N^{(olt.)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (N-1)L}{2} \frac{K\left(\sqrt{1 - \left(\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{w}{s+w}\right)\right)^2}\right)}{K\left(\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{w}{s+w}\right)\right)} = \dots = 12,9 \text{ pF} \quad (4.11)$$

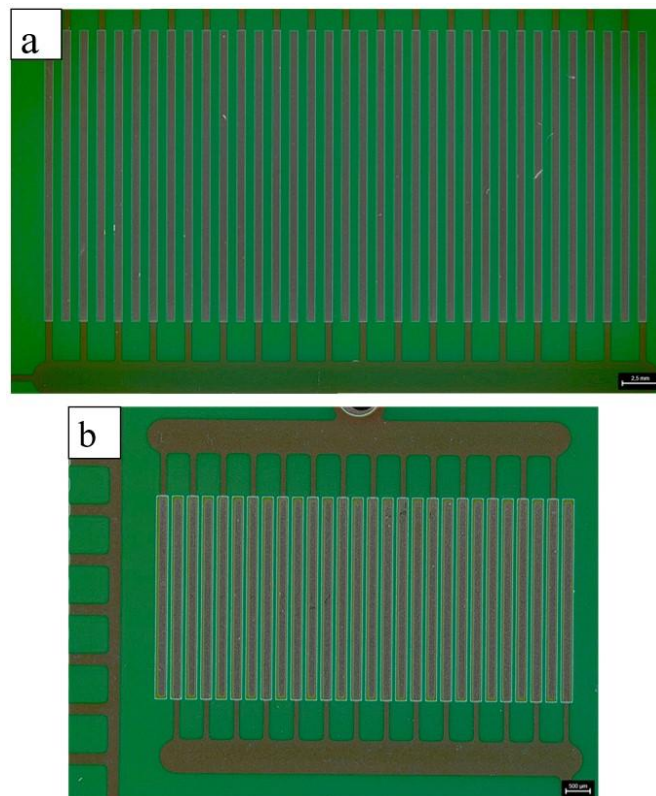
Ezt a módszert Igreja és társai gondolták tovább [109], és általánosították többrétegű rendszerekre [109], [110]. A számításokat numerikusan MATLAB környezetben elvégezve az eredmények egy olyan kétrétegű rendszerben melynek felső rétege nagyobb dielektromos állandójú anyag – például folyasztószer maradvány –, egyértelműen a számolt kapacitás növekedését mutatták. A modellszámítások eredményei összhangban vannak az 5. fejezetben mért eredményekkel, és a nagyságrendek is megegyeznek. A különbségek származhatnak abból, hogy az Olthuis és Igreja féle modellek sem számolnak a kapacitás frekvencia függésével. A folyasztószerrel szennyezett felületen változó méretű és eloszlású réteg alakul ki. Az interdigitális struktúra felületén a folyasztószer nagyméretű szerves molekulái miatt feltételezhetően komplex és összetett határfelület keletkezik. A szennyezett mintán kialakuló határfelületi hatások kumulatívák és a dielektromos tulajdonságok frekvencia függő megváltozását eredményezhetik. Például a Maxwell-Wagner polarizációból adódó relaxációs folyamatok [111] okozhatnak alacsony frekvencia tartományon nagyobb különbségeket. Ezen kívül a valós méretek nominálistól való eltérése, az IDS mintázatok minimálisan eltérő kialakítása és környezete is okozhat a modelltől való eltéréseket.

5. Folyasztószer maradványok detektálása impedancia méréssel

A szennyezettség detektálása kulcsfontosságú lehet a modern elektronikai gyártástechnológiában. Ebben a fejezetben egy olyan gyors, nem destruktív módszert vizsgálunk mely alkalmas lehet a felületi ionos maradványok detektálására interdigitális struktúrák impedancia és kapacitásmérése segítségével.

5.1 Vizsgálati módszerek

A méréseket a 4. fejezetben bemutatott tesztpanel SIR mintáin (IDS) végeztem, immerziós ón (ImSn) bevonattal ellátott felületeken (5.1. ábra).



5.1. ábra: A „nagy IDS” 20 mm × 41,2 mm volt, az elektródák távolságának mérete 0,73 mm (a), a „kis IDS” pedig 4 mm × 8,5 mm, az elektródák távolságának mérete 0,15 mm (b)

Az impedancia mérésére szolgáló mintázat ugyanaz volt, mint a SIR tesztekénél. Az egymással szemben lévő vezetőpárok közötti rész forrasztásgátló maszkkal volt borítva. A vezető sávok alapanyaga réz (~35 μm) és a legfelső réteg ón (~1,5 μm) volt. A gyenge szerves savakat tartalmazó folyasztószerrel történő szennyezés alkalmazása előtt a tesztpanelek vadonatújak voltak, eredeti csomagolásban. A paneleket a kísérletek során IF2005C típusú folyasztószerrel (szilárdanyag-tartalom $3,3 \pm 0,3\%$) szennyeztem. Az alkalmazott kereskedelmi folyasztószer savszáma 24-30 mg KOH/g, a névleges pH-

értéke 4,4. A csepp térfogatát a vizsgált mintázatok felületére korlátoztam, ami 0,178 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ felületi szennyezést eredményezett. Egy sor előre szennyezett tesztpanel 140 °C-on, 120 másodpercig hőkezelésnek tettem ki, hogy szimuláljam a forrasztási folyamat előtti előmelegítés és aktiválás során nagy valószínűséggel tapasztalható hőmérsékletet. A gyártási folyamat során a forrasztás közelében a közvetett melegedés reprodukálására alkalmaztam ezt a hőkezelést. A panelek nem estek át újraömlésztéses forrasztási folyamaton.

5.1. táblázat: A vizsgálatok kísérlettervezési táblázata. A „+” jel azt mutatja, hogy a kezelési/mérési fázist alkalmaztam a próbapanelen. A „-” azt jelenti, hogy ezt a kezelést nem alkalmaztam a panelen, vagy a panelt nem vizsgáltam a mérési fázisban

		Referencia					Teszt										
Panel		S2	S1	S1	S2	S2	S1					S2					
Vegyí ón bevonat, 2 mintázat		7	8	7	2	6	1	2	3	4	5	6	1	3	4	5	8
Fázis 1 (Eredeti)		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Szennyezés (flux)		-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Fázis 2 (Szennyezés után)		-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hőkezelés (140 °C; 120 s)		-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Fázis 3 (Hőkezelés után)		-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
SIR 40°C 90RH% 10V	0V (előfeszültség)	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
	10V (előfeszültség)	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Fázis 4 (SIR után)		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

5.1.1 Elektromos mérések

A méréseket 4 különböző fázisban hajtottam végre 6 panelen az 1-es sorozat (S1), és 5 panelen a 2-es sorozat (S2) esetében. Referencia méréseket végeztem mindkét sorozat esetében több panelen annak érdekében, hogy az egyes kezelések közötti esetleges nem kívánt hatásokat nyomon tudjam követni (lásd 5.1. táblázat). Az S1 és S2 sorozat próbáit eltérő időpontokban végeztem. Munkám során három független mérési módszert használtam az interdigitális struktúrák vizsgálatára:

Az Agilent 4284A precíziós LRC mérő 2V amplitúdójú AC jellel megtáplált tesztpanelről gyűjtötte a kapacitás/ellenállás-spektrumokat 20Hz-től 1MHz-ig C_P - R_P

ekvivalens áramköri modellt alkalmazva. A műszer bemeneti csatornái kételektrodás cella konfigurációban voltak csatlakoztatva. A spektrális adatokat mindkét mintázaton, minden kísérleti fázisban gyűjtöttem.

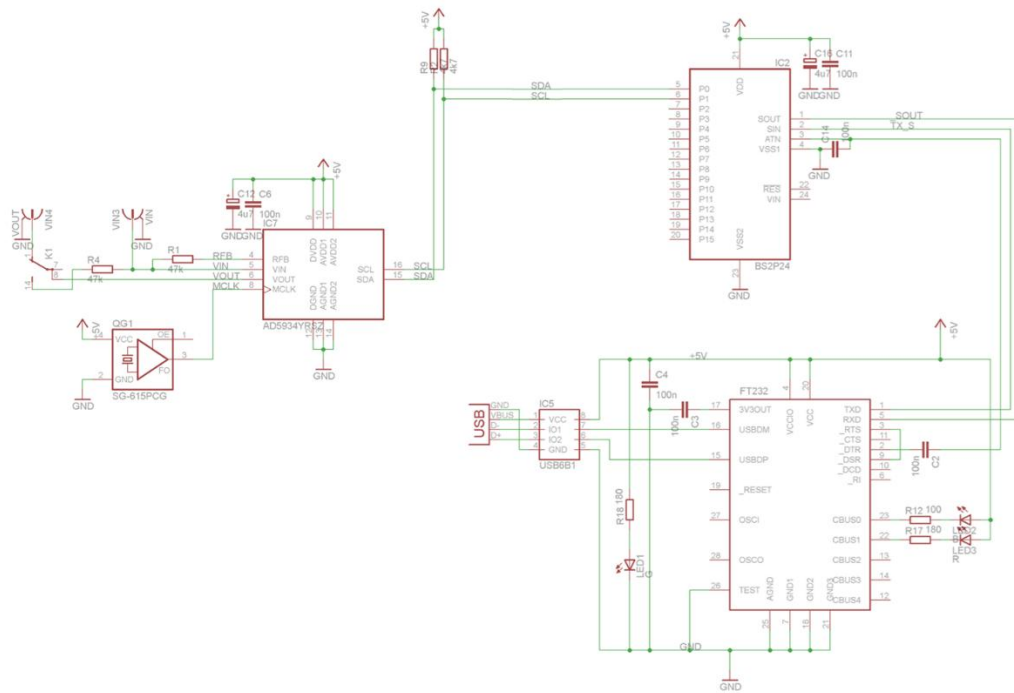
Az impedancia méréseket AD5934 Impedance Converter IC (IC) segítségével végeztem.

Az 1-es sorozat esetében az impedanciaméréseket „kis IDS” mintázatokon végeztem 5 kHz-es frekvencián. Míg a 2. sorozatban mindkét mintázatot mértem ezzel a módszerrel is. Az előzetes impedancia spektroszkópiai vizsgálatok alapján a jel alacsony frekvencián zajos a mérőrendszer tápegysége miatt (50 Hz és felharmonikusok). Magasabb frekvenciákon a szennyeződések hatása csökken. Az impedancia konverter IC 5 kHz-re lett kalibrálva, és ehhez a tartományhoz lett optimalizálva a mérőáramkör is.

A kapacitás mérését egy komplex impedancia mérésre kifejlesztett integrált áramkör segítségével oldottuk meg (5.2. ábra). Az adatgyűjtő elektronika úgy lett kialakítva, hogy más jellemzők vizsgálatára is alkalmazható legyen (vezetés, pH, hőmérsékelt stb.), de kutatásim során kizárólag a komplex impedancia és kapacitásmérésre kialakított részegységgel foglalkoztam. Az impedancia konverter IC-t alkalmazó konstrukció a jóval drágább, ipari mérőberendezéseket hivatott kiváltani.

Az adatgyűjtő egység elektronikája ANALOG DEVICES gyártmányú, AD5934 típusú impedancia konverter IC köré épül, amely az interdigitális struktúra komplex impedanciájának méréséért felel (5.2. ábra). A gerjesztő jel amplitúdója négy lépcsőben állítható a 2,98 V és 0,298 V közötti tartományban. Az IC 12 bites felbontás mellett 250000 konverzióra képes másodpercenként. A konverter IC méréstartománya 1 k Ω -tól 10 M Ω -ig terjed, ebben az intervallumban 0,5% pontosságra képes. A mérési frekvencia 0,1 Hz felbontással állítható be, az 1 Hz – 100 kHz tartományban. Az áramkör mikrovezérlővel programozható, a kommunikáció I²C interfészen keresztül valósítható meg.

A BASIC Stamp 2p24 típusú mikrovezérlő a nyers mérési adatokat egy PC-nek adja át, amely az adatfeldolgozást és a mérési eredmények grafikus megjelenítését végzi. A BASIC Stamp mikrovezérlő egy PBASIC nyelven írt kódot hajt végre. A PC és a mikrovezérlő közötti kommunikációt egy FT232RL típusú, USB-UART interfészen keresztül valósul meg. A kétirányú kommunikáció a PC által elküldött vezérlő karakterből és a mikrovezérlő által erre adott válaszból áll. A panel tápellátása ugyancsak a PC USB portjáról történik.



5.2. ábra: Az adatgyűjtő elektronika komplex impedancia mérésért felelős részének kapcsolási rajza

Az adatgyűjtő modul PC-hez történő csatlakoztatása után a Windows operációs rendszer automatikusan felismeri az RS-232 – USB átalakítót, és telepíti a szükséges meghajtóprogramot. Ezek után a feltelepített virtuális soros porton keresztül zajlik a kommunikáció a LabVIEW program és az adatgyűjtő egység között.

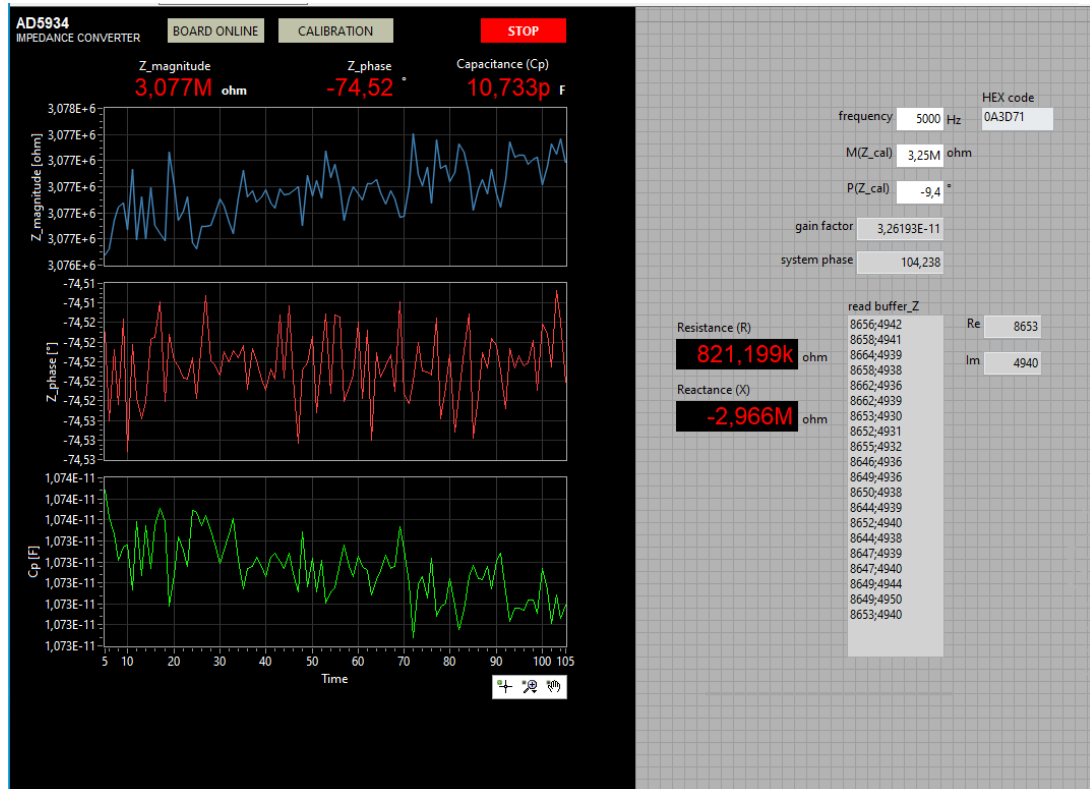
Ahhoz, hogy az AD5934 impedancia konverter áramkör mérésre kész állapotba kerüljön, számos regisztert kell feltölteni a megfelelő értékkel. Ezek közé tartozik a start frekvenciát tároló regiszter, amelyet a precíziós LRC mérővel végzett mérések alapján 5 kHz-re állítottam. Az IC lehetőséget nyújt több frekvencia pont beállítására, de ezt a funkciót nem használtam, és az impedancia mérést csak egy frekvencián hajtottam végre.

Az IC működéséből következően a mérések előtt ismert impedanciájú áramköri elemmel történő kalibrációra van szükség. Ehhez a tesztpanelen kialakított interdigitális struktúrák impedanciájának nagyságrendjébe eső ellenállást használtam. A rendszer 20 mérés átlaga alapján kapott magnitúdó, fázis és kapacitás értékeket jelzi ki és jeleníti meg a grafikonon.

Az adatgyűjtő egység és a tesztpanel összekapcsolása élcsatlakozóval történt. A megfelelő csatlakozás biztosítása érdekében aranyozott érintkezőkkel rendelkező STS20P típusú precíziós foglalatot alkalmaztam. Ezzel az elrendezéssel a panelek cseréje és a tesztpanelen elhelyezett IDS-kivezetések közötti váltás egyszerű, megbízható és kizárható a hibás csatlakoztatás kockázata.

Az impedancia konverter IC-hez készített LabVIEW szoftverrel (Flex_02.vi) rögzített frekvencián, szinuszos gerjesztő jelet alkalmazva lehet mérni a csatlakoztatott kapacitív áramkör komplex impedanciáját, és az abból származtatott kapacitást (párhuzamos helyettesítő kapcsolás szerint). A program felületét a 5.3. ábra mutatja be.

Az 5 kHz-es mérés reprezentatív és időhatékony alternatívát ad a széles spektrumú méréssel szemben, és abba a tartományba esik, ahol a szennyezés okozta differencia a legstabilabban detektálható.

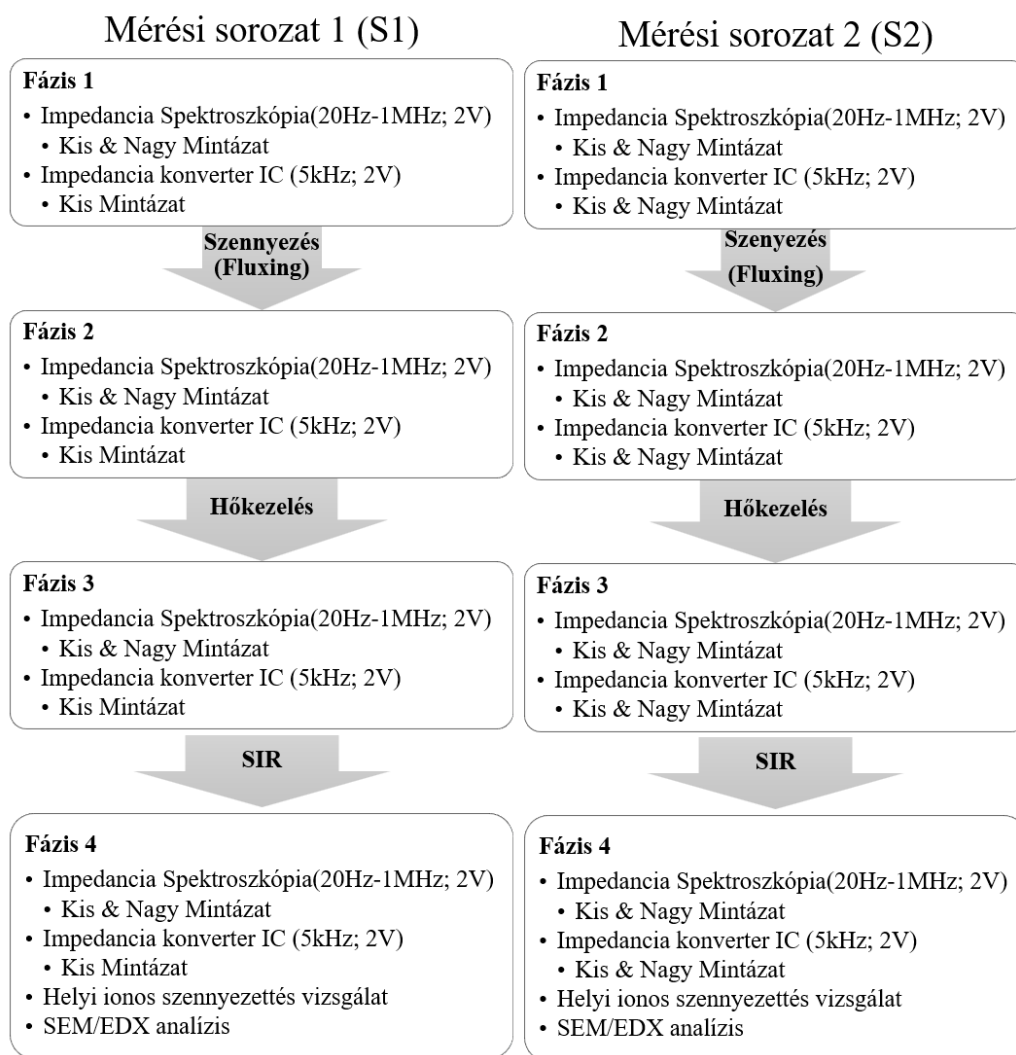


5.3. ábra: Az Impedancia konverter IC mérésekhez LabVIEW programban készült kezelőfelület

A felületi szigetelési ellenállást SIR-mintázatokon mértem, amelyek folyaszószszerrel előzetesen szennyezettek voltak és páras/meleg környezetnek voltak kitéve egy klímakamrában. A páratartalom 90RH% volt, míg a hőmérsékletet állandóan 40 °C-on tartottam a kísérlet során. Az áramerősséget egy *AutoSIR2+* egységgel az alkalmazott feszültség függvényében mértem, ami 10 V volt. A méréseket 1 héten át végeztem. Az 1-es és 2-es sorozat esetében a paraméterek megegyeztek, kivéve, hogy utóbbi esetben a 10 V-os előfeszítési feszültséget a teljes teszt során alkalmaztam.

A felület *lokális ionos szennyezettsége* könnyen meghatározható a korrozivitási index (C.I.) [3] segítségével, amely egy destruktív, nem megismételhető teszt.

Az 5.1. táblázat a kísérlet tervezési (DOE) tábláját mutatja, míg az 5.4. ábra a kísérlet folyamatábrája.



5.4. ábra: A kísérletsorozat folyamatabrája

5.2 Mérések kiértékelése

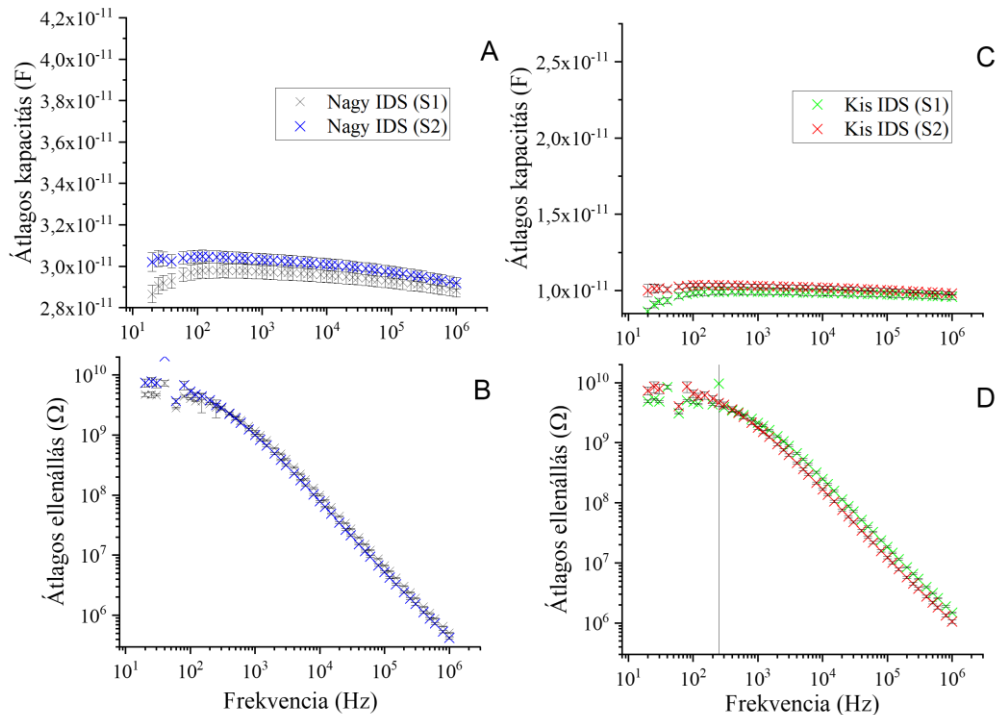
5.2.1 Impedancia spektroszkópia vizsgálatok

A Fázis 1 során minden vizsgálatban résztvevő vegyi ón bevonatú kis és nagy IDS mintázat esetében megmértem az interdigitális struktúrák kezdeti kapacitás és ellenállás értékeit a teljes (20 Hz-1 MHz) frekvencia tartományon. A mérési eredmények igazolták, az R_p - C_p helyettesítő kapcsolás választását 2V amplitúdójú szinuszos bemenő jel esetén. Az interdigitális mintázat konzekvens viselkedést mutatott minden esetben.

Az ismételhetőségi és reprodukálhatósági vizsgálatok alapján a kezdeti állapotban vizsgált eredeti minták szórása 1% alatti, ezért az egyes kísérleti fázisok jól jellemezhetők a tesztminták kapacitás- és ellenállásértékeinek átlagával. A mért kapacitás értékeket a Fázis 1 (eredeti) referenciaértékekkel normalizáltam, hogy kompenzáljam a környezeti tényezők hatását és a panelek közötti eltéréseket.

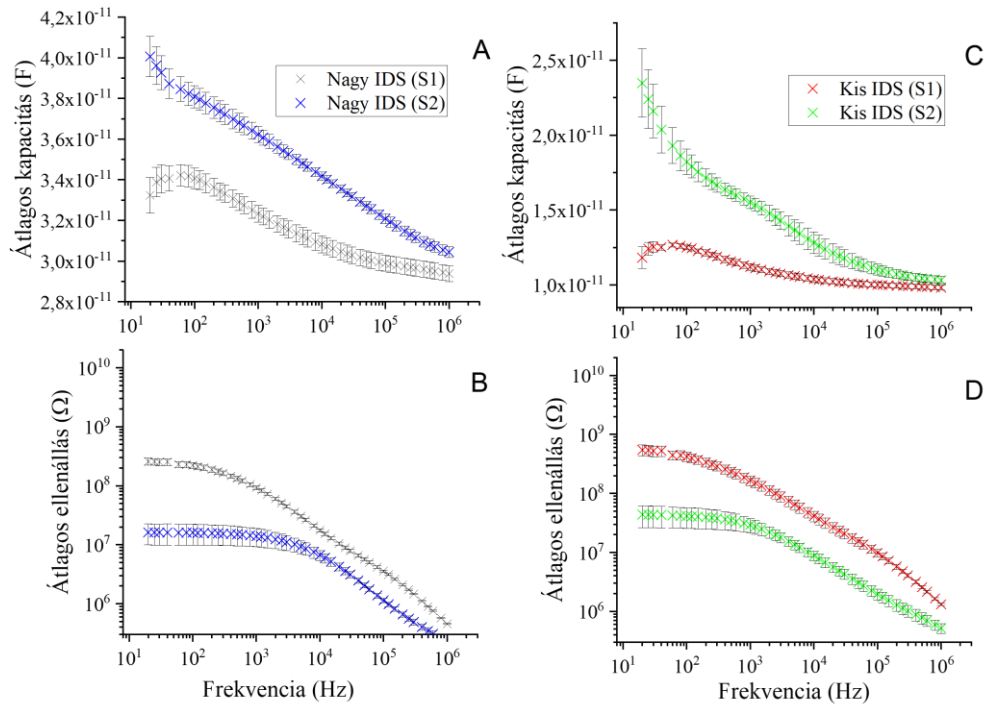
Az interdigitális struktúrák statisztikai vizsgálata alapján a referencia minták mért kapacitásértékeiben nem tapasztaltam szignifikáns változást a kísérlet teljes időtartama alatt. Állandó hőmérséklet és páratartalom mellett a vizsgált értékekben nem volt jelentős időfüggés megfigyelhető. A mért impedanciák értéke a panelek állapotának tulajdonságaitól függött. A vizsgált minták közötti szórást többnyire a minták egyedi, kismértékű eltérései határozzák meg.

Az S1 és az S2 mérési sorozatok Fázis 1-ben felvett spektrumai között nem volt kvalitatív eltérés (5.5. ábra). A kezdeti szakaszon, alacsony frekvenciákon az ellenállás dominál, a kapacitás érték növekszik. Az 50 Hz környéki tartományon mért adatokban gyakran kiugrások figyelhetők meg, amit a tápfeszültségből adódó zaj okozott. Ez a zavaró hatás több esetben, váltakozó mértékben, főleg az ellenállás értékében megfigyelhető. Ez az alacsony frekvencia tartományban (500 Hz-ig) is észlelhető volt mindkét mintázat mérése során. A kapacitás értékek az alacsony frekvencia tartományon növekedést mutatnak, majd a magasabb frekvenciákon folyamatos csökkenés volt megfigyelhető.



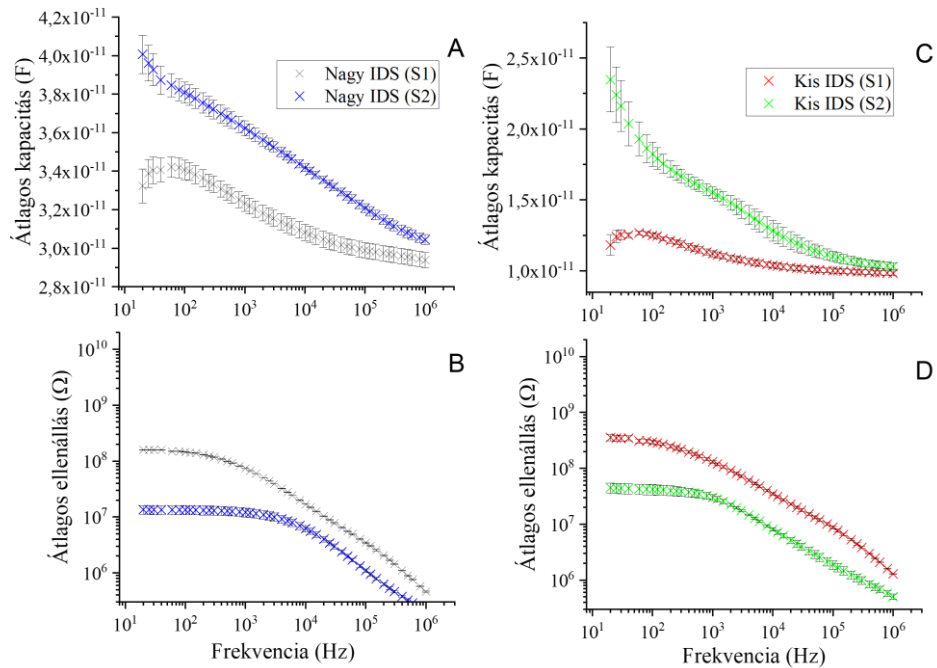
5.5. ábra: Átlagolt kapacitás (A; C) és ellenállás (B; D) spektrumok (Fázis 1: eredeti állapot)

A Fázis 2 előtt a vizsgált felületeket a korábban definiált, $0,178 \mu\text{l}/\text{cm}^2$ mennyiségű folyasztószerrel szennyeztem. A mérés menete ettől eltekintve nem tért el a Fázis 1-ben leírtaktól. A spektrumokat azután vettem fel miután a folyasztószer oldószere teljesen elpárolgott a felületről. A folyasztószer maradványok hatására az ellenállás kis frekvencián nagyságrendekkel kisebb, mint a Fázis 1 esetében. Az ellenállás spektrum jelalakja hasonlít a Fázis 1 esetében mért adatokhoz. A kapacitás maximumát a 200 Hz környéki frekvenciáig éri el. Az S1 és az S2 közötti különbségek feltételezhetően abból adódnak, hogy a folyasztószer szárazanyag tartalma eltérő volt annak ellenére, hogy ugyanazt a típust és mennyiséget használtam. Ez a folyasztószer felhasználhatósági idejének nyomon követését, és a rendszeres monitorozási igény szükségességét veti fel az ipari alkalmazások esetében. A probléma az 5.2.2 fejezetben még tárgyalásra kerül. A csúcserték mindkét sorozat esetében nagyobb volt, mint a Fázis 1 esetében. A folyasztószerrel kezelt és az eredeti állapotú interdigitális struktúrák kapacitásai közti különbség a frekvencia növekedésével csökkent (5.6. ábra)



5.6. ábra: Átlagolt kapacitás (A; C) és ellenállás (B; D) spektrumok (Fázis 2: folyasztószer szennyezés után)

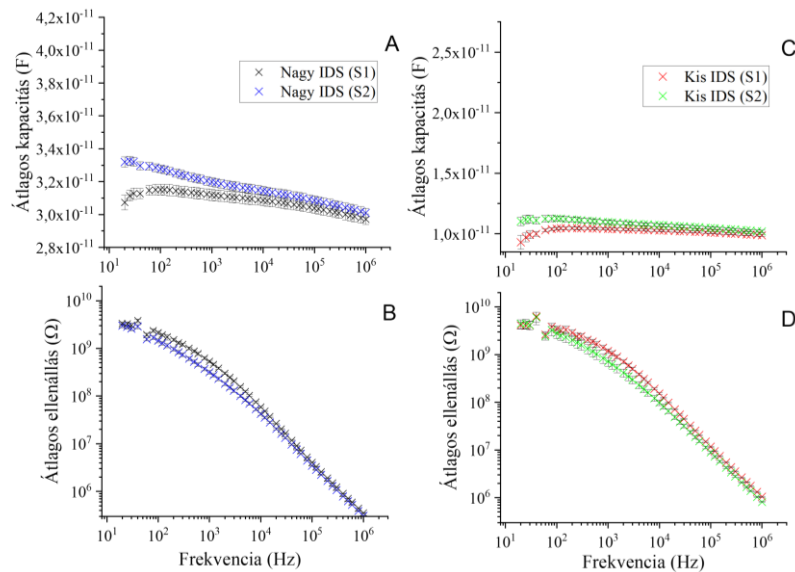
A Fázis 3 spektrumait (5.7. ábra) azután vettem fel, hogy a panelek hőkezelésen estek át. A Fázis 3 mérései során már nem volt eltérés a minták hőmérsékletében a korábbi fázisokhoz képest.



5.7. ábra: Átlagolt kapacitás (A; C) és ellenállás (B; D) spektrumok (Fázis 3: hőkezelés után)

A folyasztószer maradványok részben aktiválódtak és a gyenge szerves sav maradékok bomlása is megkezdődött. Minőségi eltérés a kapacitás spektrum jelalakjában nem látszik, azonban az ellenállás értékek a Fázis 2 mérésekhez viszonyítva minimálisan változtak főleg kis frekvenciákon, de meg sem közelítik a kezeletlen, tiszta állapotot.

Az utolsó méréseket (Fázis 4) a klíma- és SIR teszt után végeztem. A szennyezett mintázatok 1 héten át nedves környezetnek voltak kitéve és emellett 10 V nagyságú DC feszültséget alkalmaztam. A spektrumokat az 5.8. ábra mutatja.



5.8. ábra: Ellenállás és kapacitás spektrumok (Fázis 4: klímateszt után)

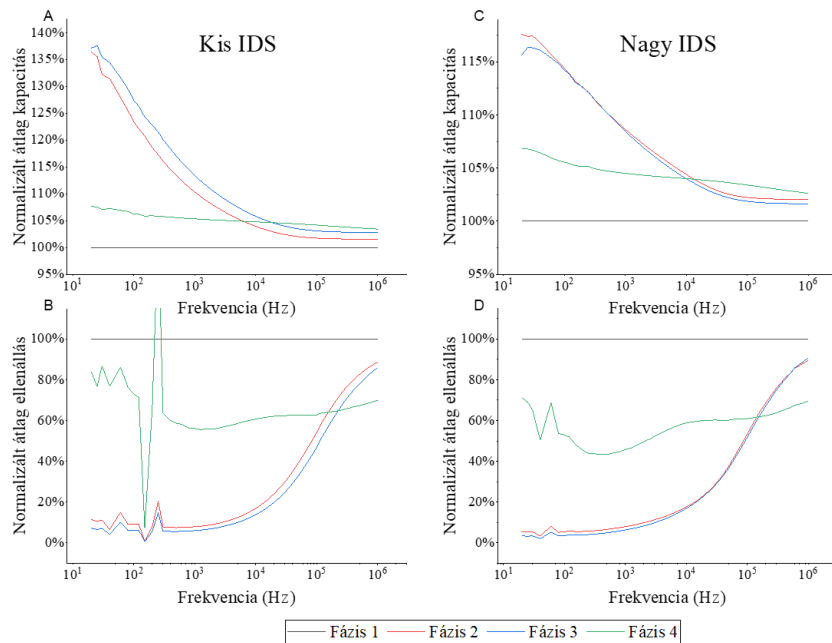
A nedvesség hatására feltételezhetően megindult a maradványok oldódása és szétterülése a teljes felületen. Ez indokolhatja a kiindulási (Fázis 1) spektrumhoz hasonló jelalakot, mivel a folyasztószer maradvány már nem csak az interdigitális struktúrák felületére koncentrálódik. A térerősség hatására megjelent az elektrokémiai migráció, ami miatt a fegyverzetek közötti effektív távolság (d) csökkenhet, és ez a 4. fejezet alapján számolt modellek szerint a kapacitás növekedését eredményezheti.

Annak érdekében, hogy a kezelések hatását és a különböző fázisokban mért spektrumokat össze lehessen hasonlítani, az egyes fázisokban mért azonos állapotú IDS-ek eredményeit átlagoltam és a spektrumokat a Fázis 1 értékével normalizáltam. Az így kapott normalizált átlag kapacitás és ellenállás értékeket az S1 esetében a 5.9. ábra az S2 esetében a 5.10. ábra szemlélteti.

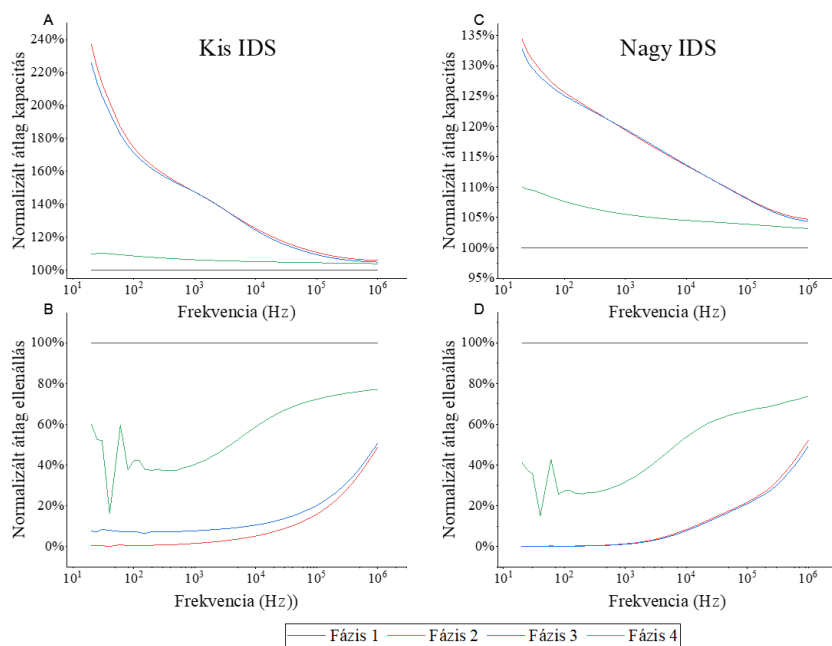
Egyértelműen látszik, hogy a trendek mindkét IDS esetében és mindkét mérési sorozatban hasonlóak. A kezdeti állapothoz (Fázis 1) képest a folyasztószer szennyezés hatására (Fázis 2) az ellenállás értékek drasztikus csökkenése és a kapacitás értékek intenzív növekedése figyelhető meg. A hatás erősen frekvenciafüggő és a 10 kHz alatti

tartományon domináns. A folyasztószer szennyezés nem változtatja meg olyan radikálisan az elektronikus tulajdonságokat magas frekvenciákon, ami megegyezik J. Nguyen eredményeivel [112].

A hőkezelés után (Fázis 3) csak minimális eltérés figyelhető meg a spektrumokban. Fázis 4 mérésénél látható, hogy a hatás mérséklődik, de az értékek nem térnek vissza a kiindulási állapotba.



5.9. ábra: Az 1. mérési sorozat minták impedancia (kapacitás, ellenállás) spektruma. A „Fázis 1” vonalak a nem szennyezett „ideális” viselkedést mutatják



5.10. ábra: A 2. mérési sorozat minták impedancia (kapacitás, ellenállás) spektruma. A „Fázis 1” vonalak a nem szennyezett „ideális” viselkedést mutatják.

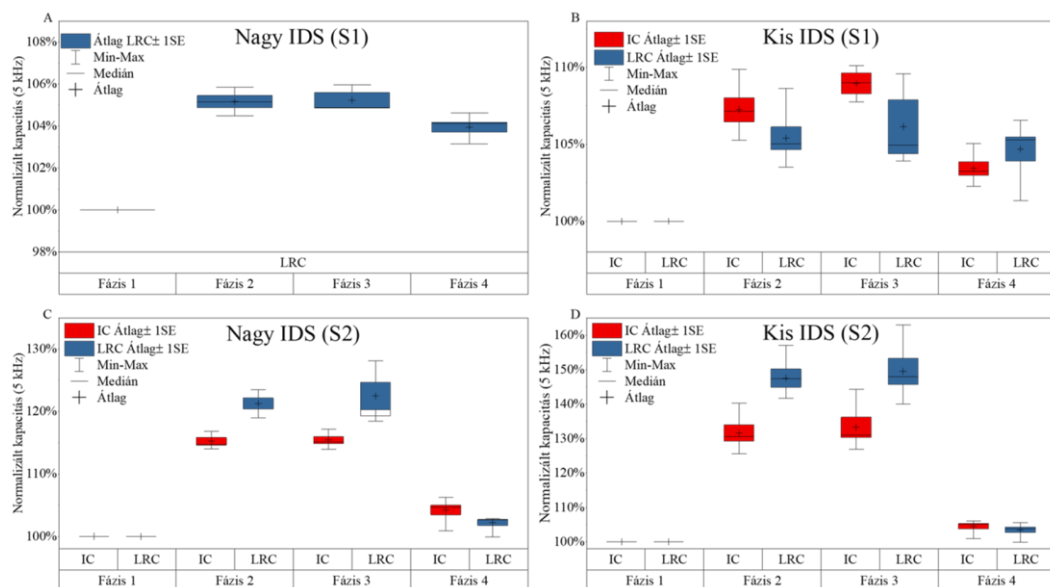
5.2.2 Impedancia konverter IC mérések

Az LRC mérésen alapuló széles frekvenciatartományon végzett vizsgálatok elemzése egyértelműen kimutatja a folyasztószer maradványok jelenlétét és következtetni lehet a felület szennyezettségi állapotára. A módszer ipari alkalmazhatósága azonban a nagy eszközígény, és az időigényes mintavételezés miatt kérdéses. Egy precíziós LRC mérer több millió forintos tétel és az adatok kiértékelése sem triviális. Egy autóiipari tisztaságvizsgálati módszernek célszerű olyan költséghatékony, gyors, de megbízható eljárást alkalmazni, mely akár a gyártás helyén (inline) azonnal elvégezhető és értékelhető.

Ezért fontos volt a kutatásom szempontjából, hogy egy költséghatékony, gyors eszköz, mint a *AD5934 Impedance Converter IC*-re épülő áramkör milyen mértékben képes a folyasztószer maradványok detektálására?

A teljes spektrumokat vizsgálva megállapítható, hogy az alacsony tartományokban a tápfeszültség zavaró hatása, valamint az ettől feltételezhetően nem független relatív nagy szórás miatt célszerű az 1 – 10 kHz közötti tartományban vizsgálni. Az 5.4. ábra alapján minden fázist IC méréssel is vizsgáltam.

A konverter IC módszer és az LRC módszer eredményei hasonló trendeket mutatnak 5 kHz frekvencián. A minták viselkedése minden fázisban következetes volt (5.11. ábra).



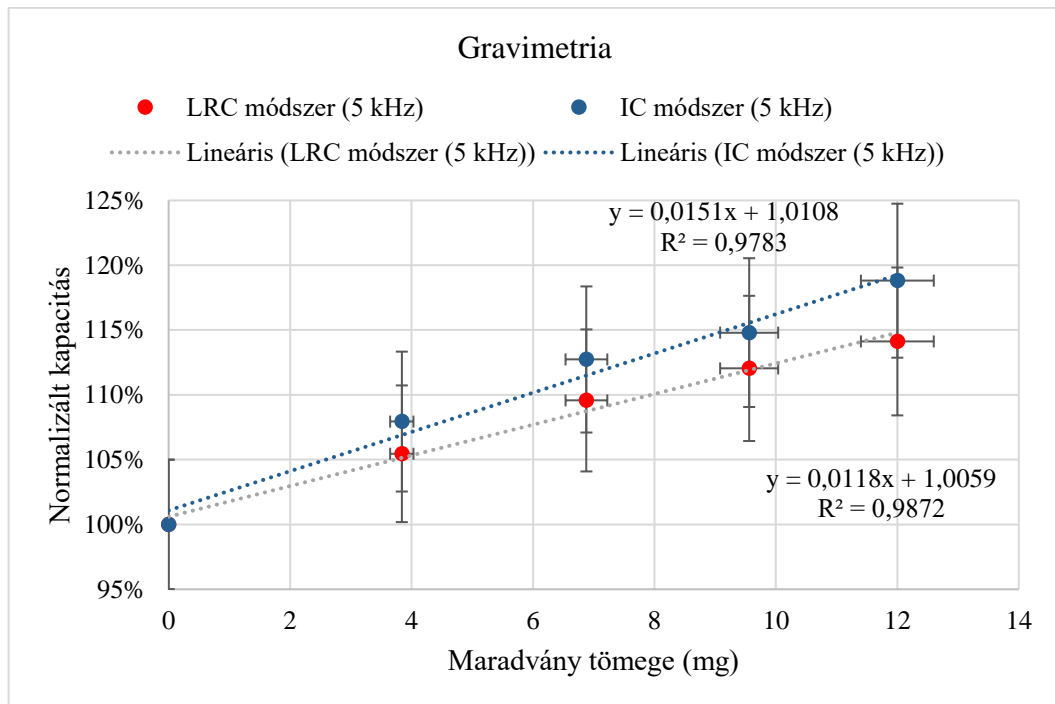
5.11. ábra: Az LRC és az IC mérések összehasonlítása

A mért ellenállás csökken, a kapacitás pedig növekszik alacsony frekvenciákon a maradékok miatt (Fázis 2). A felületek elektromos tulajdonságai is megváltoznak. A hőközlés minimális hatással van az 5kHz frekvencián mért értékekre (Fázis 2) A SIR és

a tárolás utáni eredmények visszarendeződést mutatnak, bár a nedvesség és a páralecsapódás elősegíthette a folyasztószer eloszlását. Az ionvándorlás valószínűsége megnőtt, a maradék nyomait a Fázis 4 méréseiben IC mérésekkel is kimutattam.

A folyasztószerrel kezelt mintázatok (Fázis 2) esetében nem elhanyagolható a szennyeződés-adagolás bizonytalanságából adódó szórás, de még ebben az esetben is minimálisak a minták közötti eltérések a fázisok közötti változások mértékéhez képest.

A gravimetriás vizsgálatok során (5.12. ábra) lineáris összefüggést mutattam ki a kísérletek szempontjából releváns tartományon a felületre felvitt száraz maradék tömege és a folyadék térfogata között. Ezen túlmenően a vizsgált tartományban korreláció állapítható meg a kétféle kapacitás- mérés eredménye között azonos váltakozó feszültségen (2V) és 5kHz frekvencián. A két módszerrel mért kapacitásértékek segítségével egyértelműen azonosíthatók a szennyezettségi állapotok közti különbségek.

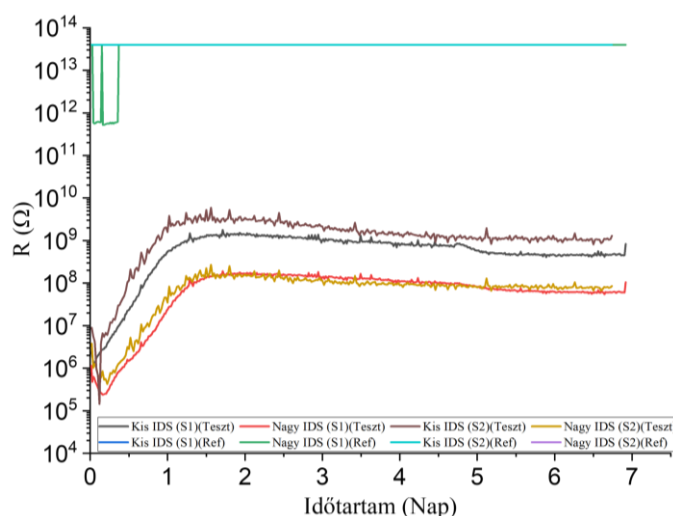


5.12. ábra: Gravimetriás és kapacitásmérés eredményei

5.2.3 „Klasszikus” vizsgálati módszerek

Az előbbieken bemutattam, hogy az impedancia, valamint kapacitás mérésen alapuló módszer hatékony a maradványok detektálásában. Fontos megbizonyosodni arról, hogy az iparban elterjed, többségében szabványosított módszerek igazolják-e a szennyezés jelenlétét. Mivel ezek a tesztek a kapacitásméréssel ellentétben nem ismételhők, mert befolyásolhatják a minta állapotát, a kísérleti terv szerint a kísérletsorozatok utolsó lépéseiként végeztem őket.

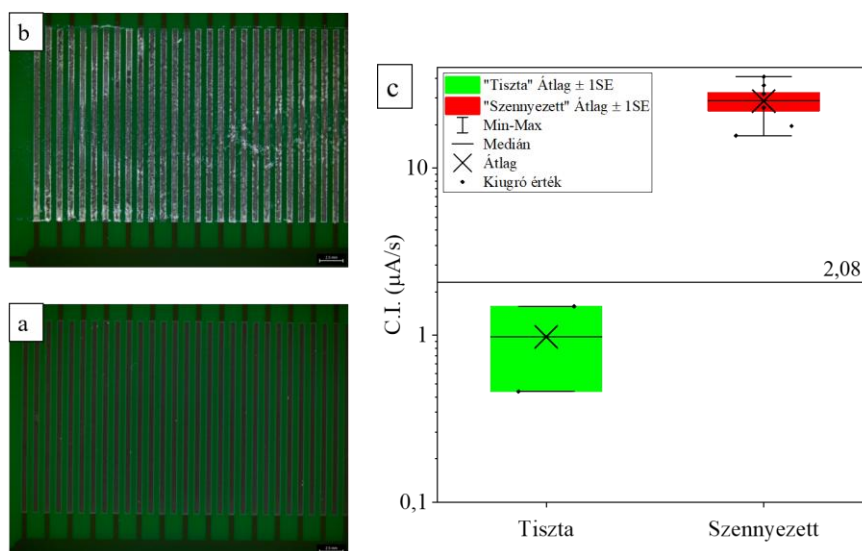
A SIR tesztre (5.13. ábra) a Fázis 3 után került sor. A folyasztószerrel szennyezett minták többsége nem érte el a 100 M Ω felületi ellenállást. Az első 12 órában minden szennyezett esetben hirtelen ellenállás esés után mérsékelt emelkedés volt megfigyelhető, bár ez a tendencia néhány nap múlva megszűnt. A vizsgálati minták ellenállása 10⁷-10⁹ ohm között stabilizálódott, és nem érte el a tiszta referenciaminták felületi szigetelési ellenállását. Az 1. és 2. sorozat teszteredményei között nem volt szignifikáns különbség. A SIR teszt során a 10 V-os kondicionáló potenciál hatása a 2-es sorozat esetében nem volt kimutatható.



5.13. ábra: SIR teszteredmények 40°C, 90RH%, 10V (példák).

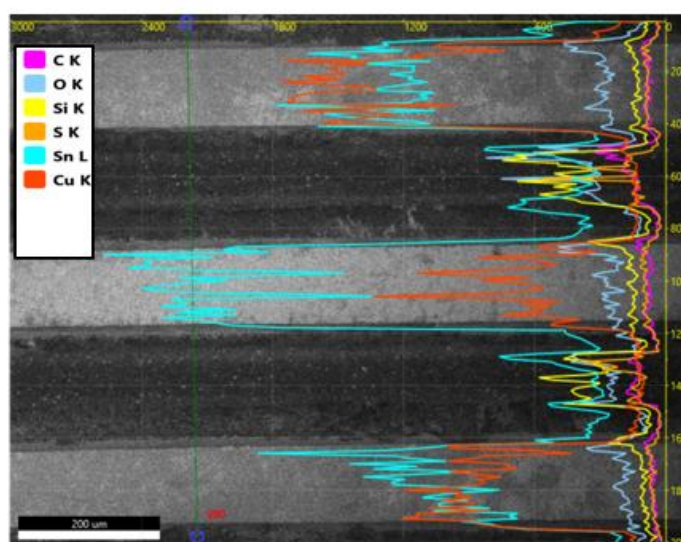
A SIR teszt utáni mikroszkópos vizsgálat fehér maradványokat mutatott a folyasztószerrel szennyezett területeken. A maradvék nem egyenletesen oszlott el, hanem a vezetők élénél halmozódott fel. Egyes esetekben a fehér maradványok két vezetőt is összekötöttek, vagy megsértették a minimális elektromos szigetelési távolságot.

Az ionos szennyeződés szintjét a destruktív C3/C.I. módszer segítségével vizsgáltam. A referenciaminták „tiszta”, míg a szennyezett minták rendkívül „koszos”, limit feletti értéket mutattak (5.14. ábra).



5.14. ábra: Nagy IDS optikai mikroszkópos felvételei a referencia (a) és folyasztószerrel szennyezett (b) mintáról a kísérlet után. A „Nagy IDS” tisztasági teszt eredményei a bal oldalon láthatók. Az elfogadási kritérium 2.08. A korróziós index (C.I.) a P/F határérték felett volt minden szennyezett területen (c)

A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek alapján az ionvándorlás ténye nyilvánvaló volt annak ellenére, hogy kifejlett átvezető dendritek nem voltak megfigyelhetők a forrasztásgátló maszk felületén. Az ónban gazdag elektróda melletti részben néhány kisebb dendrit volt látható, a másik oldalon pedig megnövekedett mennyiségű maradvány halmozódott fel. Az EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) vonalanalízise bizonyítja, hogy a felületi ónbevonat vastagságeloszlása megváltozott a különböző potenciálú elektródák között (5.15. ábra). Ezek a megfigyelések alapvetően hasonló dinamikára utalnak, mint a 6. fejezet szimulációs eredményei.



5.15. ábra: „Kis IDS” SEM-BSE képe a kísérlet után, és EDS vonalmenti elemzés. A vízszintes tengely az intenzitást (beütésszám) mutatja, a függőleges tengely pedig a mérési pontokat mutatja a vonal mentén

5.2.4 Összefoglalás

Az etanol alapú „tisztítást nem igénylő” (no-clean) folyasztszerek részeként használt WOA-k (OR/LO) elektrokémiai vizsgálata egyértelmű összefüggést mutatott ki a maradékok jelenléte és a mért impedancia értékek között. A klímavizsgálatok és a tárolási teszt után a folyasztszerek maradványokat ionos szennyeződés mérésével, vizuálisan és egyenáramú SIR tesztekkel is kimutattam.

„No-clean” folyasztszerek alkalmazása mellett az összes szennyezett minta kapacitásában mérhető változást figyeltem meg, amelyet a réz által meghatározott forrasztási felületek (Copper Defined Pads) réseiben felhalmozódott WOA maradványok okozhatnak.

Az impedancia spektrumok elemzésével kimutatható a kapacitás jelentős növekedése és az ellenállás csökkenése. A hatás különösen alacsony frekvenciákon szignifikáns.

A hőkezelt minták a csak részben aktivált folyasztszerek maradványok miatt hasonló viselkedést mutatnak, mint a szobahőmérsékleten szárított minták. Magasabb frekvenciák esetén a hatás kevésbé volt jelentős.

Az impedancia IC-n alapuló kapacitásmérés 5kHz frekvencián a folyasztszerek okozta kapacitásváltozást ugyanolyan hatékonyan kimutatta, mint a precíziós LRC mérések. Ez lehetőséget ad a váltakozó áramú, kapacitásmérésen alapuló folyasztszerek maradvány detektálás ipari célú és költséghatékony alkalmazására.

A SIR teszt és a SEM-EDS eredmények azt mutatják, hogy a klímateszt során ónmigráció történt, de nem volt jellemző a kiterjedt dendritek képződése a forrasztómaszk felületén, inkább a vezető felületek közötti hézagokban.

Összességében az eredmények megerősítik, hogy a „tisztítást nem igénylő” folyasztszerekben használt WOA-k maradványai befolyásolhatják a panelfelületek elektronikus tulajdonságait. Ezért fontos lehet a folyasztszerek felhasználás minimalizálása [113], [114] vagy utótisztítási módszerek [115], [116] alkalmazása, amikor az elektronikának biztonságkritikus körülmények között kell működni.

6. Dendritképződés szimulációs vizsgálata

6.1 Modell és szimuláció

Hibrid szimulációs módszert alkalmaztunk, amelyben a program az ionok elektrodifúzióját Brown dinamikai részecske módszerrel szimulálja, ahol az ionok részecskéként sűrűlőve mozognak a mozgásegyenletek szerint. A dendrit ezzel szemben egy előre definiált rácsra épül, hogy számítógép időt takarítson meg.

6.1.1 Geometria és kölcsönhatások

A szimulált rendszer két párhuzamos fal (elektrodák) között helyezkedik el egymástól H távolságban. A katódon a kationok (Sn^{2+}) rekombinációja és a dendritképződés megy végbe. Ennek a felületnek az elektromos potenciálja kezdetben $U < 0$, ahol U a feszültség. Az anód H távolságban földelt ($U = 0$). A modellben erről a felületről a kationok oldódnak be a falak közötti elektrolitba. A rendszer homogén és a párhuzamos x és y dimenziókban, valamint periódusos peremfeltételek (PBC) érvényesek.

A falak közötti elektrolitot implicit-víz keretben modelleztük, ahol az ionok töltött gömbök, míg a víz közvetett háttér, mely a dielektromos állandó (ϵ), az ionok típusa (i) és azok diffúziós állandói (D_i) függvényeiként jelenik meg.

A $z_i e$ töltés által tapasztalt Coulomb-erő (z_i a vegyérték, e az egységtöltés) az \mathbf{r}_i pozícióban az \mathbf{r}_j pozícióban lévő $z_j e$ töltés által létrehozott elektromos mező hatására

$$\mathbf{f}_{ij}^C(\mathbf{r}_{ij}) = \frac{z_i z_j e^2 \mathbf{r}_{ij}}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r_{ij}^3} \quad (6.1)$$

ahol $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$, $r_{ij} = |\mathbf{r}_{ij}|$, ϵ_0 a vákuum és ϵ közeg dielektromos állandója.

Az ionok véges méretét egy rövid hatótávolságú taszító magpotenciál mellett vettük figyelembe, amelyhez Weeks-Chandler-Anderson (WCA) potenciált használtam. A WCA erő a következőképpen határozható meg

$$\mathbf{f}_{ij}^{WCA}(\mathbf{r}_{ij}) = \begin{cases} \mathbf{f}_{ij}^{LJ}(\mathbf{r}_{ij}), & \text{ha } r_{ij} < 2^{\frac{1}{6}} d_{ij} \\ 0, & \text{ha } r_{ij} > 2^{\frac{1}{6}} d_{ij} \end{cases} \quad (6.2)$$

ahol,

$$\mathbf{f}_{ij}^{LJ}(\mathbf{r}_{ij}) = 24 \varepsilon^{LJ} \left[2 \left(\frac{d_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{d_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right] \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} \quad (6.3)$$

a LJ erő, R_i az i típusú ion sugara (Pauling sugarak), és $d_{ij} = R_i + R_j$ (Lorentz–Berthelot keverési szabályok). Az energia paraméterként $\varepsilon^{LJ} = kT$ értéket vettük minden ionpárhoz. Hasonló taszító potenciál hat a falak és az ionok között.

Az elektrolit Sn^{2+} és Cl^- ionokból áll, amelyek koncentrációja előre meghatározott c . A folyasztószer maradékok hatását a dendritképződésre – ami elősegíti az ón oldódását, ezáltal növeli az Sn^{2+} ionok koncentrációját – a szimulációkban az előre definiált koncentráció növelésével vettük figyelembe. Az anionok a semlegesítő háttér szerepét töltik be, amelyek nem járulnak hozzá a dendritképződés dinamikájához (az anód közelében maradnak). A Cl^- választása tetszőleges volt.

6.1.2 Brown Dinamikai szimuláció

A részecskék pályái a Langevin-féle mozgásegyenletekből számíthatók ki [117]:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_i(t)) - m_i \gamma_i \mathbf{v}_i(t) + \mathbf{R}_i(t), \quad (6.4)$$

ahol

$$\mathbf{F}_i = \sum_j (\mathbf{f}_{ij}^C + \mathbf{f}_{ij}^{WCA}) + \mathbf{F}_i^{appl} \quad (6.5)$$

a szisztematikus erő, $-m_i \gamma_i \mathbf{v}_i(t)$ a súrlódási erő, $\mathbf{R}_i(t)$ a véletlenszerű erő, \mathbf{r}_i , \mathbf{v}_i , m_i és γ_i a helyzet, a sebesség, a tömeg és az i részecske súrlódási együtthatója. Az alkalmazott erőket (\mathbf{F}_i^{appl}) a falak és a dendritek fejtik ki a következő alfejezetben leírtak szerint.

A súrlódási együttható, γ_i , az Einstein-reláción keresztül kapcsolódik a diffúziós állandóhoz, D_i

$$\gamma_i = \frac{kT}{m_i D_i}. \quad (6.6)$$

ahol k a Boltzmann-állandó és T az abszolút hőmérséklet.

A dendritek növekedésével az ionok számára rendelkezésre álló térfogat csökken. A koncentráció tehát növekszik, ezért a következő alfejezetben leírt algoritmus szerint időről időre töröljük az ionokat.

6.1.3 A dendritek rács modellje

A BD szimuláció elég időigényes, ezért célszerű volt a dendrit növekedéshez egy egyszerűsített rácsmodellt alkalmazni. Azért, hogy két kation ne foglalhassa el ugyanazt a cellát, a teret akkora kockákra kellett osztani melynek testátlói megegyeznek a kation átmérőjével.

A katódon a hidrogéngáz képződése (vagy oldott oxigén redukciója) és az Sn^{2+} ionok redukciója ($\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$), míg az anódon a hidroxidionok oxidációja és az Sn feloldódása ($\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2e^-$) megy végbe.

Az egész folyamat tehát két egymást követő (külön kezelhető) lépésből áll, (1) az ionok minőségtől függő felszíni diffúziójából, és (2) az ionok redukciójából/oxidációjából az elektródán. A fémionok természetesen impliciten megtalálhatóak a BD szimulációkban.

Az elektródával történő találkozás során, ha egy ion belép egy olyan cellába, amely szomszédja egy már dendrithez (vagy a katód felületéhez) tartozó cellának, hagyjuk, hogy ez az ion 1-es valószínűséggel a dendrit részévé váljon, és ezt a cellát a dendrit részeként értelmezzük. (Megjegyzendő, hogy Illés és mtsai. [93] is ezt a lehetőséget alkalmazták.) Két cellát szomszédnak nevezünk, ha a kocka lapjának két oldalán vannak. Egy cellának tehát hat szomszédja van.

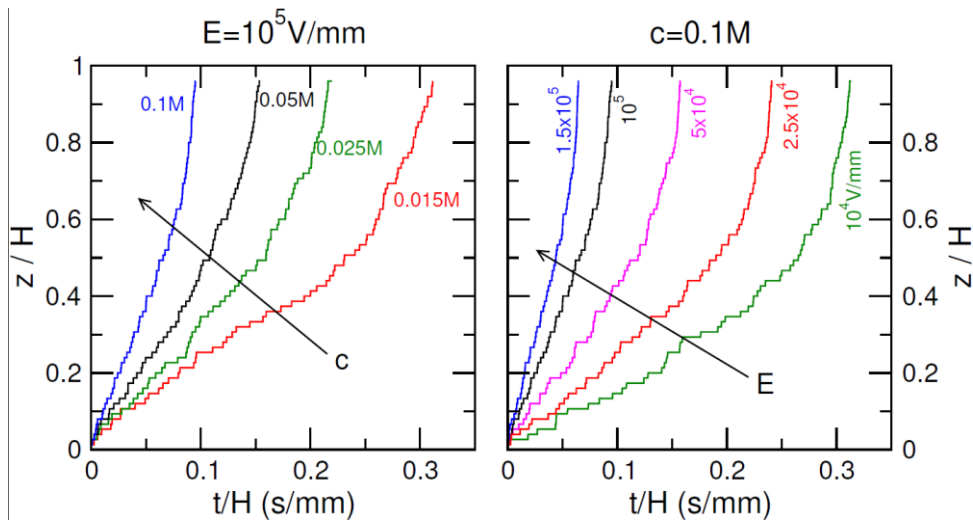
Abban az esetben, ha egy cella dendritként kerül rögzítésre, az ion eltűnik a cellából. Mivel a szimulációs cellában lévő ionok számát állandó szinten kell tartani, egy ion az elektrolitban a másik falhoz (az anódhoz) közel, véletlenszerűen kiválasztott pozícióban megjelenik.

6.2 Eredmények

A szimulációkban TTT-t (ez az az idő, amely ahhoz szükséges, hogy a dendritek elérjék és megérintsék az anódot) kapunk, mivel a TTD (detektálásig eltelt idő) nulla: amint elkezdjük a szimulációt, a dendritek növekedésnek indulnak, és néhányat gyorsan kiválasztanak a „szerencsések” közé, akik élvezik azt az előnyt, hogy hosszabbak a többieknél. Ennek két alapvető oka van. (1) Először a szimulációt állandó számú ionnal kezdjük, amely megfelel az előírt koncentrációknak. (2) Másodszer, a szimulációs

rendszer kicsi: $H = 10 - 16$ nm, $L = 4 - 6$ nm. Az $L \times L$ négyzet, amelyen a dendritek nőnek, kicsi, így gyorsan kialakulnak a „szerencsés” dendritek.

Mivel hosszabb ideig tart, amíg a dendrit egy szélesebb cellát átölel, célszerű a távolságokat a H -val normalizálni. Illetve érdemes leosztani az időt a H -val. Az a t/H érték, ahol a görbék elérik a $z/H = 1$ értéket, a TTT/H , ami a dendritek átlagos növekedési sebességének (H/TTT) reciproka.



6.1. ábra: Dendritnövekedés (a leghosszabb dendrit hossza H -val normalizálva) a t/H függvényében. A BD szimulációs eredmények különböző koncentrációkra (balra) és elektromos térerősségre (jobbra)

A 6.1. ábra a szimulációkkal kapott növekedési görbék koncentráció- és elektromos térerősségfüggését mutatja. A bal oldali panelen különböző koncentrációk ($E = 10^5$ V/mm), míg a jobb oldali panelen különböző elektromos mezők ($c = 0,1$ M) mellett láthatók az eredmények. A BD szimulációkban használt koncentrációk ($c = 0,01 - 0,1$ M) sokkal nagyobbak, mint a kísérletekben jelenlévők. Durand-Keklikianék munkájában [118] $c_{max} = 1,19 \times 10^{-6}$ M értéket közölnek.

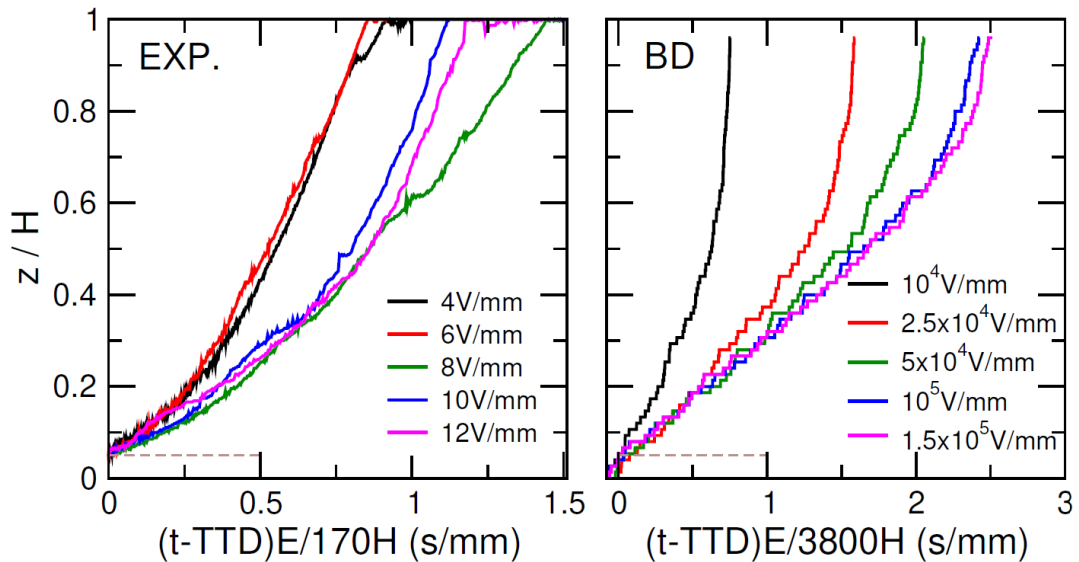
Sajnos az alacsony koncentrációk alkalmazása a részecskeszimulációkban problematikus, mivel ezek rossz mintavételt biztosítanak a kis részecskeszám és a nagy térfogat miatt, amelyet az ionoknak be kell járniuk a Brown-mozgásuk során.

Ezenkívül a szimulációkban használt elektromos mezők 4–5 nagyságrenddel nagyobbak, mint a kísérletekben használtak. Könnyebb jobb statisztikát szereztetni nagyobb hajtóerők segítségével a szimulációkban, így számítógép időt takaríthatunk meg. Nagy elektromos térben az ionok transzportját az erős tér által vezérelt ionvándorlás uralja, így a z/H és a t/H görbék stabilak, egyetlen szimuláció eredménye értelmes lehet. Alacsony elektromos mezőknél a transzportot a diffúzió uralja, és ezek a görbék nagy fluktuációt

mutatnak; sok párhuzamos szimulációra lenne szükség (a probléma további kutatás szükségességét veti fel).

A koncentrációfüggés (6.1. ábra bal oldala) azt mutatja, hogy alacsonyabb koncentrációknál a folyamat lassabb. Ez a tiszta és szennyezett panelre vonatkozó eredmények összehasonlításával kísérletekben is látható. Az elektromos mezőfüggés (6.1. ábra jobb oldala) azt mutatja, hogy a folyamat lassabb az alacsonyabb elektromos mezőkben.

A kísérletekből és szimulációkból kapott TTF (vagy TTT) értékek sok nagyságrenddel különböznek egymástól, mivel az elektródák távolsága (H) a kísérletekben sokkal nagyobb, mint a szimulációkban. 0,5 mm kontra ~ 10 nm. Ha azonban H -val normalizálunk, akkor ezt a különbséget körülbelül egy nagyságrendre csökkentjük. Egy másik jelentős különbség a kísérletek és a szimulációk között az elektromos tér erőssége.



6.2. ábra: Dendritnövekedés (a leghosszabb dendrit hossza) az idő függvényében, normalizálva H és E függőséggel. Az E függést lineáris függvényekkel való normalizálással kapjuk meg. A görbék az elektródarés 5%-ának elérésétől, azaz a TTD után láthatók. A bal és jobb oldali panelek a kísérleti, illetve a szimulációs eredményeket mutatják

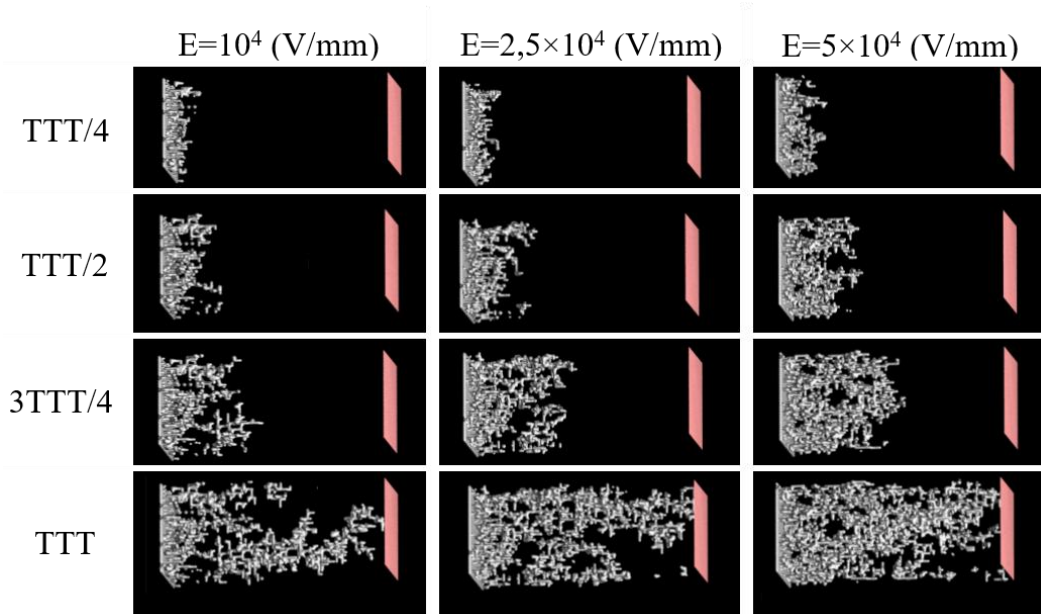
A térerősséggel történő normalizálás után a kísérleti és szimulációs eredmények közötti kvalitatív egyezés nyilvánvaló (6.2. ábra). Elvileg egy ilyen skálázási eljárás a koncentráció függvényében is lehetséges.

A TTT/ H kísérleti és szimulációs értékei között még mindig több mint egy nagyságrendű különbség van. Ezt a különbséget más tényezőknek okozhatják, például az, hogy a rendszerparaméterek (L , H , c , E) nagyságrendekkel eltérnek a szimulációban. Ezek valós mértékekhez történő igazítása feltételezhetően a TTT/ H -t növelné. Hatással van az eredményekre, hogy dendritek a modellben elektrosztatikusan inaktívak így a csúcshatás kísérletekben tapasztalt dendritnövekedést gyorsító hatása nem érvényesül.

Ez a viselkedés a 6.3. ábra szimulációkból nyert pillanatfelvételeken is látható.

Ahogy az elektromos tér balról jobbra növekszik, a dendrit tömegeloszlása megváltozik, kedvezve az igazán nagy dendriteknek, amelyek az oldalsó dimenziókba is kiterjednek, nem csak az anód felé. Az elektromos térerősség növekedésével a dendritek növekedése gyorsabbá válik.

Mivel a szimulációs cellánk viszonylag kicsi, a koncentráció túl nagy és az elektromos tér túl erős, ezek a pillanatfelvételek eltérnek a kísérletekkel kapott pillanatképektől. A minőségi tendenciák azonban hasonlóak.



6.3. ábra: Szimulációs pillanatképek $c = 0,1 M$ és változó elektromos tér (oszlopok) esetén különböző időpontokban a TTT-hez viszonyítva (sorok)

A nagy koncentráció miatt a dendritek növekedésnek indulnak az egész katódon. Nagy elektromos térnél gyakorlatilag kitöltik a szimulációs cellát. Egy idő után azonban az egyik dendrit túlnő a többin, és először éri el az anódot. Ez különösen jól látható a legkisebb elektromos térnél ($E = 10^4$ V/mm).

Az alaptrend az, hogy egy dendrit (BD) vagy pár dendrit (kísérlet) dominál a többi dendrit felett, és először éri el az anódot. Ahogy a dendritek közelednek az anódhoz, növekedésük felgyorsul.

6.3 Összegzés

Ebben a fejezetben bemutattam egy általunk megalkotott koncepciót a katód és az anód közötti dendritnövekedés hibrid Brown dinamikai szimulációs vizsgálatára. A szimuláció paraméterei úgy voltak optimalizálva, hogy az relatív rövid futási idők mellett is értékelhető és konzekvens eredményeket generáljon. A szimuláció a modellben alkalmazott közelítések és eltérő skálák miatt nem tükröz tökéletesen egy valós, makroszkopikus rendszert, de a dendritképződés dinamikáját és jellegét jól leírja. Kis rendszerméretekre, nagy koncentrációkra és nagy elektromos térerősségre, a modellezési és szimulációs módszer olyan eredményeket ad, amelyek minőségi összhangban vannak a kísérleti tényekkel.

Mindkét esetben pozitív visszacsatolási mechanizmus érvényesül, amelyben az egyes dendritek túlnőnek és ezt kihasználják az anód irányából érkező ionok összegyűjtéséhez. A szimulációkból megállapítható, hogy a dendritek növekedésének kezdeti sebessége kisebb, és a folyamat felgyorsul, ahogy a dendritek közelednek az anódhoz.

A modellezett mikroszkopikus rendszerben a térerősség növelésével arányosan nőtt a hosszabb dendritek kialakulásának valószínűsége és a növekedés is dinamikusabb volt.

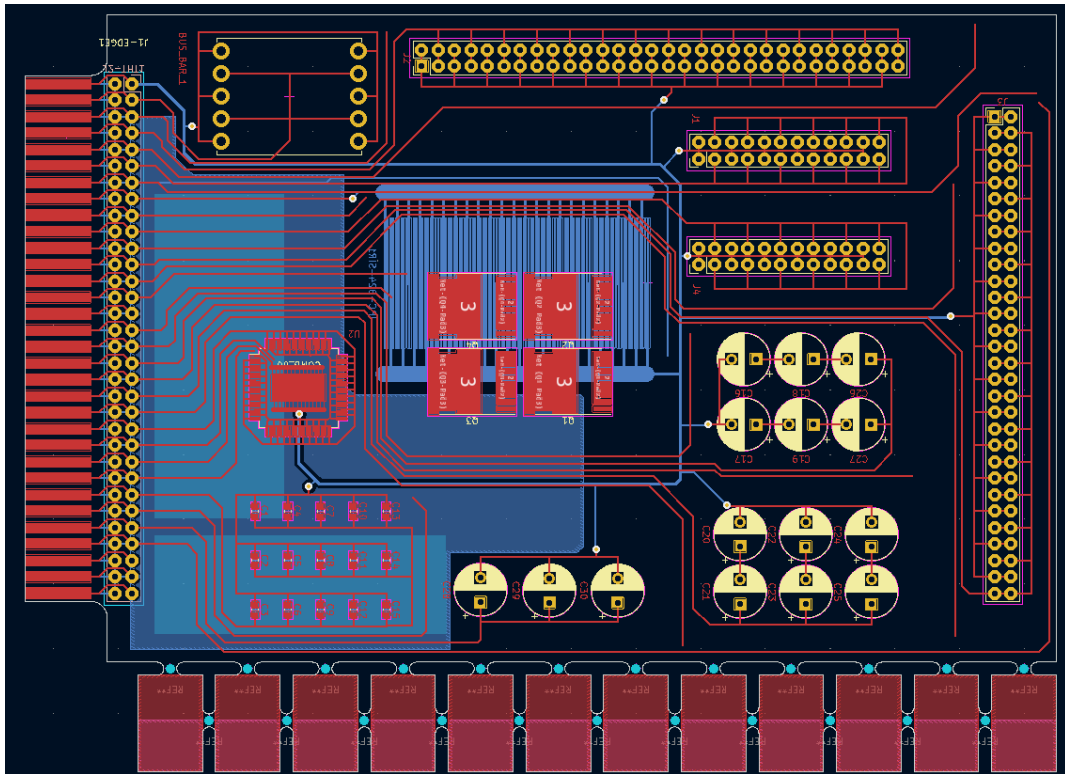
A BD szimulációban az Sn^{2+} koncentrációjának növelésével kapott eredmények azt mutatják, hogy ez nagymértékben elősegíti a dendritképződést (szignifikánsan csökkenti a TTT-et). A rendszer ezen tulajdonsága valószínűleg összhangban van az ionos maradványok jelenlétében megfigyelt fokozott Sn kioldódásával. Kutatótársaim IF 2005C folyaszószterrel szennyezett felületeken végzett WD tesztjei összhangban vannak a megfigyeléssel.

A kvalitatív trendek egyezése optimizmusra ad okot, hogy a szimulációs módszer megfelelő eszköz a jelenség molekuláris szintű vizsgálatára. További kutatás részét képezheti a kidolgozott BD módszer alkalmazása nagyobb rendszereket szimulálva, alacsonyabb koncentrációkkal és elektromos mezőkkel, mely közelebb vihet a valós rendszerekben megfigyelt elektrokémiai migráció pontosabb megértéséhez.

7. Tézisek

1. Kidolgoztam egy olyan kezelési folyamatot, mely alsó infrafűtéssel és 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 folyasztószerrel szennyezett vegyi ón (ImSn) és kémiai nikkell/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 folyasztószerből származó ionos szennyezettség korrozívítási indexét, az autóiparban 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. Ülőcsepp 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 $\mu\text{l/cm}^2$ mennyiségben felvitt aktiválatlan és 140 °C-on 1 percig hőkezelt, aktivált folyasztószer maradványok szárazjég-havas eltávolítása eredményes. Ezek alapján látható, hogy a CO₂-havas tisztítás a nem aktivált folyasztószer 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 aktiválódott folyasztószerből származó fehér maradványok mértéke is csökkent.
 - 1.4. A részecskék mozgásának mérésével 16,4 kg/h abszolút tömegáram mellett megbecsültem a szárazjégzemcsék kinetikus energiáját ($\sim 3 \times 10^{-2} \text{mJ}$). Kimutattam, hogy szárazjeges tisztítással a fenti paraméterekkel 30 mm/s pásztázási sebességgel 3 ciklusban az összeszerelt elektronikai szerelvény felületén található folyasztószerből 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])



7.1. ábra: A TTC tesztpanel kialakítása

- 2.1. A panelt ipari és kutatási célokra egyaránt alkalmazzák 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 felületszerelt alkatrészek beültetését és azok forrasztásának, valamint környezetének vizsgálatát. Igény szerinti bevonattal – vegyi ón (ImSn), tűzi ón (HASL), kémiai nikkell/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.

3. Kifejlesztettem egy olyan impedancia mérésen alapuló módszert, amely képes az interdigitális struktúrák felületén lévő folyasztószer 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 áramköri 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 folyasztószer felhasználhatóságának monitorozását, valamint tisztítási folyamatok hatékonyságának gyors minősítését. (Vonatkozó publikációk: [C2], [C4])
- 3.1. A „tisztítást nem igénylő” (OR/L0) folyasztószeres esetén felületi impedancia vizsgálattal egyértelmű összefüggést mutattam ki a maradványok mennyisége és a mért impedancia értékek között. Klíma- és a tárolástereszték után a folyasztószer maradványok jelenlétét ionos szennyeződés méréssel, vizuálisan és impedancia tesztekkel is igazoltam.
- 3.2. A folyasztószerrel kezelt összes szennyezett minta kapacitásában mérhető változást figyeltem meg, amelyet a nem-forrasztásgátló maszk által meghatározott forrasztási felület réseiben felhalmozódott 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 folyasztószer 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 folyasztószer maradványok. Így a roncsolásmentes és ismételhető módszer ipari környezetben is gazdaságosan alkalmazható.
- 3.5. A felületi szigetelési ellenállás (SIR) teszt és pásztázó 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.

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

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

ahol a $-m_i \gamma_i \mathbf{v}_i(t)$ a súrlódási 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.

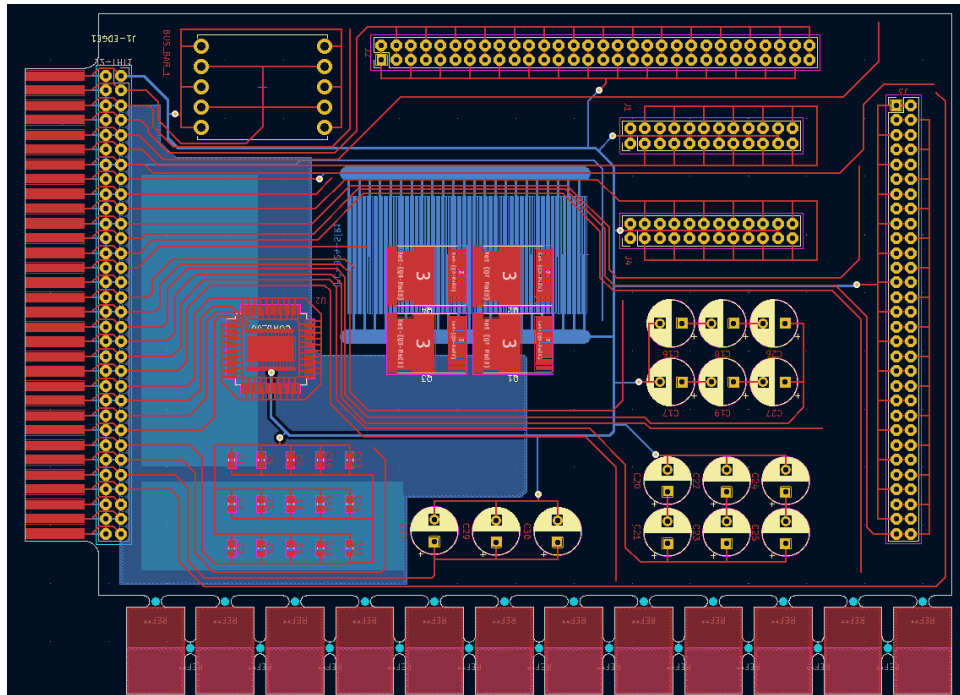
A szisztematikus erők a Coulomb erő (\mathbf{f}_{ij}^C) és a Weeks-Chandler-Anderson erő (\mathbf{f}_{ij}^{WCA}), valamint az alkalmazott erők (\mathbf{F}_i^{appl}) amiket a falak és a dendritek fejtenek ki. (Vonatkozó publikációk: [C3])

- 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 szabad Sn^{2+} ionkoncentráció növelése az átvezető dendrit kialakulási idejének (TTT) csökkenését eredményezi.

8. New scientific results, theses

1. I have developed a treatment process that uses bottom infrared heating and multi-cycle scanning of the dry ice-snow jet to ensure that the surface remains above the dew point, thus avoiding condensation. The CO₂-snow blasting process effectively removes residues from OR/L0 type, low-solids, artificially applied, and industrially flux-contaminated immersion tin (ImSn) and electroless Nickel immersion Gold (ENIG) surface finish boards. (Relevant Publications: [C1], [K1])
 - 1.1. I determined that the cleaning process, at an absolute mass flow rate of 23.4 kg/h and a scanning speed of 30 mm/s, after 3 cycles, reduces the corrosivity index of ionic contamination from flux applied to the ENIG boards below the limit of 2.08 $\mu\text{A/s}$ used in the automotive industry. Based on infrared spectroscopy (FTIR) and optical tests, the method achieved a cleaning efficiency of over 95% in removing white residues.
 - 1.2. Using the sessile drop method, I showed that dry ice-snow cleaning with an initial mass flow of 23.4 kg/h at a scanning speed of 30 mm/s with 3 repetitions has no effect on the surface free energy of ENIG or ImSn surface finish.
 - 1.3. I have performed measurements of the dry ice-snow removal of activated flux residues applied in an amount of 21 $\mu\text{l/cm}^2$ and heat-treated at 140 °C for 1 minute. Based on the results, it can be seen that CO₂-snow cleaning removes the contamination caused by the non-activated flux with an efficiency of over 90% after 3 cycles at an absolute mass flow rate of 16.4 kg/h and a scanning speed of 30 mm/s. Based on optical analysis, I confirmed that the amount of white residue from the activated flux also decreased.
 - 1.4. By measuring the movement of the particles at an absolute mass flow rate of 16.4 kg/h, I estimated the kinetic energy of the dry ice particles ($\sim 3 \times 10^{-2} \text{mJ}$). I demonstrated that with the above parameters and a scanning speed of 30 mm/s, the white residue from the flux on the surface of the assembled electronic assembly can be removed and the local ionic contamination can be reduced below acceptance limit (2.08 $\mu\text{A/s}$).

2. I designed a special multi-purpose test vehicle shown in the figure below. (Relevant Publications: [C2], [C4],))



8.1. Figure: TTC test vehicle design

- 2.1. The multi-purpose test vehicle can be widely used for both industrial and research purposes for material and cleanliness tests, as well as for solderability and accelerated lifetime tests. The SIR test compatible connection option and the interdigital structures support the implementation of standard and research tests as well. The design of the test panel supports the population of through-hole and surface-mounted components and the testing of their solder joints and their surroundings. It can be manufactured and used with the most popular surface finish – immersion Tin (ImSn), Hot Air Solder Leveling (HASL), Electroless Nickel Immersion Gold (ENIG), Immersion Silver (ImAg) and organic solderability preservative (OSP).
- 4.3. Based on the multiplate capacitor (MP) and Olthuis (Olt.) theoretical models, I estimated the theoretical values of the capacitance of the interdigital structures of the test vehicle. Furthermore, I determined the nominal square numbers which represent the the electrode geometry of the patterns. The calculated values for the “Nagy IDS” (nominal square number: 1233): $C_N^{(MP)}=1,4$ pF and $C_N^{(Olt.)}=12,9$ pF; for the “Kis IDS” (nominal square number: 720): $C_K^{(MP)}=0,8$ pF and $C_K^{(Olt.)}=1,8$ pF.

3. I have developed a method based on impedance (capacitance) measurement that can detect and measuring flux residues on the surface of interdigital structures. This method may enable the monitoring of the usability of fluxes and the rapid qualification of the effectiveness of cleaning processes. Capacitance/resistance spectra were collected from PCBs supplied with a 2V amplitude AC signal between the terminals, using a C_P - R_P equivalent circuit model in the frequency range of 20 Hz to 1 MHz. I investigated the change in the surface capacitance of the system under different contamination conditions under the influence of a defined signal (2V, 5kHz) using a circuit based on the AD5934 IC. This method allows for the monitoring of the usability of fluxes and the rapid qualification of the efficiency of cleaning processes. (Relevant Publications: [C2], [C4])

3.1. The electrochemical testing of ethanol-based weak organic acids (WOAs) containing “no-clean” (OR/L0) fluxes revealed a clear correlation between the amount of residue and the measured impedance values. After the climatic and storage tests, the flux residues were detected by ionic contamination measurement, visually and with impedance tests.

3.2. I observed a measurable difference in the capacitance of all flux-treated contaminated samples, which is caused by WOA residues accumulated in the gaps of the „copper defined” pads.

3.3. The analysis of the impedance spectra reveals a significant increase in the capacitive term and a decrease in the resistance at low frequencies (20-5000 Hz). Freshly dried samples show a similar behavior to the heat-treated samples, which is due to the presence of only partially activated flux residues. At higher frequencies (above 10000 Hz) the effect was less significant. I determined that the examination of capacitance values measured at a frequency of 5 kHz is optimal for detecting surface contamination.

3.4. By performing capacitance measurements at a specific frequency (5000 Hz) using an Impedance Converter IC, I demonstrated that the IC-based gauge circuit can detect flux residues quickly and cost-effectively. Thus, the non-destructive, repeatable method can be economically applied in industrial environments.

3.5. Based on the surface insulation resistance (SIR) tests and the scanning electron microscopy (SEM-EDS) results, I show that tin migration occurred during the climate test, however, there was no persistent dendrite formation on the surface of the solder mask between the conductive surfaces.

4. I have established that the dynamics of dendrite formation caused by electrochemical migration can be modeled with hybrid Brownian dynamics simulation, where the motion of the particles is determined by the following Langevin equation:

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

where $-m_i \gamma_i \mathbf{v}_i(t)$ is the friction force,

$\mathbf{R}_i(t)$ is the random force,

\mathbf{v}_i , m_i and γ_i are the position, velocity, mass and friction coefficient of particle i .

The systematic forces are the Coulomb force (\mathbf{f}_{ij}^C) and the Weeks-Chandler-Anderson force (\mathbf{f}_{ij}^{WCA}), as well as the applied forces ($\mathbf{F}_i^{\text{appl}}$) exerted by the walls and dendrites. (Relevant Publications: [C3])

- 4.1. I concluded from the simulations that the initial rate of dendrite growth is lower and the process accelerates as the dendrites approach the anode.
- 4.2. The dendrite growth dynamics observed in the simulation are consistent with experimental findings. Increasing the electric field strength or free Sn^{2+} ion concentration results in a decrease in the time to formation (TTT) of the conducting dendrite (short-circuiting).

9. Az értekezéshez kapcsolódó publikációk

- [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/TCPMT.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/tc10-2023.012>
- [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>

10. Irodalomjegyzék

- [1] „IPC International, Inc.” Elérés: 2025. február 21. [Online]. Elérhető: <https://www.ipc.org/>
- [2] G. M. Wenger, D. A. Dickinson, G. C. Munie, G. P. Tashjian, és R. G. Furrow, „Aqueous and Semi-Aqueous Cleaning Processes”, *AT&T Technical Journal*, köt. 71, sz. 2, o. 45–51, márc. 1992, doi: 10.1002/j.1538-7305.1992.tb00157.x.
- [3] P. Isaacs és T. Munson, „Cleanliness Requirements: A Moving Target”, in *2019 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, IEEE, febr. 2019, o. 1–10. doi: 10.23919/PanPacific.2019.8696733.
- [4] K. Hui Lee, R. Jukna, J. Altpeter, és K. Doss, „Comparison of ROSE, C3/IC, and SIR as an effective cleanliness verification test for post soldered PCBA”, *Soldering & Surface Mount Technology*, köt. 23, sz. 2, o. 85–90, ápr. 2011, doi: 10.1108/09540911111120159.
- [5] N.-C. Lee, *Reflow soldering processes*. Elsevier, 2002.
- [6] J. S. Hwang, „Solder Paste Technology and Applications”, in *Solder Joint Reliability*, J. H. Lau, Szerk., Boston, MA: Springer US, 1991, o. 38–91. doi: 10.1007/978-1-4615-3910-0_2.
- [7] T. Lentz, „Size Matters-The Effects of Solder Powder Size on Solder Paste Performance”.
- [8] S. Mallik, M. Schmidt, R. Bauer, és N. N. Ekere, „Influence of solder paste components on rheological behaviour”, in *2008 2nd Electronics System Integration Technology Conference*, IEEE, szept. 2008, o. 1135–1140. doi: 10.1109/ESTC.2008.4684512.
- [9] R. Asghar, F. Rehman, A. Aman, K. Iqbal, és A. A. Nawaz, „Defect minimization and process improvement in SMT lead-free solder paste printing: a comparative study”, *Soldering & Surface Mount Technology*, köt. 32, sz. 1, o. 1–9, szept. 2019, doi: 10.1108/SSMT-05-2019-0019.
- [10] K. Olivér, M. Péter, B. Műszaki, és G. Egyetem, „Elektronikai gyártástechnológiákban alkalmazott stencilnyomtatás optimalizálási és modellezési aspektusai”, *Elektronikai Technológia és Gyártásinformatika*, köt. 3, o. 8–14, 2019, doi: 10.35403/etesgyi.2019.03.008.

- [11] D. J. Peck, „Solder paste in SMT: a training perspective”, in *Professional Program Proceedings. Electronic Industries Forum of New England*, IEEE, o. 149–162. doi: 10.1109/EIF.1997.605384.
- [12] N. Khader és S. W. Yoon, „Stencil Printing Process Optimization to Control Solder Paste Volume Transfer Efficiency”, *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, köt. 8, sz. 9, o. 1686–1694, szept. 2018, doi: 10.1109/TCPMT.2018.2830391.
- [13] J. Gao, Y. Wu, és H. Ding, „Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor”, *Soldering & Surface Mount Technology*, köt. 19, sz. 1, o. 28–33, febr. 2007, doi: 10.1108/09540910710748131.
- [14] T.-N. Tsai, „Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative study”, *Appl Soft Comput*, köt. 12, sz. 8, o. 2601–2613, aug. 2012, doi: 10.1016/j.asoc.2012.03.066.
- [15] Y. Xu, Y. Liu, és L. Zhang, „Effects of the Solder Phase Transformation on the Optimization of Reflow Soldering Parameters and Temperature Profiles”, *Discrete Dyn Nat Soc*, köt. 2021, o. 1–19, jún. 2021, doi: 10.1155/2021/9955967.
- [16] N. C. Lee, „Optimizing the reflow profile via defect mechanism analysis”, *Soldering and Surface Mount Technology*, köt. 11, sz. 1, o. 13–20, 1999, doi: 10.1108/09540919910254642.
- [17] B. B. Smith és J. Sauber, „Soldering Methods for Allegro Products PROCESS TEMPERATURE AND MSLS”, o. 1–11, [Online]. Elérhető: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:102342434>
- [18] K. Nakao, A. Hiraizumi, és E. Iwasaki, „Reflow oven for a Pb-free soldering process”, *Gas*, köt. 1, o. T2, 2001.
- [19] E. Iwasaki és K. Nakao, „Development of high-speed pb-free reflow ovens”, *Heat transfer*, köt. 100, sz. 1, o. 2, 2005.
- [20] „Wave Soldering Techniques for PCB Assembly | Reversepcb”. Elérés: 2025. február 10. [Online]. Elérhető: <https://reversepcb.com/wave-soldering/>
- [21] Z. Olah, M. Ruzinko, R. Batorfi, és Z. Illyefalvi-Vitez, „Process parameter optimization of selective soldering”, in *2012 IEEE 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, IEEE, okt. 2012, o. 119–124. doi: 10.1109/SIITME.2012.6384359.

- [22] G. Diepstraten, „Wave/Selective Soldering”, in *Lead-free Soldering Process Development and Reliability*, Wiley, 2020, o. 19–42. doi: 10.1002/9781119482093.ch2.
- [23] „Off-line Selective Wave Soldering Machine-Product Details from I.C.T Pick and Place Machine”. Elérés: 2025. február 10. [Online]. Elérhető: <https://www.smt11.com/product/Wave-Soldering-Machine/Off-line-Selective-Wave-Soldering-Machine-SS330-185184.html>
- [24] W. W. Schmitt Heraeus GmbH Hanau, „Resin / Rosin Free Solder Pastes and Fluxes”.
- [25] C. Shea, S. Arora, és S. Brown, „SELECTION OF WAVE SOLDERING FLUXES FOR LEAD-FREE ASSEMBLY”.
- [26] S. Wakeel, A. S. M. A. Haseeb, M. A. Afifi, S. Bingol, és K. L. Hoon, „Constituents and performance of no-clean flux for electronic solder”, 2021. augusztus 1., *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.microrel.2021.114177.
- [27] Dongxia Xu, Xusheng Li, Caiqin Wang, és Bin Xu, „Study on wettability and corrosivity of a new no-clean flux for lead-free solder paste in electronic packaging technology”, in *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, IEEE, júl. 2011, o. 1706–1708. doi: 10.1109/MACE.2011.5987285.
- [28] „IPC-J-STD-004D Requirements for Soldering Fluxes”, 2023. december 1., *IPC*.
- [29] M. Kajtár, *Változatok négy elemre: Szerves kémia*. Budapest: Kajtár Márton Alapítvány, 2019.
- [30] C. Hunt és L. Zou, „The impact of temperature and humidity conditions on surface insulation resistance values for various fluxes”, *Soldering & Surface Mount Technology*, köt. 11, sz. 1, o. 36–43, ápr. 1999, doi: 10.1108/09540919910254921.
- [31] U. Rathinavelu, M. S. Jellesen, P. Moller, és R. Ambat, „Effect of no-clean flux residues on the performance of acrylic conformal coating in aggressive environments”, *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, köt. 2, sz. 4, o. 719–728, ápr. 2012, doi: 10.1109/TCPMT.2012.2186456.
- [32] Y.-R. Yoo, S. Won, és Y.-S. Kim, „Effect of Conformal Coating on Electrochemical Migration Behavior of Multi-Layer Ceramic Capacitor for Automotives Based on Water Drop Test”, *Coatings*, köt. 14, sz. 3, o. 359, márc. 2024, doi: 10.3390/coatings14030359.

- [33] G. Spur, E. Uhlmann, és F. Elbing, „Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application”, *Wear*, köt. 233–235, o. 402–411, dec. 1999, doi: 10.1016/S0043-1648(99)00204-5.
- [34] R. W. Foster, „Carbon Dioxide (Dry-Ice) Blasting”.
- [35] S. J. Dong, B. Song, B. Hansz, H. L. Liao, és C. Coddet, „Modelling of dry ice blasting and its application in thermal spray”, *Materials Research Innovations*, köt. 16, sz. 1, o. 61–66, 2012, doi: 10.1179/1433075X11Y.0000000015.
- [36] E. Uhlmann, R. Hollan, és A. El Mernissi, „Dry Ice Blasting–Energy-Efficiency and New Fields of Application”, in *Engineering Against Fracture*, Springer, 2009, o. 399–409.
- [37] R. Kohli, „Applications of Solid Carbon Dioxide (Dry Ice) Pellet Blasting for Removal of Surface Contaminants”, in *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques*, Elsevier, 2019, o. 117–169. doi: 10.1016/B978-0-12-815577-6.00004-9.
- [38] R. Sherman, „Carbon dioxide snow cleaning”, *Particulate Science and Technology*, köt. 25, sz. 1, o. 37–57, 2007.
- [39] „Carbon Dioxide (CO₂) Phase Diagram”. Elérés: 2025. március 18. [Online]. Elérhető: <https://www.chemistrylearner.com/co2-phase-diagram.html>
- [40] M. M. Hills, „Carbon dioxide jet spray cleaning of molecular contaminants”, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, köt. 13, sz. 1, o. 30–34, jan. 1995, doi: 10.1116/1.579439.
- [41] V. Máša, D. Hornák, és D. Petrilák, „Industrial use of dry ice blasting in surface cleaning”, 2021. december 20., *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129630.
- [42] A. Onofre, R. Godina, H. Carvalho, és I. Catarino, „Eco-innovation in the cleaning process: An application of dry ice blasting in automotive painting industry”, *J Clean Prod*, köt. 272, o. 122987, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122987.
- [43] A. Dzido, P. Krawczyk, K. Badyda, és P. Chondrokostas, „Operational parameters impact on the performance of dry-ice blasting nozzle”, *Energy*, köt. 214, o. 118847, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118847.
- [44] N. Baluch, S. Mohtar, és C. S. Abdullah, „Efficacy of dry-ice blasting in preventive maintenance of auto robotic assemblies”, in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., aug. 2016. doi: 10.1063/1.4960865.

- [45] „Dry Ice Blasting vs. CO2 Spray Cleaning » Plastics Decorating”. Elérés: 2025. február 9. [Online]. Elérhető: <https://plasticsdecorating.com/articles/2022/dry-ice-blasting-vs-co2-spray-cleaning/>
- [46] E. Uhlmann, M. Kretzschmar, F. Elbing, és V. Mihotovic, „Deburring with CO2 Snow Blasting”, in *Burrs - Analysis, Control and Removal*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, o. 181–187. doi: 10.1007/978-3-642-00568-8_19.
- [47] N. Chen, jplnasagov Ying Lin, D. Jackson, S. Chung, és jplnasa gov, „Particulate Removal Using a CO 2 Composite Spray Cleaning System”, 2015.
- [48] J. Vansant és C. Rogiers, „CO2 Cleaning and pH control in the food industry”, in *Gases in Agro-food Processes*, Elsevier, 2019, o. 571–581. doi: 10.1016/B978-0-12-812465-9.00024-4.
- [49] L. Mašková és mtsai., „CO2 snow microblasting of submicron particles from cellulose-based cultural heritage objects: Comparison with traditional dry cleaning methods”, *J Cult Herit*, köt. 70, o. 1–11, nov. 2024, doi: 10.1016/j.culher.2024.08.008.
- [50] Y. H. Liu, D. Hirama, és S. Matsusaka, „Particle removal process during application of impinging dry ice jet”, *Powder Technol*, köt. 217, o. 607–613, 2012, doi: 10.1016/j.powtec.2011.11.032.
- [51] E. Uhlmann, R. Hollan, R. Veit, és A. El Mernissi, „A laser assisted dry ice blasting approach for surface cleaning LCE2006”, in *Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, LCE*, Citeseer, 2006, o. 471–476.
- [52] W. Zhou, M. Liu, S. Liu, M. Peng, J. Yu, és C. Zhou, „On the mechanism of insulator cleaning using dry ice”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, köt. 19, sz. 5, o. 1715–1722, okt. 2012, doi: 10.1109/TDEI.2012.6311520.
- [53] D. M. Barnett, „CO2 (Dry Ice) Cleaning System”, in *NASA Conference Publication*, NASA, 1995, o. 391.
- [54] A. Costantini, E. Vaudano, M. C. Cravero, M. Petrozziello, A. Bernasconi, és E. Garcia-Moruno, „Application of dry-ice blasting for barrels treatment”, *BIO Web Conf*, köt. 5, o. 02012, júl. 2015, doi: 10.1051/bioconf/20150502012.

- [55] Y.-H. Liu, H. Maruyama, és S. Matsusaka, „Effect of Particle Impact on Surface Cleaning Using Dry Ice Jet”, *Aerosol Science and Technology*, köt. 45, sz. 12, o. 1519–1527, dec. 2011, doi: 10.1080/02786826.2011.603769.
- [56] J. R. Becker, „Dry ice pellet surface removal apparatus and method”, 2001. január 16.
- [57] B. A. Spalteholz és G. P. Nielsen, „Dry ice blasting cleaning apparatus”, 2006. április 25.
- [58] M. Sundaram és P. Ihatsu, „Dry ice blasting with chemical additives”, 2007. augusztus 2., *Google Patents*.
- [59] „JH Norton Company Inc. -formerly, Norton Sandblasting Equipment”. Elérés: 2025. február 2. [Online]. Elérhető: <https://nortonsandblasting.com/>
- [60] „#1 Best DIS UAE | Dis Auto Washing Equipment Trading UAE”. Elérés: 2025. február 2. [Online]. Elérhető: <https://www.disuae.com/>
- [61] „CRYOCLEAN® dry ice blasting”, 2024, *Linde*.
- [62] „Welding Machine Rentals, Welding Automation, Generator Rentals”,. Elérés: 2025. február 2. [Online]. Elérhető: <https://www.red-d-arc.com/>
- [63] „dry ice blasting machines for professionals”. Elérés: 2025. február 2. [Online]. Elérhető: <https://white-lion.eu/en/>
- [64] „Ice tech powered by cold jet catalogue”. [Online]. Elérhető: www.icetechworld.com
- [65] D. Jackson, L. Marian, F. Soto, és J. Lee, „CO2 composite spray method and apparatus”, 2015. december 29.
- [66] „CryoSnow – Home – CO2 snow blasting cleaning pretreatment dry ice”. Elérés: 2025. február 2. [Online]. Elérhető: <https://www.cryosnow.com/en/>
- [67] „Products - acp systems AG”. Elérés: 2025. február 2. [Online]. Elérhető: <https://www.acp-systems.com/en/products/>
- [68] „IPC-A-610 - Revision J - Standard Only Acceptability for Electronic Assemblies”. Elérés: 2025. február 25. [Online]. Elérhető: <https://shop.ipc.org/ipc-a-610/ipc-a-610-standard-only/Revision-j/english>
- [69] N. Otsu, „A threshold selection method from gray-level histograms”, *IEEE Trans Syst Man Cybern*, köt. 9, sz. 1, o. 62–66, 1979.
- [70] S. L. Bangare, A. Dubal, P. S. Bangare, és S. T. Patil, „Reviewing otsu’s method for image thresholding”, *International Journal of Applied Engineering Research*, köt. 10, sz. 9, o. 21777–21783, 2015, doi: 10.37622/ijaer/10.9.2015.21777-21783.

- [71] Y. Chang és mtsai., „PCB defect detection based on PSO-optimized threshold segmentation and SURF features”, *Signal Image Video Process*, köt. 18, sz. 5, o. 4327–4336, júl. 2024, doi: 10.1007/s11760-024-03075-7.
- [72] J. Kristóf, *Kémiai analízis II. (Nagyműszeres analízis)*. Veszprém, 2000.
- [73] S. Barrett, J. Reche, D.-H. Kim, és D. Stepniak, „A New Wafer Level Package For Improved Electrical And Reliability Performance”.
- [74] R. A. Shaw és H. H. Mantsch, „Near-IR Spectrometers, Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry”, in *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, Academic Press, 1999.
- [75] P. Schroeder, „Infrared Spectroscopy in clay science”, The Clay Mineral Society, 2002. [Online]. Elérhető: <https://www.researchgate.net/publication/237527451>
- [76] K. Piotrowska, M. S. Jellesen, és R. Ambat, „Thermal decomposition of solder flux activators under simulated wave soldering conditions”, *Soldering and Surface Mount Technology*, köt. 29, sz. 3, o. 133–143, 2017, doi: 10.1108/SSMT-01-2017-0003.
- [77] A. Ch. Lazanas és M. I. Prodromidis, „Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial”, *ACS Measurement Science Au*, köt. 3, sz. 3, o. 162–193, jún. 2023, doi: 10.1021/acsmesuresciau.2c00070.
- [78] Q. D. Pham, N. Holle, és J. Wilde, „Characterization of Wetting behavior of commercial flux systems by impedance measurement technique”, *2022 IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC 2022 - Proceedings*, o. 466–472, 2022, doi: 10.1109/ESTC55720.2022.9939441.
- [79] V. Verdingovas, M. S. Jellesen, és R. Ambat, „Solder Flux Residues and Humidity-Related Failures in Electronics: Relative Effects of Weak Organic Acids Used in No-Clean Flux Systems”, *J Electron Mater*, köt. 44, sz. 4, o. 1116–1127, 2015, doi: 10.1007/s11664-014-3609-0.
- [80] K. Piotrowska és R. Ambat, „Residue-Assisted Water Layer Build-Up under Transient Climatic Conditions and Failure Occurrences in Electronics”, *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, köt. 10, sz. 10, o. 1617–1635, 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.3005933.
- [81] B. Tolla, D. Ph, D. Jean, K. Loomis, Y. Shi, és D. Ph, „SURFACE INSULATION RESISTANCE OF NO-CLEAN FLUX RESIDUES UNDER VARIOUS SURFACE MOUNT COMPONENTS”, o. 25–29, 2016.

- [82] „IPC-J-STD-004 - Revision B - Standard with Amendment 1 Requirements for Soldering Fluxes”. Elérés: 2025. május 18. [Online]. Elérhető: <https://shop.ipc.org/ipc-j-std-004/ipc-j-std-004-standard-only/Revision-b/english>
- [83] L. C. Zou és C. Hunt, „Characterization of the Conduction Mechanisms in Adsorbed Electrolyte Layers on Electronic Boards Using AC Impedance”, *J Electrochem Soc*, köt. 156, sz. 1, o. C8, 2009, doi: 10.1149/1.3005563.
- [84] X. Song, K. Wang, Z. Chen, K. Ren, és P. Liu, „Electrochemical Migration Behavior on FR-4 Printed Circuit Board with Different Surface Finishes”, *J Electron Mater*, köt. 52, sz. 9, o. 6121–6132, 2023, doi: 10.1007/s11664-023-10557-w.
- [85] T. Takemoto, R. M. Latanision, T. W. Eagar, és A. Matsunawa, „Electrochemical migration tests of solder alloys in pure water”, *Corros Sci*, köt. 39, sz. 8, o. 1415–1430, 1997, doi: 10.1016/S0010-938X(97)00038-3.
- [86] P. Yi, C. Dong, Y. Ji, Y. Yin, J. Yao, és K. Xiao, „Electrochemical migration failure mechanism and dendrite composition characteristics of Sn96.5Ag3.0Cu0.5 alloy in thin electrolyte films”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, köt. 30, sz. 7, o. 6575–6582, 2019, doi: 10.1007/s10854-019-00964-3.
- [87] C. Dominkovics és G. Harsányi, „Fractal description of dendrite growth during electrochemical migration”, *Microelectronics Reliability*, köt. 48, sz. 10, o. 1628–1634, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.06.010>.
- [88] V. Verdingovas, M. S. Jellesen, és R. Ambat, „Influence of sodium chloride and weak organic acids (flux residues) on electrochemical migration of tin on surface mount chip components”, *Corrosion Engineering Science and Technology*, köt. 48, sz. 6, o. 426–435, 2013, doi: 10.1179/1743278213Y.0000000078.
- [89] B. A. Smith és L. J. Turbini, „Characterizing the weak organic acids used in low solids fluxes”, *J Electron Mater*, köt. 28, sz. 11, o. 1299–1306, 1999, doi: 10.1007/s11664-999-0171-2.
- [90] P. Isaacs, J. Porto, D. Braun, és T. Munson, „Comparison of ionic contamination test methods to determine their ability to reliably predict performance risks”, in *2017 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, 2017, o. 1–7.
- [91] H. Sela, D. R. Santosa, és C. S. Widodo, „The Effect of NaCl Concentration on the Ionic NaCl”, sz. December 2020, 2021.

- [92] M. Rossi, T. Wallmersperger, S. Neukamm, és K. Padberg-Gehle, „Modeling and Simulation of Electrochemical Cells under Applied Voltage”, *Electrochim Acta*, köt. 258, o. 241–254, dec. 2017, doi: 10.1016/j.electacta.2017.10.047.
- [93] B. Illés, B. Medgyes, K. Dušek, D. Bušek, A. Skwarek, és A. Géczy, „Numerical simulation of electrochemical migration of Cu based on the Nernst-Plank equation”, *Int J Heat Mass Transf*, köt. 184, 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122268.
- [94] X. He és N. Li, „Lattice Boltzmann simulation of electrochemical systems”, *Comput Phys Commun*, köt. 129, sz. 1, o. 158–166, 2000, doi: 10.1016/S0010-4655(00)00103-X.
- [95] Y. Zhou, L. Yang, Y. Li, és W. Lu, „Exploring the Data-Driven Modeling Methods for Electrochemical Migration Failure of Printed Circuit Board”, in *2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris)*, IEEE, máj. 2019, o. 100–105. doi: 10.1109/PHM-Paris.2019.00025.
- [96] F. Cano, „Carbon Dioxide Dry Ice Snow Cleaning”, in *Handbook for Critical Cleaning*, CRC Press, 2000, o. 353–360.
- [97] „IF 2005C Selective soldering flux – Interflux Electronics”. Elérés: 2025. február 15. [Online]. Elérhető: <https://interflux.com/product/IF-2005C>
- [98] P. Isaacs és T. Munson, „Cleanliness Requirements: A Moving Target”, in *2019 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, IEEE, febr. 2019, o. 1–10. doi: 10.23919/PanPacific.2019.8696733.
- [99] S. Shoda és T. Munson, „Cleanliness assessment correlation to electronic hardware reliability”, *IPC - IPC Printed Circuits Expo, APEX and the Designers Summit 2007*, köt. 1, o. 133–157, 2007.
- [100] M. Abtew, T. Chan, K. Moo, és K. Teoh, „White Residue Formation on Printed Circuit Board Assemblies”, sz. 2, 2018.
- [101] S.-C. Yang, K.-S. Huang, és Y.-C. Lin, „Optimization of a pulsed carbon dioxide snow jet for cleaning CMOS image sensors by using the Taguchi method”, *Sens Actuators A Phys*, köt. 139, sz. 1–2, o. 265–271, 2007.
- [102] „Tóth Zsolt - RAKK&AGY 2021 online konferencia”. Elérés: 2025. február 15. [Online]. Elérhető: <https://e-vent.space/rakk-agy/speakers/eloadas.php?lid=D-2>
- [103] C. Y. Huang, M. S. Li, C. L. Ku, H. C. Hsieh, és K. C. Li, „Chemical characterization of failures and process materials for microelectronics assembly”,

- Microelectronics International*, köt. 26, sz. 3, o. 41–48, 2009, doi: 10.1108/13565360910981553.
- [104] M. Fritscher és J. Teiser, „Tensile strength and surface energy of CO₂ice in the context of planet formation”, *Mon Not R Astron Soc*, köt. 512, sz. 3, o. 3754–3758, máj. 2022, doi: 10.1093/mnras/stac676.
- [105] J. Hsu, T. Su, X. Ye, és C. Lin, „Microstrip signal integrity enhancement by using low-loss solder mask”, in *2017 12th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, IEEE, okt. 2017, o. 122–125. doi: 10.1109/IMPACT.2017.8255958.
- [106] W. Olthuis, W. Streekstra, és P. Bergveld, „Theoretical and experimental determination of cell constants of planar-interdigitated electrolyte conductivity sensors”, *Sens Actuators B Chem*, köt. 24, sz. 1–3, o. 252–256, márc. 1995, doi: 10.1016/0925-4005(95)85053-8.
- [107] P. Tasnádi, P. Gnädig, és L. Jánossy, *Vektorszámítás III.*, köt. III. Akadémiai Kiadó, 2016. doi: 10.1556/9789630598477.
- [108] I. N. Bronstejn és I. N. Szemengyajev, „Matematikai kézikönyv. 8. átdolgozott kiadás”, *Typotex, Budapest*, köt. 1209, 2002.
- [109] R. Igreja és C. J. Dias, „Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure”, *Sens Actuators A Phys*, köt. 112, sz. 2–3, o. 291–301, máj. 2004, doi: 10.1016/j.sna.2004.01.040.
- [110] R. Igreja és C. J. Dias, „Extension to the analytical model of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure”, *Sens Actuators A Phys*, köt. 172, sz. 2, o. 392–399, dec. 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.09.033.
- [111] J. Nguyen, D. Geiger, G. Xiao, és D. Shangguan, „Study of the Effect of No-Clean Flux Residue on Signal Integrity at High Frequency”, *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, köt. 10, sz. 6, o. 1054–1060, 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.2991945.
- [112] E. Kocsis, A. Lukács, és I. Szalai, „Impact of plasma treatment on solderability of printed circuit boards”, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, köt. 1246, sz. 1, o. 012013, 2022, doi: 10.1088/1757-899x/1246/1/012013.
- [113] S. D. Kencana, Y. Kuo, Y. Yen, E. Schellkes, és W. Chuang, „Improving the Solder Wettability Via Atmospheric Plasma Technology”, in *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2019, o. 2067–2071. doi: 10.1109/ECTC.2019.00317.

- [114] C. Hecht, J.-N. Slama, M. Sprenger, F. Häußler, M. Sippel, és J. Franke, „Laser Cleaning of Flux Residues on Copper Surfaces in Electronics Production”, in *2022 IEEE 28th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2022, o. 65–69. doi: 10.1109/SIITME56728.2022.9987997.
- [115] Z. Tóth, I. Szalai, és A. Lukács, „Ionic contamination reduction with dry ice cleaning”, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2022, [Online]. Elérhető: <https://m2.mtmt.hu/api/publication/32838609>
- [116] D. S. Lemons és A. Gythiel, „Paul Langevin’s 1908 paper “On the Theory of Brownian Motion” [“Sur la théorie du mouvement brownien,” C. R. Acad. Sci. (Paris) **146** , 530–533 (1908)]”, *Am J Phys*, köt. 65, sz. 11, o. 1079–1081, nov. 1997, doi: 10.1119/1.18725.
- [117] L. Durand-Keklikian és E. Matijević, „Needle-type colloidal copper (II)hydroxide particles”, *Colloid Polym Sci*, köt. 268, sz. 12, o. 1151–1158, dec. 1990, doi: 10.1007/BF01410681.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Szalai Istvánnak és szakmai konzulensemnek Dr. Lukács Attilának, valamint Kocsis Eszternek a szakmai támogatásért és a disszertáció elkészítésében nyújtott segítségéért.

Köszönöm továbbá a Flex TTC munkatársainak, kiemelten Dr. Tóth Lászlónak az eszközök biztosítását és a technológiai és szakmai támogatást. Továbbá köszönettel tartozom a Pannon Egyetem kutatóinak, Horváth Barnabásnak és Guba Sándornak, a WD-tesztek készítéséért és Ható Zoltánnak, valamint Boda Dezsőnek a szimulációs feladatok kivitelezésében nyújtott segítségükért.

Köszönöm édesanyámnak és testvéremnek, Tóth Ágnesnek a folyamatos támogatást, türelmet és biztatást, amely nélkül nem tudtam volna véghez vinni ezt a munkát. Végül, de nem utolsósorban, szeretném megköszönni barátaim motiváló szavait, amely erőt adott a nehezebb pillanatokban is.

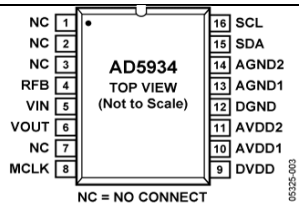
„A MUNKA AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM KOOPERATÍV DOKTORI PROGRAM DOKTORI HALLGATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”

Függelék

I. A kutatás során alkalmazott eszközök

	<p>Szárazjég-havas tisztítórendszer</p> <p>Típus: <i>CleanLogix Auto-20000 CO₂ Composite Spray Automation System</i></p> <p><i>CleanLogix CPU 6000-2 CO₂ Composite Spray Cleaning System</i></p>
	<p>IR előfűtő szett</p> <p>Típus: <i>JBC PHSE-2KB - Small Pre-Heater Set</i></p> <p>teljesítmény: 600 W</p>
	<p>Digitális mikroszkópia</p> <p>Típus: <i>Leica DVM6 A Mikroszkóp</i></p> <p>Maximum nagyítás: 190:1</p>
	<p>Helyi ionos tisztaság vizsgálat</p> <p>Típus: <i>Foresite Localized Electronics Cleanliness Tester and Residue Extractor [Model: C3/C.I.]</i></p>
	<p>FTIR spektroszkópia</p> <p>Típus: <i>Thermo Scientific Nicolet™ iN10 Infrared Microscope</i></p> <p>Detektor: folyékony N₂ hűtésű MCT</p> <p>Spektrális felbontás: 7800–650 cm⁻¹</p>

	<p>Csepp alak vizsgáló</p> <p>Típus: <i>KRÜSS DSA30S - Drop Shape Analyzer</i></p> <p>Módszer: <i>ülőcsepp</i></p> <p>Modell: <i>OWRK</i></p>
	<p>Gyorskamera</p> <p>Típus: <i>I-Speed 210</i></p> <p>Maximum képsűrűség: <i>79500 fps</i></p>
	<p>Elektron mikroszkópia és EDX</p> <p>Típus: <i>Tescan MIRA3 FE-SEM; EDAX Octane Elite EDS/EDX System</i></p> <p>Detektor: <i>BSE (alacsony vákuum)</i></p> <p>Gyorsító feszültség: <i>20 kV</i></p> <p>Munkatávolság: <i>15 mm</i></p>
	<p>Precíziós LRC mérés</p> <p>Típus: <i>Agilent 4284A Precision LCR Meter</i></p> <p>Frekvenciatartomány: <i>20 Hz – 1 MHz</i></p> <p>Tápfeszültség: <i>220 V (AC)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Kimeneti feszültség: $5 \text{ mV}_{\text{rms}} \div 2 \text{ V}_{\text{rms}}$ - Kimenetei impedancia: 100Ω



- NOTES:
1. IT IS RECOMMENDED TO TIE ALL SUPPLY CONNECTIONS (PIN 9, PIN 10, AND PIN 11) AND RUN FROM A SINGLE SUPPLY BETWEEN 2.7V AND 5.5V.
 2. IT IS ALSO RECOMMENDED TO CONNECT ALL GROUND SIGNALS TOGETHER (PIN 12, PIN 13, AND PIN 14).

16-LEAD SHRINK SMALL OUTLINE PACKAGE [SSOP] (RS-16)

Impedancia Konverter IC

Típus: AD5934 250 kSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer
 Programozható csúcs-csúcs gerjesztési

feszültség: *maximum 100 kHz*

Impedancia tartomány *1 kΩ – 10 MΩ*

Fázismérési képesség

0,5%-os rendszerpontosság

Tápellátás: *2,7 V - 5,5 V*

Hőmérséklet-tartomány: *-40°C – +125°C*

Listaár: *~5\$*



Klímateszt

Típus: *Climats 648 h*

Hőmérsékelt: *-40°C – +135 °C*

Páratartalom: *10 – 95 RH%*



SIR teszt

Típus: *AutoSIR2+*

Csatornák száma: *64*

SIR mérési tartomány: *10⁶ to 10¹⁴ Ω*

Mérési mód: *folymatos*

Mérési gyakoriság: *szabadon választható*

Adat gyűjtés: *Mintavételi idő, eltelt idő, ellenállás, áram, alkalmazott feszültség, hőmérséklet, páratartalom*

Rack befogadó képesség: *8 panel*

II. Kapacitás meghatározás az impedancia konverter IC adatai alapján

A hitelesítés idejére CELDUC D31C2110 típusú reed-relé kapcsolja a Z_0 értékű, tisztán ohmos impedanciát (precíziós ellenállás) az IC bemenetére, és kiolvassa az r_0 valós és az i_0 képzetes adatregiszterek tartalmát. Az erősítési tényező, „gain factor” (g) a kalibráló ellenállás ismert impedanciája alapján számolható:

$$g = \frac{1/Z_0}{\sqrt{r_0^2 + i_0^2}} \quad (II.1)$$

A rendszer által okozott fáziseltolást (ϕ_s) a kalibráció során kiolvasott r_0 és i_0 értékek alapján az alábbi képlet adja meg:

$$\phi_s = \arctan\left(\frac{i_0}{r_0}\right) \quad (II.2)$$

az IC bemenetére kapcsolt tisztán rezisztív áramkörü elem $\phi = 0^\circ$ fáziseltolódást okoz, azaz az AD5934 által ilyen esetben mért fázisszög megegyezik a rendszer fáziseltolásával. Ezt az értéket az erősítési tényezővel együtt tárolja a program. A kalibráció végeztével a relé visszakapcsolja a tesztpanelt az AD5934 IC-hez.

A g és ϕ_s értékek ismeretében ezek után már meg tudjuk határozni az interdigitális struktúra komplex impedanciáját, amelynek abszolút értékét a

$$|Z| = \frac{1}{g\sqrt{r^2 + i^2}} \quad (II.3)$$

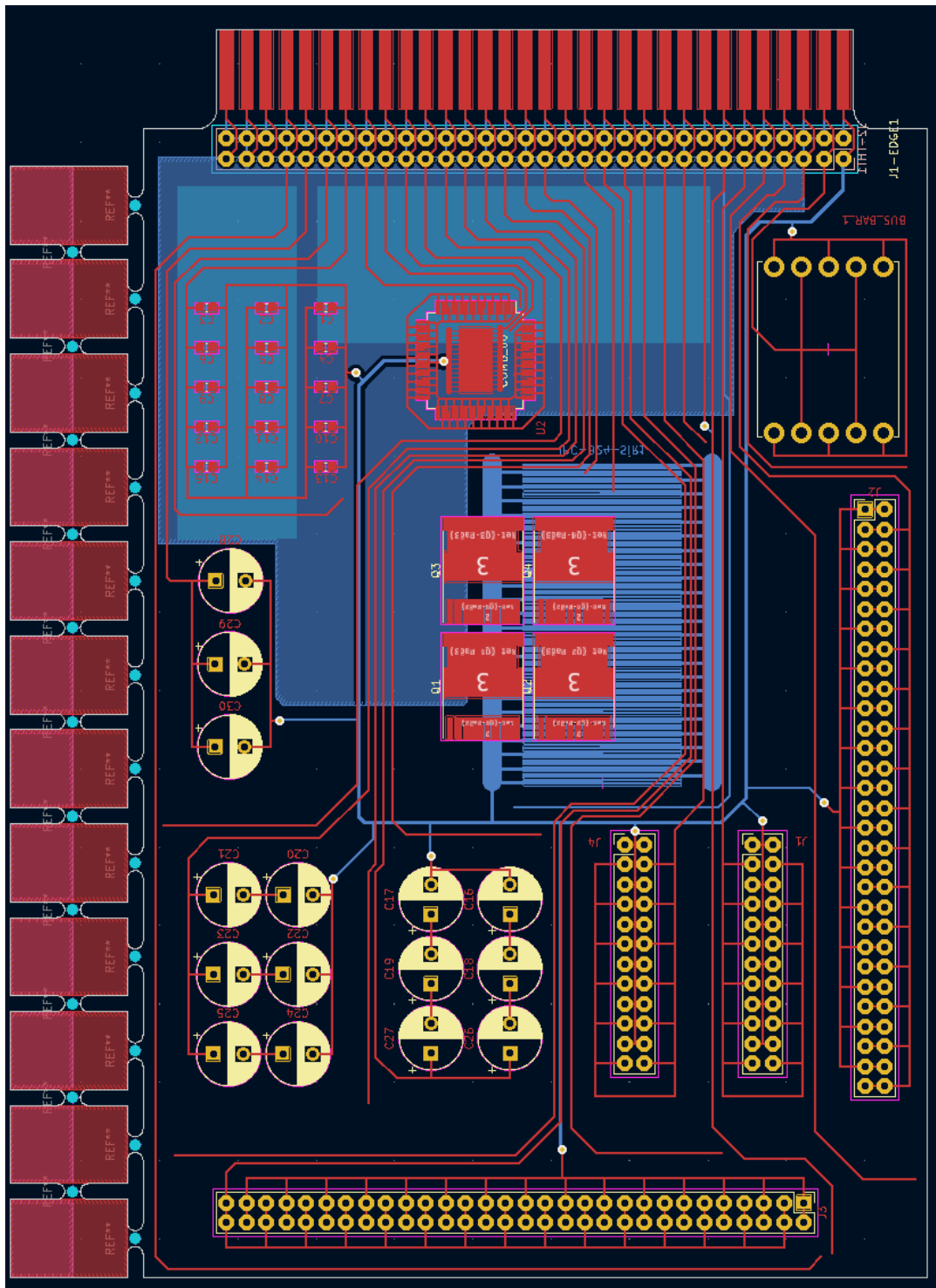
egyenlet alapján, a hozzá tartozó φ fázisszöget pedig a

$$\varphi = \arctan\left(\frac{i}{r}\right) - \phi_s \quad (II.4)$$

képlettel határozhatjuk meg, ahol r és i a konverter IC valós és képzetes adatregiszterének értéke, ha IDS van az IC bemenetére kapcsolva. A kapacitást a mért komplex impedancia értékéből a következőképpen számolhatjuk:

$$C_p = -\frac{|Z| \sin \varphi}{2\pi f} \quad (II.5)$$

III. A TTC tesztpanel kialakítása



III.1. ábra: A TTC Testpanel kialakítása