

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

KOCSIS ESZTER



Pannon Egyetem

2025

Folyasztószer-minimalizált forrasztás autóipari elektronikai termékekhez

DOI:10.18136/PE.2025.945

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Kocsis Eszter

okleveles vegyészmérnök

Témavezető:

Dr. Szalai István

egyetemi tanár

Készült a Pannon Egyetem

Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében

2025

Folyasztószer-minimalizált forrasztás autóipari elektronikai termékekhez

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

Anyagtudományok és technológiák tudományágban

Írta: Kocsis Eszter

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

I. Elméleti háttér és irodalmi áttekintés.....	1
1. Bevezetés	2
2. Irodalmi áttekintés	4
2.1 Forrasztás	4
2.1.1 Forrasztás folyamata, a kialakult kötés	5
2.1.2 Forraszötövözetek	8
2.1.3 Forrasztási felületek bevonatai	10
2.1.4 Folyasztószer	12
2.1.5 Elektronikai szerelvények gyártási folyamata, forrasztási technológiák	21
2.2 Plazmakezelés	29
2.2.1 A plazma előállítása, típusai.....	29
2.2.2 Plazmakezelés egyéb iparágakban	31
2.2.3 Plazmakezelés az autóiipari elektronikai gyártásban	32
2.3 Folyasztószer-minimalizált forrasztás fejlesztési irányai	34
II. Kísérleti rész	37
3. Folyasztószer maradványok által kiváltott elektrokémiai migráció	38
3.1 Dendritnövekedés sebességének vizsgálata a feszültség függvényében	38
3.1.1 Anyagok és módszerek.....	39
3.1.2 Mérési eredmények és értékelésük.....	40
3.2 Folyasztószer hatása az átütési feszültség értékére.....	47
3.2.1 Anyagok és módszerek.....	47
3.2.2 Mérési eredmények és értékelésük.....	49
3.3 Ionos szennyezettség vizsgálata impedancia mérésén alapuló módszerekkel....	52
3.3.1 Anyagok és módszerek.....	52
3.3.2 Mérési eredmények és értékelésük.....	53
3.4 Összefoglalás	55
4. Plazmakezelés hatása a nedvesíthetőségre és forraszthatóságra.....	56
4.1 Anyagok és módszerek	56
4.1.1 A vizsgált forrasztandó felületek.....	56
4.1.2 Plazmakezelés paraméterei.....	58
4.1.3 Forraszthatósági vizsgálat mérési elve	59
4.1.4 Nedvesíthetőségi vizsgálat mérési elve	60
4.2 Mérési eredmények és értékelésük	61
4.2.1 Forraszthatósági vizsgálati eredmények.....	61

4.2.2	Nedvesíthetőség vizsgálata kontaktszögméréssel	64
4.3	Összefoglalás	70
5.	Plazmakezelés hatásmechanizmusa a forrasztandó felületen	71
5.1	Anyagok és módszerek	71
5.1.1	Plazmakezelés és a vizsgált minták.....	71
5.1.2	Pásztázó elektronmikroszkópia és energia-diszperzív röntgenspektroszkópia 73	
5.1.3	Lézer-indukált plazma spektrometria.....	74
5.1.4	Fehérfényű interferométeres optikai vizsgálat	74
5.2	Mérési eredmények és értékelésük	75
5.2.1	A felület kémiai összetétele.....	75
5.2.2	Felületi topológiai jellemzők.....	77
5.3	Összefoglalás	81
6.	Forrasztási kísérletek és a folyasztószer minimalizálásának lehetőségei	82
6.1	Plazmakezelés hatása a felületszerelt technológiával előállított termékekre.....	82
6.1.1	Anyagok és módszerek.....	82
6.1.2	Mérési eredmények és értékelésük.....	84
6.2	Furatszerelt alkatrészek folyasztószer-minimalizált forrasztása.....	87
6.2.1	Anyagok és módszerek.....	87
6.2.2	Mérési eredmények és értékelésük.....	90
6.2.3	Összefoglalás.....	93
III.	Eredmények összegzése és tudományos hozzájárulás.....	94
7.	Tézisek.....	95
8.	Az értekezéshez kapcsolódó publikációk	99
9.	Irodalomjegyzék	101
	Köszönetnyilvánítás.....	112

Jelölések és rövidítések jegyzéke

<i>NyÁK</i>	Nyomtatott áramköri kártya
<i>PCB</i>	Nyomtatott áramköri kártya (<i>Printed Circuit Board</i>)
<i>PCBA</i>	Szerelt áramköri hordozó (<i>Printed Circuit Board Assembly</i>)
<i>IMC</i>	Intermetallikus vegyület (<i>Intermetallic Compound</i>)
<i>SMT</i>	Felületszerelt technológia (<i>Surface Mount Technology</i>)
<i>THT</i>	Furatszerelt technológia (<i>Through Hole Technology</i>)
<i>SAC</i>	Ón-ezüst-réz alapú forraszanyagok
<i>ICT</i>	Áramköri teszt (<i>In-Circuit Test</i>)
<i>AOI</i>	Automatizált Optikai Ellenőrző (<i>Automated Optical Inspection</i>)
<i>FT</i>	Funkciós teszt (<i>Functional Test</i>)
<i>EOL</i>	Gyártás-végi teszt (<i>End-of-Line Test</i>)
<i>WOA</i>	Gyenge szerves sav (<i>Weak Organic Acid</i>)
<i>VOC</i>	Illékony szerves vegyület (<i>Volatile Organic Compound</i>)
<i>ImSn</i>	Immerziós ón bevonat (<i>Immersion tin</i>)
<i>ImAg</i>	Immerziós ezüst bevonat (<i>Immersion silver</i>)
<i>ENIG</i>	Kémiai nikkelt-arany bevonat (<i>Electroless Nickel Immersion Gold</i>)
<i>RF</i>	Rádiófrekvencia
<i>APPJ</i>	Atmoszférikus nyomású plazmasugár (<i>Atmospheric Pressure Plasma Jet</i>)
<i>ECM</i>	Elektrokémiai migráció (<i>Electrochemical Migration</i>)
<i>WD</i>	Vízcsepp teszt (<i>Water Drop test</i>)
<i>MTTF</i>	Meghibásodásig eltelt átlagos idő (<i>Mean Time to Failure</i>)
<i>TTD</i>	Detektálásig eltelt idő (<i>Time to Detection</i>)
<i>TTT</i>	Érintkezésig eltelt idő (<i>Time to Touch</i>)
<i>IS</i>	Impedancia Spektroszkópia
<i>SIR</i>	Felületi Szigetelési Ellenállás (<i>Surface Insulation Resistance</i>)
<i>C.I.</i>	Korozivitási index (<i>Corrosivity Index</i>)
<i>PK</i>	Plazma Kezelés
<i>HFE</i>	Határfelületi Energia
<i>SEM</i>	Pásztázó Elektronmikroszkóp (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
<i>EDX</i>	Energia-diszperzív Röntgen Spektroszkópia (<i>Energy Dispersive X-Ray Spectrometry</i>)
<i>SE</i>	Szekunder Elektron
<i>LIBS</i>	Lézer-indukált Plazma Spektrometria (<i>Laser Induced Breakdown Spectrometry</i>)
<i>IPC</i>	Nemzetközi Elektronikai Szabvány
<i>FET</i>	Távvezérlésű Tranzisztor (<i>Field-Effect Transistor</i>)
<i>QFP</i>	Integrált áramköri tokozás (<i>Quad Flat Pack</i>)

Kivonat

A dolgozat az elektronikai szerelvények megbízhatóságának növelésére összpontosít az ólommentes forrasztás során alkalmazott folyasztószermennyiség minimalizálásával, valamint a folyasztószermaradványok által jelentett kockázatok csökkentésével.

A doktori kutatás célja, hogy feltérképezze az elektronikai szerelvények gyártása során jelenleg alkalmazott folyasztószerek hatásait a termékek élettartamára. A jelenlegitől eltérő, minimalizált folyasztószert alkalmazásával és az új tisztítási módszer (plazmakezelés) bevezetésével, lehetőség nyílik fémtiszta felületek létrehozására, elősegítve a forrasztóanyag nedvesítését, csökkentve a forrasztás után visszamaradó ionos szennyeződések. Az értekezésben négy fejezetben ismertetem a kutatások eredményeit.

Az első témakörben a folyasztószert maradványok káros hatásait ismertetem: 2 különböző meghibásodáshoz vezető mechanizmust (elektrokémiai migráció és átütési szilárdság változása), valamint impedancia mérésén alapuló ionos szennyezettség detektálására alkalmazható módszereket tárgyalva. A második témakörben bemutatott nedvesíthetőségi és forrasztathatósági mérési eredmények alátámasztják az 5% H₂ tartalmú formálógázból előállított atmoszférikus nyomású plazmakezelés forrasztást elősegítő hatását a nyomtatott áramköri lapok forrasztási felületeinek tekintetében, majd a harmadik témakör foglalkozik azzal, hogy a plazmakezelés milyen mechanizmusokon keresztül fejti ki hatását, valamint milyen folyamatok játszódhatnak le ennek során a felület kémiai összetételének és mechanikai behatás vizsgálatán keresztül. Végül a negyedik témakör mind felület-, mind furatszerelt technológiával készült folyasztószert minimalizált forrasztásokat mutat be, kiemelt figyelmet fordítva a kialakult forraszkötések anyagi minőségére és szabványoknak való megfelelésére.

Abstract

The dissertation focuses on increasing the reliability of electronic assemblies by minimizing the amount of flux used during lead-free soldering and reducing the risks posed by flux residues.

The objective of this doctoral research is to investigate the effects of currently used fluxes in the manufacturing of electronic assemblies on the product lifespan. By implementing a minimized flux application and introducing a novel cleaning method, namely plasma treatment, the creation of metal-clean surfaces can be achieved. This approach enhances solder wettability while reducing ionic contamination residues remaining after the soldering process. The dissertation presents the results of the research in four chapters.

In the first topic, I describe the harmful effects of flux residues: discussing 2 different failure mechanisms (electrochemical migration and change in dielectric strength) and methods for detecting ionic contamination based on impedance measurement. The wettability and solderability measurement results presented in the second topic support the soldering-promoting effect of atmospheric pressure plasma treatment produced from a forming gas containing 5% H₂ on the soldering surfaces of printed circuit boards. Then the third topic explores the mechanisms by which plasma treatment influences the surface properties, analyzing the potential chemical and mechanical processes that take place during the treatment. Finally, the fourth topic presents flux-minimized soldering processes utilizing both surface-mount and through-hole technologies, with a particular focus on the material quality of the formed solder joints and their compliance with industry standards.

Abstrakt

Im Fokus der Dissertation liegt auf die Erhöhung der Zuverlässigkeit elektronischer Ausrüstungen durch die Minimierung des bleifreien Lötprozesses verwendeten Flussmittelmenge sowie durch Reduzierung des Risikos von Flussmittelrückständen.

Ziel dieser Studie ist, die Auswirkung der derzeit in der elektronischer Einheit Fertigung verwendeten Flussmittel auf die Lebensdauer der Produkte zu analysieren. Durch die Einführung einer neuen Reinigungsmethode (Plasmabehandlung) ist es möglich, eine metallisch reine Oberfläche zu erzeugen, wodurch die Benetzbarkeit des Lotes verbessert und die nach dem Löten verbleibende ionische Verunreinigung reduziert wird. Die Forschungsergebnisse werden in der Dissertation in vier Kapiteln präsentiert.

Im ersten Themenbereich werden die schädlichen Auswirkungen von Flussmittelrückständen untersucht. Es werden zwei unterschiedliche Mechanismen beschrieben, die zu Fehlfunktionen führen können (elektrochemische Migration und Veränderung der Durchschlagsfestigkeit), und Methoden zum Erkennen ionischer Kontamination basierend auf Impedanzmessungen.

Im zweiten Themenbereich werden Messergebnisse zur Benetzbarkeit und Lötbarkeit präsentiert, die die lötfördernde Wirkung der atmosphärischen Plasmabehandlung mit 5 % H₂-haltigem formier Gas auf die Lötflächen von Leiterplatten belegen.

Das dritte Thema beschäftigt sich mit den Mechanismen, durch die die Plasmabehandlung ihre Wirkung entfaltet, sowie mit den dabei ablaufenden Prozessen, basierend auf der Analyse der chemischen Zusammensetzung und der mechanischen Einflüsse auf die Oberfläche.

Abschließend stellt der vierte Themenbereich Flussmittel-minimierte Lötprozesse sowohl für die Oberflächenmontage- als auch für die Durchsteckmontagetechnologie vor, wobei besonderes Augenmerk auf die Qualität der entstandenen Lötverbindungen sowie deren Konformität mit den geltenden Normen gelegt wird.

I. Elméleti háttér és irodalmi áttekintés

1. Bevezetés

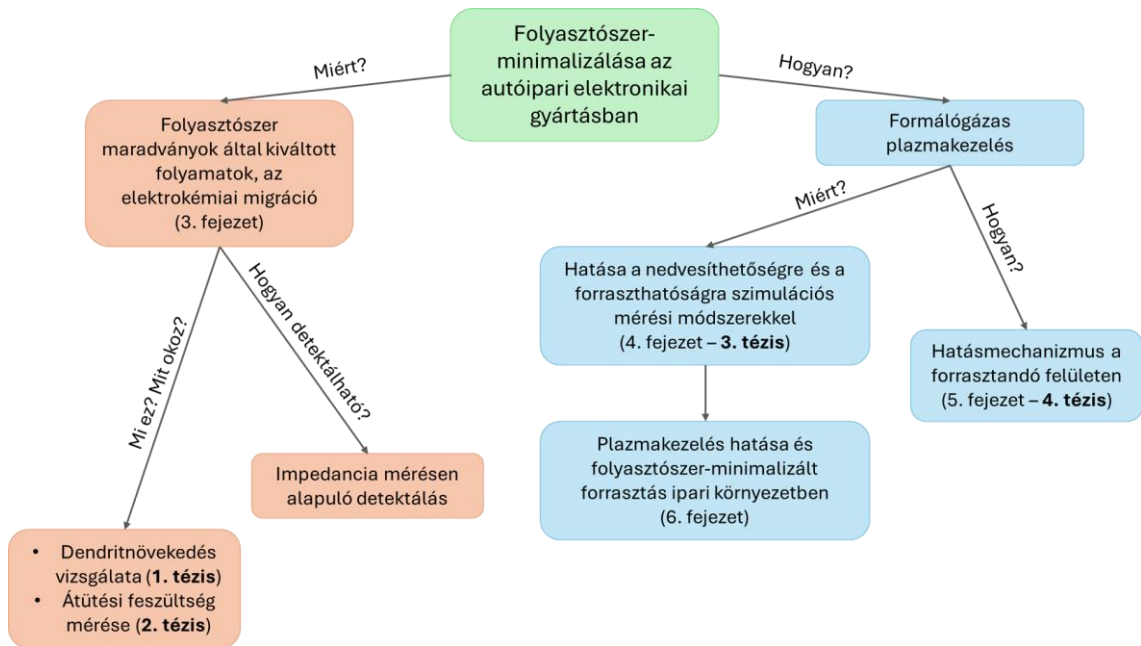
A doktori kutatás célja az ólommentes forrasztás során alkalmazott folyasztószer használatainak minimalizálása, új, alternatív tisztítási módszerek felkutatása és értékelése, így növelve az autóiipari elektronikai termék megbízhatóságát.

Az elektronikai szerelvények ólommentes forrasztásának folyamatában jelenleg nélkülözhetetlen a folyasztószer használata. A folyasztószer a fém felületek oxid mentesítésében vesz részt, valamint elősegíti a nedvesítést. A tisztítást nem igénylő folyasztószer használatakor elméletben a termék tervezett élettartama alatt nem kell számítanunk a forrasztás után visszamaradó anyagok káros hatásával. A gyakorlat azonban nem ezt mutatja, a folyasztószer alkalmazásával megbízhatósági kockázatnak tesszük ki a termékeket. Az autóiipari elektronikai termékek meghibásodása az esetek nagy részében a termék nem megfelelő tisztaságára vezethető vissza. A nyomtatott áramköri paneleken visszamaradó folyasztószer maradványok számos, különböző természetű hibajelenséget okozhatnak, mindamellett rontanak a panel esztétikai megjelenésén. Többek között elősegítik a nem kívánt forraszgolyó tapadását, a lakkréteg vagy alátöltő anyagét azonban akadályozhatják, felgyorsíthatják a PCB korrózióját. Kritikusak a folyasztószer ionos maradványai, amelyek elektromigrációt okozhatnak és villamos rövidzár alakulhat ki. Az autóiipari elektronikai ipar fejlődésével és miniatürizálásával az ionos migráció akár katasztrofális kimenetelű meghibásodáshoz is vezethet.

Az dolgozat először az irodalmi áttekintést taglalja, mely érinti a forrasztás folyamatát, alapanyagait, technológiáit, valamint a felmerülő és megoldásra váró nehézségeket. A plazmakezelés alapelveinek bemutatása mellett a már alkalmazásban lévő példákon keresztül szemléltetem annak sokoldalú és széleskörű felhasználási lehetőségeit, valamint kitérek a szakirodalomban eddig megjelent kutatási irányokra a folyasztószer-minimalizált, sőt folyasztószer mentes forrasztási folyamatok témakörében.

A harmadik fejezetben bemutatásra kerülnek a folyasztószer viselkedésének tanulmányozására irányuló saját kísérletek. A negyedik fejezet ismerteti a plazmakezelés hatását az elektronikai szerelvények nedvesíthetőségére és forraszthatóságára. Az ötödik fejezet taglalja a plazmakezelés hatásmechanizmusát és a felületen bekövetkező változásokat. A hatodik fejezet foglalkozik végül a folyasztószer csökkentésével forrasztott termékek előállításával és értékelésével. A disszertáció az eredmények tézisszerű összefoglalásával és az irodalomjegyzékkel zárul.

A doktori munkám fő kutatási irányait, valamint az azok mögött húzódó motivációkat gondolat térképpel szemléltetem (1.1. ábra).



1.1. ábra: Gondolat térkép

2. Irodalmi áttekintés

2.1 Forrasztás

A forrasztás az elektronikai gyártás alapvető folyamata, amelyet az alkatrészek közötti elektromos kapcsolatok létrehozására használnak. A forrasztási kötés kialakításával oldhatatlan kötést hozunk létre az alapanyagok között, egy harmadik, az alapanyagoknál kisebb olvadáspontú anyaggal, a forraszanyaggal. Történelmileg az ón-ólom (Sn-Pb) ötvözetek voltak az uralkodó forraszanyagok kedvező olvadási jellemzőik és mechanikai tulajdonságaik miatt. Az ólom forrasztási felhasználása az ókorba nyúlik vissza, de széleskörű alkalmazása az elektronikában a 20. század közepén kezdődött. Az ólomexpozícióval kapcsolatos növekvő környezeti és egészségügyi aggodalmak azonban jelentős szabályozási változásokhoz vezettek, különösen a veszélyes anyagok korlátozásáról szóló (RoHS) irányelv bevezetésével 2006-ban, amely korlátozta az ólom használatát az elektronikai termékekben. [1–3]

Ezekre a szabályozásokra reagálva az elektronikai ipar az ólommentes forrasztási megoldások felé fordult. A leggyakoribb ólommentes forrasztóanyagok ón-ezüst-réz (SAC) ötvözeteken alapulnak, amelyek megközelítik a hagyományos ólom-ón forraszok mechanikai teljesítményét és hőállóságát [4,5]. Az ólommentes forrasztásra való átállás különösen jelentős az autóelektronikai iparban, ahol a megbízhatóság és a teljesítmény kritikus fontosságú a járművek szélsőséges üzemi körülményei miatt. Az autóiipari alkalmazások megkövetelik, hogy a forrasztási kötések ellenálljanak a hőmérséklet-változásoknak és a mechanikai igénybevételeknek, így a forrasztóanyag kiválasztása kulcsfontosságú a hosszú távú megbízhatóság szempontjából [6,7].

Az ólommentes forraszanyagokat, mint például a SAC305, széles körben tanulmányozták mechanikai tulajdonságaik és az intermetallikus vegyületek (*intermetallic compound*, IMC) képződése szempontjából. A forrasztás kritikus folyamat az elektronikai gyártásban, különösen az alkatrészek közötti megbízható összeköttetések létrehozása szempontjából. A forrasztási kötések kialakítása magában foglalja a forrasztóanyag megolvasztását, amely azután megszilárdul, és mechanikai és elektromos kapcsolatot hoz létre. Ezeknek a forrasztási kötéseknek a megbízhatóságát számos tényező jelentősen befolyásolja, beleértve a használt forrasztóanyag típusát, a hőprofil paramétereit, valamint az intermetallikus vegyületek képződését a forraszanyag és a hordozó közötti határfelületen.

Az IMC-k növekedése a forrasztóanyag-forrasztási alapfém határfelületén kritikus tényező, amely befolyásolja a forrasztási kötések megbízhatóságát. Míg az IMC-k vékony rétege növelheti a mechanikai szilárdságot, a túlzott növekedés ridegséghez és meghibásodáshoz vezethet [8,9]. A kutatások kimutatták, hogy az ólommentes forrasztóanyagok mikroszerkezeti jellemzői, beleértve a szemcseméretet és a másodlagos fázisok jelenlétét, jelentősen befolyásolják mechanikai reakciójukat a hőciklus során [7,10]. Például az olyan elemek hozzáadása, mint az ezüst, indium vagy bizmut javíthatja a forrasztóanyag mechanikai tulajdonságait a mikrostruktúra finomításával és az IMC képződés szabályozásával [11,12]. Ezenkívül grafén nanolemezek hozzáadása elnyomhatja az IMC-k növekedését, ezáltal javítva a forrasztási kötések általános megbízhatóságát [13].

Az ólommentes forrasztóanyagok, például az ón-ezüst-réz ötvözeteken alapuló forrasztóanyagok az ólomtartalmú forrasztóanyagok kivonásáról szóló környezetvédelmi előírások miatt kerültek előtérbe. Az ólommentes forrasztóanyagok olvadási hőmérséklete és hőtágulási együtthatója eltérő hőciklus-viselkedéshez vezethet, ami befolyásolja a forrasztási kötések tartósságát [14]. Ezenkívül a forrasztási kötések mikroszerkezeti jellemzőit a forrasztási összetétel és a feldolgozás körülményei is befolyásolják. Ezeknek a kötéseknek a megbízhatóságát gyakran veszélyezteti az IMC-k növekedése, amelyek törékenyek lehetnek, és tönkremenetelhez vezethetnek, ha túl vastagok lesznek [9,15].

Összefoglalva, a forrasztási kötések kialakítása, különösen az ólommentes forrasztóanyagok esetében, a hődinamika, az anyagtulajdonságok és az intermetallikus vegyületképzés összetett kölcsönhatása. Ezeknek a tényezőknek a megértése elengedhetetlen az elektronikai szerelvényekben található forrasztási kötések megbízhatóságának javításához, különösen akkor, amikor az eszközök továbbra is miniatürizálódnak, az alkatrészek sűrűsége növekszik, és nagyobb feszültségen, egyre nehezebb körülmények között működnek.

2.1.1 Forrasztás folyamata, a kialakult kötés

A forrasztás kulcsfontosságú folyamat az elektronikai gyártásban, amely magában foglalja az elektronikus alkatrészek csatlakoztatását a nyomtatott áramköri lapokhoz olvadt forrasztóanyag használatával. A folyamat több szakaszra osztható fel átfogóan: előkészítés, forrasztóanyag felvitel, melegítés és hűtés. Ezen szakaszok mindegyike jelentős szerepet játszik a megbízható forrasztási kötések kialakításában, amelyek

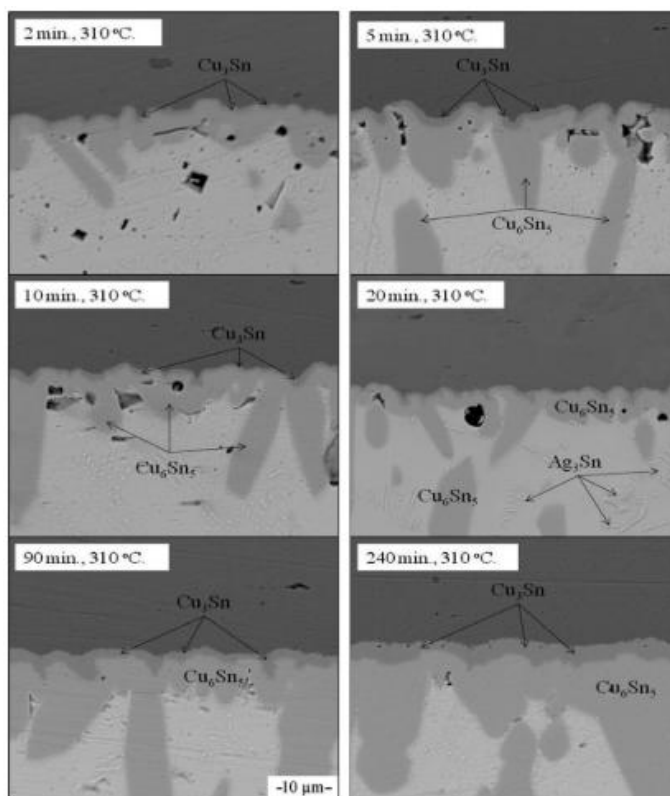
elengedhetetlenek az elektronikus eszközök működőképességéhez és hosszabb élettartamához.

Az előkészítési szakasz során a forrasztandó felületeknek tisztának és szennyeződésektől mentesnek kell lenniük. Ezt jellemzően folyasztószer alkalmazásával érik el, amely nemcsak a felületeket tisztítja, hanem elősegíti a forrasztóanyag nedvesítését is. Ezután a forrasztóanyagot felviszik a forrasztandó területekre, gyakran forraszpaszta formájában, amely folyasztószerben szuszpendált forrasztóötívzet részecskéiből áll. A forrasztási ötvözet megválasztása kritikus, mivel a különböző összetételek befolyásolhatják a végső kötés mechanikai és termikus tulajdonságait [16,17].

A melegítési vagy hevítési szakasz során a forrasztóanyag megolvad, amelyet általában olyan eljárásokkal végeznek, mint az újraömlésztéses forrasztás vagy a hullámforrasztás. Újraömlésztéses forrasztás esetén a nyomtatott áramköri szerelvényt egy szabályozott hőmérsékleti profilnak vetik alá, amely lehetővé teszi a forrasztó megolvadását és a kötés létrehozását. Ez a folyamat elengedhetetlen az intermetallikus vegyületek kialakulásához a forrasztó és az alapanyag közötti felületen, amelyek kulcsfontosságúak az erős metallurgiai kötés létrehozásához. A forrasztókötésekben leggyakrabban előforduló IMC-k közé tartozik a Cu_6Sn_5 és a Cu_3Sn , amelyek az olvadt forrasztó és a rézalapú hordozók közötti reakció eredményeként jönnek létre a folyamat során [18,19].

Abdelhadi és munkatársai [20] kísérletileg és analitikailag vizsgálták az Sn-3,5Ag forrasztóanyagok és a Cu szubsztrát között kialakuló intermetallikus rétegek növekedési kinetikáját a forrasztás során.

A forrasztóanyag felőli határrétegben Cu_6Sn_5 , a réz szubsztráthoz közelebb eső határrétegben pedig Cu_3Sn intermetallikus vegyületeket azonosítottak. A forrasztási idő hatásának összehasonlításához a 310°C forrasztási hőmérsékleten, 2 perctől 240 percig terjedő kötési idővel előállított kötésekről készült elektronmikroszkópos képeket a 2.1. ábra szemlélteti. Azt figyelték meg, hogy a forrasztási idő növelésével, mindkét intermetallikus vegyület rétegvastagsága növekszik.



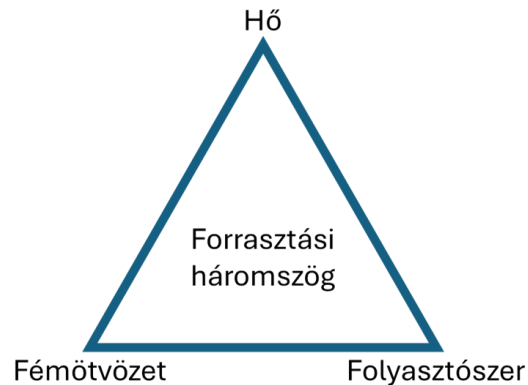
2.1. ábra: Sn-3.5Ag/Cu intermetallikus réteg elektronmikroszkóppal készült képei a forrasztási idő függvényében [20]

Az intermetallikus réteg kialakulása kétélű fegyver; míg az IMC szükséges a kapcsolat megbízhatóságához, a túlzott vastagság ridegséghez és terhelés hatására bekövetkező meghibásodáshoz vezethet. Tanulmányok kimutatták, hogy egy vékony réteg IMC az optimális, mivel a vastagabb rétegek növelhetik az elektromos ellenállást és csökkenthetik a mechanikai szilárdságot, ami potenciálisan repedésekhez vezethet termikus vagy mechanikai igénybevétel hatására [21,22]. A forrasztási folyamat hőmérséklete és ideje jelentősen befolyásolja ezeknek a vegyületeknek a növekedését, a magasabb hőmérséklet felgyorsítja képződésüket [23,24].

A hűtés az utolsó fázis, ahol az olvadt forrasztanyag megszilárdul és szilárd kötést képez. A hűtési sebesség a forrasztási kötés mikroszerkezetére is hatással van, befolyásolva az intermetallikus réteg méretét és az azt alkotó vegyületek eloszlását. A gyors lehűlés finomabb mikrostruktúrákat eredményezhet, ami javíthatja a forraszkötés mechanikai tulajdonságait [25].

Összeségében a forrasztás egy összetett folyamat, amely megköveteli a különféle paraméterek gondos kiválasztását és ellenőrzését, hogy biztosítva legyen a megbízható forrasztási kötések kialakítása. A forrasztási alapanyagok kémiai összetétele, a folyasztószer, a fűtési profilok és a hűtési sebesség közötti kölcsönhatás meghatározza a

forrasztási kötés minőségét, különösen az intermetallikus vegyületek képződését és jellemzőit. Az elektronikus szerelvények megbízhatóságának és teljesítményének növeléséhez kulcsfontosságú ezen összefüggések megértése, amelyeket jól szemléltet a forrasztási háromszög (2.2. ábra).



2.2. ábra: Forrasztási háromszög

2.1.2 Forrasztóötvetek

A forrasztóötvetek kritikus anyagok az elektronikában, amelyeket megbízható elektromos és mechanikai kapcsolatok létrehozására használnak az alkatrészek és a hordozók között. Általánosságban ólomzott és ólommentes forrasztóötvetekre oszthatók, amelyek mindegyike eltérő összetétellel és tulajdonsággal rendelkezik.

Az elsősorban ónból (Sn) és ólomból (Pb) álló ólomzott forrasztóötvetek évtizedekig széles körben használatosak voltak az elektronikában. A legelterjedtebb ólomzott forrasztóötvet az eutektikus Sn-Pb ötvözet, amelynek olvadáspontja körülbelül 183°C. Ez az eutektikus összetétel kiváló nedvesítési tulajdonságokkal és viszonylag alacsony olvadási hőmérséklettel rendelkezik, így alkalmas különféle forrasztási alkalmazásokhoz. Az ólomhoz kapcsolódó egészségügyi és környezetvédelmi aggályok miatt azonban az ólomzott forrasztóanyagok használatát korlátozzák [26].

A forrasztási folyamat során keletkező intermetallikus vegyületek hozzájárulnak a forrasztás mechanikai tulajdonságaihoz. Míg az ólomzott forrasztóanyagokat a történelem során előnyben részesítették egyszerű használatuk és teljesítményük miatt, a szabályozási nyomás az ólommentes alternatívák felé való elmozdulást ösztönözte.

Az ólommentes forrasztóötvetek előtérbe kerültek, mivel megfelelnek a környezetvédelmi előírásoknak, például az Európai Unió veszélyes anyagok korlátozásáról szóló (RoHS) irányelvének. A legszélesebb körben használt ólommentes forrasztóötvet az ón-ezüst-réz (SAC) ötvözet, különösen az Sn-3,0Ag-0,5Cu

(SAC305), amely jó egyensúlyt kínál a mechanikai tulajdonságok, a hőállóság és a forraszthatóság között [27]. A SAC-ötvözetek olvadáspontja magasabb, mint a hagyományos ólmozott forraszanyagoké, jellemzően 217-220°C körüli, ami kihívásokat okozott a gyártási folyamatokban [28].

A SAC-ötvözetek mellett más ólommentes kompozíciók közé tartoznak az Sn-Cu és Sn-Ag rendszerek, amelyek tulajdonságaik javítása érdekében különféle elemek hozzáadásával módosíthatók. Például az indium (In) hozzáadása javíthatja a nedvesítési jellemzőket és csökkentheti a forrasz olvadáspontját, míg az olyan elemek, mint a bizmut (Bi) és az antimon (Sb) javíthatják a mechanikai tulajdonságokat és a hőstabilitást [29,30]. Ezen elemek hozzáadása befolyásolhatja az IMC-k kialakulását is, amelyek kritikusak a forrasztási kötések mechanikai integritása szempontjából. Például az Ag jelenléte Ag₃Sn IMC-k képződését okozhatja, amelyek ugyan erősebbé teszik a kötést, de túlzott mennyiségben ridegséghez is vezethetnek [31].

Különféle fémek hozzáadása a forrasztási ötvözetekhez általános gyakorlat, amelynek célja a teljesítményük optimalizálása bizonyos alkalmazásokhoz. Például a nikkelt (Ni) bevezetése javíthatja az Sn-Cu ötvözetek hőfáradási ellenállását [32], míg a cink (Zn) javíthatja a nedvesíthetőséget és csökkentheti az olvadáspontot [33]. Más elemeket, például a mangánt (Mn) és a ritkaföldfémeket is vizsgálták a mikroszerkezet finomításában és a mechanikai tulajdonságok javításában rejlő lehetőségük miatt [34,35].

Az ötvözőelemek gondos kiválasztása kulcsfontosságú, mivel ezek jelentősen befolyásolhatják a mikroszerkezetet és az IMC-k képződését a forrasztási folyamat során. Például kimutatták, hogy az Sn-Ag-Cu ötvözetekhez In hozzáadása módosítja az IMC-k morfológiáját, potenciálisan javítva a forrasztási kötések mechanikai tulajdonságait [35,36]. Hasonlóképpen a nanorészecskék, például a ZrO₂ alkalmazását is vizsgálták az ólommentes forraszanyagok mikrokeménységének és általános teljesítményének javítására [37].

Az ólmozott és ólommentes forrasztóötvözetek fejlesztése egy dinamikus terület, amely a gyártástechnológiához alkalmazkodva, a szabályozási követelményeknek megfelelően folyamatosan fejlődik. Ezen ötvözetek gondos tervezése, beleértve a különféle fémek stratégiai hozzáadását, elengedhetetlen a teljesítményük optimalizálásához a modern elektronikai alkalmazásokban.

2.1.3 Forrasztási felületek bevonatai

A nyomtatott áramköri lapok felületkezelése az elektronikai gyártás kritikus szempontja, mivel jelentősen befolyásolja az elektronikus szerelvények forraszthatóságát, korrózióállóságát és általános megbízhatóságát. A nyomtatott áramköri lapok felületkezelésének elsődleges feladata a réz vezetősávok oxidációtól és szennyeződéstől való védelme, megbízható kapcsolatot biztosítva a forrasztási felületek számára. Az elektronikai iparban különféle felületkezeléseket alkalmaznak, amelyek mindegyike egyedi tulajdonságokkal és alkalmazásokkal rendelkezik.

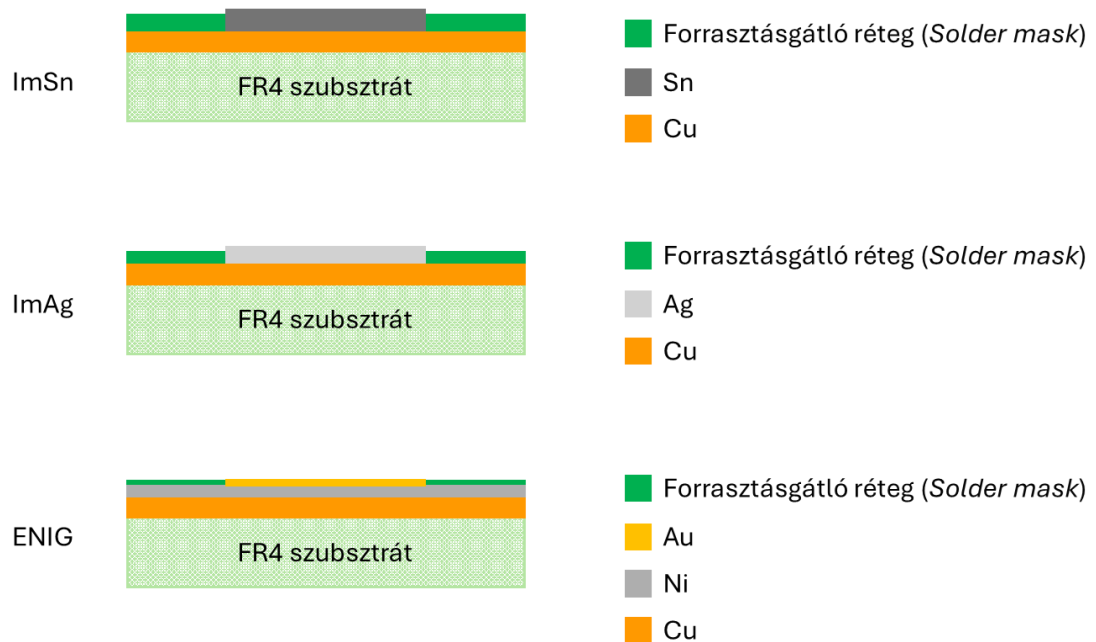
Az immerziós ón (*immersion tin*, ImSn) egy széles körben használt felületi bevonatolás, amely magában foglalja egy vékony ónréteg felvitelét a rézpárnákra elektrolízissel. Az ónréteg vastagsága körülbelül 1 μm , amely a vegyi eljárásnak köszönhetően egyenletesen terül el, szemben más gyártási technológiákkal. Ez a bevonat típus gazdaságos, jó forraszthatóságot biztosít, és különösen hatékony az ólommentes forrasztási alkalmazásoknál. Az immerziós ón azonban érzékeny a tárolási körülményekre, emiatt a korrózióra. Magas tárolási hőmérséklet hatására az ón-réz (Sn-Cu) intermetallikum növekedése felgyorsul, amelyek idővel a felszínre törhetnek, és oxidációjuk következtében akadályozhatják a forrasztási kötések kialakulását és megbízhatóságát [38–41].

Az immerziós ezüst (*immersion silver*, ImAg) egy másik népszerű választás, ahol vékony ezüstréteget helyeznek fel a rézpárnákra. Az immerziós ezüst bevonat felületén 1 μm -nél vékonyabb ezüst réteg található. Ez a felület javítja a forraszthatóságot és jó elektromos teljesítményt biztosít. Az immerziós ezüst érzékeny a levegőben található szennyeződésekre, például a klórra és a kénre, amelyek hatására patina alakulhat ki a felületen. Az ezüstréteg különösen nedves környezetben hajlamos a korrózióra, ami a forrasztási kötés integritását veszélyezteti [41–43]. Ezen túlmenően az ezüst hajlamos az ionmigrációra, amely további megbízhatósági problémákhoz vezethet. Az ilyen környezeti hatások miatt az immerziós ezüst felület tartóssága gyakran elmarad a többi bevonatétól, és foltosodásra is hajlamos lehet [44–46].

A kémiai nikk-el-arany (*electroless nickel – immersion gold*, ENIG) egy kedvelt felületkezelés, amely egy réteg nikkelt egy nagyon vékony réteg arannyal kombinál. Ez a bevonat kiváló korrózióállóságot és sima felületet biztosít, amely ideális forrasztáshoz. Az ENIG különösen nagyra értékelt a nagy megbízhatóságú alkalmazásokban, mivel képes megakadályozni az oxidációt és fenntartani a forraszthatóságot [47,48]. Ez a típusú

bevonat anyagi minőségéből adódóan és a gyártási folyamat miatt is költségesebb lehet más bevonatokhoz képest. Probléma lehet a nikkel-diffúzió a forraszanyagba, ha nem kezelik megfelelően. A leggyakoribb hibaforrás a nikkel korróziója, amely jelentkezhet a gyártás során, abban az esetben, ha az aranyozási reakció túl heves, a nikkel réteg korrodálódhat („*black pad*” jelenség). Ha azonban az arany réteg hiányos, a tárolás folyamán megindul a Ni oxidációja, ezzel csökkentve a felület forraszthatóságát [49–51].

A fent bemutatott nyomtatott áramköri lap felületkezelési eljárások során kialakított rétegsorrendet a 2.3. ábra demonstrálja.



2.3. ábra: ImSn, ImAg és ENIG bevonatokat felépítő rétegek

A nyomtatott áramköri kártyák (*Printed Circuit Board, PCB*) felületkezelése terén elért legújabb fejlesztések ezen bevonatok teljesítményének és megbízhatóságának javítására összpontosítanak. A kutatások például alternatív anyagok és eljárások alkalmazását tárták fel az immerziós ezüst és kémiai arany-nikkel bevonatok tartósságának és forraszthatóságának javítására. Kimutatták, hogy a merítési fürdők kialakításában és az ötvözőelemek hozzáadásával kapcsolatos innovációk javítják ezeknek a felületeknek a mechanikai tulajdonságait és korrózióállóságát [47,48].

Ezenkívül a tanulmányok kimutatták, hogy a nanotechnológia alkalmazása, mint például az ezüst nanorészecskék beépítése, javíthatja a PCB felületek antimikrobiális tulajdonságait, potenciálisan csökkentve az elektronikus eszközök bioszennyeződésének kockázatát. Ezen túlmenően az új bevonási technikák, például a fejlett galvanizálási

módszerek kifejlesztésének célja egységesebb és vastagabb védőrétegek létrehozása, amelyek ellenállnak a zordabb környezeti feltételeknek [52].

A NYÁK bevonatolási felületkezelésének helyes megválasztása elengedhetetlen az elektronikus szerelvények megbízhatóságának és teljesítményének biztosításához. A folyamatban lévő kutatások és technológiai fejlesztések továbbra is javítják a felületeknek a tulajdonságait, kezelve a korrózióval, a forrasztathatósággal és az általános tartóssággal kapcsolatos kihívásokat.

2.1.4 Folyasztószer

A forrasztófolyasztószeresek nélkülözhetetlen anyagok a forrasztási folyamatban, kritikus szerepet játszanak az elektronikai szerelvények forrasztási kötései minőségének és megbízhatóságának biztosításában. Elsődleges céljuk a forrasztási folyamat megkönnyítése az összekötendő felületek megtisztításával, az oxidáció megakadályozásával, valamint a forrasztóanyag hordozófelületen történő nedvesedésének elősegítésével. Ez különösen fontos az elektronikában, ahol a forrasztási kötések integritása a legfontosabb az eszköz teljesítménye és hosszú élettartama szempontjából.

2.1.4.1 Folyasztószer feladatai

A folyasztószeresek fő funkciói a következők a forrasztás folyamata során:

- Oxideltávolítás: A folyasztószeresek kémiai reakcióba lépnek a fémfelületeken lévő oxidokkal, lehetővé téve a forrasztóanyag jobb tapadását. Ez döntő fontosságú, mert az oxidok jelentősen gátolhatják a forrasztóanyag nedvesítését a fémfelületeken, ami rossz kötésminőséghez vezet [53,54].
- Nedvesítés támogatása: A folyasztószeresek csökkentik az olvadt forrasztóanyag felületi feszültségét, ezzel javítva annak területesi képességét és a felületi egyenetlenségekbe való behatolását [55,56].
- Védelem: A folyasztószeresek védőgátat képeznek az oxidáció ellen a forrasztási folyamat során és után, ami különösen fontos a magas hőmérsékletű alkalmazásoknál [57].

2.1.4.2 Folyasztószeresek összetétele

A folyasztószeresek összetételét a gyártók szigorúan titokban tartják, azonban ezek receptúrái általában hasonlóak, és gyakran azonos összetevőket tartalmaznak. Alapvetően négy fő komponens alkotja őket [57–59]:

- Hordozóanyag: Általában valamilyen természetes gyanta, amely szilárd alapot biztosít a folyasztószerhez, és hozzájárul a tapadási tulajdonságaihoz. A felületen szétterülve, elfedi a már oxidmentesített területet, védve azt az újraoxidációtól.
- Aktivátorok: Vegyi anyagok, amelyek fokozzák a folyasztószer oxid-eltávolítási képességét. A gyakori aktivátorok közé tartoznak a szerves savak és aminok, amelyek elősegítik a forraszthatóságot.
- Oldószerek: Ezek a gyanta és az aktivátorok feloldására szolgálnak, így olyan pasztát vagy folyékony formát hoznak létre, amely könnyen felvihető a forrasztási területre. Az oldószerek a folyasztószer viszkozitásának szabályozásában is segítenek.
- Segédanyagok: Olyan egyéb adalékok, amelyek módosítják a folyasztószer területi jellemzőit, lehetővé téve, hogy a forrasztási folyamat során a helyén maradjon anélkül, hogy lefolyna.

2.1.4.3 Folyasztószeres csoportosítása

Tanulmányomban részletesen bemutatom a különböző nemzetközi ipari szabványokat és azok besorolását, amelyek hozzájárulnak a rendszerszemlélet kialakításához.

A DIN 29454-1 szabvány a folyasztószeres osztályozásával és előírásaival foglalkozik. Az első rész a kémiai összetétel szerint kategorizálja ezeket az anyagokat, míg a második rész a velük szemben támasztott teljesítménykövetelményeket foglalja össze. A szabvány szerinti osztályozást a 2.1. táblázat foglalja össze.

2.1. táblázat: Folyasztószer osztályozása DIN 29454-1 szerint

Folyasztószer típusa	Alapanyag	Aktivátor	Halmazállapot
1. Gyantás	1. Természetes gyanta 2. Természetes gyanta mentes	1. Aktivátor mentes 2. Halogén aktivátorral 3. Halogénmentes	A. Folyadék B. Szilárd C. Paszta
2. Szerves	1. Vízoldható 2. Nem vízoldható	1. Aktivátor mentes 2. Halogén aktivátorral 3. Halogénmentes	
3. Szervetlen	1. Sók	1. Ammónium-klorid 2. Ammónium-klorid nélkül	
	2. Savak	1. Foszforsav 2. Egyéb sav	
	3. Lúgok (alkalikus)	1. Aminok és/vagy ammónia	

Ezt az osztályozást követve például egy 2.2.3.A típusú folyasztószerrel megállapítható, hogy szerves alapú folyasztószer, amely nem vízoldható, nem tartalmaz halogéneket, és folyadék halmazállapotú. Ezen információk alapján meghatározható a folyasztószer alkalmazása az adott felhasználási feladathoz.

A magyar MSZ EN 61190 szabvány szinte teljes mértékben megfelel az IEC 61190 1-3 szabványsorozat előírásainak, biztosítva ezzel a nemzetközi követelményekkel való összhangot. Emellett a MSZ EN 61190-1 előírásai nagyfokú hasonlóságot mutatnak az amerikai ANSI J-STD-004 szabvánnyal, ami megkönnyíti a különböző iparági normák közötti átjárhatóságot. Az ezek közötti kapcsolatok és eltérések részletes összehasonlítását a 2.2. táblázat szemlélteti.

2.2. táblázat: Folyasztószer osztályozása - MSZ EN 61190 IEC 61190 1-3 és ISO 9454 1-2 összehasonlítása

Hordozó	Folyasztószer-aktivitás (halogén-tartalom, %)	Folyasztószer osztályba sorolása		
		IEC szerint	MSZ EN 61190 szerint	ISO szerint
Természetes gyanta - RO (rosin)	Alacsony (0%)	ROL0	L0	1.1.1
	Alacsony (<0,5%)	ROL1	L1	1.1.2.W, 1.1.2.X
	Mérsékelt (0%)	ROM0	M0	1.1.3
	Mérsékelt (0,5-2,0%)	ROM1	M1	1.1.2.Y, 1.1.2.Z
	Magas (0%)	ROH0	H0	1.1.3.X
	Magas (>2%)	ROH1	H1	1.1.2.Z
Mesterséges gyanta - RE (resin)	Alacsony (0%)	REL0	L0	1.2.1
	Alacsony (<0,5%)	REL1	L1	1.2.2.W, 1.2.2.X
	Mérsékelt (0%)	REM0	M0	1.2.3
	Mérsékelt (0,5-2,0%)	REM1	M1	1.2.2.Y, 1.2.2.Z
	Magas (0%)	REH0	H0	1.2.3.X
	Magas (>2%)	REH1	H1	1.2.2.Z
Szerves - OR (organic)	Alacsony (0%)	ORL0	L0	2.2.1, 2.2.3.E
	Alacsony (<0,5%)	ORL1	L1	-
	Mérsékelt (0%)	ORM0	M0	-
	Mérsékelt (0,5-2,0%)	ORM1	M1	2.1.2, 2.2.2
	Magas (0%)	ORH0	H0	2.2.3.0
	Magas (>2%)	ORH1	H1	2.2.2
Szervetlen - IN (inorganic)	Alacsony (0%)	INL0	L0	Nem alkalmazható
	Alacsony (<0,5%)	INL1	L1	
	Mérsékelt (0%)	INM0	M0	
	Mérsékelt (0,5-2,0%)	INM1	M1	
	Magas (0%)	INH0	H0	
	Magas (>2%)	INH1	H1	

Ez alapján a bázis lehet gyanta, műgyanta, szerves vagy szervetlen anyag. A Nemzetközi Szabványügyi Szervezet először egy számmal határozza meg a hordozó alapvető kategóriáját, amelyet egy további szám követ a pontosabb specifikáció érdekében. Ezzel szemben a Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság jelölési rendszere két kezdőbetű kombinációjával utal a fő típusra.

Az aktivátor kifejezésére az ISO és az IEC eltérő módszert alkalmaz a jelölési rendszerükben. Az ISO egy harmadik számot használ annak jelzésére, hogy a folyasztószer tartalmaz-e aktivátort, és ha igen, milyen típusút. Ezt követően az X, Y, Z betűk segítségével határozza meg az aktivátor tömegszázalékát a folyasztószerben. Ezzel szemben az IEC egy harmadik betűt alkalmaz a folyasztószer aktivitásának jelölésére: a „H” magas, az „M” közepes, míg az „L” alacsony aktivitást jelent. A számérték pedig a halogéntartalomra utal, ahol az „1” jelöli a halogén jelenlétét, a „0” pedig annak hiányát.

Általánosságban elmondható, hogy a halogéntartalmú folyaszttószerkek nagyobb aktivitással rendelkeznek, ami jobb nedvesítőképességet eredményez, ugyanakkor növeli a maradék szennyeződés és a korrózió kockázatát [60].

A folyaszttószerkek kiválasztásához három fő jellemzőt kell figyelembe venni: a hordozóanyag típusát, a fennmaradó anyag ionaktivitását és a szilárdanyag-tartalmat. Ezek a tulajdonságok határozzák meg, hogy szükség van-e a forrasztott NYÁK tisztítására, bár ennek szükségessége a termék rendeltetésétől is függhet. Az aktív hordozóanyagok önálló folyaszttószerként is működnek, míg a fennmaradó anyagok és a szilárdanyag-tartalom alacsonyabb értékei jobb forrasztási eredményeket biztosítanak.

A hagyományos folyaszttószerkek nagy arányban tartalmaznak gyantát, ami magas szilárdanyag-tartalmat eredményez. Az iparágban azonban egyre nagyobb hangsúlyt kap ezen tartalom csökkentése, amelynek eredményeként olyan új termékek jelentek meg a piacon, mint a „*No Residue*” (maradékmentes), „*Low Residue*” (csekélymaradékú) vagy „*No Clean*” (tisztítást nem igénylő) folyaszttószerkek. Ezek kevesebb szilárdanyagot tartalmaznak (a korábbi 15-45%-os gyantatartalomhoz képest csupán 2-8%), csökkentve ezzel a forrasztás után visszamaradó anyagok káros hatásait és lehetővé téve a tisztítási folyamat elhagyását. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez a gyakorlatban nem minden esetben alkalmazható egyértelműen.

A folyaszttószerkek összetételük és felhasználásuk alapján az alábbi kategóriákba sorolhatók:

- **Gyanta-alapú folyaszttószerkek:** Ezek hagyományos folyaszttószerkek, amelyek elsődleges összetevője a gyanta. A folyaszttószerkek használatának előnyei közé tartozik a nagyon jó, akár kitűnő forrasztási eredmény, valamint a magas megbízhatóságot igénylő alkalmazásoknál és a magas hőmérsékletű környezetekben való kiváló teljesítmény. Ezen kívül hosszú élettartamot biztosítanak, ami tovább növeli hatékonyságukat. Ugyanakkor vannak hátrányai is: ezek a folyaszttószerkek több előmelegítést igényelnek, és a maradványokat el kell távolítani, ami további költségekkel jár. A berendezések karbantartást igényelnek, és a további folyamatokban, például az áramköri tesztelés (*In-Circuit Test*, ICT) és az automatizált optikai ellenőrzés (*Automated Optical Inspection*, AOI) során nehézségeket okozhatnak. Továbbá, gyakran szükség van a folyaszttószer adagoló karbantartására is. Egyes alkalmazások esetén pedig a maradványok megbízhatósági aggályokat vethetnek fel. A gyantatartalmú folyaszttószerkek alkalmazása az iparban a legrégibbi, így már jelentős tapasztalati

háttér áll rendelkezésre róluk, ugyanakkor ezek a folyaszttószerrek hagyják maguk után a legnagyobb szilárdanyag-tartalmú maradékot.

- **Vízben oldódó folyaszttószerrek:** A vízben oldható folyaszttószerrek egy új csoportot alkotnak, alapjuk nem feltétlenül víz, és halogén tartalmuk alapján tovább osztályozhatók. Kiválasztásuk során fontos figyelembe venni az illékony szerves vegyület (*Volatile Organic Compound*, VOC) tartalmat, mivel környezetvédelmi szempontból jelentős, és több európai uniós jogszabály is szabályozza. E folyaszttószerrek kiváló forrasztási eredményeket nyújtanak, széles folyamatablakkal rendelkeznek, és magas megbízhatóságot igénylő alkalmazásokhoz, valamint magas hőmérsékletű környezetekhez is használhatók. Ugyanakkor több előmelegítést igényelnek, és a maradványokat el kell távolítani, ami további költségekkel jár. A tisztítási folyamatot folyamatosan figyelni kell, különösen az ionvándorlás szempontjából, és azt a gyártó által előírt időn belül el kell végezni. Még enyhe maradványok is lokális hibákat okozhatnak. Bár több utólagos tisztítást igényelnek, mivel korróziós problémákat okozhatnak és magas eszköz- és energiaköltséget vonhatnak maguk után, kiváló forrasztási felületet biztosítanak, ami továbbra is fontos szerepet ad számukra a forrasztástechnikában.
- Tisztítást nem igénylő („*no-clean*”) folyaszttószerrek: Ahogy a neve is sugallja, ezeket a folyaszttószerreket úgy alakították ki, hogy minimális maradékot hagyjanak maguk után, amelyek nem igényelnek tisztítást. Kényelmük és rövidebb feldolgozási idejük miatt népszerűek a nagy volumenű gyártásban [61]. A maradékok azonban bizonyos körülmények között továbbra is káros hatásúak lehetnek, ami az alkalmazási környezet alapján gondos szelekciót tesz szükségessé [62,63].

2.1.4.4 Tisztítást nem igénylő folyaszttószer

A szilárdanyag-tartalom csökkentése érdekében két új típusú bázist fejlesztettek ki, ahol az oldószer tölti be a bázis/hordozó funkciót. Az egyik vízbázisú (bár nem feltétlenül oldódik vízben), a másik alkoholtartalmú. Az alkoholtartalmúak között különbséget tehetünk azok között, amelyek kisebb gyantatartalommal rendelkeznek, illetve azok között, amelyek teljesen gyanta mentesek.

A tisztítást nem igénylő folyaszttószerrek az elektronikai gyártásban jelentős előrelépést hoztak, mivel számos gyakorlati és gazdasági előnyt kínálnak a hagyományos folyaszttószerrekkal szemben. Az egyik legfontosabb előnyük, hogy kiküszöbölhetik a

forrasztás utáni tisztítási lépést, ami nemcsak gyorsabbá teszi a gyártási folyamatot, hanem jelentős munkaerő- és időmegtakarítást is eredményez. Emellett a tisztítás elhagyása gazdasági szempontból is kedvező, mivel nincs szükség tisztító oldószerekre vagy speciális berendezésekre, ami különösen nagy volumenű gyártásnál csökkenti a működési költségeket. Mindezek mellett nagyon jó forrasztási eredményeket biztosítanak, alacsonyabb előmelegítési folyamatokat tesznek lehetővé, és széles alkalmazási lehetőségekkel rendelkeznek, mivel könnyen kezelhetők. Az alkoholbázisú folyasztszerek alacsony szilárdanyag-tartalmúak. A vízbázisú folyasztszerek pedig VOC-mentesek, nincs illékony oldószerek, és a gyanta tartalmú változathoz vagy az alkoholos verzióhoz képest hosszabb élettartamot biztosítanak.

A környezeti szempontokat figyelembe véve a tisztítást nem igénylő folyasztszerek csökkentik a káros oldószerek használatát, ezáltal fenntarthatóbb gyártási folyamatot tesznek lehetővé. További előnyük, hogy a maradványok, amelyeket a forrasztás során hátrahagynak, általában nem korrozívak, így nem rontják az elektronikai alkatrészek teljesítményét. Ez különösen fontos a nedves környezetben történő alkalmazásoknál, ahol a hosszú távú megbízhatóság kiemelt jelentőséggel bír [64,65].

A tisztítást nem igénylő folyasztszerek, bár számos előnnyel járnak, bizonyos hátrányokkal is rendelkeznek, amelyek befolyásolhatják a forrasztási folyamat és az eredmény hosszú távú megbízhatóságát. Például az alkoholbázisú, alacsony szilárdanyag-tartalmú folyasztszerek kisebb aktivitással és szűkebb folyamatablakokkal rendelkeznek, ami magas hőmérsékletű alkalmazások esetén problémát jelenthet. A vízbázisú, VOC-mentes folyasztszerek több előmelegítést igényelnek, ami növelheti a ciklusidőt, és tisztaságuk nem éri el az alkoholos változatokét.

Hátrányok tekintetében a maradékanyagok, amelyeket ezek a folyasztszerek hagynak maguk után, bár minimalizáltak, mégis problémákat okozhatnak bizonyos alkalmazásokban. Egyes maradékok higroszkópos tulajdonságúak, ami azt jelenti, hogy nedvességet szívhatnak fel a környezetből, elősegítve a korrózió kialakulását. Ezenkívül, ha a maradékok eltávolítása mégis szükségessé válik, a tisztítás sokkal nehezebb lehet, mivel ezek a maradékok gyakran nem távolíthatók el a hagyományos tisztítási módszerekkel [63].

Bizonyos tisztítást nem igénylő folyasztszerek halogéneket vagy más korrozív anyagokat is tartalmazhatnak, amelyek nedves környezetben különösen hajlamosak lehetnek a korrózió előidézésére. Végül, az ilyen típusú folyasztszerek hatékonysága

erősen függ az adott összetételtől és a felhasznált forrasztási eljárástól, ami változékony forrasztási minőséget eredményezhet, ha nem alkalmazzák megfelelően [66,67].

Ennek ellenére ezek a folyasztószer nagy népszerűsége tettek szert, mivel széleskörűen alkalmazhatók, könnyen kezelhetők, és jelentősen kevesebb maradékot hagynak maguk után a forrasztás után, így csökkenthetik a tisztítással járó környezeti hatásokat és anyagi költségeket. A tisztítást nem igénylő folyasztószer számos területen váltak nélkülözhetetlenné az elektronikai iparban, különösen ott, ahol a hatékonyság és a költségcsökkentés kulcsfontosságú. Gyakran alkalmazzák felületszerelési technológiákban (*Surface Mount Technology, SMT*), mivel gyors és megbízható megoldást nyújtanak a nyomtatott áramkört lapok alkatrészeinek szerelésére, különösen nagy volumenű gyártási környezetben. Az újraömlésztéses forrasztási eljárásokban a forrasztópaszták részeként a folyamat során elpárolognak vagy lebomlanak, minimális maradékot hagyva maguk után. Az ún. „*flip-chip*” csomagolási technológiákban is kiemelt szerepet játszanak, mivel hozzájárulnak a költségek csökkentéséhez és a környezeti hatások minimalizálásához, miközben fenntartják a forrasztási kötések megbízhatóságát. Az automatizált forrasztási eljárások, például a hullámforrasztás, szintén előnyben részesítik ezeket a folyasztószerket, mivel lehetővé teszik a tisztítási lépések elhagyását, ezáltal egyszerűsítve a műveleteket [64,68,69].

2.1.4.5 Új irányok a folyasztószer fejlesztésében

A folyasztószer-technológia legújabb fejlesztései a teljesítmény növelésére irányulnak, miközben figyelembe veszik a környezetvédelmi és megbízhatósági szempontokat. Ezek között kiemelkednek az illékony szerves oldószer VOC-mentes folyasztószer, amelyek csökkentik a káros kibocsátásokat anélkül, hogy rontanák a forraszthatóságot [61]. Emellett a nanorészecskékkel javított készítmények a forrasztási kötések mechanikai tulajdonságait és ellenállóképességét növelik [70]. Az okos („*smart*”) folyasztószer új generációja pedig a környezeti tényezők, például hőmérséklet vagy páratartalom alapján optimalizálja a működését [71]. További kutatások a folyasztószer-maradványok korróziós hatásait vizsgálják, különös tekintettel a nedves környezetre és az aktivátorok tulajdonságaira [62,63].

2.1.4.6 Folyasztószer által okozott hibák

A tisztítást nem igénylő folyasztószer az elektronikai iparban szabványossá vált a forrasztási folyamat során nyújtott egyszerű kezelhetőségük és hatékonyságuk miatt. Használatuk azonban nem mentes kihívásoktól, különös tekintettel a nyomtatott áramkört

szerelvényeken (*Printed Circuit Board Assembly*, PCBA) előforduló folyasztószermaradványok által okozott meghibásodási mechanizmusok lehetőségére.

- Elektrokémiai migráció (*Electrochemical Migration*, ECM):

A tisztítást nem igénylő folyasztószer maradványaival kapcsolatos egyik elsődleges aggály az, hogy képesek elősegíteni az elektrokémiai migrációt. Az ECM akkor fordul elő, amikor a nedvesség és az ionos szennyeződések vezető utakat hoznak létre a PCB-k felületén, ami elektromos tér hatására a fémionok vándorlásához vezet. Ez a jelenség dendritek képződését eredményezheti, amelyek olyan vezető szálak, amelyek áthidalhatják a vezető pályák közötti hézagokat, ami végső soron nem kívánt átvezetést és eszközmeghibásodást okoz [69,72].

A jelenség különösen kritikus nagyfeszültségű, nagy sűrűségű és hosszú élettartamra tervezett elektronikai rendszerek esetében, mint például autóiipari vezérlőegységek. Az elektrokémiai migráció megelőzése érdekében elengedhetetlen a folyasztószer mennyiségének minimalizálása, valamint az észlelhetőség fejlesztése és a megfelelő tisztítási eljárások alkalmazása, az áramköri lapok környezetállóságának növelése érdekében. Az ECM kinetikai jellemzőit a hibáig eltelt átlagos idővel (MTTF – *Mean Time to Failure*) írják le, amely meghatározható vízcsepp (WD – *Water Drop*) teszttel. A WD módszer során egy vízcseppel fedett elektródapárra feszültséget kapcsolnak, és mérik az áram hirtelen megemelkedéséig eltelt időt, amely a dendritképződés következményeként fellépő rövidzárlatra utal [73].

Számos tényező befolyásolja az ECM kialakulását és az MTTF értékét, például az elektromos tér erőssége, a környezeti feltételek (hőmérséklet, páratartalom), az elektródák és a forrasztótvözet anyagi összetétele, valamint a felületkezelés módja. Kiemelten fontos szerepet játszanak a gyártási folyamatból vagy a környezetből származó szennyeződések, különösen a folyasztószermaradványok, amelyek ionvándorlást és dendritképződést segítő összetevőket (pl. kloridionokat, gyenge szerves savakat) tartalmazhatnak [74–76].

- Korrózió:

A tisztítást nem igénylő folyasztószer által visszamaradt maradékok felszívhatják a nedvességet a környezetből, kedvező környezetet teremtve a korrózióhoz. Az ionos szennyeződések jelenléte súlyosbíthatja ezt a problémát, ami az elektronikus alkatrészek korróziós meghibásodásához vezethet. Tanulmányok kimutatták, hogy ezeknek a maradványoknak az ionos természete jelentősen befolyásolhatja az elektronikai szerelvények megbízhatóságát, különösen nedves körülmények között [77,78].

- Szivárgó áramok:

A folyasztószer maradványok miatt a PCB-k felületén vízréteg képződése szivárgási áramokhoz vezethet, amelyek nem szándékos elektromos utak, és veszélyeztethetik az eszköz működését. Ezek a szivárgó áramok hozzájárulhatnak az elektronikus alkatrészek túlmelegedéséhez és esetlegesen meghibásodásához [69,79].

A dielektromos átütés akkor következik be, amikor egy szigetelő anyagon keresztül elektromos ív alakul ki, amelyet különböző tényezők, például porlerakódás, légköri átütés vagy felületi kisülés okozhat. A kritikus elektromos térerősség, amelynél a szigetelő anyag elveszíti szigetelőképességét, a dielektromos szilárdság, míg az ehhez tartozó potenciálkülönbség az átütési feszültség. Ezen értékeket több tényező befolyásolja, mint például a vezetősávok elhelyezkedése, az alkalmazott feszültség és változási üteme, valamint a környezeti feltételek, például a hőmérséklet, páratartalom és szennyeződések jelenléte. Az átütési feszültség statisztikai módszerekkel becsülhető, mivel a fent említett tényezők gyakran véletlenszerűek vagy nehezen kontrollálhatók [80,81].

A PCB-k esetében az átütés bekövetkezhet a panel ellentétes oldalán lévő vezetősávok között, az azonos oldalon futó sávok között, illetve az alkatrészek kivezetésein keresztül. Egyes esetekben a védőbevonaton keresztül vagy a felületén felhalmozódó vezető szennyeződések miatt is létrejöhet átütés. A környezeti hatások következtében az átütési feszültség függ a nyomás, hőmérséklet és páratartalom változásától. Magas páratartalom mellett a PCB felületén vékony vízréteg alakulhat ki, amely elősegíti az ionizációt, ezáltal csökkentve a dielektromos szilárdságot [82].

A gyártási folyamat során visszamaradó szennyeződések, például a forrasztási folyasztószer maradványai jelentősen növelhetik a meghibásodás kockázatát. A tisztítást nem igénylő folyasztószer alkalmazása lehetővé teszi a PCB-k tisztításának mellőzését, csökkentve ezzel az idő- és költségráfordítást, de a maradékanyagok hátrányosan befolyásolhatják a szigetelési ellenállást és elősegíthetik a korróziót és az elektrokémiai migrációt. A védőbevonatok is károsodhatnak a folyasztószer-maradványok hatására [83]. A szennyeződések eltávolításának szükségessége a működési körülményektől, például a hőmérséklettől és páratartalomtól függ.

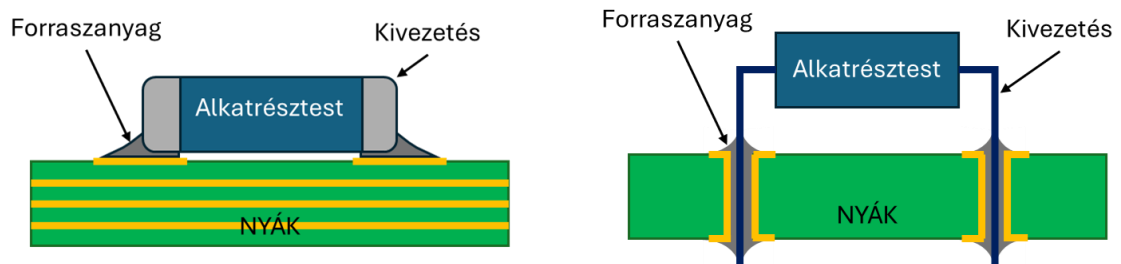
2.1.5 Elektronikai szerelvények gyártási folyamata, forrasztási technológiák

Az elektronikai termékek gyártása számos folyamatot és technológiát ölel fel, amelyet a 2.4. ábra hivatott szemléltetni. Ezek közül a forrasztási technológiák kulcsszerepet játszanak az alkatrészek és a hordozók közötti megbízható kapcsolatok biztosításában.



2.4. ábra: Elektronikai termékek gyártásának folyamatábrája

Ebben a fejezetben a forrasztási technológiák általános vonatkozásait taglalom, különös tekintettel a felületi szerelési technológiára és az átmenő furatos gyártási technológiájára, kiemelve ezek módszertanát, előnyeit és alkalmazásait. A 2.5. ábra egy felület- és furatszerelt alkatrészen keresztül mutatja be a szerelési technológiák közötti különbséget.



2.5. ábra: Felület- (SMT, bal) és furatszerelt (THT, jobb) technológia

2.1.5.1 Felületszerelt technológia

A nyomtatott áramköri kártya összeszerelésének folyamata az elektronikai gyártás kritikus aspektusa, amely egy sor aprólékosan összehangolt lépést foglal magában, amelyek biztosítják az elektronikus alkatrészek megbízható integrálását a PCB-re.

A felületszerelt technológia forradalmasította az elektronikai alkatrészek nyomtatott áramköri lapokra történő összeszerelését, lehetővé téve a nagyobb alkatrész-sűrűséget, a miniaturizálást és a gyártási folyamatok hatékonyságának javítását [84,85].

Az összeszerelési folyamat jellemzően a nyomtatott áramköri lap előkészítésével kezdődik, amely magában foglalja a tisztítást és a forrasztópaszta felhordását a kártya kijelölt területeire. Ezt követi az elektronikai alkatrészek elhelyezése, amely kézi vagy automatizált módszerekkel valósítható meg. Ez utóbbi egyre inkább elterjedt a sebesség, a pontosság és az ismételhetőség terén nyújtott előnyei miatt.

Az elektronikai termékek összeszereléséhez használt automata berendezések sokrétűek és speciálisak, beleértve a forrasztópaszta felhordásához használt pasztanyomtatókat, az alkatrészek elhelyezésére szolgáló automata gépeket és a

forrasztáshoz használt újraömlesztéses kemencét. Egy általános SMT gyártósor berendezéseinek vázlatát a 2.6. ábra demonstrálja.



2.6. ábra: SMT gyártósor berendezései

A stencilnyomtatók forrasztópasztát visznek fel a nyomtatott áramköri lapra egy sablonon keresztül, amely egy vonalba esik azokkal a forrasztási felületekkel („pad”-ekkel), ahová az alkatrészeket elhelyezik. Ez a lépés kulcsfontosságú, mivel meghatározza a felhasználandó forrasztóanyag mennyiségét, ami közvetlenül befolyásolja az újraömlesztési folyamat során kialakult forrasztási kötések minőségét [86–88]. Ebből az okból kifolyólag napjainkban már a paszta nyomtatás megfelelőségét is optikai úton, automata berendezésekkel (*Solder Paste Inspection, SPI*) ellenőrzik. Az automata alkatrészbeültető gép ezután pozicionálva elhelyezi az alkatrészeket a forrasztópasztára, kihasználva a fejlett robotikát és optikai rendszereket a precizitás biztosítása érdekében [89,90].

A komponensek elhelyezése után a PCB újraömlesztéses forrasztókemencén megy keresztül, ahol a forrasztópasztát megolvasztják, állandó elektromos és mechanikus kapcsolatokat hozva létre az alkatrészek és a PCB között [87,91,92]. Ezt a folyamatot gondosan ellenőrizni kell, hogy elkerüljük az olyan hibákat, mint például a rövidzár, az elégtelen forrasztás, vagy az úgynevezett sírkő-effektus, amelyek veszélyeztethetik az elektronikus eszköz működését [93,94]. A forrasztás után különböző ellenőrzési módszereket alkalmaznak a szerelvény integritásának biztosítására. Az automatizált optikai vizsgálatot (AOI) általában olyan hibák észlelésére használják, mint például a rosszul beültetett alkatrészek vagy forrasztási problémák, ami kritikus minőségellenőrzési intézkedést jelent a gyártási folyamatban [92,95].

Ezek az elsődleges lépéseken kívül a PCBA-folyamat további minőségbiztosítási intézkedéseket is tartalmazhat, mint például az áramköri tesztelés (ICT) és a funkcionális tesztelés. Az áramköri tesztelés magában foglalja az összeszerelt NYÁK elektromos teljesítményének tesztelését, hogy a végtermék elkészülte előtt azonosítsák a hibákat. A

funkcionális tesztelés felméri az összeszerelt NYÁK általános teljesítményét a végtermék összefüggésében, biztosítva, hogy az megfeleljen a szükséges előírásoknak.

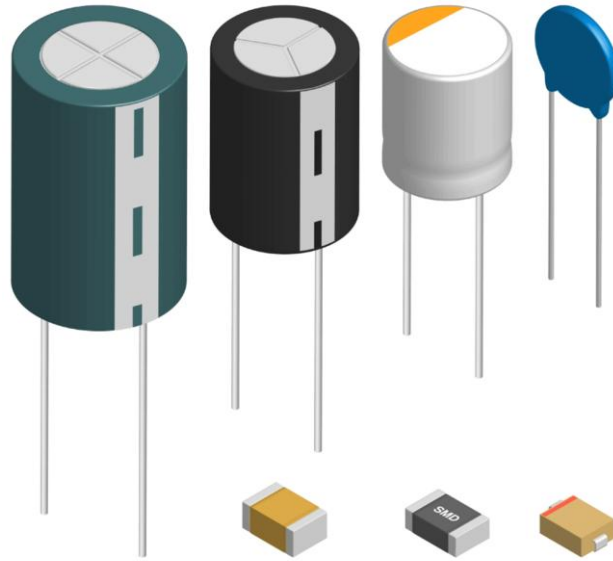
Az elektronikai termékek bonyolultabbá, komplexebbé válása, valamint a miniatürizálás kikényszerítette a technológia fejlődését, különösen az automatizálás és a gépi tanulás terén. A robotika integrálása az összeszerelési folyamatba a hatékonyság növekedéséhez és a munkaerőköltségek csökkenéséhez vezetett, lehetővé téve a gyártók számára, hogy megfeleljenek az elektronikai ipar magas teljesítményigényének. Például optimalizáló algoritmusokat alkalmaztak az SMT összeszerelő sorok tervezésének és működésének javítására, optimalizálva az elhelyezési sorrendet és csökkentve a ciklusidőket. A gépi tanulási technikák ígéretes lehetőséget kínálnak a PCBA-k minőségének és megbízhatóságának javítására hibaészlelés és folyamatoptimalizálás révén. A Six Sigma módszertanokat is alkalmazzák az újraömlésztési forrasztási folyamatból eredő hibák elemzésére és csökkentésére, ezáltal növelve a termék általános minőségét [96].

Ezenkívül a PCB-kben használt anyagok úgy fejlődtek, hogy támogassák az elektronikus eszközök egyre bonyolultabbá válását. A modern PCB-eket gyakran olyan anyagokból készítik, mint az FR-4, egy üveggel megerősített epoxi laminátum, amely kiváló elektromos szigetelést és mechanikai szilárdságot biztosít [97]. Az anyagok megválasztása kritikus, mivel nemcsak a PCBA teljesítményét, hanem a gyárthatóságát és a környezeti hatását is befolyásolja [94].

Az elektronikai szerelvények és áramköri lapok gyártásával és ártalmatlanításával kapcsolatos környezetvédelmi megfontolások is előtérbe kerültek az elmúlt években. A környezetbarátabb gyártási gyakorlatok iránti törekvés az ólommentes forrasztási technikák kifejlesztéséhez és az élelciklus végi PCB-k újrahasznosítási módszereinek feltárásához vezetett. Ezen erőfeszítések célja az elektronikai gyártás környezeti lábnyomának minimalizálása, miközben biztosítják a veszélyes anyagokra vonatkozó előírások betartását [94].

Az SMT-ben használt komponensek között számos passzív és aktív eszköz található, például ellenállások, kondenzátorok, integrált áramkörök és diódák. Ezek az összetevők jellemzően kisebbek, mint THT-társaik, ami kompaktabb kialakítást és nagyobb funkcionalitást tesz lehetővé korlátozott helyen. A miniatürizálás irányába mutató tendencia kisebb méretű komponensek, például 01005-ös (0,2 x 0,4 mm), 0201-es (0,6 x 0,3 mm) és 0402-es (1,0 x 0,5 mm) tokozások kifejlesztéséhez vezetett, amelyek egyedi kihívást jelentenek a kezelés és az elhelyezési pontosság tekintetében az összeszerelési

folyamat során [98,99]. A 2.7. ábra különböző szerelési technológiához kialakított, eltérő méretű kondenzátor alkatrészeket szemléltet.



2.7. ábra: Különböző méretű és szerelési technológiájú kondenzátorok

A felületszerelési technológia széles körben elterjedt számos iparágban, beleértve a fogyasztói elektronikát, az autógyártást, a távközlést és az orvosi eszközöket. A kompakt és megbízható elektronikai alkatrészek iránti kereslet ösztönzi az SMT folyamatok és technológiák folyamatos fejlesztését [100]. Mivel az iparágak nagyobb teljesítményre és alacsonyabb költségekre törekednek, az SMT továbbra is vezető technológia a modern elektronikai eszközök gyártásában, lehetővé téve olyan innovációkat, mint az 5G technológia és a fejlett autóiipari rendszerek [101].

2.1.5.2 Furatszerelt technológia

Az átmenő furatos vagy furatszerelt technológia (THT) egy hagyományos módszer az elektronikus alkatrészek nyomtatott áramköri kártyákra történő rögzítésére úgy, hogy az alkatrészek vezetőkeit a NYÁK-ba fúrt lyukakon keresztül vezetik be, és az ellenkező oldalon forrasztják őket. Ezt a technikát széles körben alkalmazzák különféle elektronikai alkalmazásokban, különösen ott, ahol nagy mechanikai szilárdságra és megbízhatóságra van szükség.

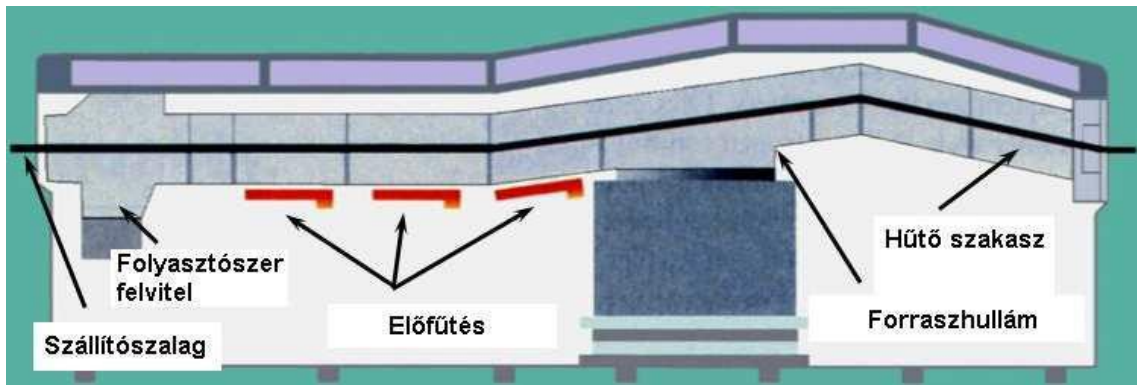
A jellemzően furatszerelt technológiával szerelt alkatrészek közé tartoznak az ellenállások, elektrolit kondenzátorok, induktorok és integrált áramkörök, különösen azok, amelyek mechanikai igénybevétel vagy hőterhelés miatt robusztus csatlakozásokat igényelnek. A THT különösen előnyös azoknál a nagyobb alkatrészeknél, amelyeket nem lehet hatékonyan felszerelni a felületszerelt technológia (SMT) segítségével. Ezenkívül a

THT-t gyakran előnyben részesítik olyan alkatrészeknél, amelyeknek nagyobb igénybevételt kell elviselniük, mint például a csatlakozók és a transzformátorok, a forrasztás során kialakuló erősebb mechanikai kötések miatt [102].

A THT forrasztási folyamat több kulcsfontosságú lépésből áll: alkatrész behelyezése, forrasztása és ellenőrzése. Első lépésként az alkatrészeket manuálisan vagy automatikusan behelyezik a nyomtatott áramkörtől lap furataiba.

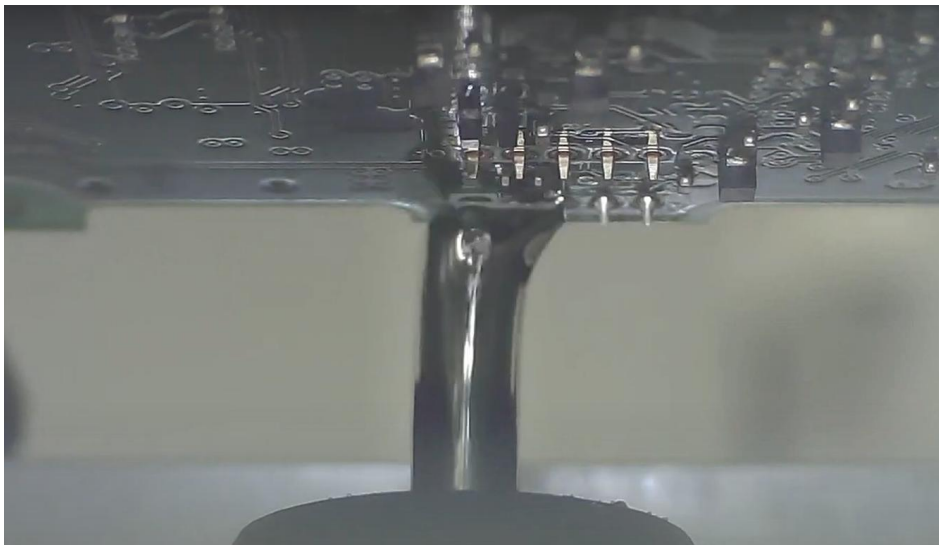
A forrasztási módszer megválasztása jelentősen befolyásolhatja a forrasztási kötések minőségét. A hagyományos módszerek közé tartozik a hullámforrasztás, a kézi forrasztás és a szelektív forrasztás, amelyek mindegyike egyedi előnyökkel és alkalmazásokkal rendelkezik. Hullámforrasztáskor a PCB-t egy olvadt forrasztóhullámon vezetik át, lehetővé téve a forrasztóanyag felszívódását a lyukakba, és biztosítva, hogy minden kivezetés megfelelően forrasztva legyen. Ez a módszer hatékony nagy volumenű gyártásnál, de nem biztos, hogy minden alkalmazásra alkalmas, különösen azokra, amelyek hőérzékeny komponenseket tartalmaznak [103–105]. Ezzel szemben a szelektív forrasztást összetettebb, bonyolultabb összeállításokhoz használják, ahol a NYÁK meghatározott területeit szükséges csak forrasztani, amely nagyobb pontosságot és csökkentett hőterhelést tesz lehetővé az érzékeny alkatrészekben, mindezt a szomszédos komponensek befolyásolása nélkül. [106,107].

A használt berendezések közé tartoznak a hullámforrasztó gépek, a szelektív forrasztógépek és a kézi forrasztószerszámok. A hullámforrasztó gépek (2.8. ábra) egy szállítószalag-rendszert használnak, hogy a PCB-t egy sor előmelegítő zónán keresztül szállítsák, mielőtt belemerítenék az olvadt forrasztóhullámba. A szelektív forrasztógépek robotkarokat alkalmaznak, hogy csak a kijelölt helyekre vigyenek fel forraszt, ami különösen hasznos olyan vegyes technológiájú szerelvények esetében, amelyek THT és SMT alkatrészeket is tartalmaznak. A kézi forrasztás továbbra is életképes lehetőség a kis mennyiségű gyártásban vagy prototípusgyártásban, ahol a precizitás és az ellenőrzés a legfontosabb.



2.8. ábra: Hullámforrasztó sematikus elrendezése [108]

A szelektív forrasztás speciális fűvókát alkalmaz, amely az olvadt forrasztóanyagot pontosan a kívánt csatlakozáshoz irányítja (2.9. ábra). Ez a módszer különösen hasznos hőérzékeny alkatrészek forrasztására, valamint nagy komponenssűrűségű NYÁK-ok esetén, ahol a hagyományos eljárások termikus károsodást okozhatnak. A fűvóka kialakítása kulcsfontosságú, mivel biztosítani kell a forrasztóanyag pontos elhelyezését, miközben minimálisan csökkenti a forrasztóhíd vagy egyéb hibák kialakulásának kockázatát. A fűvóka alakja és mérete testreszabható a különféle alkatrésztípusokhoz és a PCB-elrendezésekhez, növelve a forrasztási folyamat rugalmasságát [107].



2.9. ábra: Szelektív forrasztógép fűvókája munka közben [109]

A szelektív forrasztógépekben alkalmazott folyasztószer-adagolók kulcsszerepet játszanak a forrasztási kötések minőségének és megbízhatóságának biztosításában. A három fő típus – permetező (spray), ultrahangos és cseppadagolás (dropjet) folyasztószer-adagolók – különböző előnyöket kínálnak. A permetező folyasztószer-adagolók egyenletes bevonatot biztosítanak a nyomtatott áramköri lap felületén, ami különösen előnyös bonyolult geometriájú és sűrűn beültetett panelek esetén. Gyors alkalmazást

tesznek lehetővé, és könnyen integrálhatók automatizált gyártósorokba, növelve a termelékenységet [110]. Az ultrahangos folyasztószer-adagolók ultrahanghullámokkal történő porlasztás révén javítják a folyasztószer behatolását a kis résekbe, elősegítve a forrasztás nedvesedését és az oxidréteg eltávolítását. Ez különösen előnyös az oxidációra hajlamos anyagok esetén, mivel tisztább forrasztási felületet eredményez [111]. A cseppadagolós folyasztószer-adagolók pontosan meghatározott mennyiségben juttatják a folyasztószert a PCB adott területeire, minimalizálva a szennyeződést és a tisztítási igényt. Ez a módszer ideális nagy pontosságot igénylő alkalmazásokhoz, például finom osztásközű alkatrészekhez, hozzájárulva a forrasztási hibák csökkentéséhez és a hozam növeléséhez [112,113].

A THT technológia legújabb fejlesztései a forrasztási kötések megbízhatóságának és a folyamat hatékonyságának javítására összpontosítottak. Például az ólommentes forrasztóanyagok használata a környezetvédelmi előírások miatt egyre gyakoribbá vált, ami a forrasztási technikák és berendezések módosítását teszi szükségessé [114,115]. Emellett a pin-in-paste (PIP) technológia is teret nyer, amely a furat- és a felület-szerelési eljárásokat kombinálja úgy, hogy a THT-komponensek behelyezése előtt forrasztópasztát visznek fel a PCB forrasztási felületére, majd ezt követi az újraömlésztéses forrasztás [116,117]. Ez a hibrid megközelítés javíthatja az összeszerelési folyamat hatékonyságát, miközben megőrzi a THT-kapcsolatok megbízhatóságát.

A THT-t széles körben használják különféle iparágakban, beleértve a fogyasztói elektronikát, az autógyártást, a repülőgépgyártást és a távközlést. A THT forrasztások robusztussága ideálissá teszi őket olyan alkalmazásokhoz, ahol a mechanikai stabilitás kritikus fontosságú, például autóiipari csatlakozókban és nagy teljesítményű eszközökben. A szelektív forrasztási módszerek, a fejlett fűvókakialakítások és a hatékony folyasztószeres alkalmazási technikák integrációja jelentősen megnövelte az átmenő furatos forrasztás lehetőségeit. Ahogy az elektronikai eszközök folyamatosan fejlődnek, a bonyolultabb és kompaktabb elektronikus szerelvények iránti kereslet folyamatosan növekszik, a forrasztási technológia folyamatos fejlesztése létfontosságú lesz az iparági követelmények teljesítéséhez. A THT integrálása modern forrasztási technikákkal, például a szelektív forrasztással biztosítja, hogy ez a technológia továbbra is versenyképes maradjon az elektronikus szerelvények egyre növekvő miniatürizálása és összetettsége mellett [103].

2.2 Plazmakezelés

A plazmakezelés egy innovatív felületmódosító technológia, amely ionizált gázokkal, vagyis plazmákkal történő kezelést alkalmaz a különböző anyagok fizikai és kémiai tulajdonságainak megváltoztatására. A plazma, amelyet gyakran az anyag negyedik halmazállapotaként említene, töltött részecskékből – ionokból és elektronokból – áll [118]. Ez a technológia az elmúlt években jelentős figyelmet kapott, mivel képes javítani a felületi tulajdonságokat anélkül, hogy befolyásolná a kezelt anyagok tömbszerkezeti tulajdonságait.

A plazmakezelés egyik elsődleges előnye, hogy képes szabályozott módon módosítani a felületeket, javítva az olyan tulajdonságokat, mint a festhetőség, adhézió és a biokompatibilitás [119,120]. Tanulmányok kimutatták, hogy a plazmakezelés jelentősen javíthatja a szövetek festékfelvételét azáltal, hogy megváltoztatja azok felületi tulajdonságait, így értékes technikává vált a textiliparban [121,122]. A plazmakezelést orvosi biológiai alkalmazásokban is bevezették, ahol javíthatja az implantátumok biológiai szövetekkel való integrációját, és javíthatja a rákkezelések hatékonyságát [123].

A plazmakezelés azonban nem mentes a kihívásoktól. A folyamat bonyolult lehet, és speciális berendezéseket igényel, ami magas üzemeltetési költségekkel járhat. Ezenkívül a plazmakezelés hatásai felületspecifikusak lehetnek, ami azt jelenti, hogy nem minden anyag reagál pozitívan a kezelésre [124,125]. E kihívások ellenére a plazmakezelés sokoldalúsága és hatékonysága ígéretes technológiát kínál számos alkalmazáshoz, beleértve a textil- és elektronikai ipart, valamint az egészségügyet. Az a képessége, hogy javítja a felület tulajdonságait, miközben megőrzi az alatta lévő anyag integritását, értékes eszközzé teszi a modern gyártásban és kutatásban.

2.2.1 A plazma előállítása, típusai

A plazmaállapot többek között elektromos kisülések révén vagy termikus folyamatokkal hozható létre [126]. A plazma előállítása különböző körülmények között történhet, például alacsony nyomáson vagy légköri nyomáson, ami eltérő osztályozásokhoz és alkalmazási területekhez vezet.

A plazma többféle módszerrel állítható elő, például dielektromos gátszikkás kisüléssel (*Dielectric Barrier Discharge*, DBD), rádiófrekvenciás (RF) gerjesztéssel és mikrohullámú gerjesztéssel. A DBD-t gyakran használják légköri nyomású plazma előállítására, ahol egy dielektromos anyag választja el az elektródákat, lehetővé téve a nagyfeszültségű kisüléseket ívkisülés kialakulása nélkül [127]. Az RF- és mikrohullámú

plazmák általában alacsony nyomású környezetben jönnek létre, ahol az energia bevitele pontosan szabályozható a plazma állapot fenntartásához. Az előállítási módszer jelentős hatással van a plazma tulajdonságaira, például annak hőmérsékletére, sűrűségére és az előállított reaktív gyökök típusaira. Mindegyik típusnak megvannak a saját előnyei, és speciális alkalmazásokhoz használhatók, például a felületek nedvesíthetőségének, adhéziójának és kémiai reakcióképességének javítására [128].

A plazma több kritérium alapján osztályozható, beleértve a nyomást, a hőmérsékletet és az alkalmazást. A két elsődleges kategória az alacsony nyomású plazma és az atmoszférikus nyomású plazma. Az alacsony nyomású plazmát gyakran használják a plazmakörnyezet pontos szabályozását igénylő alkalmazásokban, például a félvezetőgyártásban és a kényes anyagok felületének módosításában. A légköri nyomású plazma viszont előnyös, mert könnyen használható, és nagyobb területeket is képes kezelni vákuumrendszerek nélkül [129]. Ezenkívül a plazmák termikus és nem termikus kategóriába sorolhatók. A termikus plazmák magas hőmérsékleten működnek, és általában olyan alkalmazásokhoz használják, mint például a megmunkálás, míg a nem termikus plazmák alacsonyabb hőmérsékleten működnek, és gyakran használják az orvostechikai alkalmazásokban, mivel képesek kölcsönhatásba lépni a biológiai szövetekkel anélkül, hogy hőkárosodást okoznának [130,131].

Az atmoszférikus nyomású plazma többféle forrásból is előállítható, beleértve a DBD-t, az atmoszférikus nyomású plazmasugarak (*Atmospheric Pressure Plasma Jet*, APPJ) és a koronakisülési rendszereket. Minden forrásnak megvannak a maga egyedi előnyei és korlátai. Például az APPJ-k hidegplazma előállítására való képességükről ismertek, ami előnyös a hőérzékeny anyagok és biológiai szövetek kezelésében [126,127].

Az atmoszférikus nyomású plazma előnyei közé tartozik, hogy képes vákuumrendszerek nélkül is működni, így elérhetőbbé és költséghatékonyabbá teszi az ipari alkalmazásokhoz. Ezenkívül nagy felületeket is képes gyorsan és hatékonyan kezelni, így alkalmas nagy áteresztőképességű folyamatokhoz [129]. Vannak azonban hátrányok is, amelyeket figyelembe kell venni. A kezelés homogenitásának elérése kihívást jelenthet, különösen összetett geometriák esetén. A keletkező reaktív gyökök a használt gáztól és az üzemi körülményektől függően változhatnak.

A plazmasugár fejek a légköri nyomású plazma egy speciális kialakítását képviselik, amelyek célzottan irányíthatók egy adott felületre. Ezek a sugarak úgy jönnek létre, hogy a gázt egy fűvókán keresztül áramoltatják, amely során ionizációval plazma keletkezik. A plazmasugár fűvókák különböző kialakításokban léteznek, például résfűvókákkal vagy

mikro-fúvóka tömbökkel, amelyek lehetővé teszik a sugár tulajdonságainak és áramlási sebességeinek precíz szabályozását [127,128]. A plazmasugarak különösen hasznosak a felületsterilizálás, az anyagmódosítás és a rákterápia terén, ahol elengedhetetlen a reaktív gyökök célzott továbbítása.

2.2.2 Plazmakezelés egyéb iparágakban

A plazmakezelés újító technológiaként jelent meg számos iparágban, túlmutatva az elektronikai gyártás területén, egyedi előnyöket kínálva a felületmódosítás és funkcionális átalakítás terén. A plazmakezelés alkalmazási területei több ágazatot is lefednek, így az élelmiszer-feldolgozást, a textilipart, az orvostechnikai eszközöket és a környezetvédelmi regenerációt.

A plazmakezelés sokféle anyagon alkalmazható, beleértve a fémeket, polimereket, kerámiákat és üvegeket. Például a polimerek esetén hasznos a megnövekedett felületi energia, ami javítja a bevonatok és tinták tapadását. A fémek kezelhetők a korrózióállóság javítására vagy a felületek további feldolgozásra, például hegesztésre vagy bevonásra való előkészítésére [132].

Az élelmiszeriparban a plazmakezelést egyre inkább elismerik az élelmiszerbiztonság és -minőség javításában rejlő potenciálja miatt. Az atmoszférikus nyomású plazmát felületek és csomagolóanyagok sterilizálására alkalmazták, hatékonyan csökkentve a mikrobiális szennyeződést durva vegyszerek használata nélkül. Emellett a plazmakezelés felhasználható az élelmiszer-csomagoló anyagok módosítására, záró tulajdonságaik javítására és az eltarthatóság meghosszabbítására [133,134].

A textilipar is profitált a plazmakezelésből, különösen a szövetek festhetőségének és nedvesíthetőségének javítása terén. A plazmakezelés módosíthatja a textíliák felületi jellemzőit, lehetővé téve a festékek és bevonatok jobb tapadását, ami kulcsfontosságú az élénk színek és a tartósság eléréséhez. Kimutatták, hogy az oxigénplazma-kezelés növeli a selyemszövetek hidrofilitását, elősegítve a jobb festékfelvételt és javítva a szövet általános minőségét. Ez a technológia környezetbarát festési folyamatokat tesz lehetővé, csökkentve a víz és a vegyi adalékanyagok felhasználását [121,122].

Az orvosbiológiai területen a plazmakezelést az orvosi eszközök és implantátumok biokompatibilitásának javítására használják. Az anyagok felületi tulajdonságainak módosításával a plazmakezelés fokozza a sejtek adhézióját, ami elengedhetetlen a biológiai szövetekkel való sikeres integrációhoz. A plazmával kezelt felületek elősegíthetik az implantátumok jobb gyógyulási reakcióit, ezáltal hatékonyabbá téve

azokat a klinikai alkalmazásokban. A hideg atmoszférikus plazma ígéretesnek bizonyult a rákkezelésben, ahol szelektíven képes megcélozni és inaktiválni a rákos sejteket anélkül, hogy károsítaná a környező egészséges szöveteket [133].

A plazmakezelést környezetvédelmi alkalmazásokhoz is vizsgálják, különösen a szennyező anyagok kármentesítésében. A plazmatechnológiát szennyvíz és légszennyező anyagok kezelésére is lehet használni, a káros anyagokat kevésbé mérgező vagy nem mérgező melléktermékekre bontva. A plazma reaktív anyagokat generáló képessége hatékony eszközzé teszi a szerves szennyeződések lebontásában és az általános környezetminőség javításában [133].

2.2.3 Plazmakezelés az autóiipari elektronikai gyártásban

A plazmakezelés kulcsfontosságú technológiává fejlődött számos iparágban, különösen az elektronikai gyártás és az autóiipar területén. Kiemelkedő előnye, hogy lehetővé teszi a felületek módosítását anélkül, hogy megváltoztatná az anyagok tömbi tulajdonságait, ezáltal kíméletesebb alternatívát nyújt a hagyományos kémiai tisztítási eljárásokkal szemben, amelyek bizonyos esetekben az alatta lévő anyag degradációját okozhatják.

Az autóiiparban a plazmakezelés elsődleges alkalmazási területe a különböző hordozók, különösen a polimerek tapadási tulajdonságainak javítása. Kutatások kimutatták, hogy a plazmakezelés hatékonyan aktiválja az alacsony felületi energiájú anyagokat, például a polipropilént (PP), amely széles körben alkalmazott az autóiipari alkatrészek gyártásában. Ez az aktiválás elősegíti a ragasztók és a hordozók közötti jobb tapadást, növelve ezzel a ragasztott kötések tartósságát és megbízhatóságát. Ciardiello és munkatársai rámutattak, hogy mind a vákuum-, mind a légköri nyomású plazmakezelés jelentősen fokozza a polipropilén ragasztott kötéseinek tapadását, ami meghatározó az autóiipari alkatrészek összeszerelése során [135,136].

A plazmakezelés másik fontos alkalmazási területe az autóiipari kompozitokban használt természetes szálak módosítása. A szálak és a polimer mátrix közötti mechanikai kapcsolat javításával hozzájárul fenntarthatóbb és könnyebb anyagok fejlesztéséhez, amelyek egyre nagyobb szerepet kapnak az autóiipari alkalmazásokban [137]. Ezenfelül a plazmakezelés meghatározó szerepet játszik az autóiipari alkatrészek korrózióállóságának növelésében. Salem és munkatársai bemutatták, hogy a légköri plazmaaktiválás és a vékonyfilm-lerakódási eljárások jelentősen fokozzák a tapadást és a korrózióállóságot, főként a termoplasztikus elasztomerek és alumínium házak esetében

[138]. A felületi tulajdonságok módosítása hozzájárul az időjárési és környezeti hatásokkal szembeni ellenállás növeléséhez, ami kiemelten fontos az autóiipari elektronikában, ahol az alkatrészek gyakran szélsőséges körülményeknek vannak kitéve.

A tapadás és a korrózióállóság javítása mellett a plazmakezelés fokozza az anyagok felületi energiáját olyan alkalmazásokban, ahol magas nedvesíthetőség szükséges. Princ és munkatársai kimutatták, hogy a nem egyensúlyi plazmakezelések jelentősen növelik a poliéter-éter-keton (PEEK) felületek nedvesíthetőségét, ezáltal alkalmassá téve őket ragasztott kötéshez [139]. Ez a tulajdonság különösen előnyös az autóiipari elektronikában, ahol különböző anyagok integrálása elengedhetetlen.

A plazmakezelés sokoldalúsága lehetővé teszi annak alkalmazását komplex geometriájú és különböző anyagok, például fémek és kompozitok esetében is. Heine és munkatársai bemutatták a többtűs dielektromos gátszikkás kisülés (DBD) plazmaforrás hatékonyságát, amely képes aktiválni a sík és görbült autóiipari polimerfelületeket, ezáltal javítva azok felületi polaritását és fokozva a tapadást [140]. Ezen túlmenően a plazmakezelés hozzájárulhat a PMOSFET-ek és inverterláncok teljesítményének növeléséhez, különösen az alacsony hőmérsékletű és kisműködési feszültségű alkalmazásokban, amelyek gyakoriak az autóelektronikában [141].

A plazmakezelés a nyomtatott áramkörtáblák (PCB-k) gyártásában is kiemelt szerepet játszik, mivel specifikusan az egyes alkalmazott anyagokhoz igazítható. Például az oxigénplazma-kezelés jelentősen javíthatja az elektronikai alkalmazásokban használt kompozit anyagok határfelületi tapadását a felületi érdesség növelésével és poláris funkció csoportok létrehozásával [142]. Hasonlóképpen, az argonplazma-kezelés kedvezően befolyásolja a fluorozott polibenzoxazol (PBO) filmek felületi tulajdonságait, amelyek gyakoriak az elektronikai eszközökben. Ez a kezelés javítja a különböző anyagok PCB-hez való tapadását, segítve ezzel az eltérő komponensek ragasztását [143]. Ez az tulajdonság kritikus az autóiiparban és a repülőgépiparban, ahol a megbízhatóság és a teljesítmény kiemelt jelentőséggel bír.

A plazmakezelés másik jelentős előnye, hogy fokozza a különböző anyagok közötti tapadást a PCB-összeszerelés során. A réz és a polimer hordozók közötti adhézió jelentősen javítható plazmakezeléssel, amely módosítja mindkét anyag felületi jellemzőit, ezáltal erősebb kötések eredményez [144]. Ez kifejezetten előnyös a többanyagú szerelvények esetében, ahol különböző hordozók hatékony összekapcsolása elengedhetetlen.

2.3 Folyasztószer-minimalizált forrasztás fejlesztési irányai

A folyasztószer-mentes forrasztás egyre nagyobb jelentőséget kap az anyagtudomány és az elektronikai gyártás területén, mivel lehetőséget kínál a forrasztási folyamat során keletkező maradványok kiküszöbölésére, miközben javítja a forrasztott kötések megbízhatóságát és teljesítményét. A hagyományos forrasztási eljárások jellemzően folyasztószereket alkalmaznak a forrasz és a fémfelületek közötti nedvesedés elősegítésére, azonban az új technológiák, például a plazmakezelés és a hangyasav atmoszféra használata, forradalmasítják ezt a folyamatot. E technikák nemcsak hogy csökkentik a környezeti terhelést, hanem jobb forrasztási minőséget és költséghatékonyabb gyártást is eredményezhetnek.

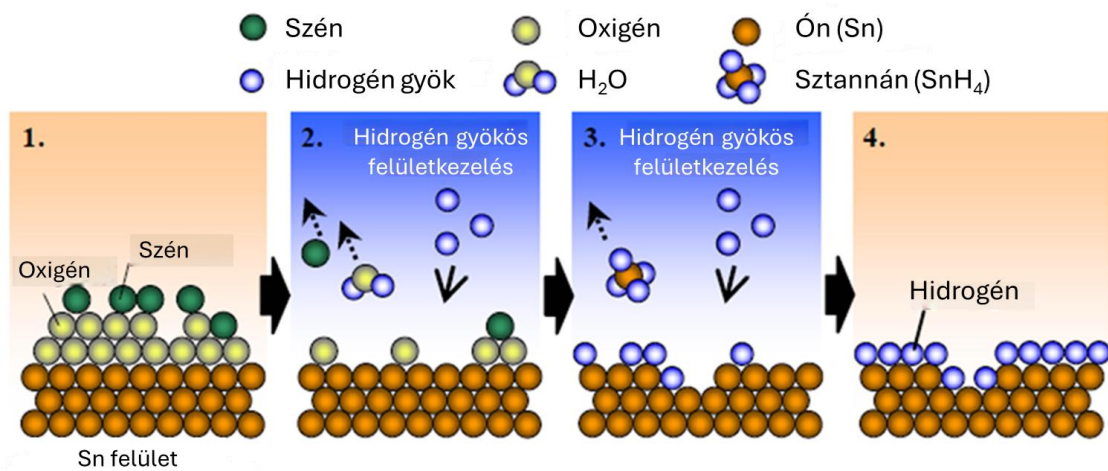
Az egyik legígéretesebb fejlesztés a folyasztószer-mentes forrasztás terén a gáz halmazállapotú hangyasav alkalmazása az oxidrétegek redukálására, ami elősegíti a forraszanyagok megfelelő nedvesedését a fémfelületeken. Hanß és Elger [145] kutatásai kimutatták, hogy a folyasztószer-mentes forrasztás maradványmentes forrasztást tesznek lehetővé, ezek alkalmazásával mechanikai nyíróerő és zárványképződés szempontjából hasonló vagy akár jobb minőségű kötések érhetők el, mint a hagyományos folyasztószeres eljárásokkal. Ez az eredmény kiemeli a folyasztószer-mentes módszerek életképességét a tisztítási lépést nem igénylő, magas minőségű forrasztási kötések kialakításában.

He és munkatársai [146] vizsgálták a Sn-3.0Ag-0.5Cu forrasz viselkedését hangyasav atmoszférában, és megállapították, hogy a kontrollált gőzölési környezet javítja a forrasz és a réz szubsztrátum közötti kölcsönhatást, ami kedvezőbb kötési tulajdonságokat eredményez. In-situ megfigyeléseik rávilágítottak a hangyasavval végzett folyasztószer-mentes forrasztás kinetikai folyamataira, valamint annak jelentőségére, hogy valós időben nyomon követhessük a forrasztási mechanizmusokat.

A kémiai redukciós módszereken túlmenően a plazmatechnológia is egyre nagyobb figyelmet kap a folyasztószer-mentes forrasztásban. A plazmakezelés hatékonyan módosítja a felületi tulajdonságokat anélkül, hogy szennyezőanyagokat juttatna a rendszerbe. Ueshima és munkatársai [147] kimutatták, hogy az atmoszférikus nyomású nem-egyensúlyi plazma jelentősen növeli az ólommentes forraszanyagok nedvesedési képességét CF₄-plazmával felületkezelt Sn és Ag hordozókon. Hasonló eredményekről számolt be Hashemabad és munkatársai [148], akik különböző felületaktiválási

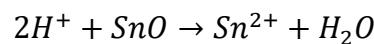
módszereket, például ultrahangos aktiválást vizsgáltak az alumíniumfelületek nedvesíthetőségének javítása érdekében.

Godard és munkatársai [149] a plazmakezelés alkalmazását tanulmányozták flip-chip kötések folyasztószer-mentes forrasztásában, és megállapították, hogy a technológia hatékonyan eltávolítja a felületi oxidokat, így elősegíti a chip és a hordozó közötti erős kötés kialakulását. Kísérleteik során Ar/H₂ plazmát alkalmaztak annak érdekében, hogy kihasználják a hidrogén redukáló hatását. Az ón-oxid hidrogéngyökök általi redukciójának mechanizmusát Sakuma és munkatársai [150] vázolták fel, amelynek szemléletes képét a 2.10. ábra szemlélteti.



2.10. ábra: Hidrogén redukció mechanizmusa [150]

A H₂ molekulák plazma általi gerjesztésével reaktív hidrogén gyökök keletkeznek. Oxidált fémmel érintkezve reagálnak az oxigénnel, és vízmolekulát (H₂O) hoznak létre:



Plazmakezelés réz hordozók esetében is bizonyítottan növeli a forraszthatóságot. Kencana és munkatársainak [151] kutatásai szerint a plazmaaktivált újraömlésztéses forrasztás hatékonyabbá teszi az organikus forraszthatósági védőréteggel ellátott rézalapú hordozók nedvesedését. Kim és munkatársai [152] továbbá megállapították, hogy a formálógáz-plazmakezelés csökkenti a rézoxidrétegek vastagságát, ami kulcsfontosságú a jó minőségű forrasztott kötések kialakításához.

Ezen felül Dong és munkatársai [153] bemutattak egy innovatív hidrogénaktivációs technológiát, amely normál forrasztási hőmérsékleten és környezeti nyomáson működik. Ez a megközelítés csökkenti a szükséges forrasztási hőmérsékletet, ezáltal minimalizálja a hőterhelést, amely az elektronikai alkatrészek szerkezeti épségét veszélyeztethetné.

A folyasztószer-mentes forrasztási technológiák fejlődése, különösen a hangyasav atmoszférán és a plazmakezelésen alapuló megoldások, jelentős előrelépést jelentenek az anyagtudomány és a gyártástechnológia területén. E módszerek nemcsak hogy magas minőségű, maradványmentes forrasztási eredményeket kínálnak, hanem hozzájárulnak a fenntarthatóbb gyártási folyamatokhoz is.

A termikus és gázáramlási jellemzők optimalizálása szükséges a folyasztószer-mentes forrasztókemencék hatékonyságának növeléséhez. Illés és munkatársai [154] kutatásai rávilágítanak arra, hogy a forrasztási folyamat pontos szabályozása elengedhetetlen az optimális eredmények elérése érdekében.

Összességében a hangyasavas környezet és plazmakezelés kémiai és fizikai szempontból is hatékony megoldást kínál a folyasztószer-mentes forrasztás során fellépő kihívások kezelésére. Ezek az innovatív technológiák lehetővé teszik a megbízhatóbb és hatékonyabb elektronikai összeszerelési folyamatokat, és várhatóan egyre szélesebb körben alkalmazzák őket az iparban. Ahogy a kutatás ezen a területen tovább fejlődik, további fejlesztések és szabványosítások járulhatnak hozzá a folyasztószer-mentes forrasztás ipari elterjedéséhez.

II. Kísérleti rész

3. Folyasztószer maradványok által kiváltott elektrokémiai migráció

A modern elektronikai gyártásban a forrasztási folyamatok megbízhatósága kiemelt jelentőséggel bír, különösen a nagy integrációs fokú, miniatürizált áramköri megoldások esetében. A forrasztás során alkalmazott folyasztószeresek kulcsszerepet játszanak az oxidrétegek eltávolításában és a forrasztóanyag nedvesedésének elősegítésében. Azonban a folyasztószeresek nem megfelelő eltávolítása vagy a még aktív összetételű maradványok jelenléte jelentős megbízhatósági problémákat okozhat az áramköri lapokon.

A fejezetben részletesen bemutatom a folyasztószer-maradványok által kiváltott elektrokémiai migráció mechanizmusát és a dendritképződés folyamatát, a meghibásodást kiváltó faktorokat, valamint az észlelhetőség javítására szolgáló módszereket, hozzájárulva ezzel az elektronikai rendszerek hosszú távú megbízhatóságának növeléséhez.

3.1 Dendritnövekedés sebességének vizsgálata a feszültség függvényében

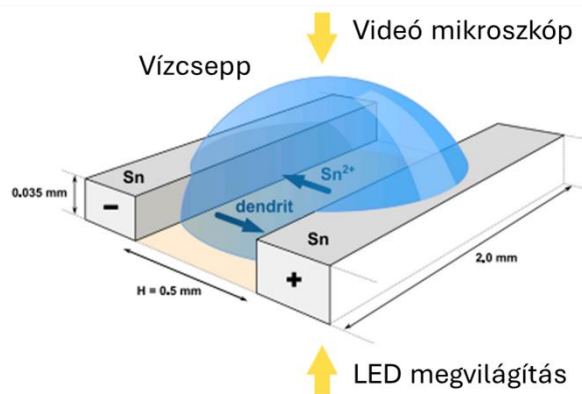
Az elektrokémiai migráció (ECM) olyan jelenség, amely során az eltérő potenciálú elektródák között kialakuló folyadékfilmben az anódról fémionok oldódnak ki oxidációs folyamat révén. Ezek az ionok diffúzió és az elektromos tér hatására a katód felé vándorolnak, ahol redukációs reakció zajlik, amelynek eredményeként elektromosan vezető dendrites szerkezetek alakulnak ki. Amennyiben egy növekvő dendrit eléri a másik elektródát, hirtelen áramnövekedés következik be, amely rövidzárlatot és az elektronikus áramkör potenciális meghibásodását eredményezheti. A dendrites növekedés különösen magas páratartalmú környezetben figyelhető meg [155].

Ezért a forrasztás utáni tisztaság biztosítása és a folyasztószer-maradványok detektálása kulcsfontosságú a PCB-k megbízhatóságának növelése és az ECM által okozott meghibásodások minimalizálása érdekében.

Az ebben az alfejezetben ismertetett kutatási eredmények az 1. számú tézis kidolgozásához vezettek.

3.1.1 Anyagok és módszerek

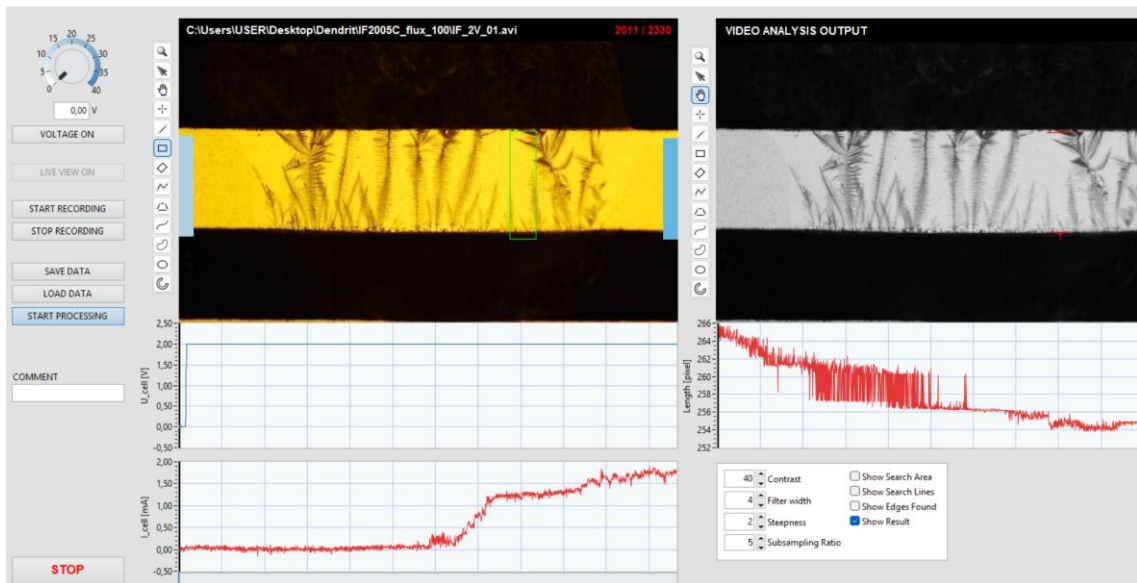
A WD tesztek egy nyomtatott áramköri lapon (PCB) elhelyezkedő két párhuzamos önbevonatú rézelektroda között zajlottak, amelynek sematikus kialakítását a 3.1. ábra szemlélteti. Az elektródák üvegszál-erősítésű epoxialapú (FR-4) hordozóra kerültek, és csak az elektródák maradtak szabadon, míg a többi felületet forrasztásgátló réteg fedte. Az elektródák távolsága 0,5 mm, vastagságuk 0,035 mm, míg hosszúságuk 2,0 mm volt. Egy többcsatornás mérőpanel egyenként 8 elektródapárt tartalmazott, így párhuzamos méréseket is lehetővé tett.



3.1. ábra: A vízcsepp tesztek elrendezésének sematikus ábrázolása

A teszt során elhelyezésre kerülő 1 μ l térfogatú ioncserélt víz Hamilton fecskendő segítségével került az elektródákra, majd állandó feszültség alkalmazása mellett létrejött az elektrokémiai migráció és a dendritnövekedés. A feszültségforrás egy Toellner TOE 8951 tápegység volt, míg a folyamat során az áramot egy National Instruments USB-6281 (8 bit-es felbontással) adatgyűjtő kártya mérte 8 párhuzamos csatornán.

A dendritképződés megfigyelését digitális mikroszkóp (Levenhuk DTX TV – 3 megapixeles kamerával) tette lehetővé. A mikroszkóp LED háttérvilágítással világította meg az elektródaközt, és 30 fps sebességgel rögzítette a folyamatot LabVIEW szoftver segítségével (3.2. ábra). Az elemzés gépi látás algoritmusokkal (Vision Development Module) történt, amelyek élkeresési módszer alapján automatikusan detektálták a dendrit hosszát.



3.2. ábra: WD tesztek rögzítéséhez és kiértékeléséhez alkalmazott LabView szoftver kezelőfelülete

A kísérletek során tanulmányozásra került a folyasztószermaradványok jelenlétének hatása az ECM-re. A NYÁK-ok Interflux2005C tisztítást nem igénylő folyasztószerrel lettek kezelve, amely három különböző koncentrációban jutott a felületre:

- Flux 10: 10%-ra hígítva etanollal,
- Flux 50: 50%-ra hígítva,
- Flux100: hígítatlan állapotban.

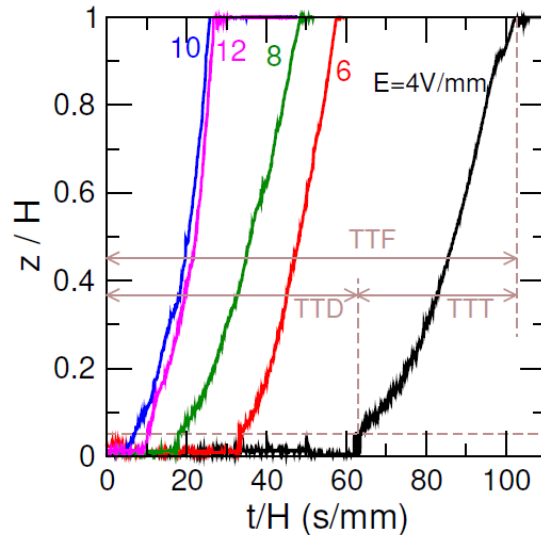
A folyasztószer elpárologtatását követően került elvégzésre a standard WD teszt ioncserélt vízcseppel.

A kísérleti eredményeket összehasonlítottuk szerzőtársaim Brown dinamikán (BD) alapuló szimulációs eredményeivel is.

3.1.2 Mérési eredmények és értékelésük

A bemutatásra kerülő kísérleti eredmények középpontjában a dendritnövekedés időbeli trendje áll, valamint annak vizsgálata, hogy a TTF (*Time to Failure*) hogyan függ különböző rendszerparamétereiktől, mint például az elektromos térerősség és az ionkoncentráció.

A 3.3. ábra jellegzetes példaként mutatja be egyetlen dendrit növekedését, amely elsőként éri át az elektródok közötti távolságot. Az eredmények olyan esetekre vonatkoznak, amikor a felület hígítás nélküli folyasztószeres kezelést kapott, és az alkalmazott elektromos mező 4 V/mm és 12 V/mm között változott. A leghosszabb dendrit z koordinátája és az idő normalizálva lett az elektródarés szélességével (H).

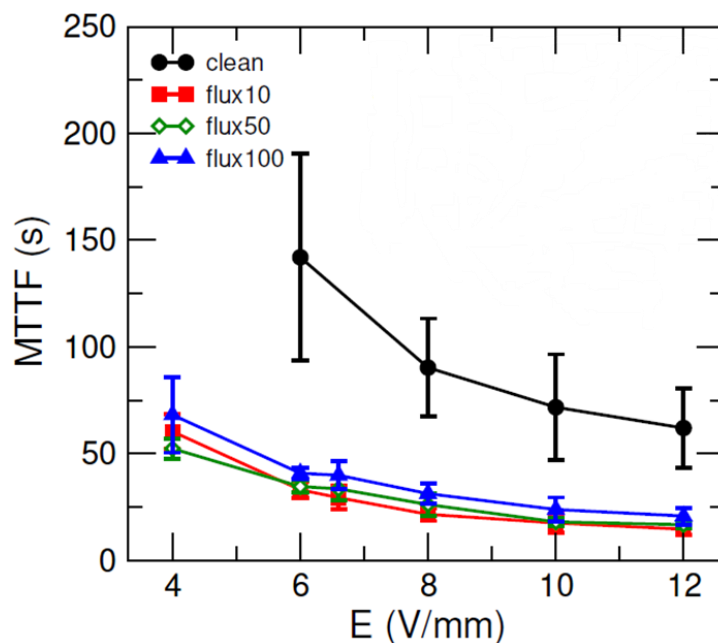


3.3. ábra: A leghosszabb dendrit hossznövekedése a hígítás nélküli folyasztószerrel kezelt minták esetén az idő függvényében, az elektromos tér különböző értékeit ábrázolva, ahol mind a dendrit hossza (z), mind az idő (t) skálázva van az elektródok közötti réssel (H) (TTD = „Time To Detection”, TTF = „Time To Failure”, TTT = „Time To Touch”)

Az így nyert görbék két jól elkülöníthető szakaszra oszthatók. Az első szakasz, amely a 3.3. ábrán zajosnak tűnik, a TTD (*Time to Detection*) időszakot képviseli. Ezen időszak alatt a növekvő dendritek hossza túl kicsi ahhoz, hogy észlelhető legyen. Bár a dendrit növekedésének elején az észlelés még nem lehetséges, ez a szakasz is része a teljes TTF-nek, ahogyan az a kísérleti részben szerepel. Az eredmények szimulációkkal való összevetéséhez a TTT (*Time to Touch*) fogalma került bevezetésre, amely azt az időt jelöli, amennyi a dendritek anódhoz való eléréséhez és érintéséhez szükséges. A TTF a teljes időtartamot jelöli a feszültség alkalmazásától az áram első hirtelen növekedéséig, amely két komponensre bontható: a TTD-re, amely a detektálásig eltelt idő, amikor a dendritek még nem érték el jelentős méretüket, valamint a TTT-re, amely a dendritek anódhoz való éréséhez szükséges idő.

Amint a dendritek elérik a megfelelő hosszúságot, pozitív visszacsatolós folyamat indul el: a hosszabb dendritek nagyobb valószínűséggel vonzzák a kationokat. Ekkor kezdődnek el a „nagy fák”, azaz a hosszabb dendritek növekedése, amelyek előnyhöz jutnak, mivel több iont képesek összegyűjteni. A pontos időpont, amikor ez a folyamat kezdődik, nem teljesen meghatározott, mivel a kísérleti beállítások korlátozottak. A gyakorlatban ez a szakasz akkor kezdődik, amikor egy hosszabb dendrit elér egy olyan hosszt, amely lehetővé teszi annak észlelését. A TTT szakasz kezdete azzal definiálható, amikor a leghosszabb dendrit eléri az összes dendrit hosszának 5%-át (3.3. ábra, barna szaggatott vonal).

A 3.4. ábra a TTF-ek (MTTF, legalább nyolc párhuzamos mérés adataiból számítva) átlagát mutatja be az elektromos tér függvényében egy csepp ioncserélt víz esetén tiszta elektródák (fekete görbe) és IF2005C, tisztítást nem igénylő folyasztszert különböző hígításaival szennyezett elektródák esetén (piros, zöld és kék görbék). Az ábrán látható, hogy ha a folyasztszert komponenseit (pl. gyenge szerves savak) feloldjuk a vízcseppben, azok elősegítik a dendrit gyorsabb növekedését, és ezáltal jelentősen csökkentik az MTTF-et. A dendrit növekedését a szennyezők különböző mechanizmusokon keresztül fokozzák, például az anód körüli pH csökkentésével (elősegítve az Sn oldódását), illetve az ionvezetőképesség növelésével. A folyasztszert különböző hígításainak görbéi a hibasávokon belül együtt futnak.



3.4. ábra: Átlagos meghibásodási idő (MTTF) az elektromos térerő függvényében tiszta és szennyezett PCB esetén. A három szennyezett minta az IF 2005C tiszta folyasztszert használatának felel meg (jelölése „Flux100”), míg a „Flux50” és „Flux10” a hígított folyasztszert jelenti 0,5 és 0,1 koncentrációban

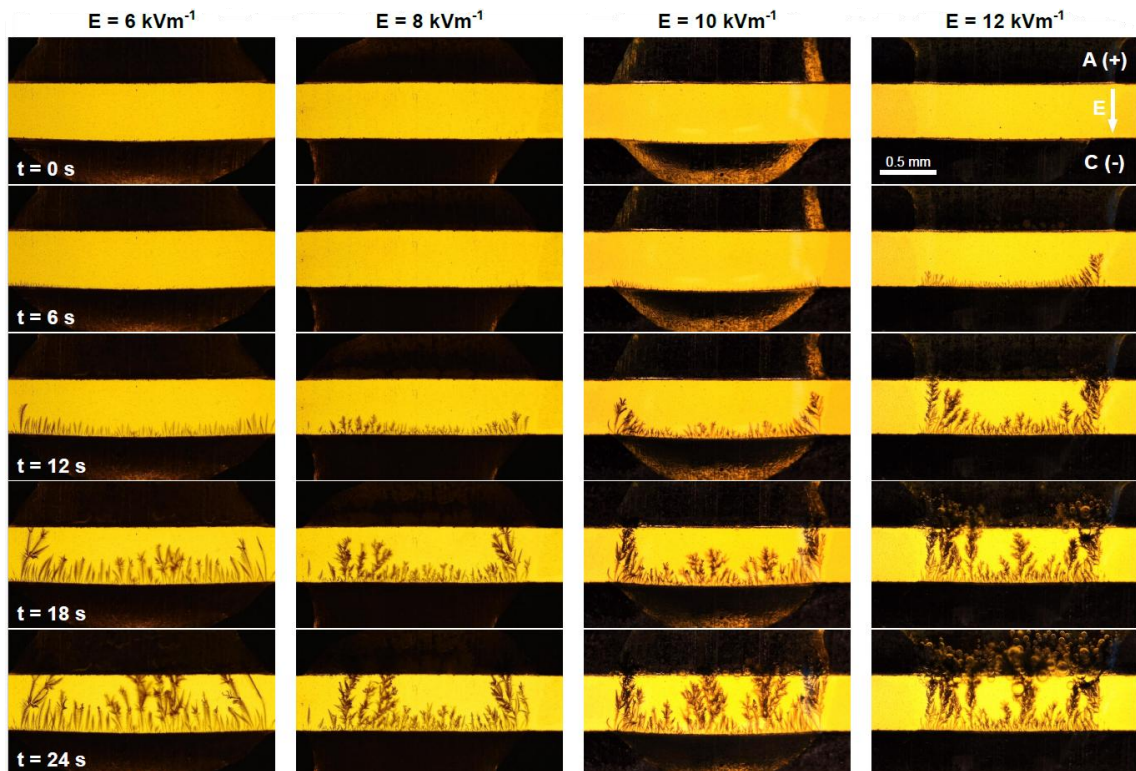
A vizuális reprezentációt nyújtó ábra mellett a 3.1. táblázat numerikus formában rögzíti az adatokat, lehetővé téve a vizsgált változások kvantitatív értékelését. A táblázatos megjelenítés elsődleges célja a pontos összehasonlítás és a tendencia számszerű kimutatása.

3.1. táblázat: Átlagos meghibásodási idő (MTTF) és szórás az elektromos térerő függvényében tiszta és szennyezett PCB esetén, ahol a „Tiszta” a folyasztószer mentes felületet, míg a „Flux10”, „Flux50” és „Flux100” az Interflux 2005C folyasztószerrel, különböző koncentrációban szennyezett felületet jelenti

E [V/mm]	MTTF [s] (szórás [s])			
	Tiszta	Flux10	Flux50	Flux100
4		68,21 (17,67)	52,40 (4,70)	60,39 (7,98)
6	142,05 (48,45)	40,84 (2,60)	34,62 (2,90)	33,10 (3,66)
8	90,33 (23,00)	31,31 (4,79)	26,17 (5,17)	21,58 (3,01)
10	71,74 (24,80)	23,86 (5,59)	18,03 (1,86)	17,54 (4,36)
12	62,00 (18,53)	20,77 (3,89)	16,71 (1,64)	14,62 (2,56)

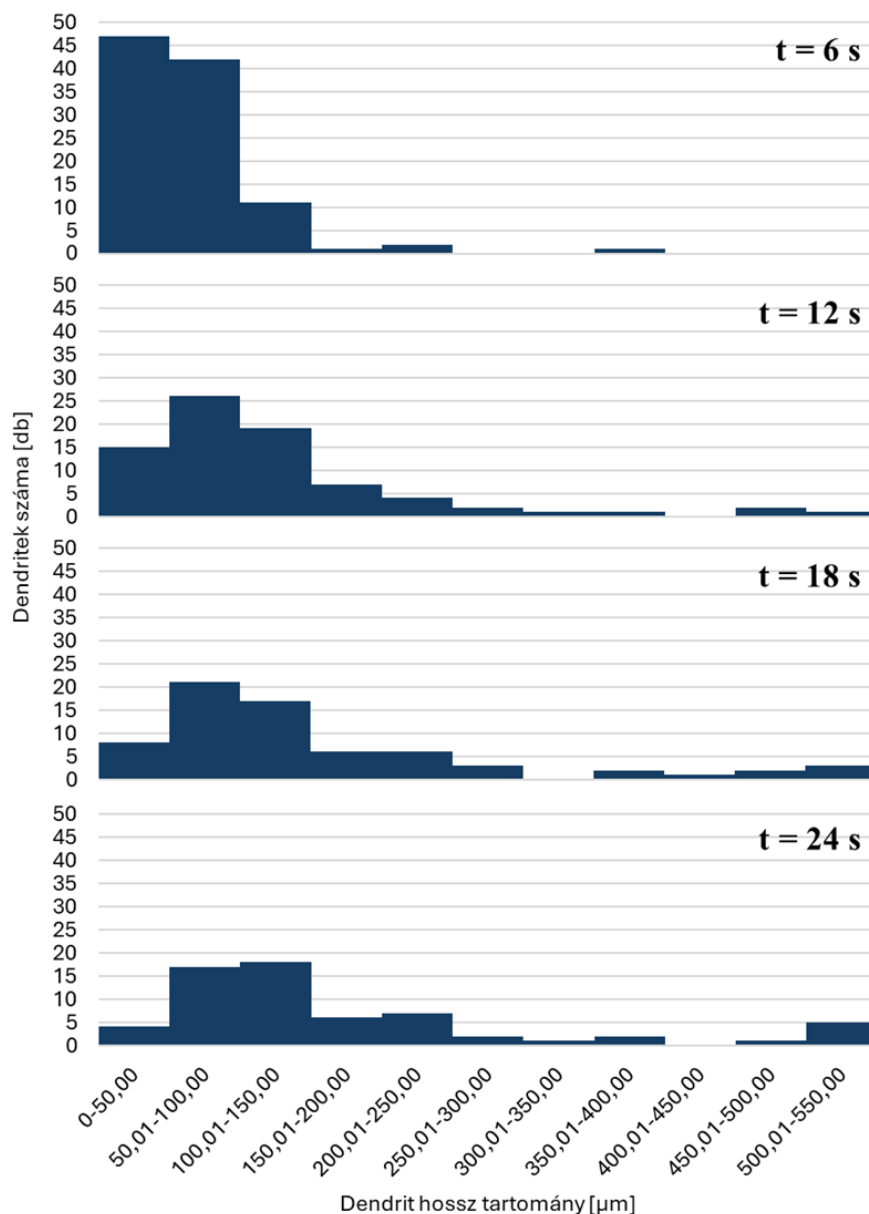
A mért adatok alapján az elektromos térerősség 6 V/mm-ről 12 V/mm-re történő növelése esetén a hibáig (átvezetés, rövidzár) eltelt átlagos idő (MTTF) átlagosan 56,1%-kal csökkent, a tiszta, valamint az eredeti koncentrációjú folyasztószerrel szennyezett felületek (Flux100) tekintetében. Az Interflux2005C tisztítást nem igénylő folyasztószer maradványaiból származó ionos koncentráció megjelenésével – tehát a tiszta és eredeti koncentrációjú folyasztószerrel szennyezett felület (Flux100) eredményeinek összehasonlításából adódóan – 76,2%-kal csökken a hibáig (átvezetés, rövidzár) eltelt átlagos idő (MTTF).

A következő ábrákon bemutatásra kerülnek azok a jelenségek, amelyek a dendritnövekedés dinamikájának hatására alakulnak ki. A 3.5. ábra a Flux100 kezeléssel ellátott elektródákra vonatkozóan készültek, és a dendrit növekedésének időbeli változása képeken keresztül szemléltethető. Az elektromos térerősség növelésével a dendritek növekedési üteme gyorsul, és a dendritek több helyről is elindulnak, de csak néhány, jellemzően a vízcsepp peremén elhelyezkedő dendrit nő gyorsabban. Ahogy az elektromos térerősség növekszik, a dendritek elérik az anódot, és gyors növekedést mutatnak.



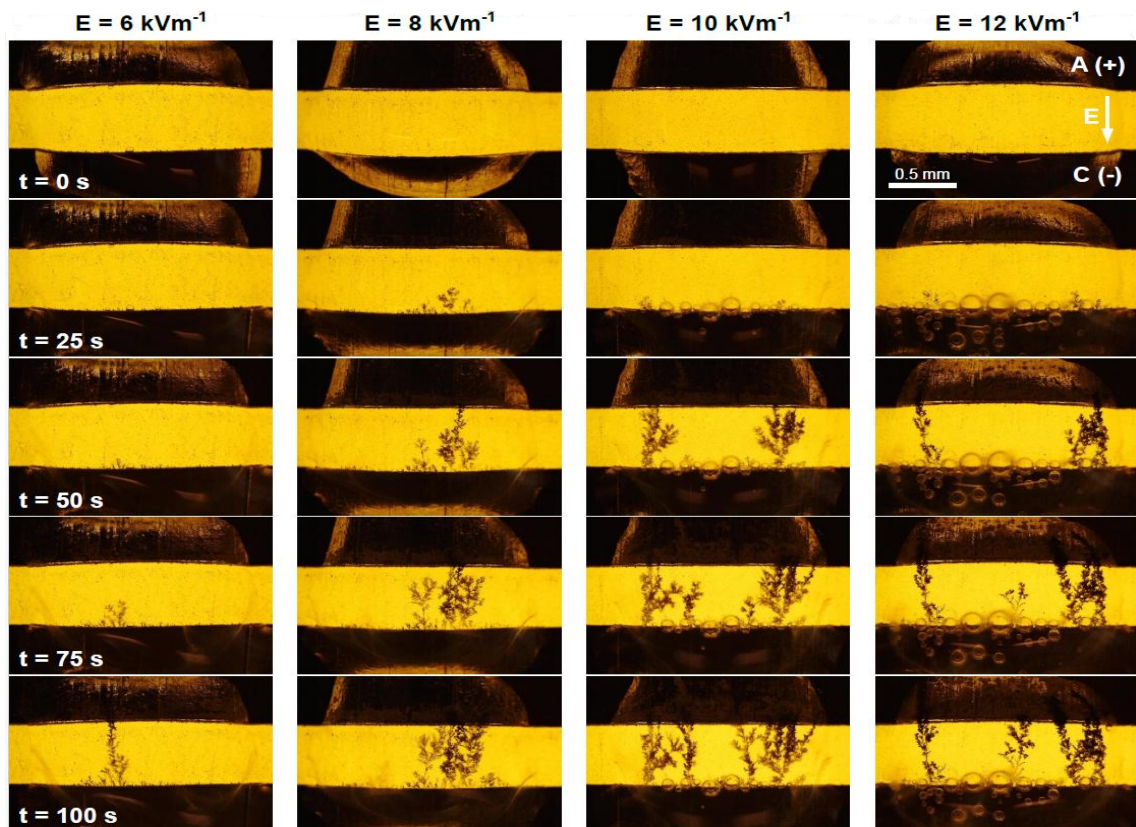
3.5. ábra: WD teszt: dendritnövekedés folyamata különböző elektromos terekben, higítás nélküli folyasztószerrel kezelt felületen

Tanulmányoztam a dendritek hosszának eloszlását az idő függvényében. A 12 V/mm elektromos térerősség esetén mért dendritek hosszának eloszlását a 3.6. ábra mutatja be. Az időbeli eloszlásfüggvények alapján elmondható, hogy kezdetben nagy számú 50 μm (47 db) és 100 μm (42 db) alatti dendrit jelenik meg, amelyek közül néhány kiemelkedik. A 3.6. ábrán ugyanaz az időskála került alkalmazásra, mint a 3.5. ábrán, és ebben az esetben is jól érzékelhető a folyamat gyors lefolyása, valamint a dendritek növekedése. Az idő előrehaladtával az 50 μm -nél kisebb méretű dendritek száma csökken, mivel a meglévő dendritek növekedésnek indulnak, miközben új dendritképződés nem figyelhető meg. A vízcsepp teszt folyamán az 50-150 μm hosszúságú dendritek vannak legnagyobb számban. A mérés 24. másodpercében 5 db 500 μm -nél nagyobb dendrit figyelhető meg, amelyek átkötést alakítottak ki a vezető sávok között.



3.6. ábra: Dendritek hosszának eloszlása az idő függvényében ($E = 12 \text{ V/mm}$)

3.7. ábra a kezeletlen, folyasztószer adagolása nélkül elvégzett tesztek folyamatát mutatja be. A folyamat lefutása nagyfokú hasonlóságot mutat az előzőekben ismertetett, folyasztószerrel szennyezett minták megfigyelése során tapasztaltakkal. Különbség azonban, hogy az elektromos tér kapcsolásától kezdődően kevesebb dendrit jelenik meg összességében, amely nem éri el a folyasztószerrel kezelt minták esetén tapasztalható dendritsűrűséget. Megállapítható, hogy a folyasztószer hozzáadása nélkül elvégzett vízcsepp tesztek lefutása lassabb, mint a folyasztószerrel szennyezett minták esetén. Ez megfigyelhető az ábrákon feltüntetett időparaméterekből is.



3.7. ábra: WD teszt: dendritnövekedés folyamata különböző elektromos terekben, tiszta felületen, folyasztószer nélkül

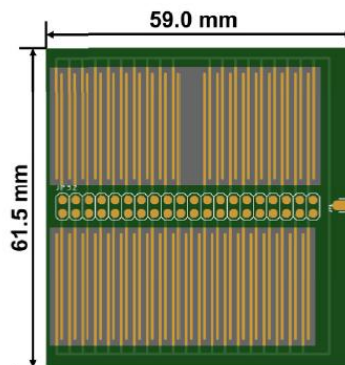
3.2 Folyasztószer hatása az átütési feszültség értékére

A nagyfeszültségű (HV) elektronikai eszközök, például az energiaátviteli rendszerek, elektromos járművek és ipari alkalmazások növekvő elterjedésével egyre fontosabbá válik a nyomtatott áramköri lapok meghibásodásának felismerése, előrejelzése és megelőzése. A magas elektromos terhelésnek és kedvezőtlen környezeti hatásoknak kitett PCB-k esetében a két leggyakoribb meghibásodási ok a dielektromos átütés és a fémionok elektrokémiai migrációja által előidézett dendritképződésből eredő rövidzárlat.

A fejezet a dielektromos átütés jelenségét tárgyalja kísérleti vizsgálatok alapján, tisztítást nem igénylő folyasztószer-maradványokat tartalmazó PCB-k esetében. A bemutatott eredmények képezik a 2. tézis alapját. Az átütési feszültség meghatározása a legelterjedtebb FR-4 üvegszál-erősítésű epoxi alapú hordozólemezen, párhuzamos vezetősávokat alkalmazva, lépcsős feszültségemelési módszerrel történik. A cél a felületi szennyeződés hatásának meghatározása az átütési feszültségre különböző környezeti paraméterek mellett, túllépve az ipari szabványok által lefedett jellemző paramétereken. Az eredmények összehasonlítása statisztikai módszerekkel történik, kiemelve a tiszta és szennyezett PCB-k dielektromos szilárdsága közötti különbségeket.

3.2.1 Anyagok és módszerek

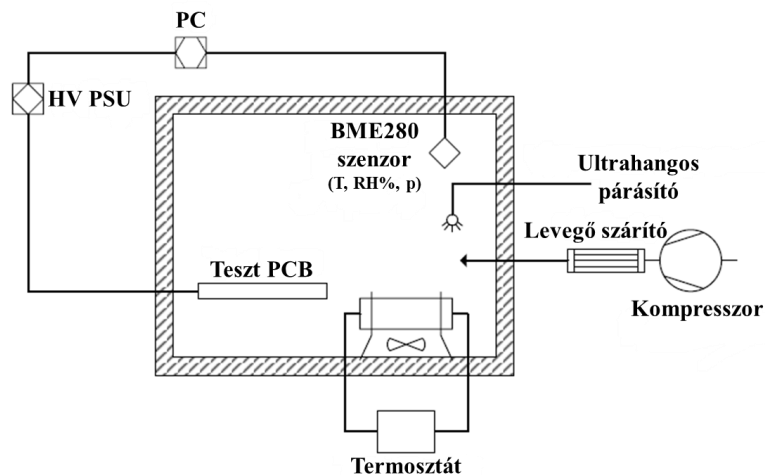
A kísérletekhez szerzőtársaim által tervezett, saját fejlesztésű teszt PCB-k kerültek felhasználásra, amelyek a széles körben alkalmazott FR-4 üvegszál-erősítésű epoxi laminátumból készültek, egyik oldalukon 0,035 mm vastag rézfóliával. A PCB-k egyik oldalán 39 párhuzamos vezetősávból álló tesztmintázat található, amely az IPC szabványos PCB-B-25A tesztpanel interdigitalis mintázatán alapul. Minden párhuzamos sáv pár elektromosan elválasztott, 20 mm hosszú és 0,5 mm széles, a köztük lévő távolság szintén 0,5 mm. A PCB felületét forrasztásgátló lakk borította, kivéve a vezetősávokat, amelyek ónbevonatot kaptak. A célra kialakított PCB vázlat a 3.8. ábrán látható.



3.8. ábra: A mérésekhez tervezett PCB kialakítása

A mérés előtt a PCB-k felülete etanollal tisztítva és zsírtalanítva lett. A vizsgálatok során az egyes vezetősáv-párok egyik fele a nagyfeszültségű tápegység pozitív pólusához, amely tápegység mérte a feszültséget és az áthaladó áramot, a másik fele pedig egy 39 eres szalagkábelen keresztül külön-külön a földponthoz csatlakoztatható volt. A kialakítás lehetővé tette több párhuzamos mérés elvégzését egyetlen teszt PCB-n, ugyanazon környezeti feltételek mellett. Egy panelen 15-20 párhuzamos mérés történt, így minden panel két eltérő környezeti feltételhez lett alkalmazva.

A teszt PCB egy hőszigetelt polisztirol kamrában lett elhelyezve, amelynek belső térfogata 0,013 m³ volt. A hőmérsékletet termosztát vezérelte ± 1 °C pontossággal, míg a relatív páratartalmat ultrahangos párologtató és szárítóval ellátott kompresszor szabályozta, $\pm 5\%$ pontossággal. A környezeti paramétereket (hőmérséklet, páratartalom, légnyomás) egy BME280 érzékelő mérte, amelynek relatív páratartalom-mérési pontossága $\pm 3\%$ RH, hőmérséklet-mérési pontossága pedig $\pm 0,5$ °C. Az adatokat egy Arduino UNO mikrokontroller dolgozta fel. A mérőrendszer sematikus elrendezését a 3.9. ábra szemlélteti.



3.9. ábra: A mérőrendszer sematikus elrendezése

A nagyfeszültségű tápegység egy PS350 típusú Stanford Research System eszköz volt, amelyet egy PXIe-6341 adatgyűjtő kártya vezérelt. Az adatgyűjtő szoftver LabVIEW környezetben készült, amely nemcsak a feszültségértékeket, hanem a környezeti paramétereket is rögzítette. Az átütési feszültség (U_B) meghatározása lépésenkénti (Tetzner) módszerrel történt, ahol a feszültség 20 V-os lépésekben lett növelve, és minden lépésnél 5 másodpercig volt fenntartva. Az átütés pillanatában a tápegység áramlökést érzékelt, és lekapcsolta a kimenetet, miközben a vezérlőprogram rögzítette az átütési feszültség értékét. Minden hőmérséklet- és páratartalomértéknél legalább 15 párhuzamos

mérés történt a statisztikai megbízhatóság biztosítása érdekében. A méréseket 20 és 40 °C hőmérsékleten, valamint 10 és 60% relatív páratartalom mellett lettek elvégezve.

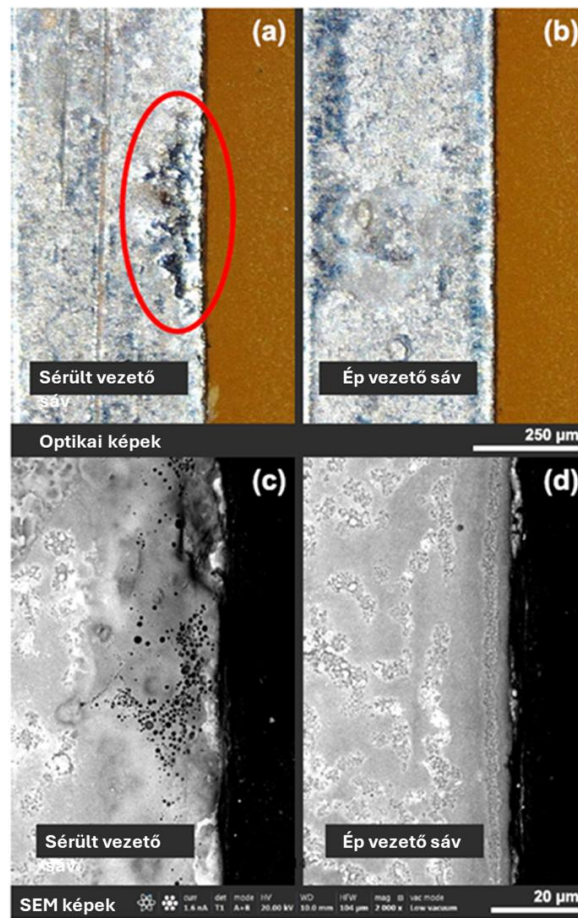
Az átütési feszültség szennyezett PCB-ken került meghatározásra, hogy a tisztítást nem igénylő folyasztszer-maradványok hatása a dielektromos szilárdságra vizsgálható legyen. Ehhez minden vezetősáv-pár közötti részbe 1 µl Cobar 95-DRX-M+ vagy Inteflux2005C tisztítást nem igénylő folyasztszer került adagolásra. A Cobar 95-DRX-M+ esetén, a gyártó által megadott összetétel szerint a folyasztszer részben vízbázisú (40 tömeg%), tartalmaz 30-35% etanolt, 20-35% 2-propanolt, 1-5% adipinsavat, 0,1-5% metanolt és kevesebb mint 0,1% kvaterner ammóniumvegyületet. Az Interflux2005C alkohol bázisú folyasztszer, a gyártó által megadott összetétel szerint 62-72% etanolt, 20-30% 2-propanolt, 5-8% n-butil-acetátot, 1-4% dikarbonsavat tartalmaz. A folyasztszer szobahőmérsékleten 15 percig történő szárításának célja az volt, hogy az illékony komponensek teljesen elpárologjanak, így a maradványokban csak az adipinsav és az ammóniumvegyületek maradtak meg.

3.2.2 Mérési eredmények és értékelésük

Ismert, hogy a dielektromos átütés során keletkező elektromos ív károsíthatja az áramvezetőket, vagy a szigetelő anyag elektromos vezetőképessége megváltozhat az átütés után. Ennek következményeként az ugyanazon vezetők között végzett egymást követő átütési feszültség mérések eredményei eltérhetnek, mivel a dielektromos szilárdság változhat minden egyes átütés után. Először annak vizsgálata történt, hogy ugyanaz a vezetősáv-pár alkalmazható-e párhuzamos mérésekhez. Ehhez a feszültséglépcsős program többszöri alkalmazása történt ugyanazon a vezetősáv-páron, és az átütési feszültség rögzítése tiszta PCB-n, 20 °C és 30% relatív páratartalom mellett.

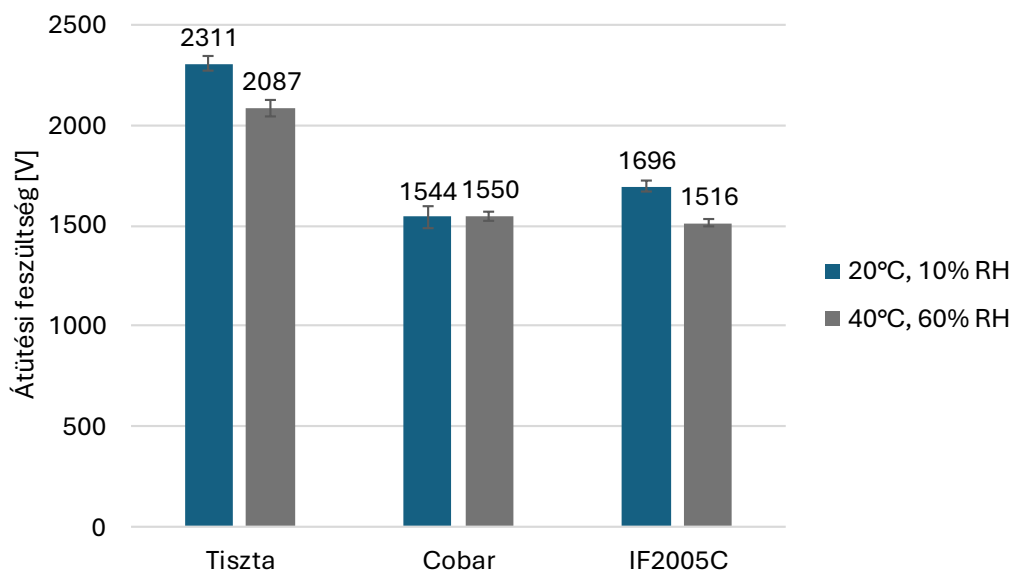
A mérések alapján megállapítható, hogy az átütési feszültség növekszik a mérések számával, ami arra utal, hogy a vezetősávok fokozatosan módosulnak a többszöri magas feszültségnek való kitettség következtében. Egy lehetséges magyarázat, hogy az elektromos ívek szerkezeti változásokat vagy károsodást okoznak a vezetősávok felületén, így azok érdessége, geometriája vagy összetétele megváltozik. Ennek ellenőrzésére optikai és elektronmikroszkópos vizsgálatokkal történt, amely felvételeket a 3.10. ábra demonstrál. Az optikai képeken jelentős változást észlelhető a vezetősávok ónbevonatú felületén az átütési helyeken, míg az elektronmikroszkópos képek szerint a károsodott területen a fémes nyomok egy része elpárolgott, és kráter alakú eróziós nyomok is megfigyelhetők. A SEM képen a sérülés felnagyított része látható, ahol az

erodált felszín és a kráterek, mint sötét foltok láthatók. A mérések statisztikájának változását elkerülendő, minden vezetősáv-párt csak egyszer használtam.



3.10. ábra: Az optikai (a) és pásztázó elektronmikroszkóppal (c) megfigyelt nagyfeszültségű ív okozta jellegzetes felületi sérülés a vezető sávon. Az ép vezető sávok (b és d) referenciaként szolgálnak

A környezeti feltételek dielektromos szilárdságra gyakorolt hatásának jellemzése céljából elvégzett mérések 10% és 60% relatív páratartalom mellett, különböző hőmérsékleteken (20°C és 40°C) történtek, többszöri ismétléssel (15 és 20 között), tiszta, valamint Cobar 95-DRX-M+ és Interflux2005C folyasztozszerrel szennyezett felületeken. A 20°C-os hőmérsékleten és 10%-os relatív páratartalom mellett végzett kísérletek kedvezőbb környezetet, míg a 40°C és 60%-os relatív páratartalom a megterhelőbb feltételeket hivatott szimulálni. A mért átütési feszültség értékek átlagát és standard hibáját a 3.11. ábra mutatja be.



3.11. ábra: Átütési feszültség értékek átlaga és st. hibája 20°C - 10% RH és 40°C - 60% RH környezeti feltételek mellett, tiszta és 2 típusú folyaszttószerezrel szennyezett felületen

Az ábra alapján egyértelműen megállapítható, hogy a folyaszttószerez maradványok jeleléte mind száraz, mind nedves környezetben negatív hatással vannak az átütési feszültség értékére. Relatív száraz környezetben a Cobar folyaszttószerezrel szennyezett minta átütési feszültsége 33,2%-kal és az Interflux2005C folyaszttószerezrel kezelt mintáé 26,6%-kal csökkent. Ebben az esetben a fő tényező a folyaszttószerez-maradványok magasabb relatív permittivitása, amely fokozza a helyi elektromos tér erősségét, így csökkentve az átütési feszültséget. A magasabb páratartalom és hőmérséklet esetén, ahol 25,7 (Cobar) és 27,4%-os (IF2005C) visszaesés tapasztalható az átütési feszültség értékeiben, a csökkenő tendencia a folyaszttószerezben található szerves savak (pl. adipinsav) vízben történő oldódásának és ionos vezetőképesség növekedésének tudható be. Cobar 95-DRX-M + tisztítást nem igénylő folyaszttószerezrel szennyezett áramköri lapok esetében a hőmérséklet és a páratartalom változása nem gyakorol jelentős hatást az átütési feszültség értékére. Tiszta és Interflux2005C folyaszttószerezrel szennyezett felületek esetén alacsonyabb átütési feszültséget eredményezett az emelt hőmérséklet és páratartalom, 224 és 180 V-os csökkenéssel. Ennek oka, hogy a felületen abszorbeálódó mikroszkopikus vízcseppek csökkentik az ellenállást és elősegítik az elektromos kisüléseket.

Eredményeim azt mutatják, hogy nagyfeszültségű környezetben a tiszta felületek fenntartása, beleértve a tisztítást nem igénylő folyaszttószerez-maradványok eltávolítását, valamint a környezeti feltételek ellenőrzése kulcsfontosságú a megbízható működés és az átütési meghibásodások elkerülése érdekében.

3.3 Ionos szennyezettség vizsgálata impedancia mérésén alapuló módszerekkel

A 3.1 és 3.2 fejezetekben bemutatásra kerültek a folyasztószer-maradványok által okozott két meghatározó, kockázatos jelenség, míg a jelen fejezetben a megbízhatósági és hibakockázat-elemzési módszerek egyik alapelve, az észlelhetőség szempontjából közelítem meg a problémát. Az elektronikai szerelvények megbízhatóságának biztosítása érdekében szükségessé vált az ionos szennyeződések hatékony kimutatása és minimalizálása.

Korábban megállapítottam, hogy a folyasztószer maradványok jelenléte jelentősen befolyásolja a nyomtatott áramköri lapok (PCB-k) elektromos tulajdonságait, különösen párás és meleg környezetben, ahol a meghibásodások gyakorisága növekszik. Az ilyen típusú vizsgálatokat jellemzően klímakamrában végzik, ahol az FR-4-alapú tesztpanelek forrasztásgátló lakkreteg nélküli és bevonatos változatait elemzik. A forrasztásgátló bevonat módosítja az elektródák közötti tér morfológiáját és elektromos viselkedését, ezért az impedanciaanalízis kiemelten fontos a valós alkalmazások megértése szempontjából.

3.3.1 Anyagok és módszerek

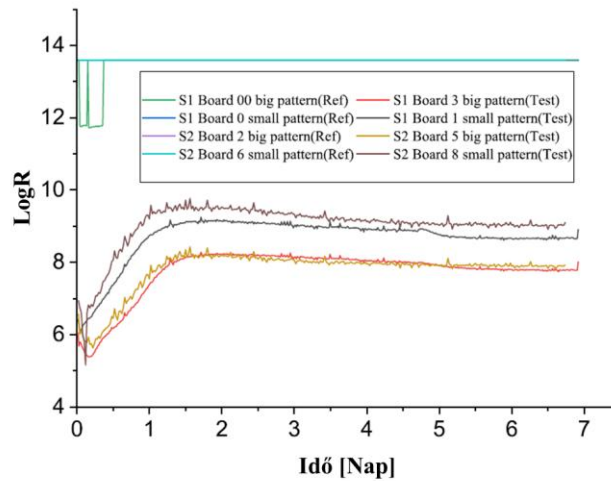
Az impedanciaspektroszkópia (IS) egy széles körben alkalmazott módszer, amely lehetővé teszi a PCB-k felszíni és belső elektromos tulajdonságainak vizsgálatát. A mérések során a fésűmintázaton kis amplitúdójú váltófeszültség került alkalmazásra különböző frekvenciákon (20 Hz és 1 MHz között), hogy az impedancia összetevői külön vizsgálhatók legyenek. A méréseket FR-4-alapú tesztpaneleken végeztem, amelyek felületére folyasztószert adagoltam, majd hőkezelésnek vettem alá. A vizsgálati folyamat egyik lépéseként 140 °C-on 120 másodpercig hevített mintákkal szimuláltam a forrasztási folyamat előtti hőmérsékleti terhelést.

A mérések során három különböző vizsgálati eljárást alkalmaztam: impedanciamérést, kapacitásmérést, valamint felületi szigetelési ellenállásmérést (*Surface Insulation Resistance*, SIR). Az impedanciamérések során egy AD5934 impedancia-konvertert alkalmaztam 5 kHz-en, mivel a vizsgálatok szerint ezen a frekvencián kapják a legmegbízhatóbb eredményeket. A kapacitásméréseket Agilent 4284A LRC-mérővel végeztem, amely 20 Hz és 1 MHz közötti frekvenciaspektrumon vizsgálta a mintákat. A

felületi szigetelési ellenállásmérések során a PCB-k egy héten keresztül 10 V feszültségnek voltak kitéve, 90%-os relatív páratartalom és 40 °C hőmérséklet mellett.

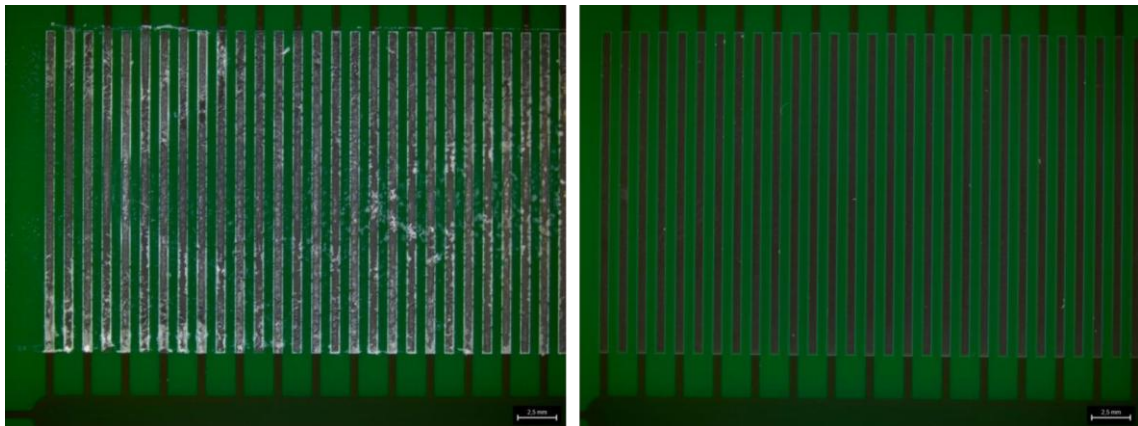
3.3.2 Mérési eredmények és értékelésük

A klímatesztek és tárolás után az ionos szennyeződésmérések, vizuális vizsgálatok és impedanciamérések egyaránt kimutatták a folyasztószer-maradványok jelenlétét. Az eredmények azt mutatják, hogy a folyasztószer-maradványok jelentős hatással vannak a PCB-k elektromos tulajdonságaira. Az impedanciamérések szerint a szennyeződés csökkenti az ellenállást és növeli a kapacitást, különösen alacsony frekvenciákon. A SIR tesztek kimutatták (3.12. ábra), hogy a folyasztószerrel kezelt minták felületi ellenállása alacsonyabb maradt, és még egy hét után sem érte el a referenciaértékeket.



3.12. ábra: SIR vizsgálati eredmények 40 °C-on, 90 relatív páratartalom, 10 V feszültség alkalmazása mellett

A mikroszkópos vizsgálatok során fehér maradványokat észleltek a folyasztószerrel szennyezett területeken (3.13. ábra), amelyek az ionmigrációra utalnak, amit a lokális ionos szennyezettség mérése is megerősített.



3.13. ábra: Optikai mikroszkópos felvételek a folyasztószerrel szennyezett (bal) és referencia fésűmintázatról a kísérlet után

Az energiadisperzív röntgenspektroszkópos (EDS) elemzés kimutatta, hogy az ónbevonat vastagsága megváltozott az eltérő potenciálú elektródák között, amely eredmény tovább igazolja az ionok vándorlásának folyamatát.

A SEM-EDX vizsgálatok szerint a klímateszt során (SIR mérés) ónmigráció ment végbe, azonban a vezetőfelületek közötti forrasztásgátló rétegen nem alakultak ki tipikus dendritok.

Vizsgáltam a plazmakezelés alkalmazhatóságát forrasztás utáni folyasztószer maradványok eltávolításában. A mesterséges szennyezés (3 típusú folyasztószerrel: alkoholos, víz és alkohol bázisú, gél), szárítás, és szimulációs hőkezelésen átesett minták referenciaként szolgáltak, ezen NYÁK-lapok tisztasági fokával hasonlítottam össze az ugyanezen folyamaton átesett, majd 5% H₂ tartalmú formálógázból előállított plazmával kezelt minták tisztasági fokával. A kapott eredmények alapján (1. táblázat) nem figyelhető meg tendencia a folyasztószerrel szennyezett, majd hőntartott, valamint az utólagos plazmakezelt minták lokális ionos szennyezettsége esetén.

3.2. táblázat: Szimulációs hőntartáson átesett és plazmakezeléssel tisztított minták összehasonlítása tisztasági fok alapján

	Korozivitási index (C3/C.I.) [μA/min]) <i>Szimulációs hőntartáson átesett minták</i>	Korozivitási index (C3/C.I.) [μA/min]) <i>Szimulációs hőntartáson és plazmakezelésen átesett minták</i>
Alkoholos folyasztószer	2,27	1,82
Víz és alkohol bázisú folyasztószer	1,42	0,72
Gél folyasztószer	0,51	0,53

Összességében az eredmények azt mutatják, hogy a tisztítást nem igénylő folyasztószerekben használt gyenge szerves sav maradványok befolyásolhatják a PCB-k elektronikai tulajdonságait, ezért a folyasztószerhasználat minimalizálása vagy utólagos tisztítási eljárások alkalmazása javasolt biztonságkritikus alkalmazások esetén.

3.4 Összefoglalás

Ebben a fejezetben bemutatásra kerültek a folyasztószer-maradványok által kiváltott folyamatok két meghatározó mechanizmusa, azok befolyásoló tényezői, valamint az ezekből eredő következmények. Továbbá ismertetésre és alkalmazásra került egy detektálási módszer az elektronikai szerelvények ionos szennyezettségének kimutatására.

A vízcsepp tesztek (WD) vizuális kiértékelése alapján megállapítható, hogy a folyasztószer-maradványok jelenléte következtében kialakuló magas koncentrációjú ionos szennyezettség jelentősen fokozza az elektrokémiai migráció sebességét. Ennek eredményeként a folyamat során létrejövő dendritképződés gyorsabban áthidalja a két vezetősáv közötti távolságot. Ez a jelenség a meghibásodásig eltelt átlagos idő (MTTF) szignifikáns csökkenéséhez vezet, ami súlyosan befolyásolhatja az érintett áramkört elemek megbízhatóságát. A magas feszültségű alkalmazások különös kockázatnak vannak kitéve, hiszen az elektromos térerősség növelésével a hibáig eltelt idő (TTF) tovább redukálódik.

Tiszta és folyasztószerrel szennyezett PCB-k átütési feszültségét vizsgáltam különböző környezeti feltételek függvényében. A mérések alapján megállapítható, hogy az átütési feszültség növekszik az ugyanazon elektródapáron ismételt mérések számával, a folyasztószerrel szennyezett felületen pedig alacsonyabb, mint a tiszta felületen. A páratartalom és hőmérséklet növekedésével a tiszta és Interflux2005C folyasztószerrel szennyezett felület esetén csökkent az átütési feszültség. Az eredmények azt sugallják, hogy a folyasztószer maradványok eltávolítása és a környezeti feltételek kontrollálása alapvető fontosságú a megbízhatóság megőrzése érdekében.

Az elektronikai szerelvények ionos szennyezettségének detektálására több, impedancia-alapú mérési módszert alkalmaztam. Ezen eljárások előnye, hogy roncsolásmentesek és ismételhettek, így alkalmasak a megbízható és reprodukálható vizsgálatok elvégzésére. A gyártásközi ellenőrzésre optimalizált módszerváltozat kidolgozása további kutatások tárgyát képezheti. Továbbá a lokális ionos szennyezettség vizsgálatok igazolták, hogy a forrasztás után visszamaradó folyasztószer-maradványok eltávolítására a plazmakezelés nem bizonyul hatékony eljárásnak.

4. Plazmakezelés hatása a nedvesíthetőségre és forraszthatóságra

A plazmatechnológia az ipar számos területén jelentős előrelépést eredményezett a felületi tulajdonságok finomhangolásában. Kiemelkedő szerepe van a nedvesíthetőség és a forraszthatóság javításában, amelyek kulcsfontosságú paraméterek a modern gyártási folyamatokban, különösen az elektronikai alkalmazásokban.

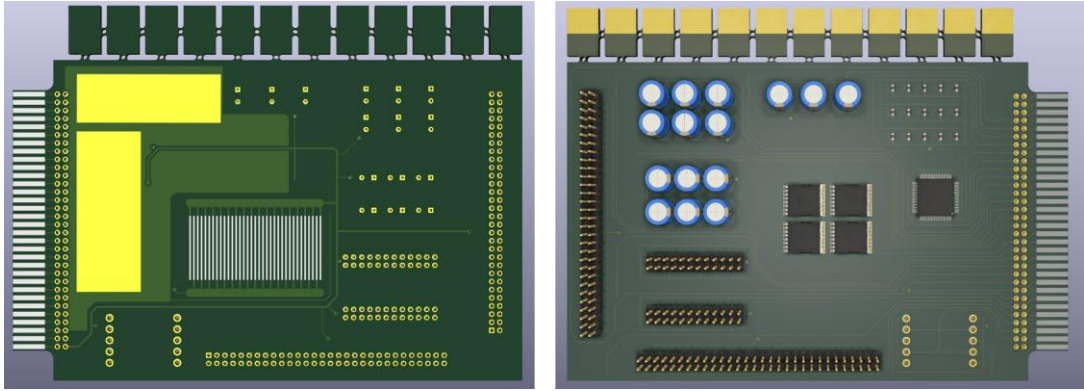
A nedvesíthetőség a forraszanyag elterülésének mértékét írja le a felületen, míg a forraszthatóság egy átfogóbb fogalom, amely a nedvesíthetőségen kívül más tényezőket is figyelembe vesz, például az intermetallikus kötés kialakulását és az oxidáció mértékét. A nedvesíthetőség javítása plazmakezeléssel nemcsak a folyadékok és szilárd felületek közötti kölcsönhatás optimalizálását teszi lehetővé, hanem hozzájárulhat a forrasztási folyamatok során a tapadási és kötési mechanizmusok hatékonyságának növeléséhez is. Ez különösen fontos olyan technológiák esetében, ahol a magas minőségű kötés és az időállóság elengedhetetlen követelmény.

A fejezetben az atmoszférikus nyomású plazmakezelés nyomtatott áramköri lapok forrasztási felületeire gyakorolt hatását vizsgáltam, különböző plazmakezelési paraméterek mellett. A kísérletek során optimalizálásra kerültek a változtatható plazmakezelési paraméterek, a lehető legjobb eredmények elérése céljából, gazdasági szempontok figyelembevételével. A módszer hatékonyságának ellenőrzése érdekében a mintákat plazmakezelés előtt és után is vizsgáltam a nedvesíthetőséget és a forraszthatóságot helyezve a középpontba. Az alábbiakban tárgyalt megállapítások az értekezés 3. tézisében kerülnek összefoglalásra.

4.1 Anyagok és módszerek

4.1.1 A vizsgált forrasztandó felületek

Kifejlesztésre került egy olyan tesztpanel, amely a doktori kutatásom során elvégzendő kísérletekhez ideális; praktikus megoldásokkal elősegítve a megfelelő hozzáférhetőséget. A nyomtatott áramköri lap kialakítását a 4.1. ábra szemlélteti.



4.1. ábra: A tervezett áramköri lap alsó vagy forrasztási (bal) és felső vagy átfolyási (jobb) oldala

Az ábra bal oldalán a nyomtatott áramköri lap alsó, vagy forrasztási oldala látható, amelyen nem található felületszerelt alkatrész, azonban kialakításra került két nagyobb sík forrasztási felület, amelyek elegendően nagy teret adnak például a peremszögmérés nagyobb számú ismétléséhez is. Egy felhasználásra készült termék esetén nincs szükség ekkora kiterjedésű forrasztandó felületre, hiszen a miniaturizációs trendnek köszönhetően nem alkalmaznak nagy kiterjedésű alkatrészeket, és a nyomtatott áramköri lap gyártási költségeit is emeli.

A 4.1. ábra jobb oldalán a felső, vagy az úgynevezett átfolyási oldal látható, amely helyet ad a felületszerelt alkatrészeknek. A nyomtatott áramköri lap felső részén 12 kupon került kialakításra, amelyek könnyű hozzáférhetősége elősegíti a forraszthatósági vizsgálatok elvégzését. Azzal, hogy a forrasztandó, fémezett felület a kupon szélétől kezdődően található, nincs szükség destruktív mintaelőkészítésre, így csökkentve a vizsgálati időt, valamint az előkészítés által felmerülő hibát, mérési eltérést.

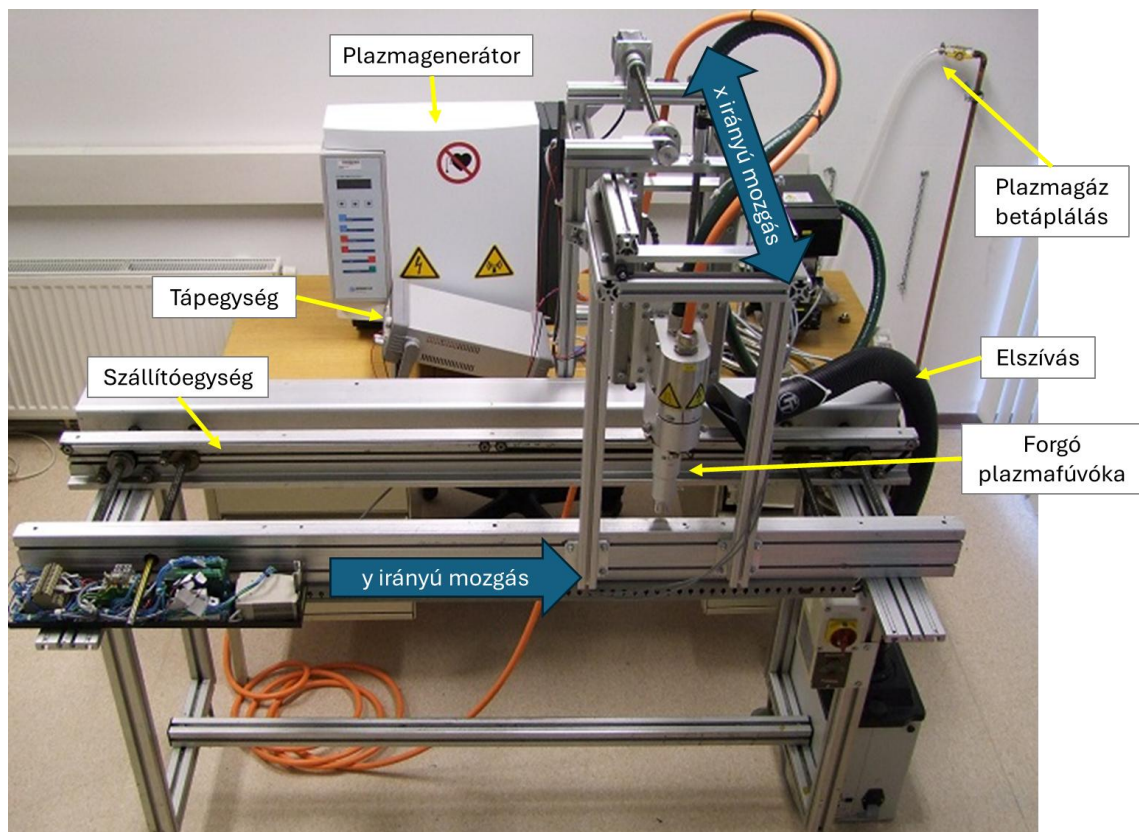
Munkám során három különböző anyagi minőségű, az elektronikai gyártásban széles körben használt panelbevonatot vizsgáltam: immerziós ón (ImSn), immerziós ezüst (ImAg) és kémiai nikk-el-arany (ENIG). Az ENIG bevonat esetén a Ni réteg vastagsága 3-6 μm , az Au réteg vastagsága pedig min. 0,05 μm . A forrasztás a nikk-el felületén történik az ENIG bevonat esetén, míg a másik két típus forrasztásakor a réz felületén. Az immerziós ón (ImSn) az egyik leggyakrabban használt panelbevonat az elektronikai iparban. Az ónréteg vastagsága körülbelül 1 μm , amely a vegyi eljárásnak köszönhetően egyenletesen terül el, szemben más gyártási technológiákkal (például HASL=Hot Air Soldering Level). Az immerziós ezüst (ImAg) bevonat felületén 1 μm -nél vékonyabb ezüst réteg található.

4.1.2 Plazmakezelés paraméterei

A felületkezelés atmoszférikus nyomású, nagyfeszültségű plazmával történt. A plazmakezeléshez Plasmatreat FG5001 típusú plazmagenerátort használtam RD1004 forgó plazmafúvókéval (4.2. ábra).

A forgó plazmafúvóka és a PCB felület között beállított távolság 10 mm volt. A rendelkezésemre álló Plasmatreat FG5001 készülék RD1004 típusú forgó plazmafúvókájának a pásztázó, x-irányú mozgásáról és annak sebességéről egy Agilent E3644A típusú laboratóriumi tápegység által működtetett egyenáramú villanymotor gondoskodik. A plazmagenerátor 280 V feszültséggel állította elő a kúp alakú plazmasugarat. Plazmagázként levegőt, valamint formálógázt alkalmaztam, amely 5 és 10 térfogatszázalék hidrogént tartalmaztak nitrogénben, a hidrogén redukáló hatásának kihasználása érdekében.

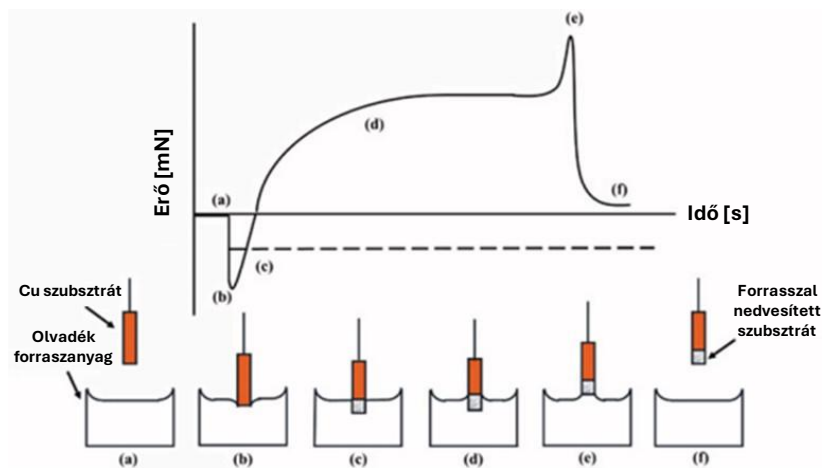
A plazmakezelés hatékonyságának szemléltetése érdekében a mintákat felületkezelés előtt és után is vizsgáltam.



4.2. ábra: Plasmatreat FG5001 plazmagenerátor és RD1004 forgófej

4.1.3 Forraszthatósági vizsgálat mérési elve

A forraszthatósági tesztek során Wetting Balance Must 3 készüléket alkalmaztam. A nedvesítési egyensúly vizsgálata kvantitatív módszer a forraszthatóság értékelésére, amely a nedvesítési sebesség és a nedvesítési erő mérésén alapul. A vizsgálathoz a mintát egy precíziós mérleghez rögzítjük, majd olvadt forrasztóanyagba merítjük. Az így keletkező függőleges felhajtóerőt és felületi feszültséget egy szenzor érzékeli, és elektromos jellé alakítja. A 4.3. ábra az ideális, jó forraszthatóságot bemutató forrasztási teszt folyamatábráját és a regisztrált grafikont szemlélteti. Az ábrán demonstrált folyamat kezdetén, amikor a tárgy és a forrasz érintkezik, a nedvesítés még nem indul meg. Ekkor erőt kell kifejteni, hogy a vizsgálni kívánt részt a forraszfürdőbe nyomjuk, így egyenlítővé ki a felhajtóerő nagyságát, amely negatív előjelű erőként jelenik meg a diagramon. Kis idő elteltével a nedvesítés megindul, a tárgy belemerül a forraszfürdőbe, mely körül ilyenkor bemélyedés figyelhető meg. Jól forrasztható felület esetén a nedvesítési görbe meredeken emelkedik, majd fokozatosan vízszintesbe áll. Ebben az időszakban a forrasztóanyag felfut a mérni kívánt felületre, kialakítva a nedvesítésre jellemző folyadékfelszínt. Rossz forraszthatóság esetén a nedvesítési erő értéke stagnál, a görbe nem emelkedik, a vizsgálni kívánt alkatrész körüli folyadékfelszín lokális mélyedést mutat. Az általam használt készülék kamerával is rendelkezik, amely lehetővé teszi a tesztelési folyamat rögzítését.



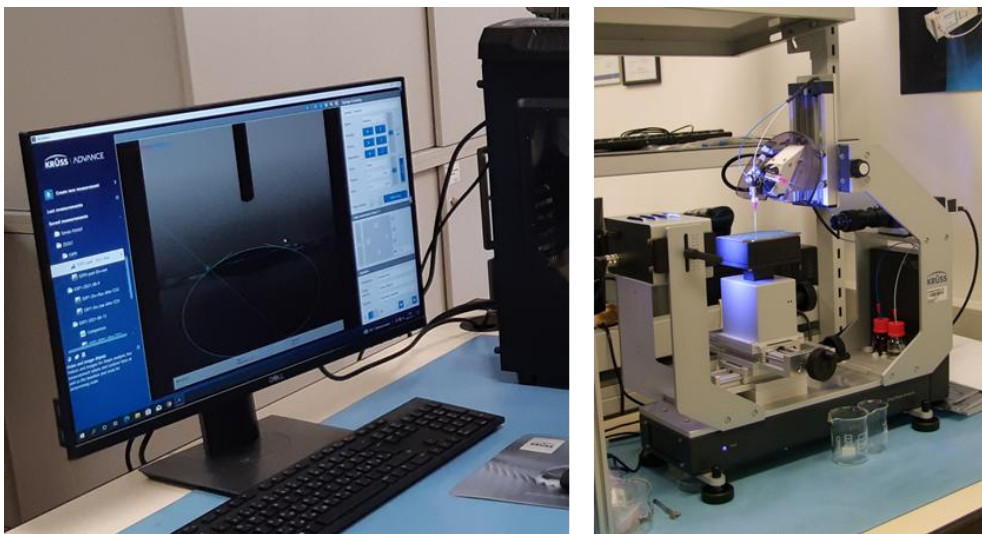
4.3. ábra: Forraszthatósági teszt folyamatábrája és a regisztrált diagram

A forraszthatósági tesztek során a nem kezelt és plazmakezelt mintákat 250°C-ra hevített, olvadt forrasztóanyagba merítettem és a nedvesítési erő értékeit regisztráltam az idő függvényében. A mérésekhez SAC305 ólommentes forrasztóanyagot alkalmaztam. A bemelegítési sebesség 6 mm/s és a bemelegítési mélység 3 mm volt, a teszt 30 másodpercig tartott.

A tesztek ebben a kísérlet-sorozatban is a 4.1.1 fejezetben leírt bevonatokon végeztem el. A forraszthatósági vizsgálatok során Interflux 2005c típusú folyasztószert használtam. A felületkezelés hatásának szemléltetése érdekében a kezelés előtti és utáni állapotot is vizsgáltam, valamint a plazmakezelés hatékonyságának számszerűsítésére az Interflux 2005c folyasztószerből higítási sort készítettem izopropil-alkohollal, 1/2, 1/4 és 1/8 higításokkal. Közvetlenül a plazmakezelés után egy csepp folyasztószert adagoltam a mintákhoz. Az eredeti, felületmódosítás nélküli mintákat referenciaként használtam.

4.1.4 Nedvesíthetőségi vizsgálat mérési elve

A panelbevonatok határfelületi energiáit (HFE) kontaktszög méréssel határoztam meg, Krüss DSA30 Drop Shape Analyzer típusú készülékkel (4.4. ábra), „Advance” szoftverrel. A gép automata mintaadagolóval és nagy sebességű kamerával szerelt. Az ülőcsepp mérési módszer alkalmazása során ismert felületi feszültségű oldószereket használtam a cseppek érintkezési szögeinek meghatározására a PCB-lapokon. A HFE poláris komponensének elemzéséhez víz, a diszperz komponens meghatározásához pedig dijód-metán standard oldatokat alkalmaztam. 1 µl oldatot helyeztem a felületre az automata mintaadagoló és a manuális vezérlésű tárgyasztal segítségével.



4.4. ábra: Krüss DSA30 kontaktszög-mérő készülék és Advanced szoftver

A mért érintkezési szögekből a szoftver az Owens/Wendt elmélet segítségével számította ki a határfelületi szabadenergiát. Matematikailag az elmélet két alapvető egyenletre épül - Young és Good egyenlet - , amelyek leírják a szilárd felületek és a folyadékok közötti kölcsönhatásokat [156].

$$\frac{\sigma_L(\cos \theta + 1)}{2(\sigma_{L,D})^{1/2}} = (\sigma_{S,P})^{1/2} \frac{(\sigma_{L,P})^{1/2}}{(\sigma_{L,D})^{1/2}} + (\sigma_{S,D})^{1/2} \quad (1)$$

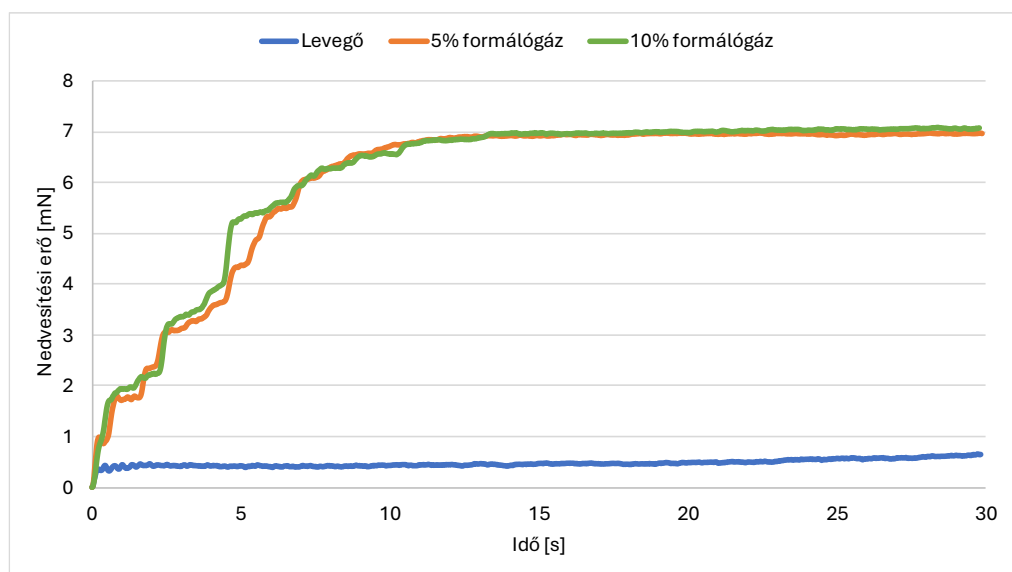
Ahol σ_L a nedvesítőfolyadék teljes felületi feszültsége, $\sigma_{L,D}$ a nedvesítőfolyadék felületi feszültségének diszperziós, apoláris komponense, $\sigma_{L,P}$ a nedvesítőfolyadék felületi feszültségének poláris komponense, $\sigma_{S,D}$ a szilárd anyag felületi energiájának diszperziós összetevője, $\sigma_{S,P}$ a szilárd anyag felületi energiájának poláris összetevője, θ pedig a folyadék és a szilárd felületek érintkezési szöge. A felületi feszültség és a határfelületi energia mértékegysége [N/m], az érintkezési szög mértékegysége pedig [°] fok az (1) egyenletben.

Ipari felhasználhatóság szempontjából, a plazmakezelés hatékonyságát befolyásoló fontos tényező a levegőn való tárolhatósága, ezért az idő függvényében is tanulmányoztam a felületkezelés hatását. A peremszög méréseket 0, 4, 12, 24 és 48 órával a felületkezelés után is elvégeztem. A plazmakezelés után a mintákat laboratóriumi körülmények között, $23\pm 2^\circ\text{C}$ hőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson tároltam. A felületkezelés előtti állapot referenciaként szolgál. A vizsgálat során nem használtam folyasztószert.

4.2 Mérési eredmények és értékelésük

4.2.1 Forraszthatósági vizsgálati eredmények

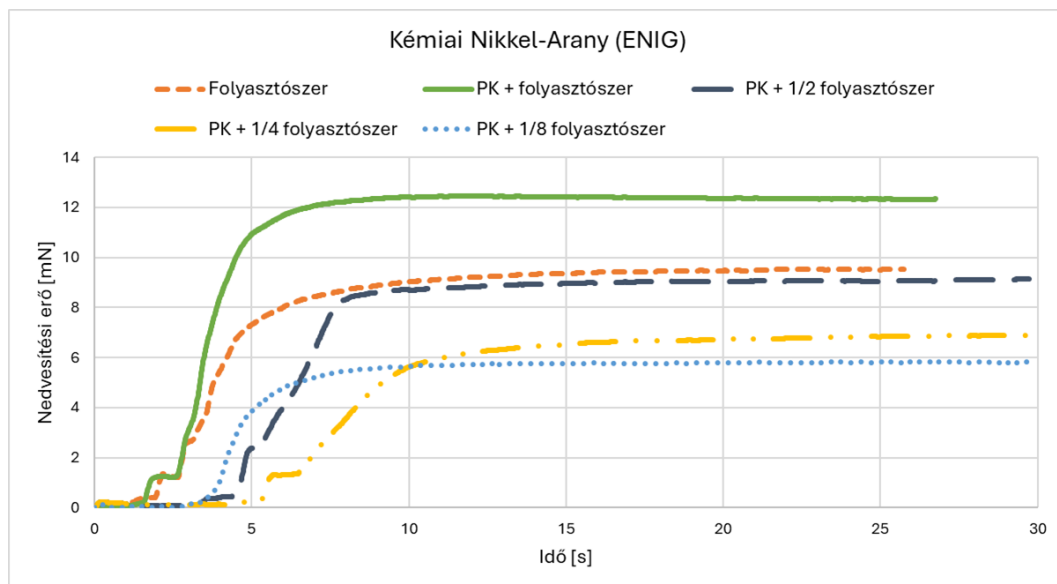
Az atmoszférikus nyomású plazmakezelés egyik változtatható, bemenő paramétere az alkalmazott plazmagáz anyagi minősége. Kísérleteim során levegőből, valamint 5% és 10% H_2 -tartalmú formálógázból előállított plazmakezeléseket végeztem, majd ezek hatását vizsgáltam a minták forraszthatóságára. A kapott nedvesítési görbék a 4.5. ábrán láthatók.



4.5. ábra: : Nedvesítési görbék különböző típusú plazmagáz esetén

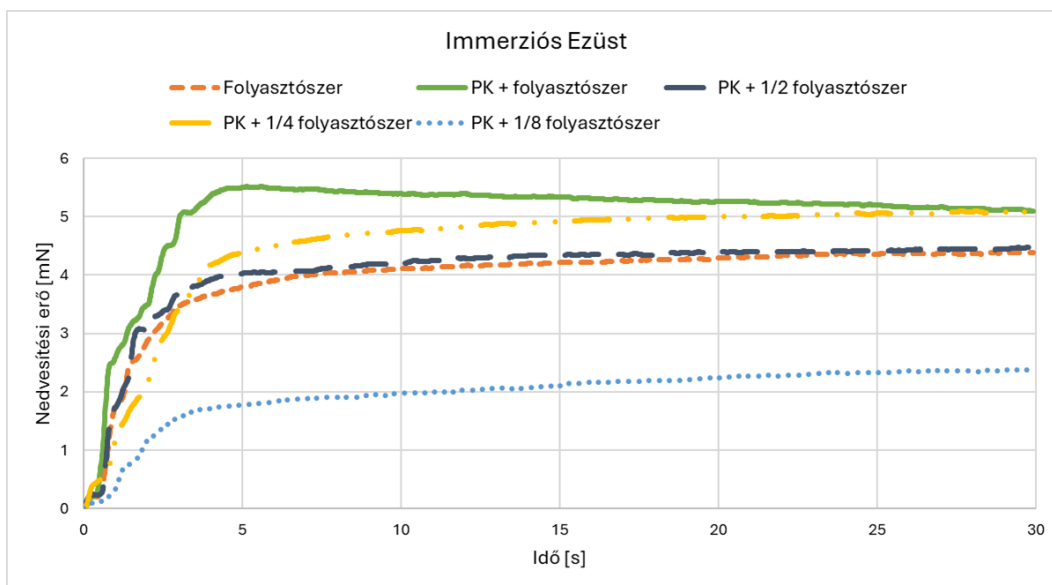
Az ábrázolt nedvesítési görbe alapján elmondható, hogy a levegőből előállított plazmával kezelt minta nem forrasztható, hiszen a nedvesítési erő értékében nem tapasztalható változás. Az 5 és 10% H₂ tartalmú formálógázból előállított plazmakezelésen résztvevő minták nedvesítési görbéi hasonló alakot vesznek fel, nem figyelhető meg szignifikáns eltérés a hatásukat tekintve. Gazdasági és biztonsági okokat szem előtt tartva, további kísérleteim során az 5% H₂ tartalmú formálógáz hatását vizsgáltam.

A forraszthatóság vizsgálatát az Interflux 2005C folyasztószer különböző hígított oldataival végeztem plazmakezelés után. A kezeletlen mintákat referenciaként szolgálnak. A mért értékeket korrigáltam a felhajtóerővel, így a geometriai eltérések hatása nem érvényesül. A vizsgálati eredményeket a 4.6. ábra, 4.7. ábra és 4.8. ábra szemlélteti.



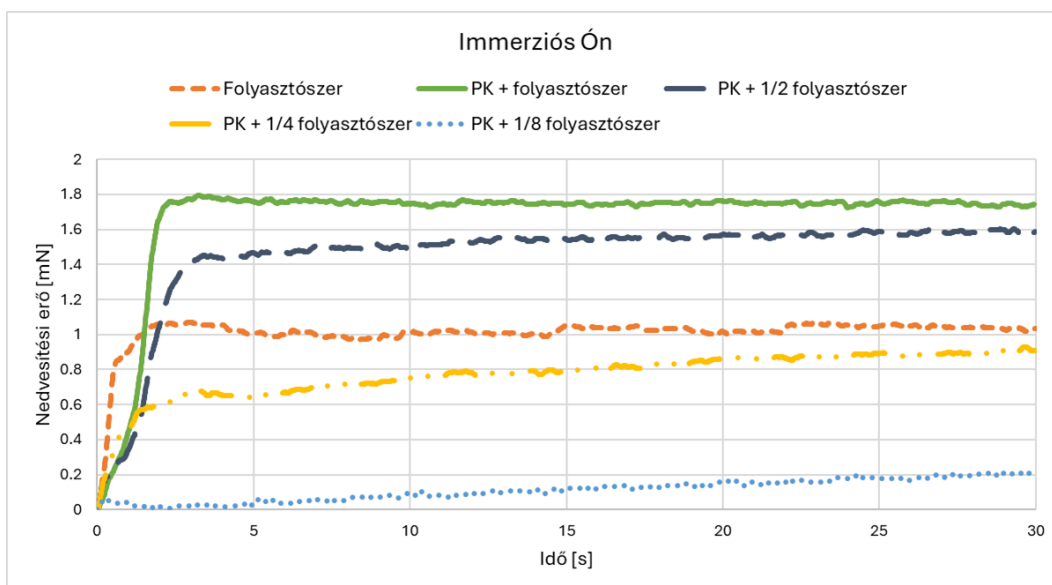
4.6. ábra: ENIG bevonat nedvesítési görbéi, ahol a PK = plazmakezelés

Az eredmények igazolják a plazmakezelés hatékonyságát az eredeti és a kezelt minták közötti különbségek alapján az ENIG bevonat esetén. A plazmakezelést követően a nedvesítési erő magasabb értéket mutat, mint kezelés nélkül. Hasonlóság figyelhető meg a kezelés nélküli minta eredeti koncentrációjú folyasztószerrel és a plazmakezelt minta 1/2 hígított folyasztószerrel végzett vizsgálata között. Ez az összefüggés arra enged következtetni, hogy a folyasztószer mennyisége akár a felére is csökkenthető, ha a forrasztás előtt plazmakezelést alkalmazunk.



4.7. ábra: ImAg bevonat nedvesítési görbéi, ahol a PK = plazmakezelés

Az immerziós ezüst bevonat nedvesítési görbéi az ENIG bevonat forrasztásához hasonló hatékonyságot mutatnak, növekedés látható a nedvesítési erőben a formálógáz plazmakezelés alá vetett minták esetén.

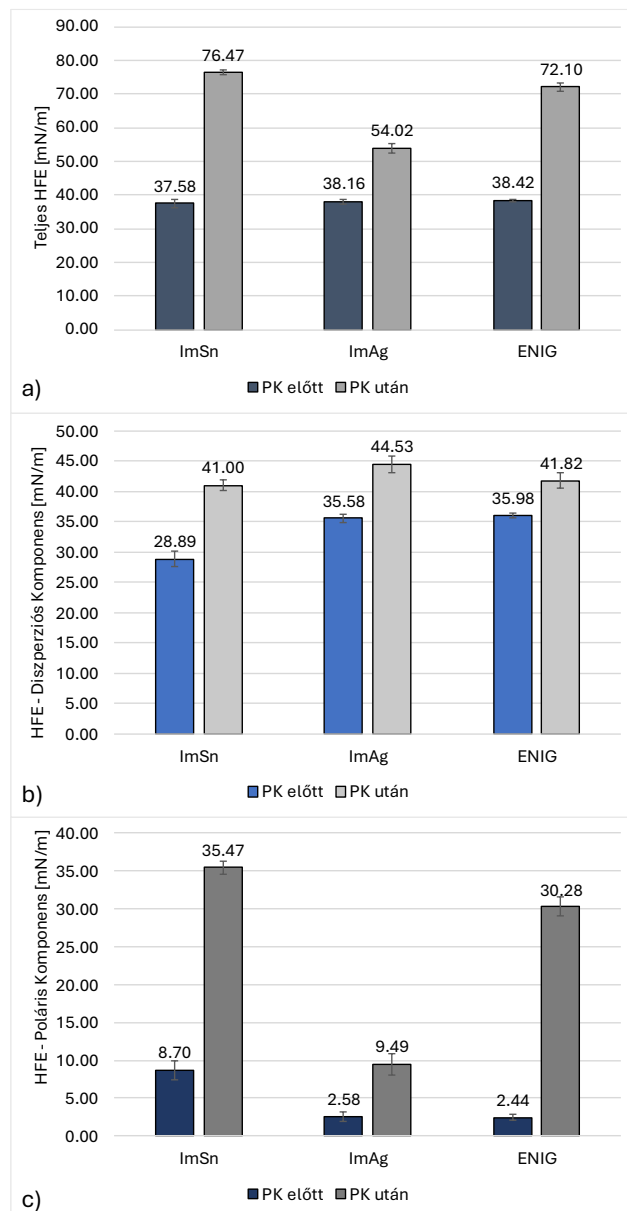


4.8. ábra: ImSn bevonat nedvesítési görbéi, ahol a PK = plazmakezelés

A harmadik vizsgált panelbevonat - az immerziós ón – az előzőekben vizsgált másik két típushoz hasonló tendenciákat mutat. A plazmakezelést követően mind az eredeti koncentrációjú-, mind az 1/2 hígítású folyasztószer oldattal kezelt minta nagyobb nedvesítési erőt produkáltak, mint a referencia, vagyis a plazmakezelés nélkül, folyasztószerrel forrasztott minták.

4.2.2 Nedvesíthetőség vizsgálata kontaktszögméréssel

Érintkezési szög, ülőcsepp módszerrel történő mérésén keresztül meghatároztam a vizsgált felületek eredeti és plazmakezelés utáni határfelületi energiáját (HFE), víz és dijód-metán standard oldatokat alkalmazva. A két különböző típusú standard oldat alkalmazása a határfelületi energia poláris és diszperziós komponensének meghatározására is lehetőséget nyújtott. A teljes határfelületi energia értékeket, valamint a határfelületi energia értékeket poláris és diszperz komponenseire bontva ábrázolja a 4.9. ábra.

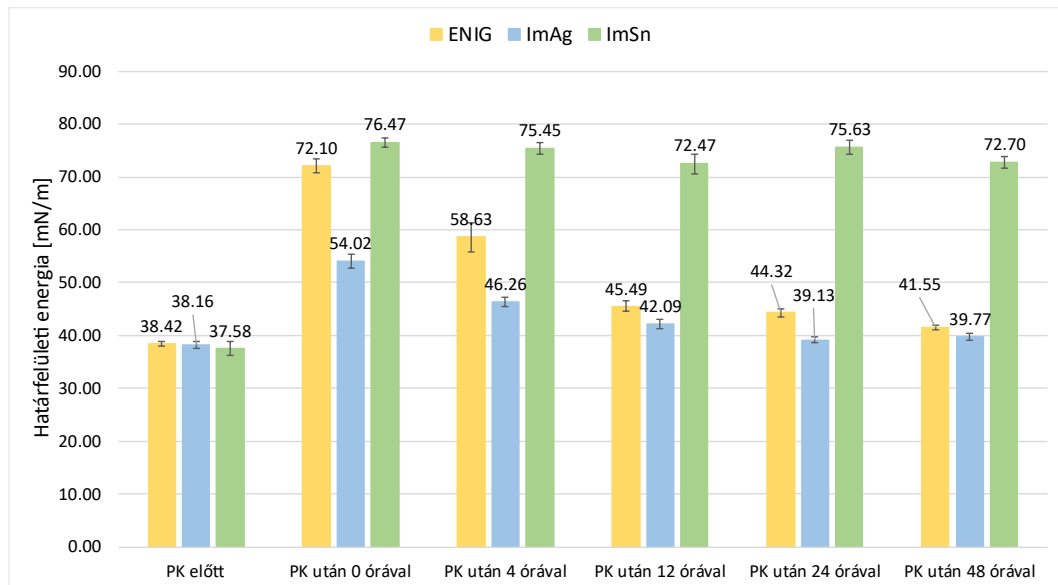


4.9. ábra: A vizsgált panelbevonatok teljes (a) HFE értékei, valamint a HFE diszperziós (b) és poláris (c) komponenseinek értékei plazmakezelés előtt és után

Az immerziós ón esetén 104%-kal, az immerziós ezüst esetén 42%-kal és kémiai nikk-el-arany bevonat esetén 88%-kal nőtt a teljes határfelületi energia. A határfelületi energia poláris komponense tekintetében immerziós ón esetén 308%-os, az immerziós ezüst esetén 268%-os és kémiai nikk-el-arany bevonat esetén 1141%-os növekedést tudtam kimutatni.

A poláris komponens növekedése több tényezőre vezethető vissza, amelyek gyakran a felület kémiai összetételének vagy szerkezetének változásával állnak összefüggésben. A plazmakezelés képes módosítani az anyag felszínét azáltal, hogy növeli a poláris csoportok koncentrációját, olyan poláris funkciós csoportokat hoz létre, amelyek fokozzák a felületi energia poláris részét. A felületi érdesség és morfológia változása szintén befolyásolhatja a poláris csoportok eloszlását a felületen. Egy durvább felület, amelyen több poláris csoport van kitéve, magasabb poláris felületi energiát eredményezhet. Emellett a nano- vagy mikrostruktúrált felszínnek is elősegíthetik a poláris funkciós csoportok nagyobb mértékű expozícióját. A felületi szabadenergia diszperziós komponense is növekedést mutatott, bár ez nem olyan jelentős mértékű, mint a poláris komponens esetében.

Mindhárom típusú PCB bevonat mintát vizsgáltam érintkezési szög méréssel a plazmakezelés előtt és után azonnal, valamint 4, 12, 24, 48 órával a kezelés után. A tesztek eredményeit a 4.10. ábra és a 4.1. táblázat, 4.2. táblázat, 4.3. táblázatok mutatják.



4.10. ábra: Határfelületi energia értékek és a mérések szórása a plazmakezelés után eltelt idő függvényében

4.1. táblázat: Kontaktszög mérési eredmények ENIG felületen

	teljes HFE [mN/m]	diszperz HFE [mN/m]	poláris HFE [mN/m]	víz – átlagos kontaktszög [°]	dijód-metán – átlagos kontaktszög [°]
PK nélkül	38,4 ±0,4	36,0 ±0,3	2,4 ±0,1	85,7 (±0,3)	46,9 (±0,5)
PK után	72,1 ±1,2	41,8 ±0,6	30,3 ±0,7	24,6 (±1,5)	35,5 (±1,2)
PK után 4 h	58,6 ±2,8	39,5 ±1,1	19,1 ±1,7	48,4 (±2,7)	40,2 (±2,2)
PK után 12 h	45,5 ±1,0	38,1 ±0,4	7,4 ±0,5	71,0 (±1,1)	42,9 (±0,8)
PK után 24 h	44,3 ±0,7	36,9 ±0,3	7,5 ±0,4	71,7 (±0,9)	45,3 (±0,6)
PK után 48 h	41,6 ±0,5	37,2 ±0,3	4,3 ±0,2	79,0 (±0,5)	44,6 (±0,5)

Az eredmények alapján elmondható, hogy ENIG bevonat esetén az érintkezési szögek jelentősen csökkentek a plazmakezelés hatására, leginkább víz esetén, növelve az HFE poláris komponensét, és ezzel egyidejűleg a teljes HFE értéke ugrásszerűen nőtt. 4 órával a felületmódosítás után a HFE még mindig magasabb volt, mint az eredeti, de csökkenésnek indult. A 12, 24 és 48 órás minták mérési eredménye azt jelzi, hogy a plazmakezelés hatása enyhülni kezd, 48 óra elteltével megközelíti a kiindulási állapotot.

4.2. táblázat: Kontaktszög mérési eredmények ImAg felületen

	teljes HFE [mN/m]	diszperz HFE [mN/m]	poláris HFE [mN/m]	víz – átlagos kontaktszög [°]	dijód-metán – átlagos kontaktszög [°]
PK nélkül	38,2 ±0,7	35,6 ±0,4	2,6 ±0,3	85,4 (±0,9)	47,6 (±0,8)
PK után	54,0 ±1,4	44,5 ±0,4	9,5 ±1,0	62,6 (±1,9)	29,3 (±1,1)
PK után 4 h	46,23 ±0,9	42,6 ±0,5	3,7 ±0,4	77,7 (±1,2)	33,8 (±1,1)
PK után 12 h	42,1 ±0,9	40,1 ±0,6	2,0 ±0,2	84,9 (±0,7)	39,0 (±1,3)
PK után 24 h	39,1 ±0,6	37,4 ±0,5	1,7 ±0,1	87,5 (±0,5)	44,3 (±0,9)
PK után 48 h	39,8 ±0,6	37,9 ±0,4	1,8 ±0,2	86,8 (±0,8)	43,3 (±0,8)

Az immerziós ezüst eredményei hasonlóságot mutatnak az ENIG bevonaton történt felületkezelés eredményeivel: a plazmakezelést követően az érintkezési szögek csökkentek, a határfelületi energia pedig nőtt. Bár a változás mértéke kevésbé intenzív, továbbra is jelentős. A felületmódosítás hatása csökkenni kezd, 48 órás levegőn történő tárolás után megközelíti a kiindulási állapotot.

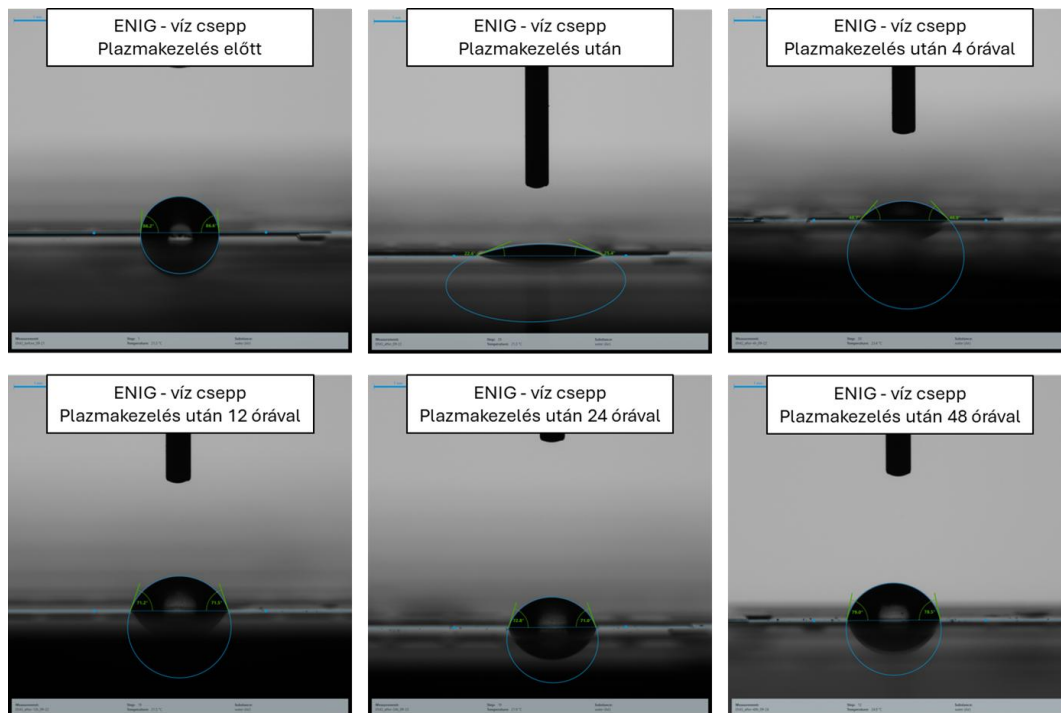
4.3. táblázat: Kontaktszög mérési eredmények ImSn felületen

	teljes HFE [mN/m]	diszperz HFE [mN/m]	poláris HFE [mN/m]	víz – átlagos kontaktszög [°]	dijód-metán – átlagos kontaktszög [°]
PK nélkül	37,6 ±1,3	28,9 ±0,7	8,7 ±0,6	74,5 (±1,0)	59,5 (±1,3)
PK után	76,5 ±0,8	41,0 ±0,5	35,5 ±0,4	8,2 (±1,3)	37,2 (±1,0)
PK után 4 h	75,5 ±1,1	39,6 ±0,7	35,9 ±0,4	10,9 (±0,7)	40,1 (±1,3)
PK után 12 h	72,5 ±1,9	37,8 ±0,6	34,6 ±1,3	19,3 (±3,7)	43,4 (±1,2)
PK után 24 h	75,6 ±1,4	38,7 ±0,9	36,9 ±0,6	8,1 (±0,3)	41,7 (±1,7)
PK után 48 h	72,7 ±1,1	35,7 ±0,6	37,0 ±0,5	16,3 (±1,2)	47,5 (±1,0)

Az immerziós ón felületkezelési eredményei szemléltetik a legjelentősebb határfelületi energia-növekedést. A víz érintkezési szögei a nyomtatott áramkörü lap felületén szignifikáns csökkenést mutatnak a plazmakezelés után. A tárolási idővel összefüggésben nem volt megfigyelhető a HFE csökkenő tendenciája. Ez azt jelzi, hogy a felületmódosítás a másik két vizsgált fémfelülethez képest tartósabb az immerziós ón panelbevonat esetén.

A különböző bevonatok eltérő viselkedése azok anyagi jellemzői ismeretében értelmezhető. A plazmakezelés által aktivált felületek érzékenyebbek a külső behatásokra. Az immerziós ezüst (ImAg) bevonat különösen érzékeny a levegőn való tárolhatóságra. Az oxigén mellett a kéntartalom is kritikus lehet a legkülső ezüst réteg korrodálási folyamatát tekintve. A kémiai nikk-el-arany (ENIG) bevonat esetében a rendkívül vékony aranyréteg fokozottan ki van téve a plazmakezelés mechanikai hatásainak, ami megnöveli a nikk-elréteg oxidációjának kockázatát. Az immerziós ón bevonat esetén az ónréteg vastagsága elegendő a kezelés utáni oxidáció elleni védelemre, ezért nem csökken számottevően a határfelületi energia a kezelést követően.

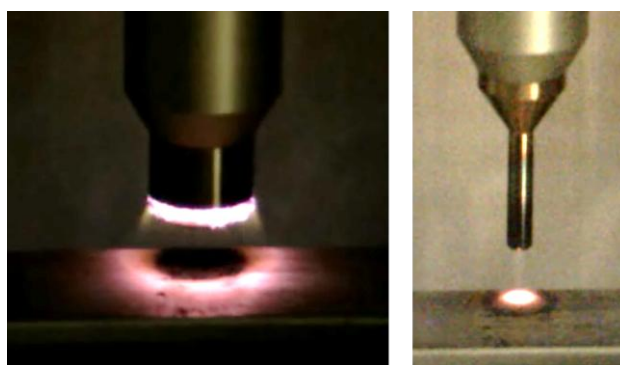
A 4.11. ábra a kontaktszög mérését szemlélteti, amelyet 1 µl térfogatú vízcseppekkel végeztem ENIG bevonaton. A legnagyobb eltérés a plazmakezelés előtti és közvetlenül utáni állapotokat ábrázoló képeken figyelhető meg: az érintkezési szögek jelentős mértékben, 85°-ról 24°-ra csökkentek. A plazmakezelést követően, a 4, 12, 24 és 48 órás tárolási időszakokban a mintákon fokozatos kontaktszög növekedés volt megfigyelhető, amelyet az ábrák jól illusztrálnak.



4.11. ábra: 1 µl-es vízcsepp kontaktszög mérése ENIG bevonaton

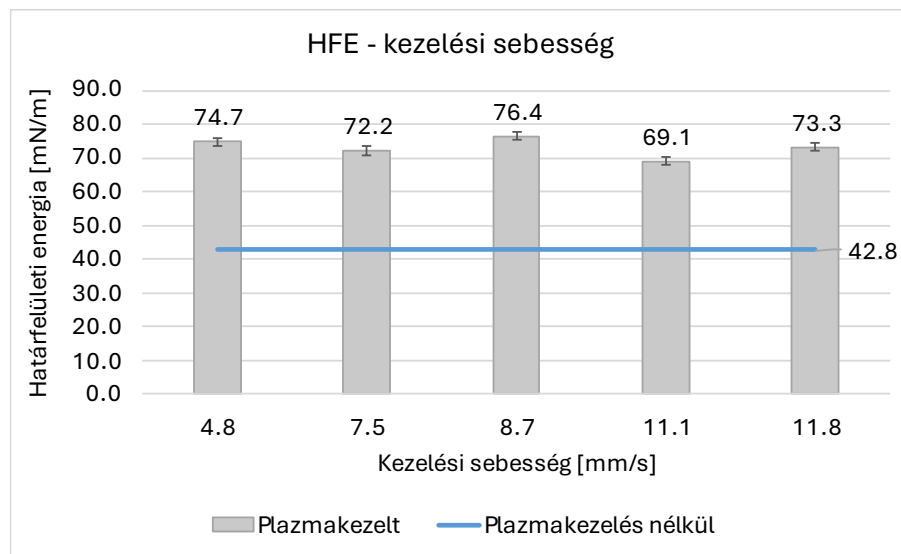
Tanulmányoztam a plazmakezelés hatékonyságát a kezelési sebesség függvényében immerziós ezüst panelbevonaton.

A plazmafej pásztázó mozgását egy laboratóriumi tápegység biztosítja, ezért a felületkezelés sebessége közvetett módon állítható. A valós kezelési sebességet iX Cameras i-Speed 210 gyártmányú gyorskamera segítségével rögzítettem, és ezen, 2500 fps gyorsítású felvételek segítségével számítottam ki a plazmakezelés idejét, sebességét. A kísérlet során alkalmazott plazmafejek és a plazmasugár gyorskamerával rögzített felvétele a 4.12. ábrán látható.



4.12. ábra: Plazmasugár gyorskamerával rögzített felvétele

Az eltérő sebességek mellett végzett plazmakezelés hatékonyságát kontaktszög-mérések segítségével ellenőriztem. A 4.13. ábra szemlélteti az elvégzett mérések eredményeit a sebesség függvényében.



4.13. ábra: Határfelületi energia értékek a kezelési sebesség függvényében

A diagramon a kék vonal a plazmakezelés előtt mért értéket jelöli, amely referenciaként szolgál. A plazmakezelés nedvesíthetőséget javító hatása ebben az esetben is megfigyelhető, mivel a felületi feszültség értékek emelkedtek. Ugyanakkor az eltérő sebességgel kezelt minták határfelületi energia értékei között nem mutatkozik jelentős különbség. Ez alapján megállapítható, hogy anyag- és időtakarékosági szempontból is kedvezőbb a berendezéssel végrehajtható legnagyobb, 11,8 mm/s-os tisztítási sebesség alkalmazása.

4.3 Összefoglalás

A fejezetben a plazmakezelés változtatható paramétereinek hatásával és ezen változók optimalizálásával foglalkoztam, valamint az 5% H₂ tartalmú formálógázból előállított, atmoszférikus nyomású plazmakezelés hatékonyságát tanulmányoztam. Munkám során ugyanazon mintákat vizsgáltam kiindulási, plazmakezelés előtti állapotban, valamint plazmakezelés után. Két különböző mérési módszert alkalmaztam: nedvesíthetőségi teszt kontaktszög méréssel, valamint forraszthatósági teszt. Az elvégzett kísérletek alapján elmondható, hogy az optimalizált paraméterekkel végrehajtott plazmakezelés javítja a nedvesíthetőséget, és elősegíti a forraszthatóságot; alkalmazásával csökkenthető a forrasztás során adagolt folyasztószer mennyisége.

A kontaktszög mérések alapján elmondható, hogy szignifikáns eltérés tapasztalható a kezelés nélküli és a plazmakezelés után mért határfelületi energia értékekben, amelyek közül az immerziós ón (ImSn) bevonat emelkedik ki. A plazmakezelés után eltelt idő függvényében mért eredmények azt mutatják, hogy 48 óra elteltével a határfelületi energia értékek a kezelés nélküli, kiindulási állapothoz közelítenek az immerziós ezüst (ImAg) és kémiai nikkkel-arany (ENIG) panelbevonatok esetén. Az immerziós ón bevonatnál azonban tartósan bizonyult a plazmakezelés, hiszen 48 óra elteltével sem figyelhető meg nagymértékű változás a mért értékekben.

A forraszthatósági tesztek eredményeiből megállapítható, hogy folyasztószer alkalmazásával a plazmakezelés előtti és utáni állapot is forrasztható, azonban változás tapasztalható a nedvesítési erő értékekben, amely a plazmakezelés pozitív hatására utal. A kémiai nikkkel-arany bevonat nedvesítési görbéi jól szemléltetik (4.6. ábra), hogy a kezelés nélküli folyasztószer alkalmazásával vizsgált minta (*Folyasztószer*) nedvesítési erő értékei megközelítik a plazmakezelt és 1/2 higítású folyasztószerrel (*PK+1/2 folyasztószer*) vizsgált minta nedvesítési erő értékeit. Következésképpen a formálógáz alapú plazmával való felületkezeléssel a folyasztószer mennyisége akár a felére is csökkenthető. A vizsgált bevonatok közül az immerziós ezüst bevonat esetén tapasztalható a legjelentősebb változás.

5. Plazmakezelés hatásmechanizmusa a forrasztandó felületen

A forrasztási folyamatok hatékonysága és minősége nagymértékben függ a felület előkészítésétől és annak kémiai-fizikai tulajdonságaitól. A plazmakezelés az egyik legmodernebb és leghatékonyabb módszer a forrasztandó felületek tisztítására, aktiválására és módosítására. Ez a technológia lehetővé teszi a felületi szennyeződések eltávolítását, az oxidrétegek lebontását, valamint a felületi energiák optimalizálását, ezáltal javítva a forrasztóanyag tapadását és a kötés minőségét.

A plazmakezelés során nagy energiájú ionizált részecskék lépnek kölcsönhatásba a kezelt felülettel, aminek következtében kémiai reakciók és strukturális változások mennek végbe. Ezek a változások jelentősen befolyásolják a felületi topológia és érdesség alakulását, amelyek kulcsfontosságú tényezők a forrasztóanyag és az alapanyag közötti erős és tartós kötés kialakításában.

A fejezetben taglalt munkám célja, hogy áttekintse a plazmakezelés hatásmechanizmusát a forrasztandó felületeken, kiemelve a felületi tisztítás és módosítás fizikai és kémiai folyamatait. Továbbá bemutatásra kerülnek azok a változások, amelyek a felület szerkezetében és tulajdonságaiban plazmakezelés hatására végbemennek, valamint ezek gyakorlati jelentősége a forrasztási folyamatok során. A fejezetben szereplő elemzések és következtetések az értekezés 4. tézisében nyernek tézisszintű megfogalmazást.

5.1 Anyagok és módszerek

5.1.1 Plazmakezelés és a vizsgált minták

A plazmakezelést Plasmatreat PTU1208 (5.1. ábra) típusú atmoszférikus plazmagenerátorral végeztem, RD1004 forgó plazmafúvókával. A korábban használt berendezéshez képest, ez az eszköz egy asztali robottal van felszerelve, amely jelentősen növeli az automatizáció mértékét és csökkenti a kezelési időt. A robot háromdimenziós térben (x, y, z irányban) programozható, a mozgási sebesség közvetlenül beállítható, például 50 mm/s értékre, továbbá a plazma előállításához szükséges feszültség is szabályozható. Ezek a paraméterezési lehetőségek nagyobb pontosságot és folyamatszabályozhatóságot biztosítanak az alkalmazás során.

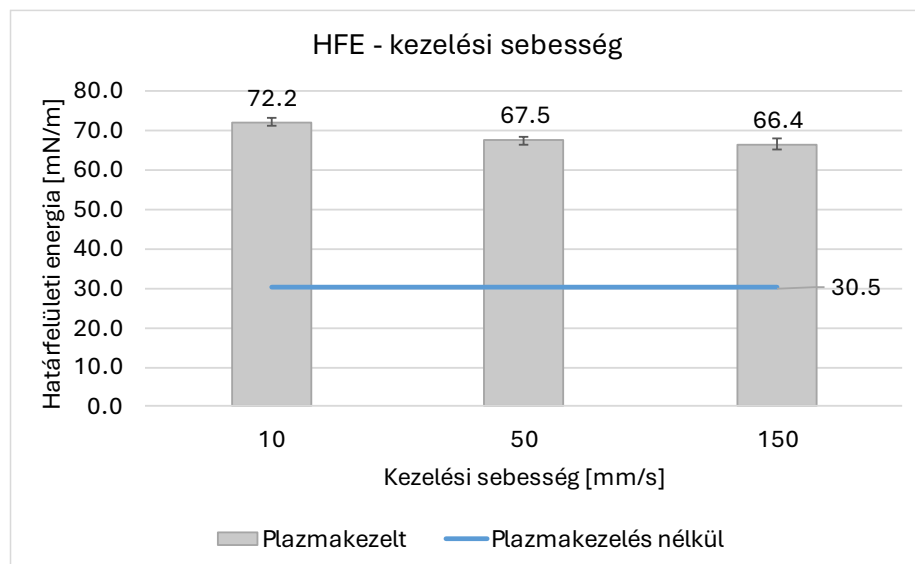
Formálógázt – 5 térfogat% hidrogént nitrogénben – alkalmaztam plazmagázként. A gázáramlási sebesség szabályozó 10%-os tőrészel 45 l/perc térfogatáramú gázt táplált a plazmagenerátorhoz. A generátor 300 V feszültséggel állította elő a plazmasugarat, amely

így 670 W teljesítményt generált. A forgó plazmafúvóka és a PCB felület közötti távolság 10 mm volt.



5.1. ábra: Plasmareat PTU1208 plazmagenerátor asztali robottal

A robot programozásával az előzőekben alkalmazott sebességnél gyorsabb kezelés vált lehetővé, ezért tanulmányoztam a kezelési sebesség növelésének hatását a nyomtatott áramköri panelek nedvesíthetőségére. 10, 50 és 150 mm/s kezelési sebességek mellett vizsgáltam immerziós ezüst bevonatú panelek nedvesíthetőségi szögét (kontaktszögmérés). A kapott eredményeket a 5.2. ábra mutatja be.



5.2. ábra: Határfelületi energia értékek a növelt kezelési sebességek függvényében

A mért értékeket ábrázoló diagram alapján elmondható, hogy a 10 mm/s sebességű kezelés eredményeként mérhető a legmagasabb határfelületi energia érték, tehát ebben az esetben a legjobb a nedvesítés. Az 50 és 150 mm/s sebességű kezelések azonban csak kis

mértékben térnek el ettől. 150 mm/s kezelési sebesség esetén a tárgyasztal hirtelen mozgása miatt a kezelendő minta rögzítésére van szükség.

Gazdaságossági és időtakarékosági szempontból a pásztázási sebességet végül 50 mm/s-ra választottam, így a kezelési idő 0,3 s.

A formálógáz, atmoszférikus nyomású plazmakezelés hatásmechanizmusát az előző fejezetben (4.1.1 fejezet) is alkalmazott 3 típusú panelbevonaton vizsgáltam: Kémiai nikkkel-arany, immerziós ezüst és immerziós ón. A három különböző típusú panelbevonat vizsgálata szükséges volt, mivel mindegyik eltérő anyagi tulajdonságokkal rendelkezik, ami különböző reakciókat és viselkedést eredményezhet a plazmakezelés hatására. A bevonatok anyagi minősége – beleértve azok kémiai összetételét, szerkezetét és fizikai jellemzőit – alapvetően befolyásolja a plazma-interakciót, így minden típus esetében más hatásmechanizmusok léphetnek fel. Ezen eltérések figyelembevételével lehet biztosítani, hogy a vizsgálat során a különböző bevonatokra vonatkozó pontos és releváns következtetéseket vonhassuk le.

5.1.2 Pásztázó elektronmikroszkópia és energia-diszperzív röntgenspektroszkópia

A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) SE detektorával kiválóan lehet vizsgálni a minta felületét, mivel ez a módszer lehetőséget ad a minták rendkívül részletes és nagy felbontású megfigyelésére. Az SE (*Secondary Electron*) detektor érzékeny a felületi struktúrákra, így különösen hasznos a mikroszkopikus felületi érdesség, textúra és módosulások vizsgálatában. A detektor a minta felületéről visszaverődő másodlagos elektronokat detektálja, amelyek lehetővé teszik a nagyon finom részletek, mint például a nanoméretű topológiai változások, egyértelmű megjelenítését. Ennek köszönhetően a SEM SE detektorával végzett vizsgálatok segítségével pontosan nyomon követhetjük a felületi módosulásokat, így ideális eszközként szolgál a különböző anyagok, például plazmakezelés előtti és utáni felületi változásainak tanulmányozásához.

Az energia-diszperzív röntgenspektroszkópia, vagy EDX (*Energy Dispersive X-ray Analysis*) egy olyan analitikai módszer, amely a pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) kombinálva lehetővé teszi a minta elemi összetételének pontos meghatározását. Az EDX detektálja az elektronnyaláb által gerjesztett röntgensugárzást, amely a minta anyagaiból származik, így információt ad az anyagok kémiai összetevőiről és azok eloszlásáról. A módszer lehetővé teszi, hogy a felületi változások során bekövetkező módosulásokat, például a plazmakezelés hatását, pontosan nyomon követhessük, így az EDX az anyagok

részletes elemzésére és a különböző kezelési folyamatok hatásainak vizsgálatára is alkalmas eszköz.

Tescan Mira3 és FEI Inspect S típusú készülékek álltak rendelkezésemre a felületi topológia és elemi összetétel tanulmányozásához. A pásztázó elektronmikroszkópos képeket, valamint összetétel meghatározást a plazmakezelés előtt és után is készítettem, ugyanazon mintákon mindhárom típusú panelbevonat esetén. A vizsgálat során folyasztószert nem használtam.

5.1.3 Lézer-indukált plazma spektrometria

A LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) egy olyan analitikai technika, amely lézeres gerjesztéssel lehetővé teszi az anyagok kémiai összetételének gyors és nem destruktív vizsgálatát. A módszer lényege, hogy egy nagy energiájú lézervény impulzusával ionizálják a minta felületét, ezáltal plazmát képeznek. A keletkező plazmából kibocsátott röntgensugárzást vagy optikai fényt detektálják, és annak spektrális elemzése alapján meghatározzák az anyag elemi összetevőit. A LIBS technika rendkívül érzékeny és gyors, így alkalmas a minta különböző elemeinek meghatározására. Széles körben használják az iparban, környezetvédelemben, valamint az anyagok minőségellenőrzésében. A LIBS előnye, hogy nem igényel bonyolult előkészítést, és képes a minták in situ, közvetlen elemzésére, így ideális eszközként szolgál az anyagok gyors és precíz vizsgálatához, például plazmakezelés után.

Keyence VHX-7000 EA-300 típusú, Nd: YAg lézerrel szerelt berendezéssel végeztem méréseket mindhárom típusú panelbevonat (kémiai nikkel-arany, immerziós ezüst és immerziós ón) ugyanazon mintáin, 5%-os formálógázos plazmakezelés előtt és után.

5.1.4 Fehérfényű interferométeres optikai vizsgálat

A fehér fényű interferometria egy rendkívül pontos és érzékeny mérési technika, amelyet a felületi topológia és érdesség vizsgálatára alkalmaznak. A módszer alapja, hogy a felület és a mérőberendezés között interferenciát hoz létre a fehér fény, amely a különböző hullámhosszú fények kombinációjából áll. A felületből visszaverődő fény és a referencia fény között kialakuló interferenciás mintázat segítségével rendkívül nagy felbontású, háromdimenziós topográfiai térképeket hozhatunk létre. Ez a technika lehetővé teszi a mikroszkopikus méretű felületi struktúrák, érdesség, valamint a felületi hibák precíz mérését, és kiválóan alkalmazható plazmakezelés vagy más felületi módosítások hatásainak vizsgálatában. A fehér fényű interferometria előnye, hogy gyors,

nem érintkező módszer, amely lehetővé teszi a minták sérülés nélküli, valós idejű elemzését.

Méréseket végeztem a vizsgált panelbevonatokon eredeti, majd plazmakezelt állapotban, egy Zygo NewView 7100 fehér fényű, 1 nm alatti vertikális felbontású interferométerrel. A műszer és a hozzá tartozó kiértékelő szoftver az érdességértékeket az ISO 4287 és EN ISO 25178 (ISO 22081:2021) szabványokban meghatározott definíciók és számítási eljárások alapján határozta meg és számolta ki, amelyeket a 5.1. táblázatban tüntettem fel.

5.1. táblázat: Vizsgált érdességi paraméterek meghatározása ISO szabványok alapján, ahol Z_{p_i} az i-edik csúcs magassága, Z_{v_i} az i-edik völgy mélysége, Z a magasság, A pedig a felület

Jel	Megnevezés	Számítása
R_z	Egyenletlenség-magasság	$\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (Z_{p_i} + Z_{v_i})$
S_a	Felületi érdesség aritmetikai középértéke	$\frac{1}{A} \iint Z(x, y) dA$
S_q	Felületi érdesség négyzetes középértéke	$\sqrt{\frac{1}{A} \iint Z^2(x, y) dA}$

5.2 Mérési eredmények és értékelésük

5.2.1 A felület kémiai összetétele

Az anyagi minőség tanulmányozására szolgáló egyik módszerként a pásztázó elektron mikroszkópiát választottam.

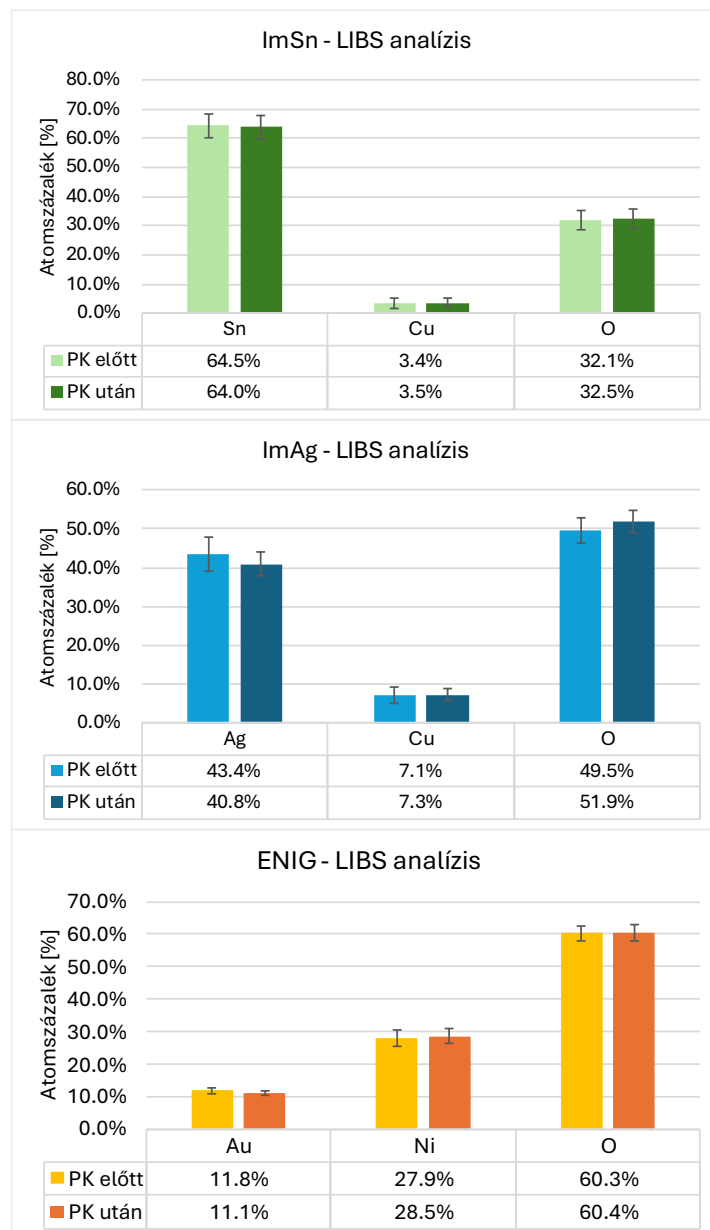
Az energia-diszperzív röntgenspektroszkópia vizsgálat által meghatároztam a felületen található oxigén mennyiségét, amelyet az 5.2. táblázatban tüntettem fel. Az atomszázalékban kifejezett értékek ugyanazon felületek plazmakezelés előtti és utáni állapotát mutatják.

5.2. táblázat: EDX eredmények plazmakezelés előtt és után - Oxigén atomszázalékos értékei

At%	Plazmakezelés előtt	Plazmakezelés után
	Átlag (Std. hiba)	Átlag (Std. hiba)
ImSn	9,92 (0,28)	10,54 (0,16)
ImAg	1,71 (0,08)	1,92 (0,08)
ENIG	2,68 (0,18)	3,17 (0,12)

15 mérést végeztem a plazmakezelés előtt minden egyes panelbevonaton, és ugyanazokat a mintákat használtam a plazmakezelés utáni mérésekhez a lehető legjobb összehasonlíthatóság érdekében. A felületek gerjesztése 10 kV-os gyorsítófeszültségű elektronsugárral történt. Az eredmények azt mutatják, hogy mindhárom bevonat esetében minimális növekedés tapasztalható az oxigén atomszázalékos arányában.

A plazmakezelés előtti és utáni felületi összetétel összehasonlítását a LIBS elemzés alapján az 5.3. ábra mutatja be. Ezek az összetételi százalékok 375 mérés átlagát reprezentálják, a legnagyobb szórás pedig 4,45% volt az ezüst esetében az immerziós ezüst felületen.

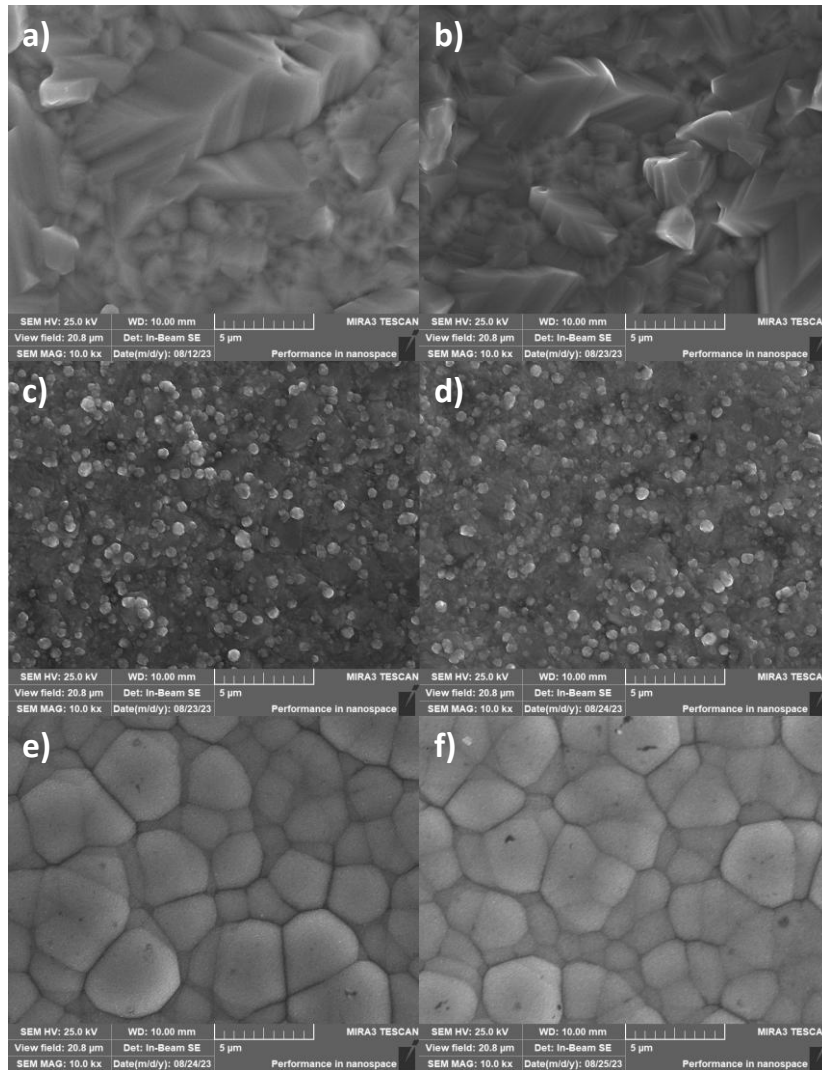


5.3. ábra: A felületi összetétel összehasonlítása LIBS eredmények alapján a plazmakezelés (PK) előtt és után

A mért oxigéntartalom mindhárom forrasztási bevonat típus esetében hasonló tendenciát mutatott, mint az EDX mérések eredményei. Az adatok arra utalnak, hogy a plazmakezelés hatására növekedhet az oxigén mennyisége a felületeken, ugyanakkor a plazmakezelés előtti és utáni értékek közötti különbség nem bizonyult jelentősnek. Az elemzések során a maximális standard hiba 0,23% volt, amely az immerziós ezüst panelbevonat esetén jelentkezett. Mindhárom vizsgált bevonat típus esetén elmondható, hogy a forrasztási fémfelületet védő felszíni bevonat – vagyis ImSn esetén az Sn, ImAg esetén az Ag, és ENIG esetén az Au – atomszázalékos koncentrációja csökkent, míg a forrasztási alapanyag – vagyis ImSn és ImAg esetén az Cu, míg ENIG esetén a Ni – százalékos aránya minimálisan nőtt a felszínen a plazmakezelés hatására. Az eredmények alapján arra lehet következtetni, hogy a védőbevonat részben eltávolodott vagy vékonyabbá vált, valószínűleg a mechanikai behatások következtében. Ennek eredményeképpen az alatta található forrasztandó alapfém felszíne jobban feltárult, és ezáltal az elemzések számára könnyebben észlelhetővé vált.

5.2.2 Felületi topológiai jellemzők

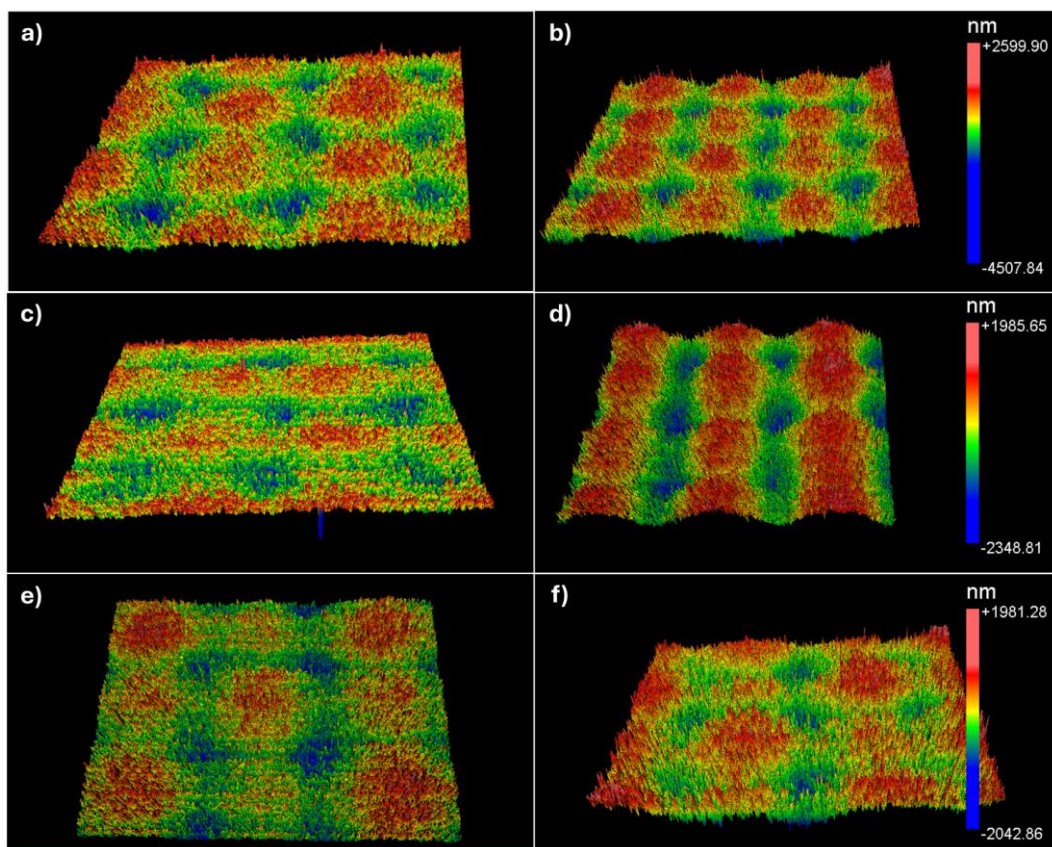
A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) szekunder elektron (SE) detektora által készített képek a felületről adnak információt. A NYÁK felületek SE detektorral végzett pásztázó elektronmikroszkópos képei a 5.4. ábrán láthatók. Ez a felület állapotát mutatja a plazmás felületkezelés előtt és után.



5.4. ábra: SEM SE képek az ImSn bevonatról PK előtt (a) és után (b), ImAg bevonatról PK előtt (c) és után (d), valamint ENIG bevonatról PK előtt (e) és után (f)

Az immerziós ón és ezüst esetén az alapfém, amelyen kialakul a forrasztási kötés, a réz. Ezek a felületek kristályszerű megjelenést mutatnak éles éllel. Ezzel szemben az ENIG alapanyaga nikkell, amely meghatározza a felület topológiáját jellegzetes szemcsemintázatával. A plazmakezelés utáni képek alapján feltételezhető, hogy a felületek nanoméretű struktúrái durvábbá váltak, ami elősegíti a jobb nedvesedést a fémfelület és az olvadt forrasztóanyag között.

A felületi érdesség mérése fehér fény interferometriával történt, amely egy nagy pontosságú és precíz módszer a felületi érdesség meghatározására. Az alkalmazott - Zygo NewView 7100 típusú - eszköz vertikális felbontása 0,2 nm. Az elemzett panelbevonatok plazmakezelés előtti és utáni 3D felülete az 5.5. ábrán látható.



5.5. ábra: A vizsgált forrasztási bevonatok felszínének 3D képei: ImSn bevonat PK előtt (a) és után (b), ImAg bevonat PK előtt (c) és után (d), valamint ENIG bevonat PK előtt (e) és után (f)

Az R_z (egyenletlenség magasság - 5.3. táblázat), S_q (felületi érdesség négyzetes középértéke - 5.4. táblázat) és S_a (felületi érdesség aritmetikai középértéke - 5.5. táblázat) értékek növekedést mutattak az ImSn és ImAg panelbevonatok esetében a plazmakezelést követően. Az egyenletlenség magasság (R_z) és az átlagos amplitúdó növekedése a magasság irányában arra utal, hogy a forrasztható felület összességében megnövekszik. ENIG felületkezelés esetén azonban az S_q és S_a értékek enyhe csökkenése figyelhető meg. Az R_z értéke az ImSn és ImAg bevonatokhoz hasonlóan javulást mutatnak, bár a különbség kisebb. A S_a és S_q csökkenése arra utal, hogy a felület átlagos érdessége alacsonyabb, ami simább felületet jelent. Az R_z növekedése viszont azt jelzi, hogy néhány kivételesen nagy eltérés van jelen, ami drasztikusan megnöveli a maximális érdességkülönbséget.

5.3. táblázat: Felületi érdesség értékek (R_z) plazmakezelés előtt és után

R_z [μm]	Plazmakezelés előtt	Plazmakezelés után
ImSn	1,611	1,893
ImAg	1,019	1,843
ENIG	1,358	1,439

5.4. táblázat: Felületi érdesség értékek (S_q) plazmakezelés előtt és után

S_q [μm]	Plazmakezelés előtt	Plazmakezelés után
ImSn	0,488	0,534
ImAg	0,305	0,621
ENIG	0,415	0,383

5.5. táblázat: Felületi érdesség értékek (S_a) plazmakezelés előtt és után

S_a [μm]	Plazmakezelés előtt	Plazmakezelés után
ImSn	0,391	0,430
ImAg	0,242	0,521
ENIG	0,333	0,308

Az eltérő viselkedési tendenciák a panelbevonatok anyagi minőségének különbözőségéből származhatnak. A külső ón- és ezüstréteg alatt réz található, amely az alapanyag a forrasztáshoz. Az kémiai nikkel-arany bevonat esetében az alapanyag a nikkelt, amelyet egy nagyon vékony aranyréteg borít. A plazmakezelés során a felület kémiai és fizikai módosulásai kisebb érdességi elemek, például a vékony aranyréteg részeinek eltávolításához vezethetnek, ami növelheti az R_z értéket. A LIBS elemzés alapján az ENIG mutatja a legnagyobb növekedést az alapfémek tekintetében, ami alátámaszthatja azt a feltételezést, hogy az aranyréteg elvékonyodik vagy akár teljesen eltávolodik a nikkeltől bizonyos területeken a plazmakezelés hatására.

5.3 Összefoglalás

A fejezetben a 5%-os formálógázzal előállított, atmoszférikus nyomású plazmakezelés hatásmechanizmusát tanulmányoztam nyomtatott áramköri panelek forrasztási felületein. A három vizsgált panelbevonat – immerziós ón, immerziós ezüst és kémiai nikk-el-arany – összességében hasonló tendenciákat mutattak a vizsgálati metódusok eredményeit tekintve.

A SEM-EDX és a LIBS analíziseket végeztem annak érdekében, hogy megfigyeljem a plazmakezelést követően bekövetkező kémiai változásokat a felületen. Godard és társai [9] elmélete szerint, a hidrogént redukálószerként használva a plazmában, az az oxigéntartalom csökkenését eredményezheti a felületen. Az általam kivitelezett SEM-EDX és LIBS analízisek adatai alapján azonban jelentős változások nem figyelhetők meg.

Fehérfény-interferometria elvén működő optikai módszert alkalmaztam a plazmakezelés felületi érdességre gyakorolt hatásának vizsgálatára. A mérések jelentős növekedést mutatnak az S_a , S_q és R_z értékekben az immerziós ón és immerziós ezüst védőréteggel rendelkező minták esetén. Ez egy általánosan érdesebb felszínt jelent, amely nagyobb forrasztási felületet kínál. Ezek az eredmények összhangban állnak Shin és társai [7] eredményeivel, ahol a felületi érdességet optikai profilométerrel mérték. A kémiai nikk-el-arany panelbevonat esetében az R_z értékek hasonló növekedést mutatnak, míg az S_a és S_q értékek csökkentek. Az S_a és S_q értékek csökkenése, miközben az R_z érték növekszik, azt jelzi, hogy kisebb felületi szabálytalanságok kisimultak, de néhány nagyobb kiemelkedés megmaradt vagy éppen kialakult. Ezek a nagyobb érdességi elemek drasztikusan növelik az R_z értékét, míg az általános felületi érdesség (S_a és S_q) simábbá válik a kisebb elemek eltűnésével.

6. Forrasztási kísérletek és a folyasztószer minimalizálásának lehetőségei

A folyasztószer minimalizálásának egyik fő célja a forrasztási folyamatok környezetbarátabbá tétele és a termelékenység növelése anélkül, hogy a kötésminőség romlana. Az SMT technológia esetében a folyasztószer kritikus szerepet játszik a forrasztás viselkedésében, a forrasztás egyenletességében és a forrasztási hibák – például gömbösödés, elégtelen nedvesedés vagy hídhibák – elkerülésében. A THT forrasztásnál a folyasztószer szerepe még összetettebb, mivel befolyásolja a kapilláris hatást, amely elengedhetetlen az átmenőfuratok megfelelő kitöltéséhez. A minimális folyasztószer-használat esetén fennáll a veszélye, hogy a forrasztás nem áramlik megfelelően a furatokba, ami gyenge mechanikai és elektromos kötések eredményezhet. Ugyanakkor a túlzott folyasztószer-adagolás nemcsak maradványokat hagyhat, hanem felesleges gázképződéshez és szennyeződéshez is vezethet, ami csökkentheti a kötések minőségét.

A folyasztószer minimalizálásával kapcsolatos kísérletek célja annak meghatározása, hogy milyen mértékben csökkenthető a folyasztószer mennyisége anélkül, hogy az negatív hatással lenne a forrasztási kötések megbízhatóságára. Az eredmények hozzájárulhatnak a forrasztási folyamatok fenntarthatóbbá tételéhez, miközben megőrzik a forrasztási kötések megbízhatóságát és hosszú távú stabilitását.

6.1 Plazmakezelés hatása a felületszerelt technológiával előállított termékekre

Az SMT technológia esetében a folyasztószer mennyiségét alapvetően a kereskedelmi forgalomban kapható forrasztás összetétele határozza meg, így annak csökkentése közvetlenül nem lehetséges. Ugyanakkor a plazmakezelés alkalmazása jelentős hatással lehet a forrasztási folyamatra, mivel javítja a határfelületi energiát és eltávolítja a szennyeződéseket az áramköri lap forrasztási pontjairól. Ezáltal elősegíti a forrasztóanyag jobb terülését és nedvesedését, csökkentve a folyasztószertől való függőséget.

6.1.1 Anyagok és módszerek

A plazmakezelés hatását a felületszerelt technológiára két módszer szerint tanulmányoztam. Az újraömlésztéses forrasztási szimuláció során a NYÁK-ot végigvezetik az SMT gyártási folyamaton, azonban alkatrész beültetésére nem kerül sor.

Így tehát végeredményben a panel forrasztási felületeire nyomtatott paszta területe vizsgálható mikroszkópiával. A második esetben ugyanezt a folyamatot alkatrészek beültetése mellett végeztem el, így az alkatrészek és a NYÁK között kialakult forrasztási kötést vizsgáltam röntgenes és mikroszkópiai módszerekkel, valamint keresztmetszeti csiszolat készítésével az intermetallikus réteg is megfigyelhető volt.

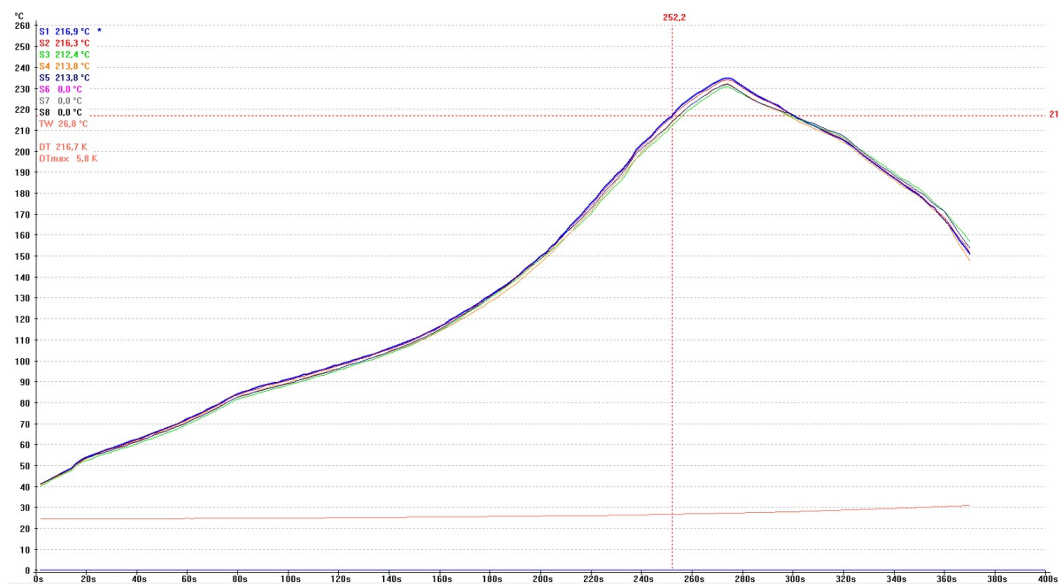
A forrasztási kísérletek során immerziós ón (ImSn) bevonatú nyomtatott áramköri panelek viselkedését tanulmányoztam. Mivel a felületszerelt gyártási folyamat során a folyasztószer a kereskedelmi forgalomban kapható forraszpasztában található, ezért a kísérletek során nem lehetett elkerülni a folyasztószer használatát. Indium8.9hf típusú, ólommentes, halogénmentes forraszpasztával dolgoztam, amelyet széles körben alkalmaznak az elektronikai iparban. SAC387 ötvözetet tartalmaz, amely 20-45 μm átmérőjű (3-as típusú) gömbök formájában van jelen, valamint ROL0 típusú folyasztószer segíti a forraszanyag eloszlását.

Plasmatreat PTU1208 típusú berendezéssel végeztem plazmakezelést az előző fejezetekben optimalizált paraméterekkel. Az 5% H_2 tartalmú formálógázból, 300 V feszültséggel előállított plazmasugár 50 mm/s-os sebességgel pásztázta a minták felületét, 10 mm-es tárgy távolság mellett. A plazmakezelés nélküli minták referenciaként szolgáltak a vizsgálat során.

Az SMT gyártósor összeállítása a következő:

- stencilpasztázó és adagoló: DEK 710, Camalot Prodigy
- Pasztanyomtatás ellenőrző: Koh-Young KY-8030-2F
- automata beültető: ASMSiplace X4S (2 db)
- Kemence előtti automatikus optikai ellenőrző (AOI): Yamaha YSi-V 3D
- Újraömlesztéses kemence: ASSCON VP7000
- Kemence utáni automatikus optikai ellenőrző (AOI): Yamaha YSi-V 3D

A nyers panel adagolása és a leforrasztott termék magazinokba töltése manuálisan történik. Az újraömlesztéses forrasztás során használt hőprofil a 6.1. ábrán látható.



6.1. ábra: SMT forrasztás során alkalmazott hőprofil

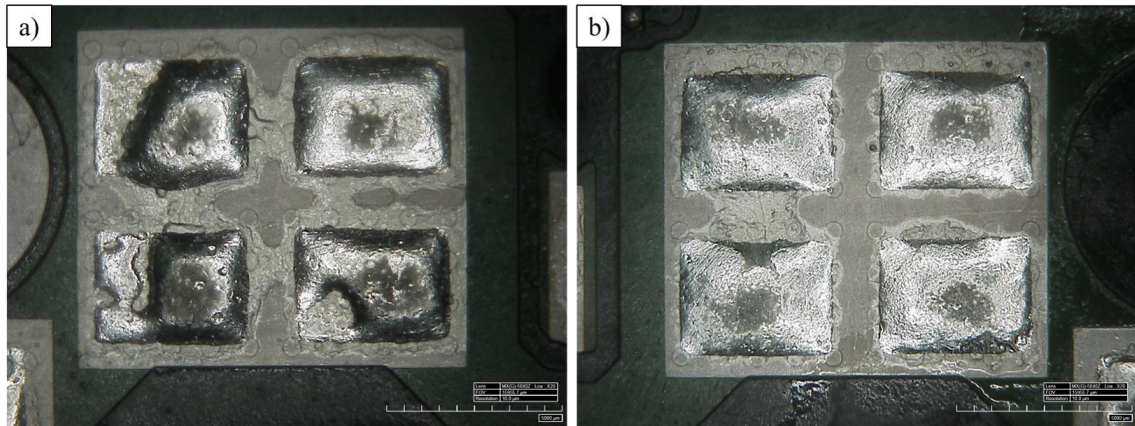
Az újraömllesztés forraszthatósági szimuláció eredményeként kapott, forraszpasztával borított mintákat digitális mikroszkóp segítségével tanulmányoztam. A rendelkezésemre álló Hirox KH-8700 típusú mikroszkóppal készítettem képeket a felületről, 20-szoros nagyítás mellett.

Az alkatrészrel szerelt mintapaneleket Dage Quadra7 röntgenkészülékkel vizsgáltam, valamint Keyence VHX-7000 típusú digitális mikroszkóp segítségével végeztem először vizuális inspekción, majd a keresztmetszeti csiszolatok elemzését folytattam le. A keresztmetszeti csiszolatok készítéséhez Struers gyártmányú segédeszközöket használtam. Az érdekelt terület kivágása után, a kapott mintát 2 komponensű gyantába ágyaztam, és csiszolási, majd polírozási folyamatnak vettem alá, amelynek legutolsó lépéseként enyhe maratást alkalmaztam az intermetallikus rétegek érzékelhetőségének javítására.

6.1.2 Mérési eredmények és értékelésük

A formálógázos plazmakezelés hatását a 6.2. ábra szemlélteti. A plazmakezelés nélkül gyártott minta esetén (a) az immerziós ón felületen „dewetting” jelensége figyelhető meg, amely a forraszanyag visszahúzódását jelenti. Az 5%-os formálógázos plazmával kezelt mintán a forraszanyag területe jó nedvesítést és forraszthatóságot mutat. Az újraömllesztés forrasztás szimulációjának folyamatleírását, valamint a kiértékelési kritériumokat az IPC J-STD-003 szabvány foglalja magában. Mind a referenciaként használt kezeletlen minták, mind a plazmakezelésnek alávetett minták esetén 12

ismétléssel végeztem el a területszámítást. A szabvány alapján a nyomtatott áramköri lap forraszthatósága akkor megfelelő, ha a forraszanyag a pasztázott terület 95%-át fedi. A plazmakezelés nélküli referenciaminta esetén átlagosan 83,1%-ban fedi forraszanyag a pasztázott területet, amely a szabvány alapján nem megfelelő. A forrasz visszahúzódnak jelensége szintén nem elfogadható a standard értelmében.

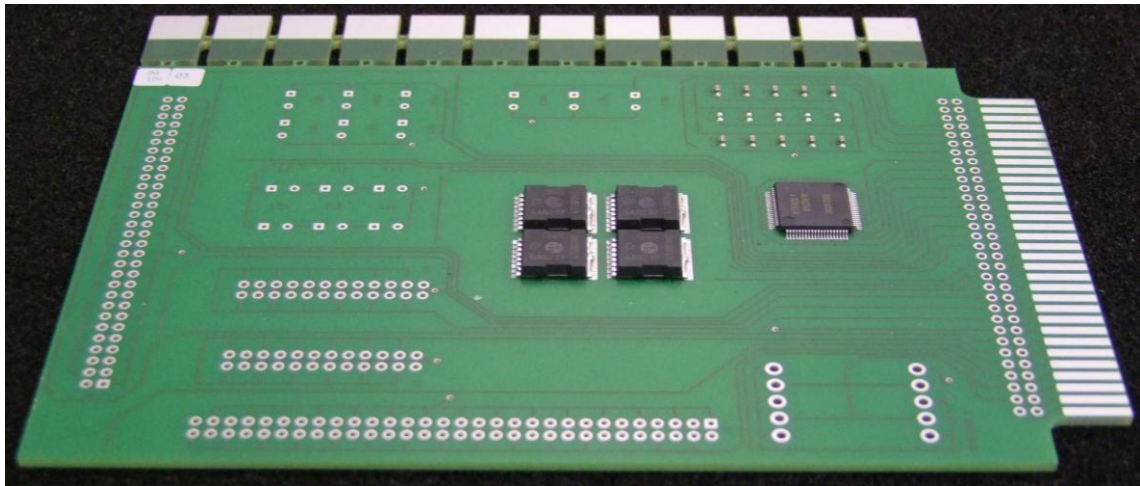


6.2. ábra: Immerziós ón bevonat felületszerelt forrasztása plazmakezelés előtt (a) és után (b)

A 6.2. ábra a plazmakezelt immerziós ón felületet mutatja, ahol a forraszanyag területe 100% a pasztázott területhez képest, vagyis megfelel az IPC-J-STD-003 szabvány elfogadási kritériumainak.

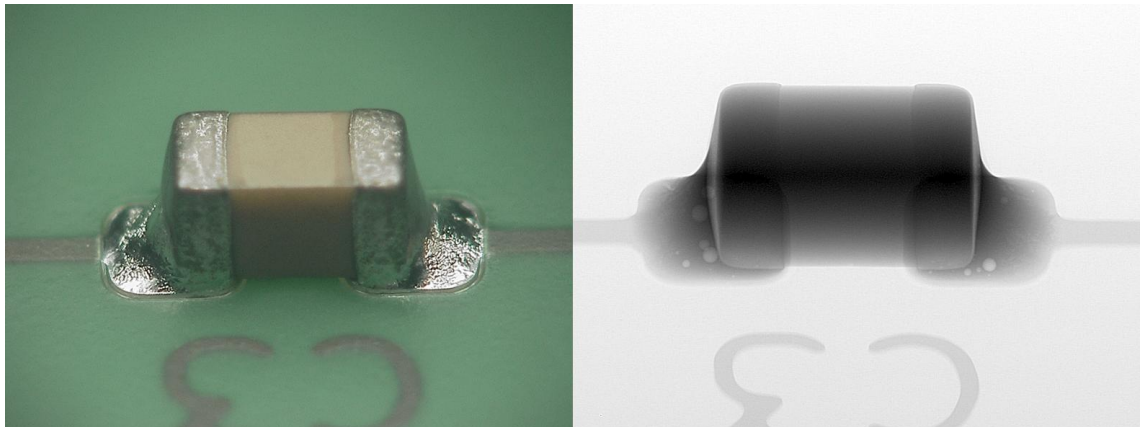
Ezek alapján megállapítható, hogy a folyasztószer alkalmazása mellett is előnyös a formálógázos plazmakezelés, mivel jelentősen javítja a forrasztás minőségét. A kezelés hatására megszűnik a forrasz visszahúzódnak (*dewetting*) jelensége, amely a forraszanyag elégtelen nedvesedéséből adódó hibák egyik fő oka. Ennek eredményeként egyenletesebb és megbízhatóbb forraszkötések alakulnak ki, csökkentve a forraszhibák előfordulását és növelve az összeköttetések hosszú távú stabilitását.

Az alkatrészrel gyártott nyomtatott áramköri lap képe a 6.3. ábrán látható. Ahogyan azt az ábra is mutatja, 10 db chipkondenzátor és 4 db térvezérlésű tranzisztor (FET), valamint egy sirálysárny kivezetésű integrált áramkör (QFP) került beültetésre.



6.3. ábra: SMT alkatrészekkel szerelt tesztpanel

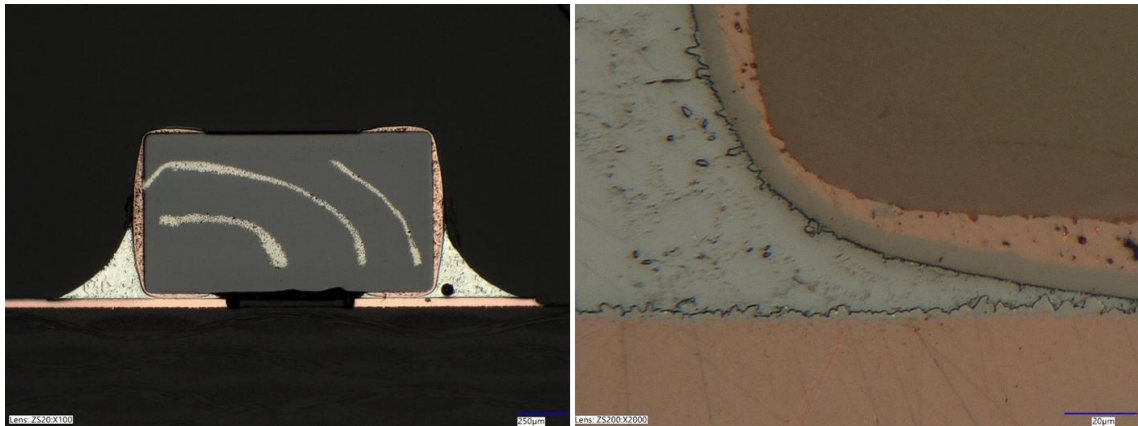
Röntgenes és vizuális inspekció alapján a kondenzátorok forrasztása megfelelő, amelyet a 6.4. ábra demonstrál.



6.4. ábra: Chipkondenzátor mikroszkópos- (bal) és röntgenképe (jobb)

A forraszanyag megfelelően felfutott az alkatrész forrasztási felületeire, főként az oldalára. Az így megfigyelhető forraszívét menizkusznak nevezik, amelynek alakja értékes információt nyújt a forraszkötésről.

A keresztmetszeti csiszolatok vizsgálata során az intermetallikus réteg elemzésére fókuszáltam, alakját és vastagságát előtérbe helyezve. A kondenzátor keresztmetszeti képe és az intermetallikus réteg vastagsága a 6.5. ábrán látható.



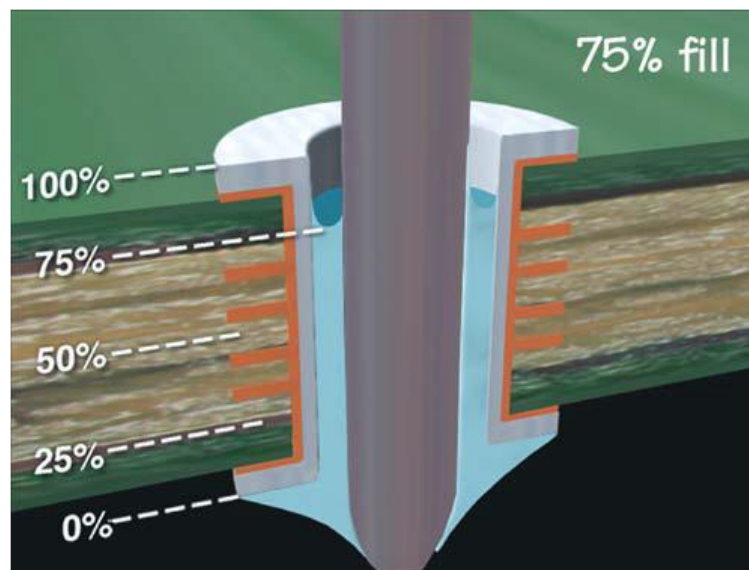
6.5. ábra: Chipkondenzátor mikroszkópos keresztmetszeti képe és a kialakult intermetallikus réteg

5-5 db kondenzátor keresztmetszeti csiszolatát vizsgálva elmondható, hogy a plazmakezelés nincs jelentős hatással az intermetallikus réteg vastagságára. Az 5%-os formálógázzal plazmakezelt és plazmakezelés nélkül gyártott mintákon egyaránt 1,5-3 µm vastagságú intermetallikus réteg volt megfigyelhető.

6.2 Furatszerelt alkatrészek folyasztószer-minimalizált forrasztása

6.2.1 Anyagok és módszerek

A furatkitöltés kritikus tényező a furatszerelt alkatrészek forrasztása során, mivel közvetlenül befolyásolja a forraszkötések elektromos vezetését, mechanikai szilárdságát és hőtechnikai viselkedését. Az iparban használt IPC-A-610 szabvány autóiipari elektronikákra (3. osztály) vonatkozó elvárásai szerint, a furatkitöltés 75% felett elfogadható (6.6. ábra).



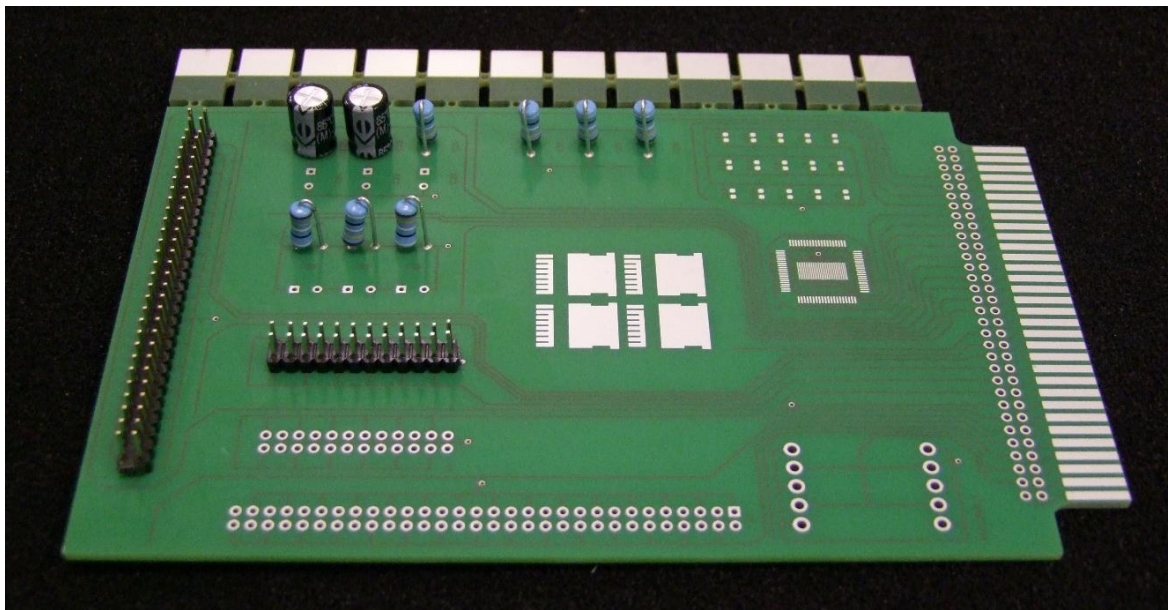
6.6. ábra: Furatkitöltés számítása [157]

A furatkitöltés vizsgálata nem kizárólag keresztmetszeti csiszolat készítésével végezhető el. A mai, korszerű röntgen berendezések lehetőséget kínálnak a nyomtatott áramköri szerelvény vizsgálatára roncsolásmentes módon. A hozzájuk rendelt szoftver segítségével pedig a furatkitöltés százalékos aránya kiszámítható. Méréseim során YXLON Y.Cheetah röntgenberendezést és F.GUI szoftvert használtam. Röntgenes furatkitöltés ellenőrzése mellett digitális mikroszkóp segítségével végeztem vizuális inspekción a gyártott szerelvényeken.

A kiválasztott furatszerelt alkatrészeket immerziós ón bevonatú tesztpanelokba ültettem. A tesztpanel az alábbi alkatrészeket tartalmazza:

- 2 db elektrolit kondenzátor – ón bevonat
- 7 db ellenállás- ón bevonat
- 1 db 24-lábú csatlakozó – arany bevonat
- 1 db 60-lábú csatlakozó – arany bevonat

Az alkatrészekkel beültetett, leforrasztott tesztpanel képe a 6.7. ábrán látható:



6.7. ábra: Furatszerelt alkatrészek elrendezése a tesztpanelen

Az előzőekhez hasonlóan referenciaként kezelés nélküli minták szolgáltak. A plazmakezelést Plasmatreat PTU1208 berendezésen végeztem, optimalizált paraméterek mellett. A plazmakezelésnek a már alkatrészekkel beültetett nyomtatott áramköri panelt vettem alá, amelynek célja az volt, hogy minimálisra csökkentsem a plazmakezelés és a forrasztás között eltelt időt, valamint elkerüljem a kezelésből adódó lehetséges szennyezéseket a legjobb eredmények elérése érdekében. A forrasztókeretben elvégzett

plazmakezelés előnye továbbá, hogy nem csak a NYÁK forrasztási felületeit érte a plazmasugár, hanem az alkatrészek forrasztandó kivezetéseit is.

A forrasztást egy Pillarhouse Jade S200 típusú szelektív forrasztógéppel végeztem, amely cseppadagolós folyasztószer-adagolóval (*drop-jet fluxer*) szerelt. A folyasztószer adagolt mennyisége szabályozható paraméter, azonban a megbízhatóbb eredmény biztosítása érdekében hígított folyasztószert alkalmaztam. A 4.1.3 fejezetben taglalt folyasztószer hígítási-sort alkalmaztam a szelektív forrasztási folyamat során, vagyis a kereskedelmi forgalomban kapható Interflux2005C folyasztószer (100%) koncentrációját izo-propil-alkohollal felére (50%), negyedére (25%) és nyolcadára (12,5%) csökkentettem.

Míg a kondenzátorok és ellenállások forrasztásához a pontforrasztás technikáját alkalmaztam, addig a csatlakozók esetén vonalforrasztás történt. Az alkalmazott forrasztási paramétereket az 6.1. táblázat tartalmazza.

6.1. táblázat: Szelektív forrasztás paraméterei

Forrasztógép típusa	Pillarhouse Jade S200
Folyasztószer típusa	Interflux 2005c (100%, hígított: 50%, 25%, 12,5%)
Folyasztószer adagolás típusa	drop-jet fluxer
Forraszanyag típusa:	SACx0307
Forraszanyag hőmérséklete	280°C (kád)
Fúvóka átmérő	8 mm
Folyasztószer felvitel paraméterei:	
Vonali adagolás sebessége	39 mm/s
Folyasztószer adagoló nyitási ideje	2,5 ms
Pontforrasztás (kondenzátorok és ellenállások esetén):	
Fúvókatávolság	2 mm
Pontforrasztási idő	3,5 s
Vonal forrasztás (csatlakozók esetén):	
Fúvókatávolság	2,5 mm
Vonalforrasztás sebessége	4 mm/s

A forrasztási paraméterek minden minta esetén azonosak voltak, azonban az előkezelést (plazmakezelés), valamint az alkalmazott folyasztószer koncentrációját

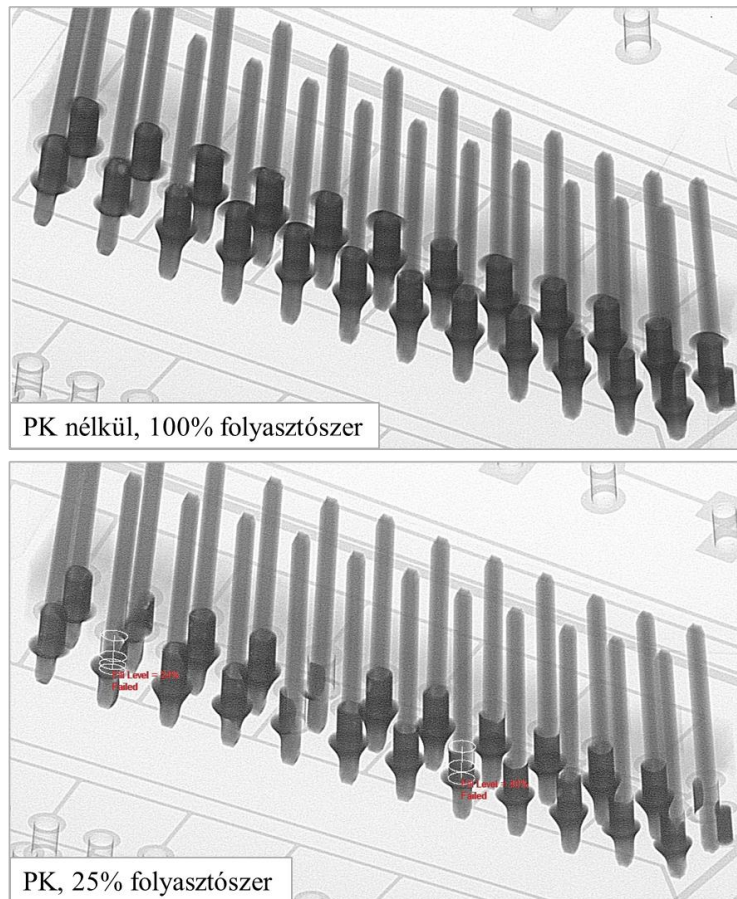
változtattam az egyes mintacsoportok esetén. Referenciaként használtam az eredeti, kereskedelmi forgalomban kapható folyasztószerrel (100%) és plazmakezelés nélkül előállított mintákat. A további legyártott áramköri lapok mindegyikét alávettem plazmakezelésnek, a folyasztószer koncentrációjának csökkentése mellett. A hígítás következtében a forrasztás során azonos folyasztószer-mennyiségeket adagoltam.

6.2.2 Mérési eredmények és értékelésük

Az így előállított termékek alkatrészeinek furatkitöltéseit röntgenes vizsgálattal ellenőriztem, és vettem össze. A 6.2. táblázat a 24-lábú csatlakozó furatkitöltési átlagát és azok szórását mutatja be, valamint a 6.8. ábrán – a jelenlegi technológiával gyártott – plazmakezelés (PK) nélküli, 100% folyasztószer adagolásával forrasztott, és a plazmakezelt, 25%-ra hígított folyasztószer alkalmazása mellett készült minta röntgenképe látható.

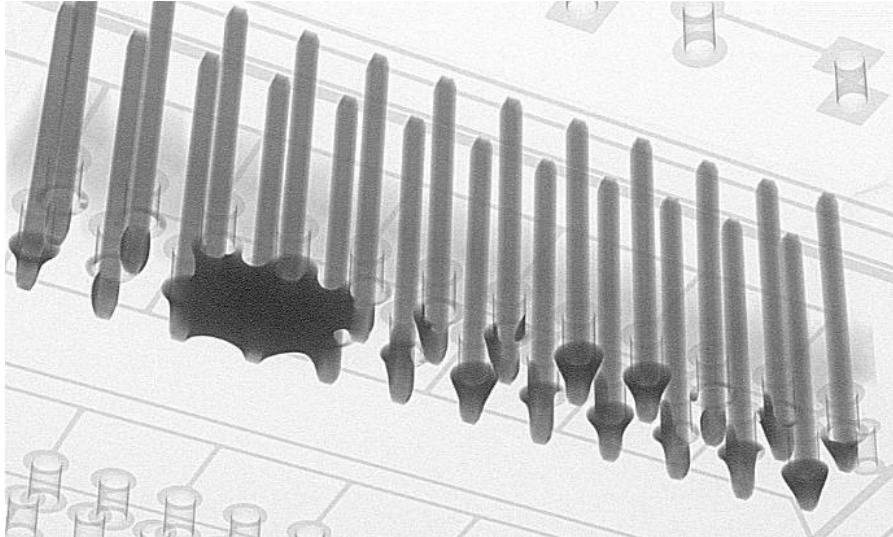
6.2. táblázat: 24-lábú csatlakozó furatkitöltési adatai

	Átlagos furatkitöltés [%]	Szórás [%]
PK nélkül, 100% folyasztószer	100,00	0,00
PK, 50% folyasztószer	83,14	7,89
PK, 25% folyasztószer	81,90	11,02
PK, 12,5% folyasztószer	0	-



6.8. ábra: 24-lábú csatlakozóról készült röntgen képek: plazmakezelés (PK) nélkül, 100% folyasztószerrel (fent), és plazmakezelt, 25% folyasztószerrel forrasztott (lent) csatlakozó

A jelenlegi technológiával gyártott panelek esetén 100%-os furatkitöltöttséget tapasztaltam. A plazmakezelt és csökkentett koncentrációjú minták esetén azt figyeltem meg a furatkitöltési adatokból, hogy átlaguk nem éri el a 100%-ot, azonban 75% feletti értéket kaptam, amely az autóiipari standard (IPC-A-610) szerint még elfogadható. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy a plazmakezelt, valamint 50 és 25%-os hígítású folyasztószer mellett gyártott minták furatkitöltési értékei között nincs szignifikáns különbség. A 12,5%-os hígítással azonban nem volt megfelelő furatkitöltés, ezt a 6.9. ábra szemlélteti. Ugyanez a tendencia figyelhető meg a többi típusú alkatrész furatkitöltésének vizsgálata és elemzése alapján.



6.9. ábra: Plazmakezelt, 12,5%-os folyasztószerezrel forrasztott minta röntgenképe

A vizuális inspekciónál, a 100% folyasztószerez alkalmazásával, és plazmakezelés nélkül gyártott mintákon megfigyelhető volt a tisztítást nem igénylő folyasztószerez maradványa, amelyet az autóiipari standard, az IPC-A-610 szabvány fehér maradványként említ, és hibaként definiál (6.10. ábra). A 25%-os hígítású folyasztószerezrel gyártott minták felületén már nem tapasztaltam fehér maradványt.



6.10. ábra: Fehér maradvány a furatszerelt csatlakozó környezetében

6.2.3 Összefoglalás

A fejezetben forrasztási kísérlet-sorozatokon keresztül tanulmányoztam a folyasztószer minimalizálásának lehetőségeit formálógázos plazmakezelést használva alternatívaként a felületek előkészítésére.

Az SMT technológia tekintetében a folyasztószer mennyisége adott, hiszen a forraszpaszta tartalmazza azt, azonban a plazmakezelés forrasztást elősegítő hatása ebben az esetben is kimutatható. A forraszanyag területét vizsgálva, azt tapasztaltam, hogy a formálógázos plazmakezelés csökkenti a forraszanyag visszahúzódását, és elősegíti a felület nedvesítését és a forraszanyag tapadását.

A THT technológia esetén elmondható, hogy immerziós ón bevonatú forrasztási felületek esetén a folyasztószer mennyisége akár a negyedére is csökkenthető formálógázos plazmakezelés alkalmazása mellett. Ezek az eredmények összefüggést mutatnak a 4.2.1 fejezetben ismertetett forraszthatósági vizsgálat (*Wetting Balance* teszt) eredményeivel.

Összességében elmondható hogy mind a felület-, mind a furatszerelt technológiára nézve kedvező a plazmakezelés alkalmazása a forrasztási folyamat előtt. Az atmoszférikus plazmaberendezések nagy előnye, hogy automatizálható. Erre többféle megoldás is implementálható: a plazmafej mozgási pályája programozható, a felületkezelendő nyomtatott áramköri lapok pedig szállítószalagon mozgathatók. Ezek következtében a plazmaberendezés jól beilleszthető a gyártási folyamatba.

III. Eredmények összegzése és tudományos hozzájárulás

7. Tézisek

1. Az egymástól 0,5 mm távolságban elhelyezkedő ón vezetősávok között kialakuló dendritek fejlődési sebességének vízcsepp teszttel történő elemzésén keresztül kimutattam, hogy az elektromos térerősség (6-12 V/mm) növelésével átlagosan 56,1%-ot, míg az Interflux2005C tisztítást nem igénylő folyasztószer maradványaiból származó ionos koncentráció megjelenésével 76,2%-ot csökken a hibáig (átvezetés, rövidzár) eltelt átlagos idő (MTTF).

(Vonatkozó publikáció: [C1])

2. Kimutattam, hogy a hőmérséklet, a páratartalom és az ionos koncentráció növelésével csökken az ón bevonatú FR-4 alapanyagú nyomtatott áramkört lemezek átütési feszültség értéke. Az Interflux2005C tisztítást nem igénylő folyasztószerrel szennyezett ón bevonatú, FR-4 alapanyagú NYÁK átütési feszültsége 27%-kal kisebb, mint a folyasztószer hozzáadása nélkül vizsgált ugyanolyan anyagi minőségű minta átütési feszültsége. Tiszta és Interflux2005C folyasztószerrel szennyezett felületek esetén alacsonyabb átütési feszültséget eredményezett az emelt hőmérséklet és páratartalom (40°C, 60% RH), 9,7 és 10,6%-os csökkenéssel, az enyhébb környezeti paraméterekhez (20°C, 10% RH) képest. (Vonatkozó publikáció: [C2])

3. Megállapítottam, hogy 5% H₂ és 95% N₂ tartalmú formálógázból, atmoszférikus nyomáson előállított, 10 mm-es tárgy távolságban plazmakezelt immerziós ón, immerziós ezüst és kémiai nikk-el-arany panelbevonatok esetén csökkenthető a forrasztás során alkalmazott folyasztószer mennyisége, mivel az így végrehajtott plazmakezelés javítja a nedvesíthetőséget és forraszthatóságot.

(Vonatkozó publikációk: [C3, K1, K2])

- 3.1. Érintkezési szög, ülcsepp módszerrel történő mérésén keresztül meghatároztam a vizsgált felületek eredeti és plazmakezelés utáni határfelületi energiáját, víz és dijó-d-metán standard oldatokat alkalmazva. Az immerziós ón esetén 104%-kal, az immerziós ezüst esetén 42%-kal és kémiai nikk-el-arany bevonat esetén 88%-kal nőtt a teljes határfelületi energia. A határfelületi energia poláris komponense tekintetében immerziós ón esetén 308%-os, az immerziós ezüst esetén 268%-os és kémiai nikk-el-arany bevonat esetén 1141%-os növekedést tudtam kimutatni.

- 3.2. 250°C-ra hevített, olvadt SAC305 forrasanyagot alkalmazó forraszthatósági tesztek alapján meghatároztam a vizsgált felületek nedvesítési görbéit. Kísérleteim során kereskedelmi forgalomban kapható Interflux2005C folyasztószert alkalmaztam 100%, 50%, 25% és 12,5% koncentrációban. Ezen higítási sor segítségével megállapítottam, hogy a forrasztás során alkalmazott Interflux2005C típusú folyasztószer mennyisége a felére csökkenthető a vizsgált panelbevonatok esetén, a leírt paraméterekkel végrehajtott plazmakezelés alkalmazása mellett anélkül, hogy a forraszthatóság kedvezőtlenül változna.
4. Kimutattam, hogy immerziós ón, immerziós ezüst és kémiai nikkel-arany felületeken az 5% H₂ és 95% N₂ tartalmú formálógázból előállított, atmoszférikus nyomású plazmakezelés a nyomtatott áramköri lap forrasztási felületének érdességét módosítja, míg a kémia összetételre nincs jelentős hatással.

(Vonatkozó publikációk: [C4, K3])

- 4.1. Fehér fény interferometriával meghatározott felületi érdesség értékek alapján megállapítottam, hogy az egyenletlenség magasság (R_z) értéke növekszik a plazmakezelés hatására immerziós ón (1,611 μm -ről 1,893 μm -re), immerziós ezüst (1,019 μm -ről 1,843 μm -re) és kémiai nikkel-arany bevonatok (1,358 μm -ről 1,439 μm -re) esetén. Immerziós ón és immerziós ezüst bevonat esetén a felületi érdesség négyzetes középértéke (S_q) és felületi érdesség aritmetikai középértéke (S_a) is növekvő tendenciát mutat. Kémiai nikkel-arany bevonat esetén ezen értékek csökkenése tapasztalható. Pásztázó elektronmikroszkóp energia diszperzív röntgen spektroszkópiái és lézer-indukált plazma spektrometriai módszerekkel vizsgálva a forrasztási felületeket plazmakezelés előtt és után, megállapítható, hogy nem tapasztalható szignifikáns eltérés a felületek kémiai összetételében.

Theses

1. Through the analysis of dendrite growth rates between tin conductor traces spaced 0.5 mm apart using the water drop test, it has been demonstrated that increasing the electric field strength (from 6 to 12 V/mm) results in an average decrease of 56.1% in the mean time to failure (MTTF) (e.g., bridging or short circuit). Furthermore, in the presence of ionic contamination originating from residues of Interflux 2005C no-clean flux, the MTTF decreases by 76.2% on average.

(Relevant publication: [C1])

2. It has been shown that the breakdown voltage of tin-coated FR-4 printed circuit boards decreases with increasing temperature, humidity, and ionic concentration. It was observed that the breakdown voltage of a tin-coated FR-4 PCB contaminated with Interflux 2005C no-clean flux residue is 27% lower than that of a sample with the same material quality without flux contamination. It has been demonstrated that elevated temperature and humidity conditions (40°C, 60% RH) resulted in a lower breakdown voltage for both clean and Interflux 2005C-contaminated surfaces, with reductions of 9.7% and 10.6%, respectively, compared to milder environmental conditions (20°C, 10% RH). (Relevant publication: [C2])

3. It has been established that for immersion tin (ImSn), immersion silver (ImAg), and electroless nickel-immersion gold (ENIG) surface finishes treated with plasma generated from 5% H₂ and 95% N₂ containing forming gas at atmospheric pressure and a treatment distance of 10 mm, the amount of flux required during soldering can be reduced. This is due to the plasma treatment's ability to enhance wettability and solderability.

(Relevant publications: [C3, K1, K2])

- 3.1. Through contact angle measurements using the sessile drop method, the original and post-plasma-treatment surface free energy of the examined surfaces was determined, employing water and diiodomethane standard solutions. The total surface free energy increased by 104% for immersion tin, 42% for immersion silver, and 88% for electroless nickel-immersion gold surface finishes. Regarding the polar component of surface free energy, increases of 308% for immersion tin, 268% for immersion silver, and 1141% for electroless nickel-immersion gold were observed.

- 3.2. Wetting curves for the investigated surfaces were determined through solderability tests using molten SAC305 solder heated to 250°C. In the experiments, commercially available Interflux 2005C flux was applied at concentrations of 100%, 50%, 25%, and 12.5%. This dilution series demonstrated that the amount of Interflux 2005C flux required for soldering could be reduced by half for the examined surface finishes when plasma treatment was applied under the specified parameters, without adversely affecting solderability.
4. It has been demonstrated that for immersion tin (ImSn), immersion silver (ImAg), and electroless nickel-immersion gold (ENIG) surface finishes, atmospheric pressure plasma treatment generated from 5% H₂ and 95% N₂ containing formic gas modifies the roughness of the printed circuit board's soldering surface, while having no significant effect on its chemical composition.

(Relevant publications: [C4, K3])

- 4.1. Based on surface roughness values determined by white light interferometry, it was established that the roughness parameter (R_z) increases following plasma treatment for immersion tin (from 1,611 μm to 1,893 μm), immersion silver (from 1,019 μm to 1,843 μm), and electroless nickel-immersion gold (from 1,358 μm to 1,439 μm) surface finishes. In the case of immersion tin and immersion silver coatings, both the root mean square roughness (S_q) and arithmetic mean roughness (S_a) show an increasing trend, whereas for electroless nickel-gold coatings, a decrease in these values was observed. Analysis of the soldering surfaces before and after plasma treatment using scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) and laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) revealed no significant changes in the chemical composition.

8. Az értekezéshez kapcsolódó publikációk

- [C1] 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>
- [C2] Guba, S., Horváth, B., Gugolya, Z., **Kocsis, E.** and Szalai I.: Dielectric breakdown characteristics of flux-contaminated printed circuit boards in different environmental conditions, Heliyon 11 (2025) e42324
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42324>
- [C3] **Kocsis, E.**; Lukács, A. and Szalai, I.: Impact of plasma treatment on solderability of printed circuit boards, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 1246 (2022) 012013
doi:10.1088/1757-899X/1246/1/012013
- [C4] **Kocsis E.**; Lukács, A. and Szalai, I.: Investigation of Atmospheric Pressure Plasma Treatment on PCB Surface Finishes, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 52, no. 11, pp. 5345-5349, Nov. 2024
doi: 10.1109/TPS.2024.3507074
- [C5] 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>
- [K1] **Kocsis, E.**; Lukács, A. és Szalai, I.: Plazmakezelés hatásvizsgálata nyomtatott áramköri panelek forraszthatóságára, XIII. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese, 2021. október 10-12.
- [K2] **Kocsis, E.**; Lukács, A. és Szalai, I.: Plazmakezelés hatása elektronikai szerelvények forraszthatóságára, ENELKO 2022 - XXIII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2022 - XXXII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2022) pp. 25-29., 4 p., ENELKO, Marosvásárhely, Románia, 2022. október 13-16.
- [K3] **Kocsis, E.**; Lukács, A. és Szalai, I.: Investigation of Atmospheric Pressure Plasma Treatment on PCB Surface Finishes, Conference on MACRO meets NANO in

Measurement for Diagnostics, Optimization and Control, Delft, Hollandia, 2023. szeptember 21-22.

- [K4] **Kocsis, E.;** Lukács, A. és Szalai, I.: Plazmakezelés nyomtatott áramköri panelek forraszthatóságának javítására, PhD hallgatók anyagtudományi napja XXI., Veszprém, 2021. november 8.
- [K5] **Kocsis, E.;** Lukács, A. és Szalai, I.: Plazmakezelés tisztítási hatékonyságának vizsgálata forrasztott elektronikai termékeken, PhD hallgatók anyagtudományi napja XXII., Veszprém, 2022. november 14.

9. Irodalomjegyzék

- [1] M. Aamir, M. Tolouei-Rad, I.U. Din, K. Giasin, A. Vafadar, Performance of SAC305 and SAC305-0.4La lead free electronic solders at high temperature, *Soldering and Surface Mount Technology* 31 (2019) 250–260. <https://doi.org/10.1108/SSMT-01-2019-0001>.
- [2] K. Minagawa, H. Kakisawa, Y. Osawa, S. Takamori, K. Halada, Production of fine spherical lead-free solder powders by hybrid atomization, in: *Sci Technol Adv Mater*, 2005: pp. 325–329. <https://doi.org/10.1016/j.stam.2005.03.010>.
- [3] A.K. Basak, A. Pramanik, H. Riazi, M. Silakhori, A.K.O. Netting, Development of pb-free nanocomposite solder alloys, *Journal of Composites Science* 2 (2018). <https://doi.org/10.3390/jcs2020028>.
- [4] A. Muhammad, I. Muhammad, W. Muhammad, I. Muhammad, H. Muhammad Imran, M. Riaz, Fuzzy logic approach for investigation of microstructure and mechanical properties of Sn96.5-Ag3.0-Cu0.5 lead free solder alloy, *Soldering and Surface Mount Technology* 29 (2017) 191–198. <https://doi.org/10.1108/SSMT-02-2017-0005>.
- [5] S.K. Kang, P. Lauro, D.-Y. Shih, D.W. Henderson, J. Bartelo, T. Gosselin, S.R. Cain, C. Goldsmith, K. Puttlitz, T.K. Hwang, W.K. Choi, The Microstructure, Thermal Fatigue, and Failure Analysis of Near-Ternary Eutectic Sn-Ag-Cu Solder Joints, n.d.
- [6] J. Cugnoni, J. Botsis, J. Janczak-Rusch, Size and constraining effects in lead-free solder joints, in: *Adv Eng Mater*, 2006: pp. 184–191. <https://doi.org/10.1002/adem.200400236>.
- [7] T.T.N.K.L.W.E.C.P.B. B Arfaei, Dependence of SnAgCu Solder Joint Properties on Solder Microstructure, *IEEE*, 2011. <https://doi.org/DOI:10.1109/ECTC.2011.5898502>.
- [8] D.Q. Yu, L. Wang, The growth and roughness evolution of intermetallic compounds of Sn-Ag-Cu/Cu interface during soldering reaction, *J Alloys Compd* 458 (2008) 542–547. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.047>.
- [9] A. Abdullah, S.R. Aisha Idris, A review: effect of copper percentage solder alloy after laser soldering, *Soldering and Surface Mount Technology* 35 (2023) 175–188. <https://doi.org/10.1108/SSMT-03-2022-0022>.
- [10] B. Zhou, T.R. Bieler, G. Wu, S. Zaefferer, T.K. Lee, K.C. Liu, In situ synchrotron characterization of melting, dissolution, and resolidification in lead-free solders, *J Electron Mater* 41 (2012) 262–272. <https://doi.org/10.1007/s11664-011-1785-8>.
- [11] N.A. Jasli, H.A. Hamid, R. Mayappan, Effect of Ag Addition on the Intermetallic Compound and Joint Strength between Sn-Zn-Bi Lead Free Solder and Copper Substrate, n.d.
- [12] M. Reid, J. Punch, M. Collins, C. Ryan, Effect of Ag content on the microstructure of Sn-Ag-Cu based solder alloys, *Soldering & Surface Mount Technology* 20 (2008) 3–8. <https://doi.org/10.1108/09540910810902651>.
- [13] M.S. Kang, D.S. Kim, Y.E. Shin, Suppression of the growth of intermetallic compound layers with the addition of graphene nano-sheets to an epoxy Sn-Ag-Cu solder on a Cu substrate, *Materials* 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12060936>.
- [14] M.I.I. Ramli, M.A.A.M. Salleh, M.M.A.B. Abdullah, N.S.M. Zaimi, A.V. Sandu, P. Vizureanu, A. Rylski, S.F.M. Amlı, Formation and Growth of Intermetallic Compounds in Lead-Free Solder Joints: A Review, *Materials* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15041451>.

- [15] F. Somidin, N.F.N. Ilias, N.S.M. Zaimi, M.I.I. Ramli, N.R.A. Razak, Influence of Fly Ash Geopolymer Ceramic Powder Addition on Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Joints, in: *J Phys Conf Ser*, IOP Publishing Ltd, 2022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2169/1/012032>.
- [16] B. Dziurdzia, J. Mikolajek, X-ray inspection and Six-Sigma in analysis of LED thermal pad coverage, in: *Soldering and Surface Mount Technology*, Emerald Group Publishing Ltd., 2017: pp. 28–33. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0028>.
- [17] Keyun. Bi, Zhong. Tian, Ziqiang. Xu, 2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT 2014): Chengdu, China, August 12 to 15, 2014 = 2014电子封装技术国际会议, IEEE, 2014.
- [18] F. Haq, A. Pham, S. Sadasiva, G. Li, M. Koslowski, The role of Sn grain orientation in Cu depletion of Sn-based solders, *Model Simul Mat Sci Eng* 32 (2024). <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ad56a7>.
- [19] Y.H. Chan, M.M. Arafat, A.S.M.A. Haseeb, Effects of reflow on the interfacial characteristics between Zn nanoparticles containing Sn-3.8Ag-0.7Cu solder and copper substrate, *Soldering and Surface Mount Technology* 25 (2013) 91–98. <https://doi.org/10.1108/09540911311309040>.
- [20] O.M. Abdelhadi, L. Ladani, IMC growth of Sn-3.5Ag/Cu system: Combined chemical reaction and diffusion mechanisms, *J Alloys Compd* 537 (2012) 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.04.068>.
- [21] D.G. Rosa, M.R. Stracke, V.T. Padilha, C. Peter, W.H. Carreira, C.A.M. Moraes, Analysis of ball soldering parameters on the properties of a BGA packaged semiconductor, in: *Materials Research*, Universidade Federal de Sao Carlos, 2017: pp. 858–862. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-1075>.
- [22] N.H. Jamadon, Y. Miyashita, F. Yusof, M. Hamdi, Y. Otsuka, T. Ariga, Formation behaviour of reaction layer in Sn-3.0Ag-0.5Cu solder joint with addition of porous Cu interlayer, in: *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, Institute of Physics Publishing, 2014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/61/1/012020>.
- [23] H.M.S.L.J.S.A.K.W.M.J.H.Y.B. Jiahui Liu, The study of interfacial reaction during rapidly solidified lead-free solder Sn3.5Ag0.7Cu/Cu laser soldering, (2014).
- [24] J.M. Song, B.C. Huang, D. Tarng, C.P. Hung, K. Yasuda, Relationship between nanomechanical responses of interfacial intermetallic compound layers and impact reliability of solder joints, *Nanomaterials* 10 (2020) 1–13. <https://doi.org/10.3390/nano10081456>.
- [25] W. Yue, C. Ding, H. Qin, C. Gong, J. Zhang, Crystallographic characteristic effect of cu substrate on serrated cathode dissolution in Cu/Sn–3.0Ag–0.5Cu/Cu solder joints during electromigration, *Materials* 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14102486>.
- [26] L.M. Lee, A.A. Mohamad, Interfacial reaction of Sn-Ag-Cu lead-free solder alloy on Cu: A review, *Advances in Materials Science and Engineering* 2013 (2013). <https://doi.org/10.1155/2013/123697>.
- [27] A. Skwarek, O. Krammer, T. Hurtony, P. Ptak, K. Górecki, S. Wroński, D. Straubinger, K. Witek, B. Illés, Application of zno nanoparticles in sn99ag0.3 cu0.7-based composite solder alloys, *Nanomaterials* 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11061545>.
- [28] B.O. Li, Y. Shi, Y. Lei, F.U. Guo, Z. Xia, B. Zong, Effect of Rare Earth Element Addition on the Microstructure of Sn-Ag-Cu Solder Joint, 2005.

- [29] A.M. Yu, M.S. Kim, C.W. Lee, J.H. Lee, Wetting and interfacial reaction characteristics of Sn-1.2Ag-0.5Cu-xIn quaternary solder alloys, *Metals and Materials International* 17 (2011) 521–526. <https://doi.org/10.1007/s12540-011-0634-x>.
- [30] S. Chantaramanee, W. Sriwittayakul, P. Sungkhaphaitoon, Effects of antimony and indium addition on wettability and interfacial reaction of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead free solder on copper substrate, in: *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2018: pp. 188–193. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.928.188>.
- [31] M. Ghosh, A. Kar, S.K. Das, A.K. Ray, Aging characteristics of Sn-Ag eutectic solder alloy with the addition of Cu, In, and Mn, *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* 40 (2009) 2369–2376. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9948-4>.
- [32] J. Fan, H. Zhai, Z. Liu, X. Wang, Y. Li, H. Gao, J. Liu, Effect of Ni Content on the Microstructure Formation and Properties of Sn-0.7Cu-xNi Solder Alloys, *J Mater Eng Perform* 29 (2020) 4934–4943. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04996-3>.
- [33] K. Le Zhao, Y.F. Yan, Y.Y. Sheng, N. Du, Z.L. Liu, Interfacial reaction and solderability of Zn₂₀Sn_xCu solder, in: *Adv Mat Res*, 2011: pp. 402–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.337.402>.
- [34] J. Shen, P. He, T. Zhang, Y. Li, Y. Pu, J. Chen, The effects of Mn powder additions on the microstructures and tensile property of SnAgCu/Cu solder joints, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 25 (2014) 4779–4785. <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2233-3>.
- [35] S. Chantaramanee, P. Sungkhaphaitoon, T. Plookphol, Influence of indium and antimony additions on mechanical properties and microstructure of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead free solder alloys, in: *Solid State Phenomena*, Trans Tech Publications Ltd, 2017: pp. 196–200. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.266.196>.
- [36] A.-M. Yu, C.-W. Lee, M.-S. Kim, J.-H. Lee, The Effect of the Addition of In on the Reaction and Mechanical Properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu Solder Alloy, 2007.
- [37] J. Shen, Y.C. Liu, Y.J. Han, Y.M. Tian, H.X. Gao, Strengthening Effects of ZrO₂ Nanoparticles on the Microstructure and Microhardness of Sn-3.5Ag Lead-Free Solder, n.d.
- [38] M. Arra, F. Tampere, F. Dongkai, S. & Dongji, X. Flextronics, S. Jose, Wetting of Fresh and Aged Immersion Tin and Silver Surface Finishes by Sn/Ag/Cu Solder, n.d.
- [39] H.P. Lim, A. Ourdjini, T.A.A. Bakar, T. Tesfamichael, The Effects of Humidity on Tin Whisker Growth by Immersion Tin Plating and Tin Solder Dipping Surface Finishes, in: *Procedia Manuf*, Elsevier B.V., 2015: pp. 275–279. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.048>.
- [40] S. Lamprecht, R. Vogel, H.-J. Schreier, Immersion Sn solderability Ageing Characteristics of Immersion Tin Surface Finishes, 2001. <https://www.researchgate.net/publication/294658245>.
- [41] M. Arra, D. Shangguan, D. Xie, J. Sundelin, T. Lepistö, E. Ristolainen, Study of immersion silver and tin printed-circuit-board surface finishes in lead-free solder applications, *J Electron Mater* 33 (2004) 977–990. <https://doi.org/10.1007/s11664-004-0025-x>.
- [42] R. Saleh, S. Schütt, M. Barth, T. Lang, W. Eberhardt, A. Zimmermann, Assembly of Surface-Mounted Devices on Flexible Substrates by Isotropic Conductive Adhesive and Solder and Lifetime Characterization, *Micromachines* (Basel) 13 (2022). <https://doi.org/10.3390/mi13081240>.
- [43] Y. Hu, K. Xiao, D. Zhang, P. Yi, R. Xiong, C. Dong, J. Wu, X. Li, Corrosion acceleration of printed circuit boards with an immersion silver layer exposed to

- Bacillus cereus in an aerobic medium, *Front Microbiol* 10 (2019). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01493>.
- [44] H. Huang, X. Guo, F. Bu, G. Huang, Corrosion behavior of immersion silver printed circuit board copper under a thin electrolyte layer, *Eng Fail Anal* 117 (2020) 104807. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104807>.
- [45] P. Yi, K. Xiao, C. Dong, S. Zou, X. Li, Effects of mould on electrochemical migration behaviour of immersion silver finished printed circuit board, *Bioelectrochemistry* 119 (2018) 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.10.004>.
- [46] L. Yan, K. Xiao, P. Yi, C. Dong, J. Wu, Z. Bai, C. Mao, L. Jiang, X. Li, The corrosion behavior of PCB-ImAg in industry polluted marine atmosphere environment, *Mater Des* 115 (2017) 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.074>.
- [47] A. Accogli, E. Gibertini, G. Panzeri, A. Lucotti, L. Magagnin, Understanding the Failure Mode of Electroless Nickel Immersion Gold Process: In Situ-Raman Spectroscopy and Electrochemical Characterization, *J Electrochem Soc* 167 (2020) 082507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8ce6>.
- [48] M.A. Rabiatal Adawiyah, S.A. Amirul, O. Saliza Azlina, H. Syafiq, Impact of multiple reflow on intermetallic compound of nickel-doped tin-silver-copper on ENImAg substrate, *Materwiss Werksttech* 51 (2020) 780–786. <https://doi.org/10.1002/mawe.201900246>.
- [49] C.K. Meng, T.S. Selvamuniandy, C. Gurumurthy, Discoloration related failure mechanism and its root cause in Electroless Nickel Immersion Gold (ENIG) Pad metallurgical surface finish, *Proceedings of the International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, IPFA (2004)* 229–233. <https://doi.org/10.1109/ipfa.2004.1345605>.
- [50] B. Medgyes, Electrochemical migration of Ni and ENIG surface finish during Environmental test contaminated by NaCl, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 28 (2017) 18578–18584. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7806-5>.
- [51] H. Lee, C. Kim, C. Heo, C. Kim, J.H. Lee, Y. Kim, Effect of solder resist dissolution on the joint reliability of ENIG surface and Sn–Ag–Cu solder, *Microelectronics Reliability* 87 (2018) 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.05.017>.
- [52] R. Nandeshwar, M.S. Kumar, K. Kondabagil, S. Tallur, Electrochemical Immunosensor Platform Using Low-Cost ENIG PCB Finish Electrodes: Application for SARS-CoV-2 Spike Protein Sensing, *IEEE Access* 9 (2021) 154368–154377. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3128668>.
- [53] K. Dušek, P. Veselý, D. Bušek, A. Petráč, A. Géczy, B. Illés, O. Krammer, Influence of flux and related factors on intermetallic layer growth within sac305 solder joints, *Materials* 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14247909>.
- [54] S. Rabiatalull, A. Idris, N. Farihan, H. Kahar, Effect of Flux onto Intermetallic Compound Formation and Growth, (n.d.). <https://doi.org/10.1051/00034>.
- [55] H. Liu, F. Xue, J. Zhou, Study of flux on wetting behavior of Sn-Zn lead-free solders, in: *Adv Mat Res*, 2011: pp. 3230–3237. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3230>.
- [56] M. Kozak, P. Vesely, K. Dusek, Analysis of solder mask roughness and stencil shape influence on void formation in solder joints, *Welding in the World* 67 (2023) 1347–1355. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01505-7>.

- [57] N. Ismail, A. Jalar, M. Abu Bakar, R. Ismail, N. Saedi Ibrahim, Effect of flux functional group for solder paste formulation towards soldering quality of SAC305/CNT/Cu, *Soldering and Surface Mount Technology* 32 (2020) 157–164. <https://doi.org/10.1108/SSMT-07-2019-0024>.
- [58] M.N. Ervina Efzan, S.O. Ayodeji, Effect of fluxes on Sn-Zn-Bi solder alloys on copper substrate, *Soldering and Surface Mount Technology* 29 (2017) 225–234. <https://doi.org/10.1108/SSMT-05-2017-0014>.
- [59] K. Microsolder Kft, Rádai Sándor: A forrasztástechnika egyik ősi problémája: Az ionos szennyeződések-1-A forrasztástechnika egyik ősi problémája: Az ionos szennyeződések, n.d.
- [60] ELEKTRONIKAI INFORMATIKAI SZAKFOLYÓIRAT Fókuszban a mérés technika Az ELEKTRONet a rendezvény hivatalos lapja, n.d. www.elektro-net.hu/hatter/tajvannap.
- [61] D. Xu, D. Wang, Y. Lei, Study of VOC-free, no-clean flux for lead-free soldering in electronic packaging, in: *Adv Mat Res*, 2011: pp. 1012–1018. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.1012>.
- [62] V. Verdingovas, S. Joshy, M. Stendahl Jellesen, R. Ambat, Analysis of surface insulation resistance related failures in electronics by circuit simulation, *Circuit World* 43 (2017) 45–55. <https://doi.org/10.1108/CW-09-2016-0040>.
- [63] V. Verdingovas, M.S. Jellesen, R. Ambat, Relative effect of solder flux chemistry on the humidity related failures in electronics, *Soldering and Surface Mount Technology* 27 (2015) 146–156. <https://doi.org/10.1108/SSMT-11-2014-0022>.
- [64] K.-W.L.K.O.H.M.Y.O. Akihiro Horibe, No Clean Flux Technology for Large Die Flip Chip Packages, in: 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 2013.
- [65] K. Piotrowska, F. Li, R. Ambat, Thermal decomposition of binary mixtures of organic activators used in no-clean fluxes and impact on PCBA corrosion reliability, *Soldering and Surface Mount Technology* 32 (2020) 93–103. <https://doi.org/10.1108/SSMT-05-2019-0020>.
- [66] L. Rauter, J. Zikulnig, T. Sinani, H. Zangl, L.M. Faller, Evaluation of Standard Electrical Bonding Strategies for the Hybrid Integration of Inkjet-Printed Electronics, *Electronic Materials* 1 (2020). <https://doi.org/10.3390/electronicmat1010002>.
- [67] P. Veselý, D. Bušek, O. Krammer, K. Dušek, Analysis of no-clean flux spatter during the soldering process, *J Mater Process Technol* 275 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116289>.
- [68] H. Conseil, M.S. Jellesen, R. Ambat, Contamination profile on typical printed circuit board assemblies vs soldering process, *Soldering and Surface Mount Technology* 26 (2014) 194–202. <https://doi.org/10.1108/SSMT-03-2014-0007>.
- [69] K. Piotrowska, M.S. Jellesen, R. Ambat, Thermal decomposition of solder flux activators under simulated wave soldering conditions, *Soldering and Surface Mount Technology* 29 (2017) 133–143. <https://doi.org/10.1108/SSMT-01-2017-0003>.
- [70] M.N. Bashir, A.S.M.A. Haseeb, A.Z.M.S. Rahman, M.A. Fazal, C.R. Kao, Reduction of electromigration damage in SAC305 solder joints by adding Ni nanoparticles through flux doping, *J Mater Sci* 50 (2015) 6748–6756. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9230-7>.
- [71] P. Veselý, I. Králová, D. Pilnaj, M. Plaček, K. Dušek, SnAgCu Solder Joint Microstructure Evolution During Thermal Aging: Influence of Flux, *Adv Eng Mater* (2024). <https://doi.org/10.1002/adem.202401366>.

- [72] W.Z. Xiao Hui, Study on Short-circuit Failure of Solder-joint Interconnections, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016.
- [73] T. Takemoto, R.M. Latanisioni, T.W. Eagart, A. Matsunawa, ELECTROCHEMICAL MIGRATION TESTS OF SOLDER ALLOYS IN PURE WATER, 1997.
- [74] C. Dominkovics, G. Harsányi, Fractal description of dendrite growth during electrochemical migration, *Microelectronics Reliability* 48 (2008) 1628–1634. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.06.010>.
- [75] P. Yi, C. Dong, Y. Ji, Y. Yin, J. Yao, 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* 30 (2019) 6575–6582. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00964-3>.
- [76] B. Illés, B. Medgyes, K. Dušek, D. Bušek, A. Skwarek, A. Géczy, Numerical simulation of electrochemical migration of Cu based on the Nernst-Planck equation, *Int J Heat Mass Transf* 184 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122268>.
- [77] V. Verdingovas, M.S. Jellesen, 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* 44 (2015) 1116–1127. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3609-0>.
- [78] M.S. Jellesen, D. Minzari, U. Rathinavelu, P. Møller, R. Ambat, Corrosion failure due to flux residues in an electronic add-on device, *Eng Fail Anal* 17 (2010) 1263–1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.02.010>.
- [79] U. Rathinavelu, M.S. Jellesen, R. Ambat, Effect of solder flux residue on the performance of silicone conformal coatings on printed circuit board assemblies, *Corrosion Engineering Science and Technology* 48 (2013) 436–444. <https://doi.org/10.1179/1743278213Y.0000000096>.
- [80] C. Hillman, R. Esser, J. Mcleish, White Paper Failure Mechanisms in High Voltage Printed Circuit Boards, n.d.
- [81] Q. Zhou, M. Wen, T. Xiong, T. Jiang, M. Zhou, X. Ouyang, L. Xing, Study on insulation breakdown characteristics of printed circuit board under continuous square impulse voltage, *Energies (Basel)* 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/en11112908>.
- [82] C. Hu, W. Zheng, B. Zhao, Y. Fan, H. Li, K. Zheng, G. Wang, The Effect of Thermal and Moisture Stress on Insulation Deterioration Law of Ionic Contaminated High-Voltage Printed Circuit Board of Electronic Power Conditioner, *Energies (Basel)* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/en15249616>.
- [83] C. Emersic, R. Lowndes, I. Cotton, S. Rowland, R. Freer, Observations of breakdown through printed circuit board polymer coatings via a surface pollution layer, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24 (2017) 2570–2578. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.005814>.
- [84] X. Xiang Wong, W. Eng Ong, A. Rahman, Surface Mount Technology Line Optimisation using Modified k-means with Feature Weight Constraints, 2022. www.matematika.utm.my.
- [85] A. O. Castro; U. H. Bezerra; J. C. Leite; M. S. S. Azevedo, Methodology proposal for multicriteria optimization using NSGA-II in industrial applications, (2014).
- [86] D. Straubinger, A. Toth, V. Kerek, Z. Czecei, A. Szabo, A. Geczy, Investigation of solder beading phenomenon under surface-mounted electrolytic capacitors, *Soldering and Surface Mount Technology* 34 (2022) 203–211. <https://doi.org/10.1108/SSMT-06-2021-0039>.

- [87] V.W.C. Fung, K.C. Yung, An intelligent approach for improving printed circuit board assembly process performance in smart manufacturing, *International Journal of Engineering Business Management* 12 (2020). <https://doi.org/10.1177/1847979020946189>.
- [88] D. Kim, J. Koo, H. Kim, S. Kang, S.H. Lee, J.T. Kang, Rapid fault cause identification in surface mount technology processes based on factory-wide data analysis, *Int J Distrib Sens Netw* 15 (2019). <https://doi.org/10.1177/1550147719832802>.
- [89] B. Iftikhar, M.M. Malik, S. Hadi, O. Wajid, M.N. Farooq, M.M. Rehman, A.K. Hassan, Cost-effective, Reliable, and Precise Surface Mount Device (SMD) on PCBs, in: *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, IOP Publishing Ltd, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/899/1/012007>.
- [90] K.T. Andrzejewski, M.P. Cooper, C.A. Griffiths, C. Giannetti, Optimisation process for robotic assembly of electronic components, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99 (2018) 2523–2535. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2645-y>.
- [91] M.P.S.V.R. de L.L.G.B.M.M.O. Ana C. Bueno, Analysis of Defects Generated by the Reflow Soldering in SMT (Surface Mount Technology) Assembly Applying the Six Sigma Method, *JOURNAL INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS* 1 (2004).
- [92] M. Noroozi, J. Ghadermazi, A. Shah, J.L. Zayas-Castro, Toward Optimal Defect Detection in Assembled Printed Circuit Boards under Adverse Conditions, *IEEE Access* 11 (2023) 127119–127131. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3330142>.
- [93] A. Sezer, A. Altan, Detection of solder paste defects with an optimization-based deep learning model using image processing techniques, *Soldering and Surface Mount Technology* 33 (2021) 291–298. <https://doi.org/10.1108/SSMT-04-2021-0013>.
- [94] R. Gupta, Failure Mode and Effects Analysis of PCB for Quality Control Process, *Mapan - Journal of Metrology Society of India* 38 (2023) 547–556. <https://doi.org/10.1007/s12647-022-00619-5>.
- [95] N. Petkov, M. Ivanova, Printed circuit board and printed circuit board assembly methods for testing and visual inspection: a review, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 13 (2024) 2566–2585. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i4.7601>.
- [96] H.P. Hsu, Printed Circuit Board Assembly Planning for Multi-Head Gantry SMT Machine Using Multi-Swarm and Discrete Firefly Algorithm, *IEEE Access* 9 (2021) 1642–1654. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046495>.
- [97] C.T. Obe, S.E. Oti, C.U. Eya, D.B.N. Nnadi, O.E. Nnadi, A low-cost printed circuit board design technique and processes using ferric chloride solution, *Nigerian Journal of Technology* 39 (2021) 1223–1231. <https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.31>.
- [98] R. Asghar, F. Rehman, A. Aman, K. Iqbal, Low RH and temperature effect on 0201 sized passive components during SMT mounting, *Soldering and Surface Mount Technology* 32 (2020) 48–54. <https://doi.org/10.1108/SSMT-02-2019-0006>.
- [99] C.Y. Huang, Y.H. Lin, K.C. Ying, C.L. Ku, The solder paste printing process: Critical parameters, defect scenarios, specifications, and cost reduction, *Soldering & Surface Mount Technology* 23 (2011) 211–223. <https://doi.org/10.1108/09540911111169057>.

- [100] M.N.A. Rahman, N.S.M. Zubir, R.A.C. Leuveano, J.A. Ghani, W.M.F. Wan Mahmood, Reliability study of solder paste alloy for the improvement of solder joint at surface mount fine-pitch components, *Materials* 7 (2014) 7706–7721. <https://doi.org/10.3390/ma7127706>.
- [101] X. Liu, W. Zhang, D. Hao, Y. Liu, Cost-Effective Surface-Mounted Patch Antenna with Ring Slot Using Ball Grid Array Packaging for 5G Millimeter-Wave Applications, 2021.
- [102] P. Martinek, O. Krammer, Optimising pin-in-paste technology using gradient boosted decision trees, *Soldering and Surface Mount Technology* 30 (2018) 164–170. <https://doi.org/10.1108/SSMT-09-2017-0024>.
- [103] V. Carvalho, B. Arcipreste, D. Soares, L. Ribas, N. Rodrigues, S. Teixeira, J.C. Teixeira, Experimental measurements of the shear force on surface mount components simulating the wave soldering process, *Soldering and Surface Mount Technology* 34 (2022) 16–23. <https://doi.org/10.1108/SSMT-12-2020-0057>.
- [104] M.S. Abdul Aziz, M.Z. Abdullah, C.Y. Khor, Effects of solder temperature on pin through-hole during wave soldering: Thermal-fluid structure interaction analysis, *Scientific World Journal* 2014 (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/482363>.
- [105] V.L.I.H. and Z.I. Attila Géczy, Low Temperature Soldering on Biopolymer (PLA) Printed Wiring Board Substrate, (2011).
- [106] Zoltán Oláh; Miklós Ruzinkó; Réka Bátorfi; Zsolt Illyefalvi-Vitéz, Process parameter optimization of selective soldering, (2012) 350.
- [107] L.R.A.M. Paul Gierth, Evaluation of Soldering Processes for High Efficiency Solar Cells, (2012).
- [108] AmCham_Elektronikai_gyartas_Tk_2019_0812, (n.d.).
- [109] smtfactory.com, Selective soldering, n.d. www.indium.com.
- [110] B. Liu, T.K. Lee, K.C. Liu, Impact of 5% NaCl salt spray pretreatment on the long-term reliability of wafer-level packages with Sn-Pb and Sn-Ag-Cu solder interconnects, *J Electron Mater* 40 (2011) 2111–2118. <https://doi.org/10.1007/s11664-011-1705-y>.
- [111] B. Dziurdzia, M. Sobolewski, J. Mikołajek, S. Wroński, Low-voiding solder pastes in LED assembly, *Soldering and Surface Mount Technology* 32 (2020) 201–217. <https://doi.org/10.1108/SSMT-11-2019-0041>.
- [112] M. Benke, Z. Salyi, G. Kaptay, Investigation of dissolution resistance of blank and gas-nitrided carbon steels in stationary SAC305 solder alloy melt, *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy* 54 (2018) 283–290. <https://doi.org/10.2298/JMMB170918019B>.
- [113] T. Hurtony, A. Bonyár, P. Gordon, Microstructure comparison of soldered joints using electrochemical selective etching, in: *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2013: pp. 367–372. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.729.367>.
- [114] P. Mach, P. Zeman, E. Kotrcova, S. Barto, Optimization of Lead-Free Wave Soldering Process Using Taguchi Orthogonal Arrays, 2010.
- [115] K.K. Xu, L. Zhang, L.L. Gao, N. Jiang, L. Zhang, S.J. Zhong, Review of microstructure and properties of low temperature lead-free solder in electronic packaging, *Sci Technol Adv Mater* 21 (2020) 689–711. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1824255>.
- [116] R.B. Lima, V.F. Cardoso, A.N. Da Silva, Analysis of Pin in Paste Soldering on Printed Circuits Boards Assembly Using Lead Free Solder Paste, *ECS Trans* 39 (2011) 417–422. <https://doi.org/10.1149/1.3615221>.

- [117] T.I. Al-Ma'aiteh, O. Krammer, B. Illés, Transient numerical modelling of the pin-in-paste technology, *Applied Sciences (Switzerland)* 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11104670>.
- [118] I. Aydın, C. Demirkir, Activation of spruce wood surfaces by plasma treatment after long terms of natural Surface inactivation, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 30 (2010) 697–706. <https://doi.org/10.1007/s11090-010-9244-5>.
- [119] G. Li, Z. Sun, S. Gao, Y. Wang, S. Chen, J. Ma, The effect of plasma treatment process on the electrical conductivity and coating fastness of silver nanoparticles functionalized aramid fiber paper, *Engineering Reports* 3 (2021). <https://doi.org/10.1002/eng2.12384>.
- [120] Z. Ömeroğulları, D. Kut, Application of low-frequency oxygen plasma treatment to polyester fabric to reduce the amount of flame retardant agent, *Textile Research Journal* 82 (2012) 613–621. <https://doi.org/10.1177/0040517511420758>.
- [121] C.W. Kan, Y.L. Lam, M.Y. Li, The effect of plasma treatment on the dyeing properties of silk fabric, *Coloration Technology* 132 (2016) 9–16. <https://doi.org/10.1111/cote.12189>.
- [122] W. Wang, H.T. Choi, C.W. Kan, P. Jaroensappayanant, P. Rug-Ngam, K. Surakul, R. Mongkholrattanasit, Effect of plasma pre-treatment on the dyeability of silk fabric with metal-complex dye, in: *Key Eng Mater*, Trans Tech Publications Ltd, 2019: pp. 21–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.818.21>.
- [123] H. Tanaka, M. Mizuno, K. Ishikawa, S. Toyokuni, H. Kajiyama, F. Kikkawa, M. Hori, New Hopes for Plasma-Based Cancer Treatment, *Plasma* 1 (2018) 150–155. <https://doi.org/10.3390/plasma1010014>.
- [124] M. Mateu-Sanz, J. Tornín, B. Brulin, A. Khlyustova, M.P. Ginebra, P. Layrolle, C. Canal, Cold plasma-treated ringer's saline: A weapon to target osteosarcoma, *Cancers (Basel)* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/cancers12010227>.
- [125] Y. Ren, J. Deng, Z.H. Li, Influence of the combined treatment of causticization and low temperature plasma on the properties of polyester fiber, in: *Adv Mat Res*, 2011: pp. 312–317. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.175-176.312>.
- [126] O. Handorf, T. Weihe, S. Bekeschus, A.C. Graf, U. Schnabel, K. Riedel, J. Ehlbeck, Nonthermal Plasma Jet Treatment Negatively Affects the Viability and Structure of *Candida albicans* SC5314 Biofilms, 2018. <https://journals.asm.org/journal/aem>.
- [127] N. Oshima, R. Takada, Y. Kubota, P. Abraha, T. Hara, Development of atmospheric pressure plasma jet with slit nozzle, in: *Jpn J Appl Phys*, 2011. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.01AH06>.
- [128] R.B. Tyata, D.P. Subedi, A. Shrestha, D. Baral, DEVELOPMENT OF ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA JET IN AIR, 2012.
- [129] A.J. Knoll, P. Luan, A. Pranda, R.L. Bruce, G.S. Oehrlein, Polymer etching by atmospheric-pressure plasma jet and surface micro-discharge sources: Activation energy analysis and etching directionality, *Plasma Processes and Polymers* 15 (2018). <https://doi.org/10.1002/ppap.201700217>.
- [130] F. Feng, X. He, Y. Liang, F. Yang, F. Wang, Y. Yang, T. Liu, Ar plasma jet generation and its application for water and surface sterilization, in: *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197802020>.
- [131] M.A. Özdemir, G.D. Özdemir, M. Gül, O. Güren, U.K. Ercan, Machine learning to predict the antimicrobial activity of cold atmospheric plasma-activated liquids, *Mach Learn Sci Technol* 4 (2023). <https://doi.org/10.1088/2632-2153/acc1c0>.

- [132] M. Berczeli, Z. Weltsch, S. Lanceros-Mendez, J. Nunes-Pereira, Enhanced Wetting and Adhesive Properties by Atmospheric Pressure Plasma Surface Treatment Methods and Investigation Processes on the Influencing Parameters on HIPS Polymer, (2021). <https://doi.org/10.3390/polym>.
- [133] O. Handorf, V.I. Pauker, U. Schnabel, T. Weihe, E. Freund, S. Bekeschus, K. Riedel, J. Ehlbeck, Characterization of antimicrobial effects of Plasma-Treated Water (PTW) produced by Microwave-Induced Plasma (MidiPLexc) on pseudomonas fluorescens biofilms, *Applied Sciences (Switzerland)* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10093118>.
- [134] S.K. Pankaj, C. Bueno-Ferrer, L. O'Neill, B.K. Tiwari, P. Bourke, P.J. Cullen, Characterization of Dielectric Barrier Discharge Atmospheric Air Plasma Treated Chitosan Films, *J Food Process Preserv* 41 (2017). <https://doi.org/10.1111/jfpp.12889>.
- [135] M. Kehrer, A. Rottensteiner, W. Hartl, J. Duchoslav, S. Thomas, D. Stifter, Cold atmospheric pressure plasma treatment for adhesion improvement on polypropylene surfaces, *Surf Coat Technol* 403 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126389>.
- [136] R. Ciardiello, G. Belingardi, F. Litterio, V. Brunella, Thermomechanical characterization of reinforced and dismountable thermoplastic adhesive joints activated by microwave and induction processes, *Compos Struct* 244 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112314>.
- [137] H.A. a. Sadeq, W.I. Yaseen, Optical Properties of Manufactured Mirrors Using DC Plasma Magnetron Sputtering Technique, *Iraqi Journal of Science* 63 (2022) 2297–2306. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2022.63.5.39>.
- [138] R. Stewart, V. Goodship, F. Guild, M. Green, J. Farrow, Investigation and demonstration of the durability of air plasma pre-treatment on polypropylene automotive bumpers, *Int J Adhes Adhes* 25 (2005) 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2004.04.001>.
- [139] G. Primc, Strategies for Improved Wettability of Polyetheretherketone (PEEK) Polymers by Non-Equilibrium Plasma Treatment, *Polymers (Basel)* 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14235319>.
- [140] J. Heine, R. Damm, C. Gerhard, S. Wieneke, W. Viöl, Surface activation of plane and curved automotive polymer surfaces by using a fittable multi-pin DBD plasma source, *Plasma Science and Technology* 16 (2014) 593–597. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/16/6/10>.
- [141] J. Song, E. Lee, S. Hong, J. Kim, J. Oh, B. Choi, The Performance Enhancement of PMOSFETs and Inverter Chains at Low Temperature and Low Voltage by Removing Plasma-Damaged Layers, *Electronics (Switzerland)* 11 (2022). <https://doi.org/10.3390/electronics11131929>.
- [142] H. Cui, X. Gao, Surface Modification on Polyimide Yarn by Plasma Treatment to Enhance Adhesion with Polypropylene Resin, *Polymers (Basel)* 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14194232>.
- [143] H. Shamkhalichenar, C.J. Bueche, J.W. Choi, Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms, *Biosensors (Basel)* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/bios10110159>.
- [144] Z. Károly, G. Kalácska, J. Sukumaran, D. Fauconnier, Á. Kalácska, M. Mohai, S. Klébert, Effect of atmospheric cold plasma treatment on the adhesion and tribological properties of polyamide 66 and poly(tetrafluoroethylene), *Materials* 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12040658>.

- [145] A. Hanss, G. Elger, Residual free solder process for fluxless solder pastes, *Soldering and Surface Mount Technology* 30 (2018) 118–128. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2017-0030>.
- [146] S. He, R. Gao, J. Li, Y.A. Shen, H. Nishikawa, In-situ observation of fluxless soldering of Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu under a formic acid atmosphere, *Mater Chem Phys* 239 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122309>.
- [147] M. Ueshima, Y. Nakamura, S. Horii, K. Sugiyama, Improvement of flux-less, lead-free solder wettability on CF₄-plasma-fluorinated Sn and Ag substrates using “atmospheric pressure non-equilibrium plasma,” *Surf Coat Technol* 205 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.136>.
- [148] S. Gheybi Hashemabad, Z. Gu, T. Ando, Flux-less direct soldering of aluminum by ultrasonic surface activation, *J Mater Process Technol* 233 (2016) 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.02.015>.
- [149] M. Godard, D. Drouin, M. Darnon, S. Martel, C. Fortin, Plasma Treatment for Fluxless Flip-Chip Chip-Joining Process, *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference 2018-May* (2018) 419–424. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2018.00069>.
- [150] K.T.H.N.K.S.N.U.J.M.S.S. and Y.O. K. Sakuma, Fluxless Bonding for Fine-pitch and Low-volume Solder 3-D Interconnections, *IEEE*, 2011.
- [151] S.D. Kencana, Y.L. Kuo, Y.W. Yen, W. Chuang, E. Schellkes, The roles of plasma science towards plasma-activated reflow soldering on Cu substrate with organic solderability preservatives surface finish, *Surfaces and Interfaces* 34 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102284>.
- [152] J. Kim, C.C. Lee, Fluxless Sn-Ag bonding in vacuum using electroplated layers, *Materials Science and Engineering: A* 448 (2007) 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.160>.
- [153] C.C. Dong, R.E. Patrick, R.A. Siminski, T. Bao, Fluxless soldering in activated hydrogen atmosphere, *China Semiconductor Technology International Conference 2016, CSTIC 2016* (2016) 2–4. <https://doi.org/10.1109/CSTIC.2016.7464060>.
- [154] B. Illés, G. Kristóf, L. Jakab, Thermal and gas flow characterization of a fluxless Si solder bonding oven, *Exp Therm Fluid Sci* 35 (2011) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.08.003>.
- [155] X. Song, K. Wang, Z. Chen, K. Ren, P. Liu, Electrochemical Migration Behavior on FR-4 Printed Circuit Board with Different Surface Finishes, *J Electron Mater* 52 (2023) 6121–6132. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10557-w>.
- [156] D.K. Owens, R.C. Wendt, *Estimation of the Surface Free Energy of Polymers*, 1969.
- [157] IPC-A-610 Revision J, 2024 March, n.d.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani mindenekelőtt témavezetőmnek, dr. Szalai Istvánnak, valamint vállalati szakértőmnek, Dr. Lukács Attilának, akik szakmai támogatással, útmutatással és a disszertáció elkészítésében nyújtott segítségükkel elengedhetetlen szerepet játszottak a munkám sikeres megvalósításában.

Külön köszönet illeti Dr. Tóth Lászlót, aki szakmai tanácsaival és iránymutatásával jelentősen hozzájárult a kutatás sikeres megvalósításához. Továbbá hálás vagyok a szerzőtársaimnak és munkatársaimnak, Tóth Zsoltnak, Dr. Horváth Barnabásnak, Dr. Guba Sándornak, Dr. Boda Dezsőnek és Dr. Ható Zoltánnak, akik szakmai hozzájárulásukkal támogatták a kutatási folyamatot.

Szeretnék köszönetet mondani a Flextronics International Kft. Hibaelemző Laboratóriumának és Prototípusgyártó Központjának munkatársainak is, akik a gyakorlati mérések és forrasztási kísérletek lebonyolításában nyújtották segítségüket.

Végül, de nem utolsósorban hálás vagyok férjemnek és családomnak a szeretetükért, türelmükért és folyamatos támogatásukért, amelyek nélkül nem sikerült volna megvalósítanom ezt a kutatást.

EZ 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.