

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék

Forrasztott kötések vizsgálata nedvesedési peremszögméréssel

TDK dolgozat

Készítette: Hlinka József, Járműmérnök (MSc)
2. évfolyam (4. félév)

Konzulens: Weltsch Zoltán, tanársegéd

2013. november

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	4
2. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ.....	7
2.1 FORRASZTÁS TECHNOLÓGIÁJA	7
2.1.1 FORRASZTÁS ALAPJAI, HELYE A KÖTÉSI MÓDOK KÖZÖTT	7
2.1.2 FORRASZTÁS MENETE, FORRASZTÁSKOR LEJÁTSZÓDÓ FOLYAMATOK.....	9
2.1.3. FORRASZTOTT KÖTÉS LÉTREHOZÁSÁHOZ SZÜKSÉGES HŐMÉRSÉKLETI VISZONYOK ÖSSZEFOGLALÁSA	14
2.2. A NEDVESEDÉS ELMÉLETE	15
2.2.1. A HATÁRFELÜLETI ENERGIA (γ)	19
2.2.2. A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖG TARTOMÁNYAI	19
2.3. PEREMSZÖGET BEFOLYÁSOLÓ JELENSÉGEK	21
2.3.1. EÖTVÖS- SZABÁLY	21
2.3.2. MARANGONI-ÁRAMLÁS	23
2.4. A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖG MEGHATÁROZÁSI MÓDJAI	27
2.4.1. NYUGVÓ CSEPP MÓDSZER	27
2.4.2. ADAGOLT CSEPP MÓDSZER	28
2.4.3. PEREMSZÖGMÉRÉSI MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	29
3. A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖGMÉRŐ BERENDEZÉS ÉS A PEREMSZÖGMÉRÉSI FOLYAMAT ISMERTETÉSE	30
3.1. A PEREMSZÖGMÉRŐ BERENDEZÉS FŐBB RÉSZEI	31
3.2. MÉRÉSI CIKLUS BEMUTATÁSA FORRASZOK NEDVESEDÉS-VIZSGÁLATÁNÁL.....	33
3.3. PEREMSZÖG KIÉRTÉKELÉSI MÓDOK ÉS AZ EREDMÉNYEK SZÓRÁSA	35
3.3.1. KÉZI PEREMSZÖG KIÉRTÉKELÉS	35
3.3.2. KIÉRTÉKELT EREDMÉNYEK SZÓRÁSA, HIBÁK OKAI.....	37

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK.....	40
4.1. KÍSÉRLETEK SORÁN FELHASZNÁLT ANYAGOK.....	40
4.2. KÜLÖNBÖZŐ FLUXOK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA	42
4.3. KÜLÖNBÖZŐ ÖSSZETÉTELEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA	43
4.4. MINTÁK KERESZTMETSZETI VIZSGÁLATA	45
5. ÖSSZEFOGLALÁS	47
6. IRODALOMJEGYZÉK	49

1. BEVEZETÉS

Mai világunkban az elektronikai ipar fejlődéséből adódóan a leggyakrabban alkalmazott kötéstechológia a lágyforrasztás. A nyomtatott áramköri lemezekre (NYÁK) esetenként több száz áramköri építőelemet kell rögzíteni. A forrasztások elkészítéséhez leggyakrabban forraszpasztát alkalmaznak, amely forraszfém és hozzáadott folyasztószer (flux) keveréke. A hibamentes üzem biztosítása érdekében kifogástalan kötések szükségesek. A megfelelő kötés kialakításához, a forrasztanyagoknak rendelkeznie kell számos, a kötést elősegítő tulajdonsággal (pl. jó nedvesítési tulajdonság). A gyakorlatban sok esetben nem megfelelő a forraszpasztá nedvesítő képessége.

A kondenzált fázisok között bármely két fázist a háromdimenziós térben felületek választanak el egymástól, amiket fázishatárnak hívunk. A kondenzált fázisokat gyakran gázfázis választja el egymástól, de léteznek kondenzált/kondenzált fázisok közötti határfelületek is. Az atomokra a kondenzált fázisok belsejében szimmetrikus erőter hat, azokat a kohéziós energia tartja össze. Ezzel szemben a határfelületeken lévő atomokra aszimmetrikus erőter hat. Egy kondenzált fázis/gáz határfelületen lévő atom a gázfázis oldaláról elveszítette a szomszédjait, ezért a felületen lévő atomok átlagos Gibbs-energiája különbözni fog a fázis belső atomjainak energiájától. A kondenzált fázisok határfelületi tulajdonságait nedvesítő-képességükkel lehet legjobban jellemezni.

A nedvesedés fogalma a régi megfigyelésből származik, miszerint különböző anyagok különbözően folynak, illetve terülnek szét. Tiszta padlón például a kiloccsant víz szétfolyik, viszont a leejtett és összetört higanyos hőmérőből, a higany golyókat formál, melyek a padló egyenetlenségei mentén szétgurulnak. Ezen elemi megfigyelések fizikai-kémiai hátterének pontos megfogalmazását már az 1920-as években megalkották [1, 2].

Mai világunkban az elektronikai- és járműipar a legjelentősebb és legdinamikusabban fejlődő iparágak, ezért a hozzájuk kapcsolódó technológiák kutatása-fejlesztése kiemelt jelentőséggel bír. A szilárd és folyékony halmazállapotú anyagok nedvesedési viszonyainak ismerete elengedhetetlen szerepet játszik az alkatrészek gyártásánál, járművekben és elektronikai berendezésekben különböző kötések létrehozásánál,

felületkezelési műveleteknél, illetve gépalkatrészek kenésénél. A jelenség nagy technikai jelentőségűvé vált a vegyiparban, a kohászati gyakorlatban, és napjainkban a nyomtatott áramkörök gyártásában is. Kompozit anyagok gyártásánál a mátrix és diszperz fázis közti határfelület nedvesítésének döntő szerepe van, például az alumínium olvadék a szénszálat nem nedvesíti, ezért annak felületét nikkellel vagy tantállal vonják be. Nyilvánvaló jelentősége van a határfelületek nedvesítésének a felületmódosító eljárásokban, például galvanizálás, PVD, CVD eljárás, plazmaszórás vagy vízálló nanotechnológiás bevonatok területén. Mindezeknél a felület megfelelő előkészítése (zsírtalanítás, stb.) alapvetően meghatározza a felületmódosítási technika alkalmazásának sikerét. Az olvadékok üreget kitöltő képessége különösen a kis méretű, bonyolult felületű, tagolt öntvények előállításánál fontos. A forrasztásoknál a munkadarabok hőkárosodása nélkül, a forrasztóanyag létesít kapcsolatot a darabok között, tehát elengedhetetlen a forrasztóanyag nedvesítési tulajdonságainak alapos ismerete, az adott körülményeknek megfelelő ötvözetartalmú és fluxtartalmú forrasztóanyag kifejlesztéséhez. Ahhoz, hogy a nedvesedési tulajdonságokat szükség szerint befolyásolni tudjuk, ismerni kell a jelenség fizikai-kémiai alapjait.

Ha a fémolvadék szilárd fázishoz ér, akkor összfelületének legalább egy kis hányadán közös felületet alakít ki vele. A fajlagos felület minimumra való törekvése miatt a csepp alakja gömbsüveg lesz, ami egy kör mentén fog érintkezni a szilárd fázissal (a szilárd/folyékony/gőz fázisok pedig egy körvonal mentén érintkeznek). A fémolvadéokra jellemző, egyensúlyi alakot az úgynevezett peremszöggel (Θ) jellemezhetjük, ami az érintkezési körvonalra merőleges, a folyadék/gáz határfelülettel párhuzamos egyenes és a szilárd síkja közötti csepp felőli szög. A nedvesítési tulajdonságok főként az anyagminőségtől, a felületi tulajdonságoktól (érdesség), az atmoszférától és a hőmérséklettől függenek.

A nedvesítési viszonyok változtatása nagy jelentőségűvé vált az iparban, az új anyagok és új technológiák alkalmazásával. A nedvesedési tulajdonságokat befolyásolhatjuk, például speciális bevonatokkal (nanotechnológiás víztaszító bevonat) rontva a nedvesedést. Az iparban azonban a legtöbb alkalommal a nedvesedési viszonyok javítására van szükség, amelyet elérhetünk például a hőmérséklet változtatásával, folyasztószerek, vagy megfelelő összetételű fedőporok, bevonatok alkalmazásával.

A nedvesedés számunkra megfelelő irányú befolyásolása érdekében fontos ismerni, hogy többkomponensű rendszerekben hogyan viszonyulnak egymáshoz a különböző összetételű ötvözetek nedvesedési tulajdonságai. Ha feltérképezzük különböző anyagpárok ötvözeteinek nedvesedési törvényszerűségeit, az adott feladathoz, technológiához optimálisan felhasználható anyagot tudunk választani.

Azon termékek legyártásánál, ahol több ciklusú forrasztásra van szükség, az újrahevítések hatására létrejövő nedvesedés romlás miatt egyes forrasztások kivitelezhetetlenné válhatnak. Ez a jelenség főként az önbevonattal rendelkező NYÁK lemezeknél lép fel.

A Gépjárművek és Járműgyártás Tanszéken kifejlesztésre került egy berendezés, amely alkalmas a nedvesedési viszonyok magas hőmérsékletű, inert, cserélhető atmoszféra alatti vizsgálatára. TDK munkám keretein belül ennek a berendezésnek a fejlesztésébe, illetve egy átfogó kísérletsorozatba kapcsolódtam be. Kísérleteim során nagy jelentőséggel bírt a mérések azonos körülmények közötti lebonyolítása, mivel a mérési körülmények közvetlenül befolyásolhatják a mérési eredményeket, megamisíthatják azt.

Dolgozatom célja, a nedvesedési tulajdonságok befolyásolásának meghatározása különböző paraméterek változtatásával. Összehasonlító vizsgálatok elvégzése különböző fluxokkal gyártott forrasztások nedvesedése között, valamint különböző összetételű forrasztóötvözetek esetén.

2. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

2.1 FORRASZTÁS TECHNOLÓGIÁJA

Egyes alkatrészekből vagy szerkezeti csoportokból kész gyártmányokat különféle kötési eljárásokkal lehet összeállítani. A szerkezeti elemek oldható vagy nem oldható kötéssel erősíthetők egymáshoz. Az oldható kötések (csavározás, csapos kötés, szorítókötés) lehetővé teszik az alkatrészek többszöri összeerősítését vagy szétszerelését. Ezzel szemben a nem oldható kötések (hegesztés, ragasztás) csak a kötési helyek, illetve a szerkezeti elemek megsértésével vagy szétroncsolásával oldhatók. Forrasztás esetén a forrasztóanyag kiolvasztásával általában a szerkezeti elemek tönkremenetele nélkül oldható a kötés. Az alkalmazandó eljárás műszaki és gazdasági szempontok alapján választható ki. Az eljárás kiválasztása után azonban mindenekelőtt arra kell ügyelni, hogy a szerkezet az illető kötési eljárásnak megfeleljen.

Kísérleteim során forrasztóanyagokkal foglalkozom, azok tulajdonságait vizsgálom, ezért röviden, a teljesség igénye nélkül ismertetem a forrasztást, mint technológiai folyamatot.

2.1.1 FORRASZTÁS ALAPJAI, HELYE A KÖTÉSI MÓDOK KÖZÖTT

A forrasztás során az összekötendő fémeket az alapanyagok szolidusz hőmérsékleténél kisebb hőmérsékletre hevítve, és a még kisebb olvadási hőmérsékleti tartományú forrasztóanyagot megömlesztve hozzuk létre a kötést. Mivel a forrasztási technológia kevésbé ismert eljárás, mint a hegesztés, és sokszor nem egyértelmű a különbség, ezért a következőkben mindkét eljárást definiálom, és a későbbiekben ezt tekintem meghatározónak.

A forrasztás olyan termikus eljárás, amely alkatrészek összekötésére és rétegezésére a forrasztóanyag megolvasztásával (megömlesztéses forrasztás) vagy a határfelületnél bekövetkező diffúzióval (diffúziós forrasztás) kialakuló folyékony fázis megszilárdulásával jön létre. A forrasztási hőmérséklet az alapanyag szolidusz hőmérsékletét nem éri el [DIN 8505, 3, 4].

A hegesztés olyan oldhatatlan termikus kötési eljárás, amelynél a munkadarabokat hővel és/vagy nyomással hozaganyag alkalmazása nélkül vagy – az alapanyaggal azonos vagy ahhoz hasonló összetételű – hozaganyaggal egyesítik [DIN 8593, 3, 4].

Tehát a forrasztás a fémek megömlés nélküli egyesítése, megömlesztett forraszanyaggal, amelynek olvadási hőmérséklete kisebb, mint a forrasztandó fémeké. A lágy- és keményforrasztás közötti választóvonalnak nemzetközileg a 450°C hőmérséklethatárt tekintik. Eszerint lágyforrasztás a 450°C alatt olvadó, és a keményforrasztás a 450°C felett olvadó forraszanyaggal végzett forrasztás [5].

Mind a hegesztés, mind a forrasztás fémes kötések készítésére alkalmas. Az anyagok fémes kapcsolatát mindkét eljárás során megömlesztett fémes kötőanyag létesíti. Bár a hegesztés és a forrasztás fogalmaira van egyértelmű meghatározás, mégis adódik a két eljárás elhatárolásában bizonytalanság. A hegesztés fémes szerkezeti anyagok egyesítése hő vagy nyomás, esetleg mindkettő hatásával hasonló jellegű, közel azonos olvadási hőmérsékletű anyag hozzáadásával vagy anélkül. Hegesztéskor tehát mind az alap-, mind a hegesztőanyag megömlik, míg forrasztáskor csak a kötőanyag. Ezekből a különbségekből következik a műszaki és gazdasági jelentőségük. Amíg a forrasztási hőmérséklet az újrakristályosodási és egyéb kritikus hőmérsékletek alatt marad, el lehet kerülni a nem kívánatos szövetátalakulásokat, belső feszültségeket és vetemedéseket. A kisebb hőbevitel következménye a kisebb költségráfordítás. Technológiai, valamint gazdaságossági előnyei folytán mind nagyobb mértékben alkalmazzák a különféle iparágakban.

A forraszanyagokkal szembeni elvárás, hogy képezzen szilárd oldatot az alapanyaggal, olvadási hőmérséklete legyen kisebb az alapanyag szolidusz hőmérsékleténél. A forraszanyag olvadási hőmérséklet tartományán azt a hőmérséklet tartományt értjük, amely a megömlés kezdetétől a teljes folyékony halmazállapot eléréséig tart. A szűkebb olvadási tartománnyal rendelkező forraszanyagok kedvezőbbek abból a szempontból, hogy a megolvadáskor nem vagy kisebb mértékben maradnak vissza szilárd részek az olvadéokban, amelyek hátráltatnák a szűk réseknél a réskitöltési képességet. A nagyobb olvadási tartományú forraszanyagok jól alakíthatók, megolvadt állapotban szétkenhetők és nagyobb lyukak, mélyedések kitöltésére alkalmasabbak. A forraszanyagok kiválasztásánál a következő szempontokat kell figyelembe venni: az alapanyag

összetétele, előzetes kezelése (hő és mechanikai), az anyagpárosítások és a hozaganyag mennyisége. A forrasztó berendezés típusa, a forrasztás hőmérséklete, a későbbi hőkezelések, méretek és tűrések, a munkabiztonság és a gazdaságosság [6, 7].

2.1.2 FORRASZTÁS MENETE, FORRASZTÁSKOR LEJÁTSZÓDÓ FOLYAMATOK

Forrasztáskor – függetlenül a forrasztandó alapfémektől, a felmelegítés módjától és a szükséges hőmérséklettől – a következő műveletek végzendők:

- A munkadarabok előkészítése.
- A munkadarabok megtisztítása a felületét borító idegen anyagoktól.
- A forrasztási hely felmelegítése a forrasztási hőmérsékletre.
- A forrasztási hely megtisztítása folyasztószerrel.
- A forraszanyag adagolása, megolvasztása és a kötés elkészítése (forrasztási folyamat).
- A forrasztási helyek lehűtése és utókezelése.

Előkészítés

Az előkészítésbe beletartozik az összeforrasztandó részek rögzítése (illesztéssel, szorítással), azoknak a forrasztás szempontjából legalkalmasabb helyzetben tartása, hogy a műveletet zavartalanul hajthassuk végre. Adott esetben az előkészítéshez számítható a forraszanyagnak a kötési hézagba való elhelyezése és a folyasztószer felhordása is.

Tisztítás

A tisztítás kiemelt jelentőségű a sikeres forrasztás érdekében. Minthogy a forraszanyag csak tiszta fémfelületet nedvesít jól, a forrasztandó részeket gondosan meg kell tisztítani a rátapadó idegen rétegektől. A vastag oxid-, reve- és salakrétegek eltávolításához mechanikus felület-előkészítésre van szükség, amely köszörüléssel, reszeléssel vagy hántolással végezhető el, de használható kémiai tisztítás is. Frissen megmunkált és hengerelt vagy húzott fémeket nem kell különlegesen megtisztítani, de minden forrasztási munka megkezdése előtt ügyelni kell arra, hogy a forrasztási felületeken ne legyen olaj vagy zsír. Ezek legtöbbször port és egyéb szennyezést kötnek le, amelyek a forraszanyag folyását akadályozzák. Hasonló hatásúak a magas hőmérsékleten

keletkező bomlási termékek is, mint szilárd kérgesedések, amelyek legtöbbször kivált karbonok alakjában jelentkeznek a felületen.

Forrasztott kötés létrehozása

A forrasztási helynek a forrasztási hőmérsékletre való felmelegítése a forrasztás munkafolyamatának egyik legfontosabb része, minthogy a forrasztóanyag csak egyenletesen és megfelelően felhevített munkadarabon folyik és köt kifogástalanul. A hőátadás irányától függően megkülönböztetünk direkt és indirekt melegítést. Direkt melegítéskor a hőközlés egyidejűleg hat a forrasztóanyagra és a munkadarabokra. Kisebb tömegénél fogva a forrasztóanyag jelentősen rövidebb idő alatt éri el a forrasztási hőmérsékletet, a folyékony forrasztóanyag cseppeket alkot és eltávolodik a forrasztási hézagtól, tehát a munkadarabot nem nedvesíti. További hőbevitel a forrasztóanyag túlhevítéséhez vezet. Megváltozhat a vegyi összetétele, így a tulajdonsága is. Mire a munkadarabok is elérik a szükséges hőmérsékletet, előfordulhat, hogy nem áll már rendelkezésünkre (legalábbis nem elegendő mértékben) forrasztóanyag, hogy a forrasztási hézagot kitöltse. Indirekt felmelegítéskor először a munkadarabot hevítjük fel és azután hővezetés útján a forrasztóanyagot. A forrasztóanyag megolvad, szétterül és kitölti a forrasztási hézagot. Az indirekt felmelegítés előnyösebb, mint a direkt hevítés.

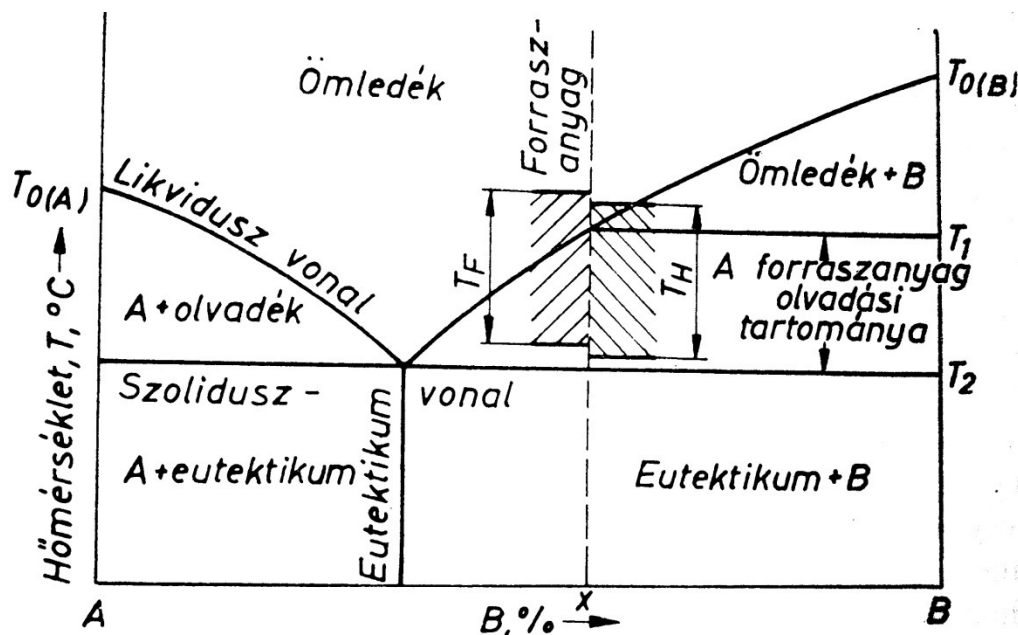
A folyasztószer feladata, hogy a munkadarabokon a tisztítás után visszamaradt és a felmelegítéskor újra képződött vékony oxidrétegeket eltávolítsa, továbbá, hogy az alapanyagokat és a forrasztóanyagot az oxidációtól védje. A folyasztószer egyúttal elősegíti a nedvesítést és a forrasztóanyag szétterülését a munkadarabokon. A folyasztószer azonban nem alkalmas és nem használható a szennyeződés, vastagabb oxid- és reverétegek eltávolítására. Forrasztópaszta esetében a folyasztószer általában gyárilag bele van keverve a pasztába, nem szükséges külön folyasztószer hozzáadása.

Miután a munkadarabok elérték a forrasztási hőmérsékletet, következik a forrasztóanyag adagolása, megolvasztása és a kötés elkészítése. A forrasztóanyag adagolása elmarad, ha a forrasztóanyagot a munkadarabok előkészítésekor a megfelelően kialakított forrasztási részbe helyezik el.

Nagyon eltérő hőtágulási tényezőjű anyagok forrasztásakor forrasztási feszültségek keletkezhetnek, és ez bizonyos körülmények között a szerkezeti elem töréséhez vezethet. Hogy ezt elkerüljük, illetve a legkisebb mértékre szorítsuk, a munkadarabokat

kontrolláltan szükséges lehűteni a forrasztási hőmérsékletről szobahőmérsékletre. A forrasztott kötés hűlése hatással van a kötésben kialakuló szemcseszerkezetre. Lassú lehűtés esetén durva szemcseszerkezet alakul ki a kötésben, aminek hatására a kötés veszít a rugalmasságából, rideg lesz.

A forrasztási helyek utánkezelése általában a forrasztott daraboknak a folyasztószer maradványaitól való megtisztítását jelenti. Higroszkópos folyasztószer-maradványok korróziós jelenségeket idézhetnek elő, ezért lemosással el kell távolítani vagy vegyi utókezeléssel közömbösíteni.



1. ábra: Eutektikus ötvözet állapotábrája [6]

($T_{0(A)}$ az A fém olvadáspontja; $T_{0(B)}$ a B fém olvadáspontja; T_1 likvidusz hőmérséklet;

T_2 szolidusz hőmérséklet; T_F forrasztási hőmérséklet; T_H folyasztószer hatásterülete)

Forraszötvözetek olvadási tulajdonságai

Valamely forraszanyag olvadási tartományán azt a hőmérsékletet értjük, mely a megömlés kezdetétől (szolidusz hőmérséklet) a teljesen folyékony halmazállapotig (likvidusz hőmérséklet) terjed (1. ábra). A forraszanyagoknak összetételüktől függően keskeny vagy széles olvadáspont-tartományuk van. Az olvadáspont-tartomány nagysága főképpen a tömegforrasztások esetén fontos. A széles olvadáspont-tartományú forraszanyagok a szolidusz hőmérséklet elérésekor csak részben ömlenek meg és olyan ömledéket képeznek, amelyek még szilárd fázist is tartalmaznak. Az elsődleges

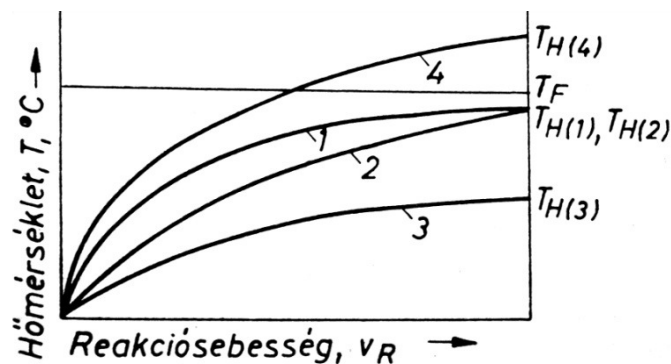
ömledék befolyik és kitölti a forrasztási rést. Emellett bizonyos mennyiségű szilárd részecskéket is magával visz a forrasztási hézagba. Olyan forrasztanyagok esetén, amelyeknek keskeny az olvadási hőmérséklet-tartományuk vagy határozott olvadáspontjuk van, és nem hajlamosak a kiválásra, nem következik be az elsődleges megolvadás és meg nem olvadt visszamaradó részecskék szétválása, minthogy a szolidusz és likvidusz hőmérséklet igen közel van egymáshoz, vagy éppen egybe esik. Ennek az előnye, hogy a teljes forrasztanyagot fel lehet használni a forrasztási hézag kitöltésére. A forrasztanyag-felhasználás tehát csekély, a gazdaságosság nő. Kézi forrasztás esetén az olvadási hőmérséklettartomány nem olyan jelentős, mert a forrasztanyagot a forrasztási helyhez akkor visszük oda, amikor az összekötendő alkatrészek elérték a forrasztási hőmérsékletet. Bizonyos forrasztási munkáknál nagy előnyt tulajdonítanak a széles olvadási hőmérséklettartománynak, mert az ilyen forrasztanyagok igen jól alakíthatók. Ezeket félfolyékony állapotban kifogástalanul szét lehet kenni és így jól kitölthetők velük a mélyedések, továbbá a hibák kijavítására alkalmasak [6].

Folyasztószer használata

Minden forrasztási munka alapfeltétele, hogy a munkadarabok felületei oxidrétegektől mentesek legyenek, hogy azokat a forrasztanyag nedvesíteni tudja. Az oxidréteg eltávolítására folyasztószert használunk, amelyet a forrasztási felületre viszünk fel, és amelynek a forrasztási hőmérséklet alatt kell hatásosnak lennie. Az a hőmérséklet, amelyen a folyasztószer hatni kezd, a folyasztószer optimális (legkedvezőbb) hőmérséklete. A forrasztási hőmérséklet növelése vagy a forrasztási idő meghosszabbítása bizonyos határon túl káros, elsősorban azért, mert a folyasztószer hatása csökken. A folyasztószer használhatósága tehát főképpen a hőmérséklettől függ [8].

Optimális hőmérséklettartomány az, amelyen belül a folyasztószer vagy a forrasztási védőgáz a meglevő oxidréteget eltávolítja, valamint a munkadarabokon a nedvesítést, a folyékony forrasztanyag szétterülését lehetővé vagy kedvezővé teszi. A legtöbb folyasztószer olvadt állapotában kerül felhasználásra, így olvadási illetve likvidusz hőmérséklete a forrasztási hőmérsékleten vagy alatta kell legyen. A folyasztószer reakciósebessége és a hőmérséklet közötti összefüggés jellegét a 2. ábra szemlélteti. Jó

folyasztószerrel (1. görbe) a forrasztási sebesség jelentősen ingadozhat anélkül, hogy a hatásos hőmérséklet lényegesen változna. Ha azonban a folyasztószer már alacsony hőmérsékleten is aktív (2. görbe), nagy forrasztási sebességet kell alkalmazni, hogy a folyasztószernek az oxidokkal való idő előtti telítésének veszélyét és a forrasztáskor hátrányos hatását elkerüljük. Fokozott mértékben érvényes ez a 3. görbe szerinti folyasztószerre, amelynek a hatásos hőmérséklete igen alacsony és ezért erre az esetre különösen jellemző. Lángforrasztásnál használatos olyan folyasztószer, amely csak a forraszanyag olvadáspontja felett fejti ki tisztító hatását (4. görbe). [9]



2. ábra: Fluxok aktiválódási sebességeinek alakulása [9]

(T_F forrasztási hőmérséklet, T_H aktiválódási hőmérséklet)

Forrasztás esetében is a 2.2.2. fejezetben leírt nedvesítési folyamat és lehetőségek adottak.

Általában a 40° -nál nagyobb nedvesítési szög már nem nedvesít elegendően. Ezért olyan folyékony ötvözetek, amelyek nem nedvesítenek, forraszanyagként nem használhatók. A nedvesedési szög nagyságából lehet következtetni a forrasztás helyére. A forrasztási helyek kifogástalanok, ha a forraszanyag laposan és homorúan helyezkedik el, a nedvesítési szög pedig 20° alatt van. A 20° és 80° közötti nedvesítési szögből részleges nedvesítésre lehet következtetni. Ilyen forrasztási helyeket még a helyzettől függően éppen el lehet fogadni, de lehetőség szerint el kell ezeket a lehetőségeket kerülni. A folyasztószer nedvesítése és szétterülése után a forraszanyagnak a folyasztószer ki kell szorítania, tehát a forraszanyag nedvesítési képességének nagyobbnak kell lennie, mint a folyasztószeré.

A forraszanyag szétterülése nagymértékben függ az alapanyagnak a folyékony forraszanyagban való oldóképességétől. Ha a forraszanyag kölcsönösen csekély

oldóképességű, a forraszanyag megömlése után azonnal kezdődik az anyag szétterülése, ami a növekvő forrasztási idővel alig változik.

A forraszanyag és az alapanyag közötti kötés főként az atom- és molekulakicserélődés miatt jön létre, kevésbé az atomos és molekuláris erők hatására. A kötési folyamat előfeltétele azonban mindig a folyékony forraszanyag és az alapanyag közötti nedvesedés. Csak a forraszanyag jó nedvesítő képességével, tehát az alapanyag határfelületén szétterülő folyadékréteggel érhető el a forrasztáskor szoros - a kölcsönös diffúzióhoz szükséges - érintkezés a forraszanyag és az alapanyag között.

A legtöbb keményforrasztáskor viszont az alapanyag és a forraszanyag reakciója követi a nedvesítési folyamatot. A lehetőségek szerint fellépő reakciókhoz tartozik az alapanyagnak a folyékony forraszanyag által vegyes kristályképződéssel vagy fémek között vegyületek létrejöttével járó oldódása, a forraszanyagnak az alapanyag szemcsehatárain bekövetkező diffúziója, és az atomi diffúzió. A forrasz és az alapanyag alkotórészeinek kölcsönös diffúziójával a nedvesítési folyamat közben ötvözetzőna jön létre.

2.1.3. FORRASZTOTT KÖTÉS LÉTREHOZÁSÁHOZ SZÜKSÉGES HŐMÉRSÉKLETI VISZONYOK ÖSSZEFOGLALÁSA

Valamely alapanyagra jutó folyékony forraszanyag csepp csak akkor létesíthet kötést, ha a forraszanyag és az alapanyag érintkezési helyén a hőmérséklet a forraszanyag szolidusz hőmérsékleténél nagyobb. Ez csak akkor lehetséges, ha a csepp elég nagy ahhoz, hogy az érintkezés helyén a forraszanyag szolidusz hőmérsékletének eléréséhez szükséges hőt le tudja adni abban az esetben is, ha az alapanyag felületi hőmérséklete a forraszanyag csepp rájutása előtt a forraszanyag szolidusz hőmérséklete alatt van.

Az alapanyagra jutó folyékony forraszanyag csepp csak akkor létesíthet kötést, ha az alapanyag felületét a folyékony forraszanyag rájutása előtt a forraszanyag szolidusz hőmérséklete fölé melegítették.

Ezekből a kötés előfeltételeként azt a végkövetkeztetést lehet levonni, hogy a forraszanyag, valamint az alapanyag határfelületein folyékony rétegnek kell lennie, aminek feltétele, hogy a határfelületek mindenkor a forraszanyag szolidusz hőmérséklete felett legyenek, összhangban a forrasztószer optimális hőmérsékletével.

2.2. A NEDVESEDÉS ELMÉLETE

Az előző fejezetben a forrasztási kötések kialakulásakor többször szó esett a nedvesedési tulajdonságokról, amelyek alapvetően határozzák meg a forrasztott kötés tulajdonságait. Ebben a fejezetben részletesen ismertetem a nedvesedés fogalmát, és elméleti háttérét annak érdekében, hogy megértsük mi a jó nedvesítés feltétele, hogyan változtathatjuk számunkra kedvező módon azt.

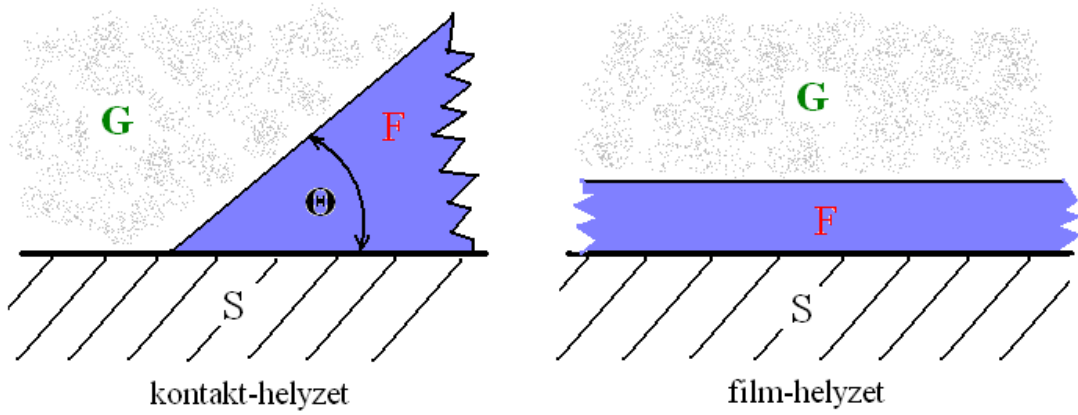
A nedvesedőképesség elsősorban a folyadékok szilárd felületeken való szétterülésével jellemezhető. Ha a folyadékcsepp szilárd fázishoz ér, akkor jellemzően felületének legalább egy kis hányadán közös felületet alakít vele. A fajlagos felületminimumra való törekvés miatt a csepp alakja gömbsüveg lesz, ami egy kör mentén fog érintkezni a szilárd fázissal. Ennek az egyensúlyi alaknak közvetlen mérőszáma a peremszög (Θ), ami az érintkezési körvonalra merőleges, a folyadék/gáz határfelülettel párhuzamos egyenes és a szilárd felület síkja közötti szög, azaz a két fázis érintkezése mentén kialakuló illeszkedési szög.

A szétterülés mértékét a szilárd test és a folyadék molekuláinak a határfelületein végbemenő kölcsönhatásaik szabják meg. A határfelületek tulajdonságait – így a szilárd felületek nedvesítő képességét is – a legkülső, néhány atomnyi távolságra terjedő réteg, annak is főként a folyadékfázissal közvetlenül érintkező atomjai vagy atomcsoportjai határozzák meg. Ezt a független felületi hatások elvének nevezzük [10]. Ebből az elvből következik, hogy a nedvesítő képességet a megfelelő szerkezetű és irányítottágú adszorpciós rétegek kialakulásával tudatosan befolyásolhatjuk.

A szilárd/folyadék határfelületi kölcsönhatásoknak az egymással érintkező felületek geometriai és méretviszonyai szerint három altípusa van:

- Érintkezéses (adhéziós v. kontakt) nedvesedés;
- Bemerülékes (immerziós) nedvesedés;
- Szétterülékes (film) nedvesedés [10].

A szilárd/folyadék/gőz háromfázisú rendszer két formában jelenhet meg (3. ábra) aszerint, hogy a három fázis termodinamikai (és mechanikai) egyensúlya során kontakt-helyzet alakul ki, vagy pedig a folyadék teljesen szétterül a szilárd felületen, és összefüggő nedvesítő réteget alkot rajta (film-helyzet) (3. ábra).



3. ábra: A szilárd (S) - folyadék (F) - gőz (G) háromfázisú rendszer egyensúlyi konfigurációi [11]

A kontakt-helyzet egyensúlyi feltételét a Young-egyenlet rögzíti:

$$\cos \Theta = \frac{(\gamma_{SV} - \pi_{SG}) - \gamma_{SF}}{\gamma_{FG}} = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SF}}{\gamma_{FG}}, \quad (1)$$

ahol

Θ : peremszög (nedvesítési szög),

γ_{SG} : szilárd/gőz határfelületi feszültség,

γ_{SV} : szilárd/vákuum határfelületi feszültség,

γ_{SF} : szilárd/folyadék határfelületi feszültség

γ_{FG} : folyadék/gőz határfelületi feszültség,

$\pi_{SG} = \gamma_{SV} - \gamma_{SG}$: az adszorbeált gőz „kétdimenziós” felületi nyomása [10].

A film helyzetet a szétterülési együttható (S_{FSG}) definícióegyenlete írja le:

$$S_{FSG} = \gamma_{SG} - (\gamma_{SF} + \gamma_{FG}) \geq 0. \quad (2)$$

A (2) definícióegyenletből következik, hogy a szétterülés szükséges és elégséges feltétele:

$$\gamma_{SG} \geq \gamma_{SF} + \gamma_{FG}. \quad (3)$$

Szükséges, (de nem elégséges) feltétele pedig:

$$\gamma_{SG} > \gamma_{FG}. \quad (4)$$

Szétterülés tehát csak olyan szilárd felületen következhet be, amelynek még a π_{SG} felületi nyomással csökkentett felületi feszültsége is nagyobb, mint a kérdéses folyadéké [10]. Ellenkező esetben a teljes szétterülés elmarad, és a folyadék a kontakt egyensúly helyzetbe áll be.

A kontakt-helyzetből a film-helyzetbe való kritikus átmenetből, azaz az éppen bekövetkező szétterülésből és a (2)-ből adódik, hogy

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SF} + \gamma_{FG}. \quad (5)$$

Az alábbiakban még két jellemzőt definiálunk, a reverzibilis adhézios munkát (6) és a nedvesedési feszültséget (7). A W_{FSG} , reverzibilis adhézios munka (adhézios energia):

$$W_{FSG} = \gamma_{SG} + \gamma_{SF} - \gamma_{FG}. \quad (6)$$

Mivel az adhézios energia 0-nál mindig nagyobb pozitív szám, és a szilárdoldatokkal végzett vizsgálataim fém-kerámia párokra terjednek ki, ezért az adhézios energia a következő értelmezési tartománnyal bír:

$$0 < W_{FSG} < \gamma_{SG} + \gamma_{FG}. \quad (6a)$$

A nedvesedési feszültség (T_{FSG}), a szilárd/gőz és szilárd/folyadék határfelületi feszültségek különbsége:

$$T_{FSG} = \gamma_{SG} - \gamma_{SF} \quad (7)$$

A (2), (6), és (7) egyenletnek a Young-egyenlettel (1) való összehasonlítása az alábbi összefüggéseket szolgáltatja:

$$W_{FSG} = \gamma_{FG} (\cos \Theta + 1) \quad (8)$$

$$S_{FSG} = \gamma_{FG} (\cos \Theta - 1) \quad (9)$$

$$T_{FSG} = \gamma_{FG} \cos \Theta. \quad (10)$$

Ezeket az egyenleteket nevezhetjük a nedvesedés három alaptípusára vonatkozó definícióegyenleteknek [10].

Fontos, hogy az összefüggésekben szereplő γ_{SG} nem a szabad szilárd felületre vonatkozik, hanem a folyadék telített gőzével adszorpciós egyensúlyban álló felületre,

értéke tehát az adszorbeált réteg π_{SG} felületi nyomásával kisebb a vákuummal érintkező felület γ_{SV} értékénél:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SV} - \pi_{SG}. \quad (11)$$

A (2) és (6) képlet kombinációjából felírható a Young-Dupré egyenlet (8). Ez a képlet lehetővé teszi két mért értékből az adhéziós energia meghatározását, ami definíció szerint annál nagyobb, minél erősebb a kötés a szilárd és folyékony fázisok között, egységnyi felületre vonatkoztatva:

$$W_{FSG} = \gamma_{FG} (\cos \Theta + 1). \quad (8)$$

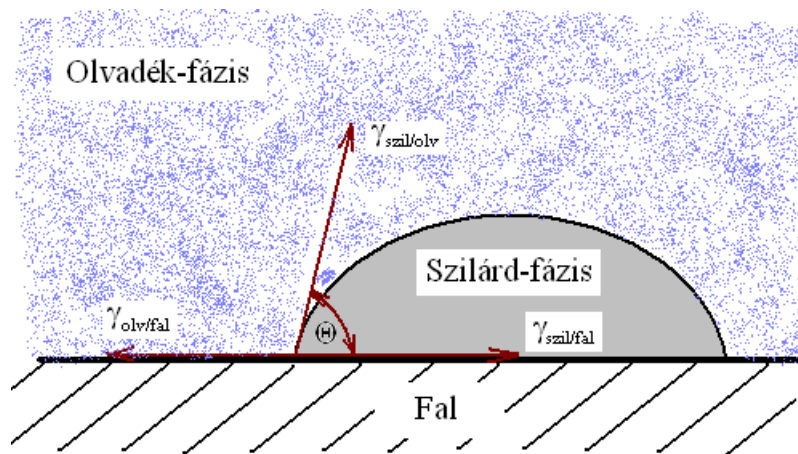
Az adhéziós energia különböző fizikai és kémiai kölcsönhatások miatt lép fel. Két fém között pl. fémes, míg két ionos anyag között ionos kölcsönhatásra vezethető vissza az adhéziós energia. Ezek a párosítások erős adhéziós energiát adnak, ami általában tökéletes nedvesítéshez vezet (a hasonló szereti a hasonlót elvnek megfelelően). Ha a két fázis különböző kémiai kötésű, akkor közöttük a kapcsolatot csak a gyenge Van der Waals kötőerők tudják megteremteni, melynek nagyságrendje $0,1 \text{ J/m}^2$. Összevetve ezt a fémek jellemzően 1 J/m^2 -es felületi feszültségével, a (8) képletből 154° -os peremszög érték adódik, azaz a fémolvadék cseppek jellemzően nem nedvesítenek semmilyen nem fémes felületet. Ezért van az, hogy a parkettán jól lehet focizni a szinte gömb alakú higanycseppekkel. A rossz nedvesítés miatt gurulnak a felületen és viszonylag nagy méretben egyben is maradnak a nagy felületi feszültség miatt. Vízcseppekkel ez nem valósítható meg. A víz felületi feszültsége ugyanis $0,07 \text{ J/m}^2$ nagyságrendű, amire a (8) képletből ($W = 0,1 \text{ J/m}^2$ mellett) 65° -os peremszög adódik. Tehát a víz a szilárd anyagok többségét általában nedvesíti. Szinte feltétel nélküli tökéletes nedvesítés a szerves folyadékoktól várható, melyek felületi feszültsége $0,03 \text{ J/m}^2$ nagyságrendű, azaz a képletből ($W = 0,1 \text{ J/m}^2$ mellett) 0° peremszög adódik [12].

A vízbázisú vagy alkohol oldószeres folyasztozszer a forrasztandó felületeket jól nedvesítik. A folyasztozszer a felületi oxidokat oldja és javítja a fémfelületen a forrasz nedvesítési tulajdonságát.

2.2.1. A HATÁRFELÜLETI ENERGIA (γ)

A termodinamikai rendszerek fázisait határfelületek választják el egymástól. A határfelületen lévő molekulák, atomok, ionok más környezetben vannak, mint a fázis belsejében lévő. Így például egy folyadék/gőz határfelületen a kondenzált fázis nem teljesen lekötött erőterű szabad felületén lévő részecskékre a kölcsönhatási erők egyoldalú, a fázis belseje felé irányuló vonzást fejtenek ki. E ténynek az a következménye, hogy egyrészt a felületi réteg energiatartalma eltér a folyadék belsejének energiatartalmától, másrészt a folyadék szabad felszíne adott viszonyok mellett a lehető legkisebbre akar összehúzódni. A fázishatáron, az egységnyi felület energiatöbbletét a fázis belsejéhez képest, határfelületi energiának nevezzük (jele: γ , mértékegysége: J/m^2) [11].

A fémolvadék hűlése során kialakult szilárd fázisban (csírában) a Θ nedvesedési szög azt mutatja meg, hogy milyen méretű túlhűléssel kezdődik a dermedés (4. ábra).



4. ábra: Az olvadék hűlése során kialakult felületi feszültségi viszonyok [11]

A $\gamma_{Szil/Olv}$ elérhet olyan értéket, amely mellett az úgynevezett „heterogén nukleáció” esete léphet fel, amely érthetővé teszi, hogy a kristályosodás a falnál hamarabb elindul, tehát kisebb túlhűlésnél is megindul a dermedés.

2.2.2. A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖG TARTOMÁNYAI

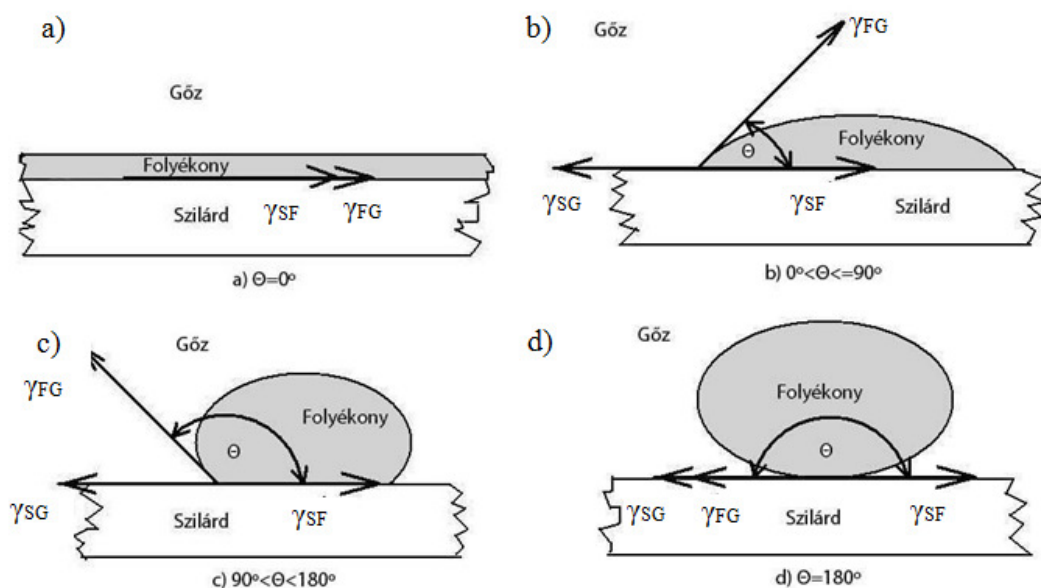
A peremszög értéke 0° akkor, ha az adhéziós energia legalább kétszerese az olvadék felületi feszültségének, azaz az adhézió olyan erős, hogy vékony, egymással kötést nem létesítő rétegekben a szilárd felületre kényszeríti az olvadékot. Ekkor tökéletes

nedvesedésről beszélünk. Figyelembe véve (6a) egyenletet ez csak akkor lehetséges, ha a szilárd felület felületi feszültsége nagyobb, mint az olvadék felületi feszültsége. Ebben az esetben azonban lehetséges az is, hogy az adhíziós energia több mint kétszerese az olvadék felületi feszültségének. Ekkor azonban a peremszög már nem ad valós információt a határfelületi energetikai viszonyokról, hiszen attól függetlenül, hogy az adhíziós energia mennyivel nagyobb az olvadék felületi feszültségének duplájánál, a peremszög 0° -os, geometriailag lehetséges határértékét mutatja (5/a ábra).

A peremszög $0^\circ < \Theta \leq 90^\circ$ között van (az olvadék nedvesíti a felületet) akkor, ha az adhíziós energia nagyobb (de kevesebb, mint kétszerese) az olvadék felületi feszültségénél, azaz az adhízió elég erős ahhoz, hogy az olvadékot egyre inkább a felülethez kényszerítse (5/b ábra). Ebben az esetben jó nedvesítésről beszélünk.

A peremszög $90^\circ < \Theta < 180^\circ$ között van (az olvadék nem nedvesíti a felületet) akkor, ha az adhíziós energia kisebb az olvadék felületi feszültségénél, azaz ha az adhízió annyira gyenge, hogy az olvadék inkább a gőzzel képez nagy közös felületet (5/c ábra). Ilyenkor rossz nedvesítésről beszélünk.

A peremszög értéke 180° (az olvadék egy ponton érintkezik a felülettel) akkor, ha az adhízió nulla a két felület között. Ilyen eset akkor fordulhat elő, ha az olvadék megszilárdul, és szilárd/szilárd fázisokat vizsgálunk (5/d ábra). Ebben az esetben nincs nedvesítés [11].



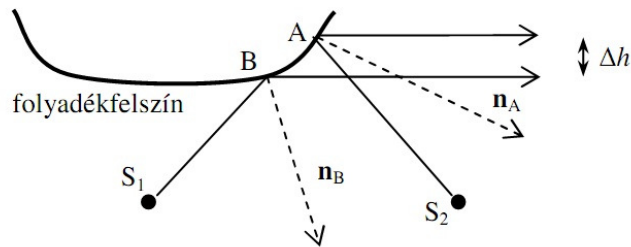
5. ábra: Szilárd hordozóra helyezett folyadékcsepp esetén a nedvesedési peremszög alakulása különböző esetekben (2/a,b,c,d) [11]

2.3. PEREMSZÖGET BEFOLYÁSOLÓ JELENSÉGEK

A nedvesedést sok tényező és jelenség befolyásolja, melyek azt javíthatják vagy ronthatják. A teljesség igénye nélkül ismertetem a fontosabbakat.

2.3.1. EÖTVÖS- SZABÁLY

Eötvös Loránd (1848-1919) nemcsak a gravitációs és elektromágneses kölcsönhatás megismerésére irányuló méréseket végzett, a molekuláris erők is érdekelték. A felületi feszültség mérésére kidolgozta az ún. reflexiós módszert [13]. Sokféle mérési módszer létezik a felületi feszültség mérésére, mégis a reflexiós módszer igen nagy előnyökkel bír a többihez képest. A mérés elrendezése az 6. ábrán látható.



6. ábra: A reflexiós módszer vázlata [26]

Eötvös két ismert helyű fényforrással, S_1 és S_2 világította meg a folyadékot. Ezek a sugarak megtörttek a folyadék felszínén. Megmérte a két forrásból vízszintesen visszaverődő sugarak függőleges távolságát, Δh -t. Az n_A és n_B normálvektorai a felületnek adódnak a források helyzetéből és abból, hogy a sugarak vízszintesen verődtek vissza. A folyadékfelszín alakja a normális irányának függvényében kiszámolható, ebből meghatározható a felületi feszültség mértéke. A módszer egyik előnye, hogy nem kell hozzá a kissé bizonytalanul mérhető illeszkedési szöget meghatározni. A módszerrel lezárt üvegedényben levő folyadék felületi feszültsége is mérhető, így meg lehet akadályozni a felület szennyeződését. Eötvös Loránd azt mutatta meg ezzel a módszerrel, hogy a felületi feszültség nem változik az időben, mint ahogy az korábbi méréseknél felmerült. Évek múltán is ugyanazt a felületi feszültségértéket tudta mérni, ami nyilvánvalóvá tette, hogy a felületi feszültség időbeli változását a korábbi mérésekben a levegőből a felületre került kosz okozta. Új módszerével Eötvös Loránd a felületi feszültség és a molekuláris paraméterek közti összefüggést kereste.

Elméleti megfontolások és mérései alapján arra jutott, hogy egyszerűen összetett folyadékokra a folyadék minőségétől függetlenül fennáll a (13) összefüggés.

$$\frac{d(\gamma v^{2/3})}{dT} = k' \quad (13)$$

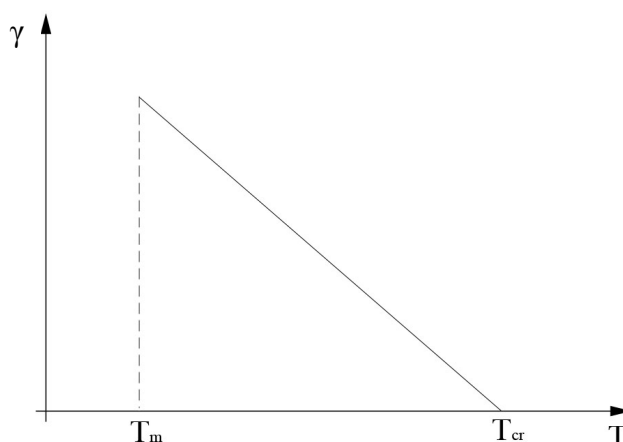
Ahol v egy folyadékrészecske térfogata, így $v^{2/3}$ a molekuláris felület, $\gamma v^{2/3}$ a molekuláris felületi energia, T a hőmérséklet K-ben kifejezve, k' pedig egy hőmérséklettől független konstans. Vagyis bármely egyszerűen összetett folyadék molekuláris felületi energiája ugyanannyit változik a hőmérséklet egységnyi emelkedésével. Mivel k' értéke nagyon kicsi, ezért inkább a

$$V_m = N_A \cdot v \quad (14)$$

moláris térfogatot (V_m) érdemes használni egy részecske térfogata helyett, ahol N_A az Avogadro-szám. Ezzel kifejezve az Eötvös-törvény gyakrabban használt alakja:

$$\gamma V_m^{2/3} = k(T_0 - T), \quad (15)$$

ahol k az Eötvös-állandó, értéke $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ J/(K} \cdot \text{mol}^{2/3})$. T_0 az a hőmérséklet, amelyen a felületi feszültség nullára csökken, erre az értékre Eötvös azt kapta, hogy közel esik a folyadék kritikus hőmérsékletéhez, T_c -hez. Egy anyagnak a kritikus hőmérsékletén megszűnik a folyadék és annak gőze közötti különbség és a fázishatár eltűnik. Az Eötvös-szabály alapján adódik az 7. ábrán látható egyenes, mely a felületi feszültséget jelöli hőmérséklet függvényében.



7. ábra: Felületi feszültség hőmérsékletfüggése az Eötvös-szabály alapján [14]

Eötvös idejében még nem voltak elég pontos mérések a kritikus hőmérsékletekre, így Eötvös még T_C -vel írta fel a törvényt. Később Ramsay angol kémikus módosította T_0 értékét:

$$T_0 = T_C - 6K \quad (16)$$

Mérések a képlethez hasonlóan kimutatják, hogy a tiszta folyadékok felületi feszültsége csökken a hőmérséklet növekedésével [14].

A peremszög és a felületi feszültség értéke a hőmérséklet függvényében a Young-egyenlet (1) alapján azonos irányban változik. Az Eötvös-szabály szerint a hőmérséklet növekedésének hatására a felületi feszültség csökken, tehát a peremszögeértékeknek is növekvő hőmérséklet mellett csökkenő tendenciát kell mutatniuk. A nedvesedés a peremszögeérték csökkenése esetében javul, így az Eötvös-szabály azt mondja ki, hogy az anyagok a hőmérséklet növekedésének hatására jobban nedvesítik a felületet.

2.3.2. MARANGONI-ÁRAMLÁS

A felületi feszültség a hőmérséklet és az összetétel függvénye. Ha egy felület különböző pontjain különböző a hőmérséklet vagy az összetétel, akkor különböző lesz a felületi feszültség is. Ekkor a (17) egyenlet alapján, a rendszernek az energiaminimumra törekvése miatt lesz az érdeke, hogy a nagy felületi feszültségű felületrészt lecserélje az alacsonyabb felületi feszültségű felületrésszel.

$$G = G_b + S \cdot V_m \cdot \gamma \quad (17)$$

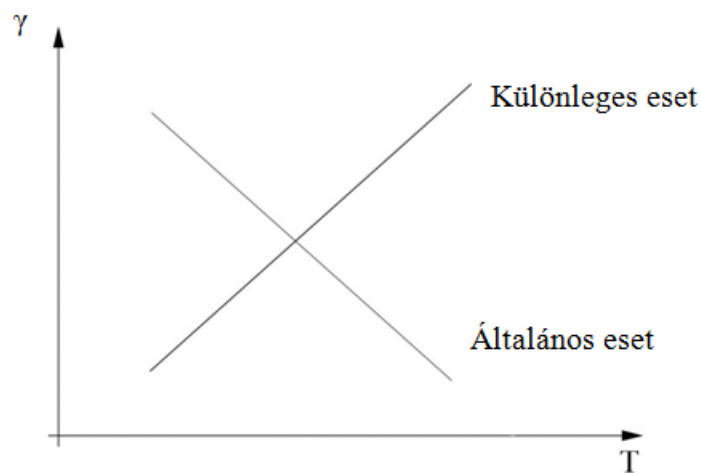
E célból a folyadék felülete mentén irányított áramlás indul el az alacsonyabb felületi feszültségű felületrész felől a magasabb felületi feszültségű felületrész felé, amit felfedezőjéről Marangoni-áramlásnak nevezünk. A Marangoni-áramlás hajtóereje:

$$\Delta_M G = S \cdot V_m \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \quad (18)$$

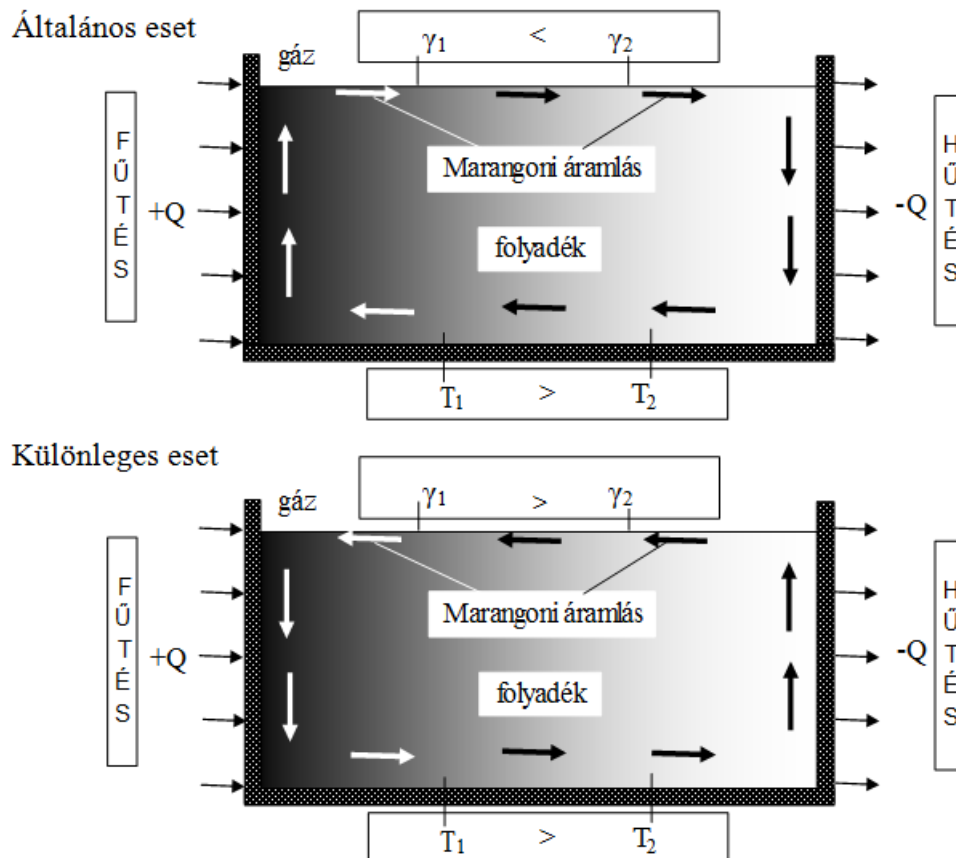
ahol γ_1 és γ_2 az 1-es és 2-es pontokban érvényes felületi feszültség. Zárt rendszerben a Marangoni-áramlás idővel megáll, mivel a rendszerben beáll az egyensúly, amikor

definíció szerint megszűnik az azonos fázisok felületén az összetétel- és hőmérséklet-különbség és ezért a felületi feszültség-különbség is.

A mérnöki gyakorlat azonban gyakran nyitott rendszerekről szól. Ha például egy tartály bal oldalát fűtjük, azaz Q hőmennyiséget viszünk be a rendszerbe, jobb oldalát pedig hűtjük, azaz Q hőmennyiséget vonunk el a rendszertől, akkor beáll egy állandósult állapot, amit a felület mentén egy hőmérséklet gradiens jellemez (a hőmérséklet a felület mentén balról jobbra fokozatosan csökken). Átlagos esetben a felületi feszültség a hőmérséklet növelésével csökken (Eötvös-szabály) (8. ábra), ezért ilyenkor a bal oldalon lesz a kisebb felületi feszültségű folyadék és a Marangoni-áramlás a felületen balról jobbra indul el (9. ábra). Ha fenntartjuk a fűtést/hűtést (azaz állandóan energiát táplálunk a rendszerbe), akkor a felületi áramlás térfogati áramlást indukál. Különleges esetekben, az ötvözetek szűk koncentrációtartományában előfordul, hogy a felületi feszültség nem csökken, hanem nő a hőmérséklet növelésével. Ekkor a Marangoni-áramlás iránya fordított lesz.

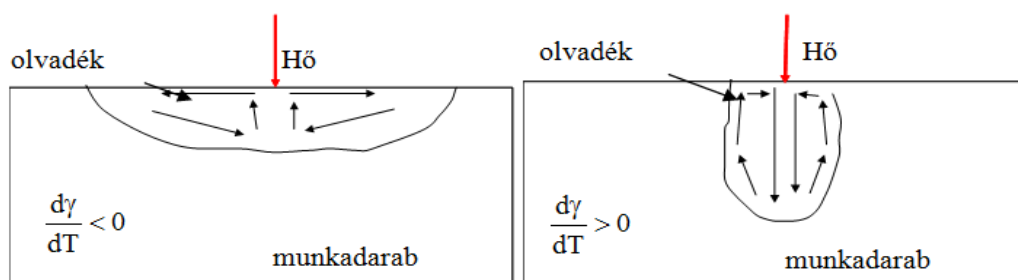


8. ábra: Felületi feszültség hőmérsékletfüggése általános és különleges esetben [12]



9. ábra: Marangoni-áramlás általános és különleges esetben [12]

Hegesztés során például egy koncentrált hőforrással olvasztják meg a fém felületét. Ekkor tehát a megolvasztott tócsa közepén lesz a forró-pont, és onnan radiálisan kifelé csökken a felületi hőmérséklet (10. ábra). Normál esetben a felületi feszültség a hőmérséklet növelésével csökken, azaz a forrópontban lesz a legkisebb a felületi feszültség. Ez oda vezet, hogy az olvadék a forró, központi pontból fog a felület mentén kifelé áramlani és ezzel radiálisan olvasztani fogja a szilárd fém felületét. Az olvasztással a forró folyadék elveszíti extra hőjét, és miközben hidegen lefelé-visszafelé áramlik, lefelé gyakorlatilag nem képes olvasztani az anyagot.



10. ábra: Marangoni-áramlás hatása hegesztéskor [4]

A mély és keskeny hegesztési varratok készítésének egyetlen esélye az, hogy meg kell fordítani a Marangoni-áramlás irányát úgy, hogy a forró folyadék ne a felületen oldalirányban, hanem középen lefelé áramoljon. Ehhez el kell érni, hogy a fémolvadék felületi feszültsége a hőmérséklet emelésével növekedjen. Ezt akkor tudjuk elérni, ha felületi fázisátalakulás, fázisszétválás során nanométer vékonyságú FeO réteg keletkezik. Ekkor megfordul a felületi feszültség hőmérsékleti koefficiensének előjele és a felületi feszültség a hőmérséklet növelésének hatására csökkenni fog [12, 15, 16, 17].

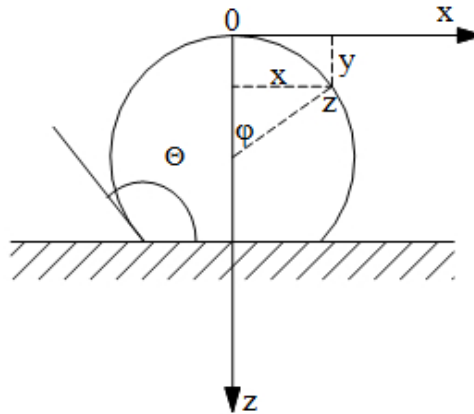
A Marangoni-áramlás felületi feszültségre gyakorolt hatása megjelenhet a nyugvó csepp módszerrel mért nedvesedési peremszög értékekben is. Ha megjelenik, akkor a felületi feszültség és a peremszögtételek a hőmérséklet függvényében az általános esettel ellentétes dőlésű változást adnak eredményül. Tehát a peremszögtételek növekedése mérhető a hőmérséklet növelésének hatására, ami azt jelenti, hogy romlanak a nedvesedési tulajdonságai az anyagnak, ha a jelenség fellép a peremszögmérés során.

2.4. A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖG MEGHATÁROZÁSI MÓDJAI

Számos módszer ismert a nedvesedési peremszög meghatározására: a nyugvó csepp módszer, adagolt csepp módszer, Wilhelmy folyadékba merített lemez módszere, nagy csepp módszer. Ezek közül a nyugvó csepp módszerét ismertetem részletesen, amelyet a méréseknél alkalmaztam.

2.4.1. NYUGVÓ CSEPP MÓDSZER

A nyugvó csepp módszernél azt vizsgáljuk, hogy milyen alakot vesz fel egy vízszintes szilárd felületre (ún. szubsztrátra) helyezett folyadékcsepp. A szilárd és a folyadék fázisok közötti nedvesedési peremszög (Θ) a 11. ábrán látható.



11. ábra: A szilárd és a folyadék fázisok közötti nedvesedési peremszög (Θ) [11]

Egy gravitációs mezőbe helyezett vízszintes felületen nyugvó csepp alakját a következő egyenlettel írhatjuk le:

$$\frac{b}{\rho} + \frac{b \cdot \sin \varphi}{x} = 2 + \frac{z}{b} \cdot \frac{(D-d) \cdot g}{\gamma_{lv}} \quad (19)$$

ahol ρ a cseppfelület görbületi sugara annak meridián síkjában, b a görbületi sugár a csepp tetején, $(D-d)$ a folyékony és a szilárd fázisok közötti sűrűségkülönbség, g a gravitációs gyorsulás, x és z pedig a csepp felületi pontjának koordinátái. Az egyenlet megoldásával megadható a felület bármely pontjának hajlásszöge, beleértve a kontaktpontot is.

Ezért a nyugvó csepp módszer alkalmas a felületi feszültség (γ_{FG}) és a kontaktszög (Θ) meghatározására. Mivel ez az egyenlet csak nehézkesen oldható meg ebben az alakban, ezért a nedvesedési peremszög meghatározásához a csepp fotózását alkalmazzák. A megfelelően nagy felbontású fotó segítségével a peremszög meghatározható (megszerkeszthető), ha érintőt húzunk a csepp kontúrvonalához az érintkezési pont közelében.

A nyugvó csepp módszer esetében szükséges lehet a peremszögértékeken kívül több más, a csepp alakjához, geometriájához kapcsolódó érték mérése is, melyekkel a peremszögértékek kompenzálhatók. Ilyen például a csepp és a szubsztrát érintkezési felülete, amelynek területe nem változik a mérés során. Mérhető a csepp magassága és legnagyobb átmérője, ezek akkor kellenek, ha változik a csepptérfogat, például a minta ötvözetet képez az alappal [9]. A minta tömegének peremszögvizsgálat előtti és utáni mérése is fontos, mert így információ kapható a minta által a mérés során elnyelt vagy abból eltávozott anyag mennyiségéről. Például megállapítható, hogy mennyi anyag távozik, ha magasabb hőmérsékleten végzünk peremszögvizsgálatot, mint a vizsgált anyagnak vagy ötvözet egyik alkotójának forráspontja. A nyugvó csepp módszer a minta anyagszármazására és a vizsgált térfogatra érzékeny, ezért nagy hőmérsékleti tartományban végzett peremszögmérés esetében a hőtágulásból származó hibák számottevőek lehetnek.

A nyugvó csepp módszer számos előnnyel rendelkezik, amelyek nagy jelentőséggel bírnak, mikor olvadt fémekkel dolgozunk. Ilyenek lehetnek a következők: a módszer egyszerűsége, kis anyagszármazás is elegendő a mérésekhez, valamint a szilárd rész egyszerű geometriai kialakítása. A minta zárt berendezésbe helyezhető, hevíthető, megfelelő atmoszféra hozható létre és távolról fényképezhető.

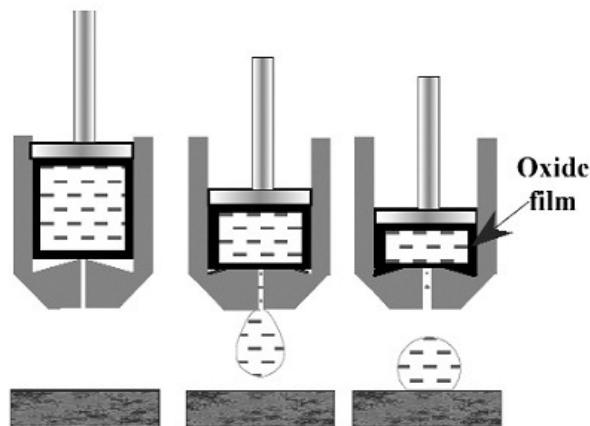
A módszer fő hátránya a nehéz reprodukálhatóság, amelyet nagyrészt a folyadékcsepp felszínének oxidációja okoz. Ez kellően tiszta anyagok alkalmazásával és megfelelő körülményekkel mérsékelhető, kiküszöbölhető [11, 18].

2.4.2. ADAGOLT CSEPP MÓDSZER

A nyugvó csepp módszer továbbfejlesztett változata az adagolt csepp módszer (12. ábra). Az olvadék egy nem nedvesített, kémiaiilag közömbös zárt kerámia csőben

van és innen adagolható a szubsztrát felszínére egy a cső alján lévő kis furaton keresztül. Az adagolást inert gáz nyomása vagy dugattyú is szabályozhatja.

A megfelelően nagy felbontású fotó segítségével a peremszög meghatározható (megszerkeszthető), ha érintőt húzunk a csepp kontúrvonalához az érintkezési pont közelében.



12. ábra: Adagolt csepp módszer [10]

A nyugvó csepp módszerhez képest jobb, mert a folyadékcsepp felszínének szennyeződése kiküszöbölhető, az adagolás során megszakad a kapcsolat a folyékony fém és a szennyezések, oxidok között. Hátrány, hogy az adagoló berendezés miatt bonyolultabb a rendszer, valamint rosszul nedvesítő esetben a mérés nehézkes, mert a minta legurul a szilárd fázisról, szubsztrátról [19, 20].

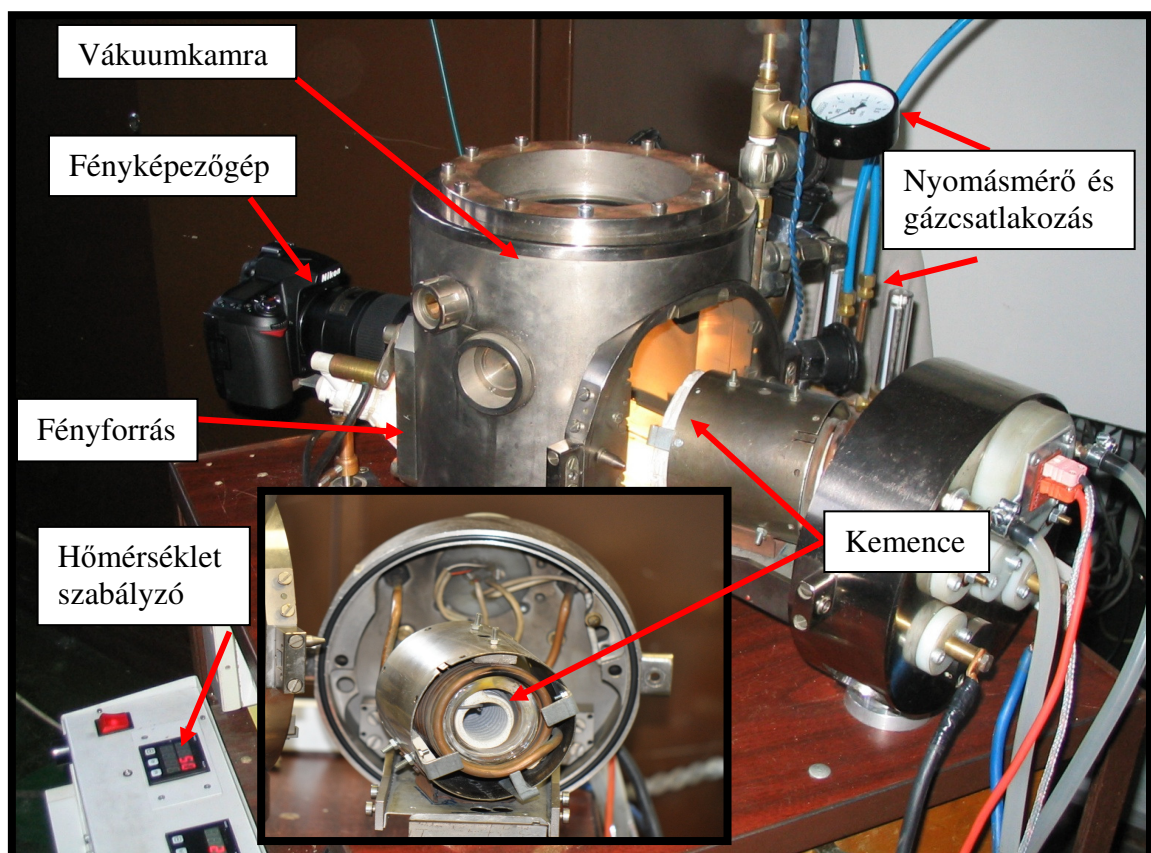
2.4.3. PEREMSZÖGMÉRÉSI MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Különbséget az eljárások között az egyszerűség és a pontosság jelent. Méréseim során a peremszög közvetlen mérése volt a célszerű, így a nyugvó csepp, adagolt csepp, nagy csepp, folyadékba merített lemez módszer közül az egyszerűen megvalósítható, könnyen mérhető nyugvó csepp módszere volt a legcélravezetőbb. A forraszpaszták ipari felhasználásának módját ez a módszer közelíti legjobban. A pasztafelvitel a stencilnyomás metódusához hasonló.

3. A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖGMÉRŐ BERENDEZÉS ÉS A PEREMSZÖGMÉRÉSI FOLYAMAT ISMERTETÉSE

A 2.4. fejezetben láthattuk, hogy a nedvesedési peremszög mérésére számos mérési eljárást dolgoztak ki. A nedvesedési viszonyokat a különböző technológiai műveleteknél számunkra kedvező módon szeretnénk változtatni. Ez akkor lehetséges, ha különböző paraméterek változtatásának hatására tudjuk, hogy milyen nedvesítési peremszög változás következik be, az általunk kiválasztott, és a gyakorlatban is használatos anyagpárok esetén, adott hőmérsékleten, atmoszférában és nyomáson. A fentebb bemutatott mérési eljárások közül a leginkább a nyugvó csepp módszer bizonyul alkalmasnak a nedvesedési peremszög mérésére.

Az irodalomban található összetett mérőrendszerek megoldásai alapján készült el a Gépjárművek és Járműgyártás Tanszéken a nedvesedési peremszög mérésére alkalmas mérőműszer (13. ábra), amellyel lehetséges a nedvesítési viszonyok vizsgálata és amelynek tervezésébe bekapcsolódtam.



13. ábra: A peremszögmérő berendezés részei

3.1. A PEREMSZÖGMÉRŐ BERENDEZÉS FŐBB RÉSZEI

A **vákuumkamra** a mérőgép főegysége, egy elektronmikroszkóp része volt. A mérések elvégzéséhez szükséges inert atmoszféra létrehozása miatt kell a kamrát levákuumozni majd nitrogénnel (N) feltölteni. A kamra szigetelése megfelelő és belső tere jól megfigyelhető a hőálló vizsgálóüvegen keresztül. A vákuum a kamrára csatlakoztatott háromfázisú rotációs **szivattyú**val hozható létre. A minimális vákuum 2 mbar a kamrában, mely az atmoszfératisztítás során megfelelő volt.

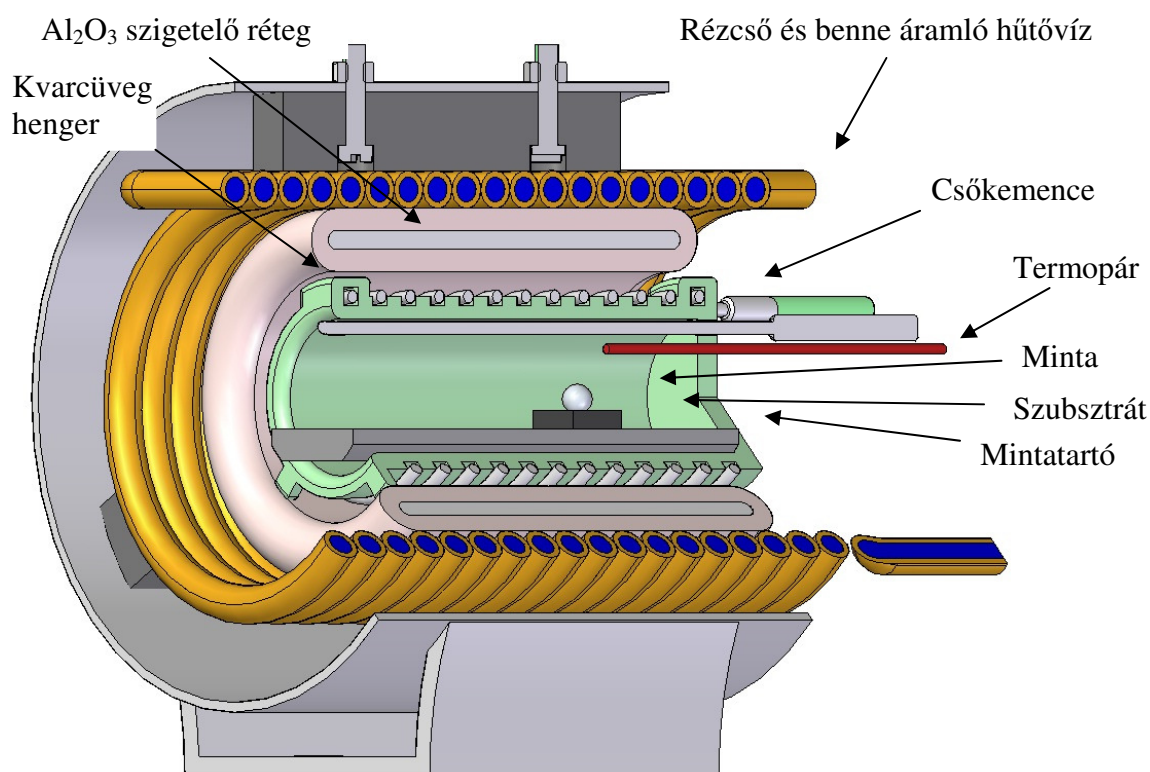
Az ellenállás fűtésű kemence HAGA KD48D2 típusú **szabályzó**val szabályozott, mely a kemence és a kamra hőmérsékletének kijelzésére is használható. A kemence hőmérsékletének mérésére teflon érszigetelésű, szilikon köpenyszigetelésű, külső árnyékoló fémharisnyával ellátott kompenzációs vezetékkel toldalékolt N-típusú (NiCrSi-NiSi) **köpenyhőelem** került beépítésre. A szabályzóval kis hőmérséklet kilengéssel ($\pm 1^\circ\text{C}$ - 2°C), rövid szabályozási idő alatt eléri a kemence a kívánt hőmérsékletet. A szabályzóval állítható a fűtési teljesítmény is, ennek köszönhetően adott hőmérsékleten a kilengés minimalizálható. Az optimális felfűtés érdekében a szabályozón az önszabályozás funkciót alkalmaztam és így a szabályzó beállította a megfelelő értékeit. Egy másik hőmérséklet-érzékelő a fűtött kemencén kívül a kamra falánál helyezkedik el és méri kamra környezeti hőmérsékletét. A kamra környezeti hőmérsékletének mérésére a gumitömítések korlátozott hőállósága miatt van szükség.

A minták hevítése elektromos ellenállás-fűtésű csőkemencében történt. A **kemence** fűtőszála 1,4 mm átmérőjű kantálból (FeCrAlCo) készült. A használat során kiderült, hogy a fűtőszál kantálja is oxidálódik és így az élettartama véges. A kantál tönkremenetelének első jele a maximális felfűtési hőmérséklet csökkenése. További használat mellett a kantál el fog szakadni. A 14. ábrán egy ilyen eltört, megszakadt fűtőszál látható.



14. ábra: Szálszakadásos csőkemence

A kemence által előállított hőt koncentrálja az Al_2O_3 paplannal bélelt és levákuumozott duplafalú kvarcüveg **szigetelés**. A kamra kemencén kívüli környezetét, a szigetelés köré tekert rézcsőben áramló hűtővíz hűti. A mérések magas hőmérsékleten, 1000°C - 1200°C között is történhetnek, a forraszpasztákkal végzett mérések 250°C -on történtek. A kamra egész belső terének fűtése energiaigényes és a gépalkatrészek nem bírják ki, másrészt számunkra csak a minta közelében kell biztosítani a méréshez szükséges magas hőmérsékletet. A szigetelés korlátozza a létrehozott hőmennyiség szóródását a vákuumkamrában, így koncentrálni tudjuk a kemence belsejébe. A kemencében elhelyezett minta környezetében a méréshez szükséges magas hőmérséklet létrehozható úgy, hogy a kamra, szigetelésen kívüli része sokkal kisebb hőmérsékletű marad.



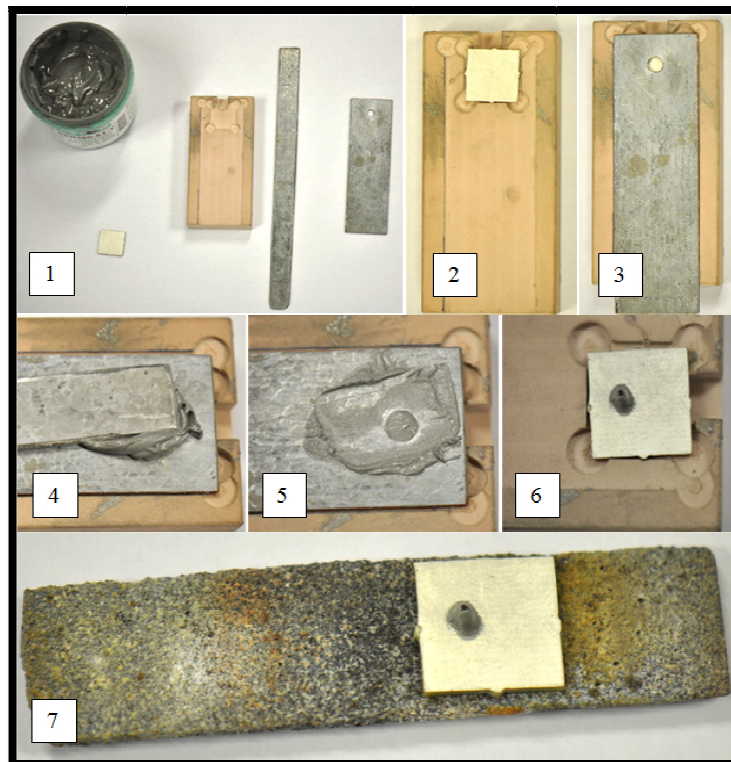
15. ábra: Csőkemence és szigetelésének felépítése 3D CAD modellben

A mérések során a fényképek egy makró objektívvel (AF-S DX Micro NIKKOR 85mm f/3.5G ED VR) felszerelt Nikon D90 típusú **fényképezőgéppel** készültek. A 12,3 megapixel és a makró objektív segítségével lehetőség van nagy, jó felbontású (1:1 leképezésű), éles makró kép készítésére a csepről. A nagy felbontású és jó minőségű kép kiértékelése könnyebb és biztosabb is.

3.2. MÉRÉSI CIKLUS BEMUTATÁSA FORRASZOK NEDVESEDÉS-VIZSGÁLATÁNÁL

Réz szubsztráton vizsgáltam különböző forraszpaszták nedvesedését. A peremszögmérések eredményeinek összehasonlíthatósága érdekében az összes mérésnél törekedtem, hogy a mérési folyamatok mindig ugyanúgy történjenek. A mérési folyamat a következő részekből épül fel:

a) A vizsgálathoz szükséges a forraszpasztá és egy szubsztrát amin a mérés történik. A forraszpasztákkal végzett méréseimhez szubsztrátként általában valamilyen NYÁK szerelőlemezt vagy rézlemezt alkalmaztam. Első lépésként a forraszanyagot a szubsztrátra vittem fel. A dolgozat méréseihez rézlemezt használtam szubsztrátként. Ahhoz, hogy a szubsztrátok különbsége a nedvesedésmérés eredményére ne legyen hatással, az összes minta ugyanazon a csiszoláson és polírozáson esett át. A mérések előtt a már polírozott rézlemez egy Copperbrite nevű marószeres, majd desztillált vizes, végül pedig alkoholos mosáson esett át. A pasztafelvitel művelet lépései a 16. ábrán láthatók. Ezzel a felviteli megoldással tudtam biztosítani, hogy a lapkára felvitt forraszanyag mennyisége a méréseknél közel azonos legyen. A felvitt paszta mennyisége 80-100 mg. Pasztafelviteli tömegmérések alapján a felvitt forraszanyag mennyiség szórása 1,75 mg, mely kb. 2 %-on belüli tömegingadozást jelent.



16. ábra: A forraszanyag felvitelének lépései

b) A szubsztrátot a felvitt forraszanyaggal ezután egy tartóra tettem, majd a csőkemencébe helyeztem és zártam a vákuumkamrát. A kemencébe helyezésnél nagy figyelmet fordítottam a szubsztrát vízszinteségének megteremtésére.

c) Azoknál a méréseknél, amelyeket védőgáz alatt végeztem, a következő lépés a mérési tér oxigénmentesítése volt. Többszöri vákuumozást (legalább három alkalom), többszöri inert, nagy tisztaságú (99,99%) nitrogén gázzal való feltöltés követett, ezzel az a cél, hogy a vákuumkamrában a lehető legkevesebb oxigén maradjon bent. Először körülbelül 6-8 percig tartott a leszívási folyamat, majd a nitrogénnel való feltöltés után 2,5 mbar értékig tartott a leszívás. A harmadik leszívásnál az elérhető legkisebb vákuum 2 mbar volt. A harmadik leszívás után is a kamrát a légköri nyomásig nitrogén gázzal való feltöltés követett. Azért volt szükség a többszöri átöblítésre, mert a levegőből származó oxigén megtapad a kamra belső felületein. Minél többször hajtjuk végre az öblítést annál kevesebb oxigén marad a falhoz tapadva és így minden leszívásnál nagyobb vákuumot tudunk létrehozni az előzőnél, a szivattyú teljesítőképességének határain belül.

Azoknál a méréseknél, ahol a mérés levegő atmoszférában történt, a c) lépés, azaz a kamra oxigénmentesítése és inert gázzal való feltöltése kimarad a mérési folyamatból.

d) Ha megfelelő a kamra légköre, a kemence felfűtése és kívánt hőmérsékletre állítása következik. Ha a hőmérséklet beáll a kívánt értékre a nedvesedési jelenség rögzítendő a fényképezőgép segítségével. A mérés befejezéseként a fűtést le kell kapcsolni és várni 20 percet, amíg a kamra visszahűl a környezeti hőmérsékletig.

e) Az utolsó lépés a mérési eredmények kiértékelése, melynek menetét a 3.3. fejezet írja le.

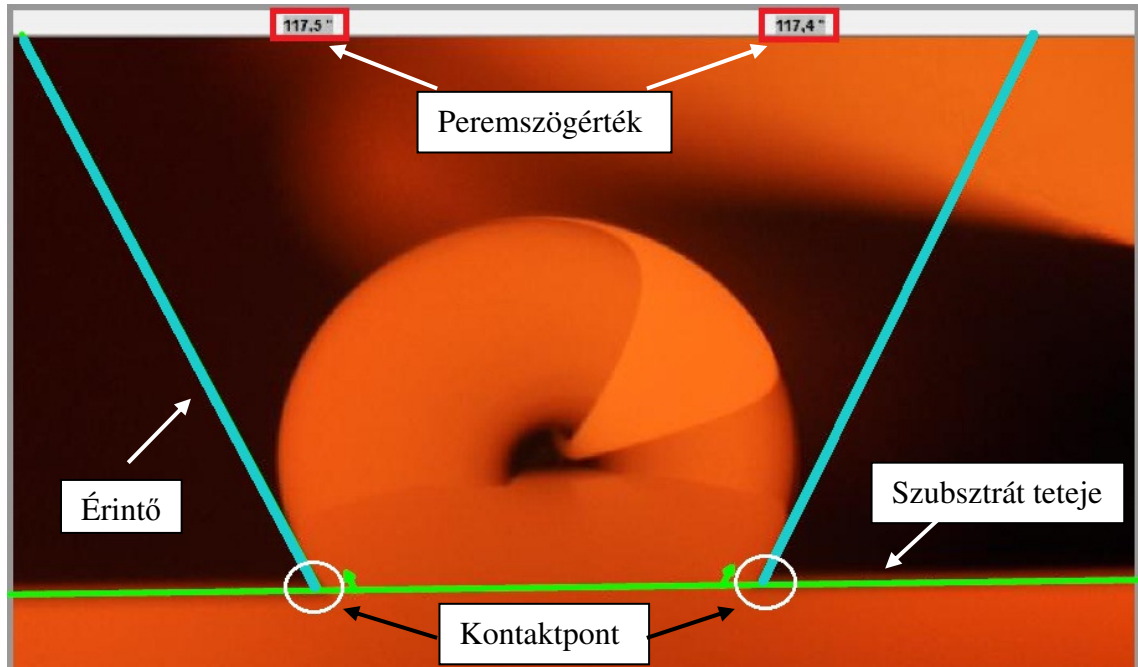
3.3. PEREMSZÖG KIÉRTÉKELÉSI MÓDOK ÉS AZ EREDMÉNYEK SZÓRÁSA

A nyugvó csepp módszerrel való peremszögmérés során a vizsgált olvadék/szubsztrát rendszert lefotózzuk, így egy fényképből kell meghatároznunk a peremszöget. A digitális fénykép kiértékelésének egyik módja, hogy számítógép segítségével kielemezzük, ez történhet a képeken pontok kézi kijelölésével vagy kiértékelő segédprogram használatával. Mindkét esetben a peremszögértékeket fokban kifejezve kapjuk eredményül [21].

3.3.1. KÉZI PEREMSZÖG KIÉRTÉKELÉS

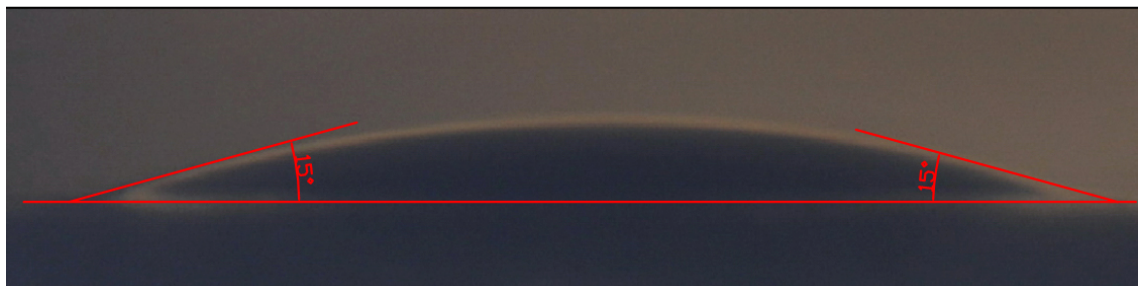
A forraszpaszta peremszögmérése során a forraszfém a kötésre jellemző lapos, lencse alakot formál. Az ilyen minták kiértékelésénél a rendelkezésre álló automatikus peremszögmérő szoftver a működéséből kifolyólag nem alkalmazható, így a mérések kézzel történő kiértékelése szükséges. A mérések során készített fényképeknek számítógépen történik a kézi kiértékelése. A kézi kiértékelésnél egy számítógépes segédprogramot használunk, mely segítségével először betöltjük a kialakult kontakt helyzetről készített fényképet, majd az egér használatával, kézzel kijelöljük a csepp két szélső kontaktpontját, ahol érintkezik a szubsztráttal. A 17. ábrán a fehér körök jelzik a pontokat. Ez a két pont meghatároz egy egyenest, a szubsztrát tetejét (zöld egyenes). Következő lépésként a két kontaktpontból érintőt húzunk a csepp kontúrjával (a 17. ábrán a kék egyenesek). A kezdetben meghatározott egyenes és az érintők által bezárt csepp felőli szög, a nedvesedési peremszög, ezt a program kiírja (az ábrán piros

keretben látható értékek) és menti egy .txt kiterjesztésű fájlba. A jobb és bal oldali peremszögeket ezután táblázatos formában célszerű összesíteni, majd a két oldalon kapott peremszögek átlagait ábrázolni diagramban [22].



17. ábra: Kézi kiértékelés menetének bemutatása, a kiértékelő program futási képén

A 18. ábrán látható egy forraszpasza vizsgálatról készített kép, a kiértékel peremszögekkel együtt.



18. ábra: Kézi kiértékelés eredménye forraszpasza kiértékelése során

A módszer problémája az emberi pontatlanság. Az eredmények kiértékelési hibával terheltek, amely hiba mérőszemélyenként és mérésenként is különbözik. Ha jó minőségű képpel dolgozunk, akkor is megjelenik a mérések között egy bizonyos mértékű szórás. Ennek oka, hogy a kezdetben kiválasztott szélső kontaktpontok, ezáltal a szubsztrát felső felületét jelképező vízszintes egyenes és az érintők pontossága, a kiértékelő személy pontosságától függenek. Annak, hogy kétszer pontosan ugyanabba a

pontba kattintunk, a valószínűsége csekély. Jó minőségű fényképek esetében természetesen jobb a kiértékelés ismétlési pontossága, mint életlenebb képek esetében, hisz a kontaktpont és a csepp kontúrához húzott érintő meghatározásához szükséges kattintások általában közelebb esnek egymáshoz.

A peremszögmérés szórásának megállapításához egy adott típusú pasztával öt külön mérést végeztem el azonos körülmények között. A mérési eredmények alapján (19. ábra) a mérés szórása $0,46^\circ$ -ra adódott.

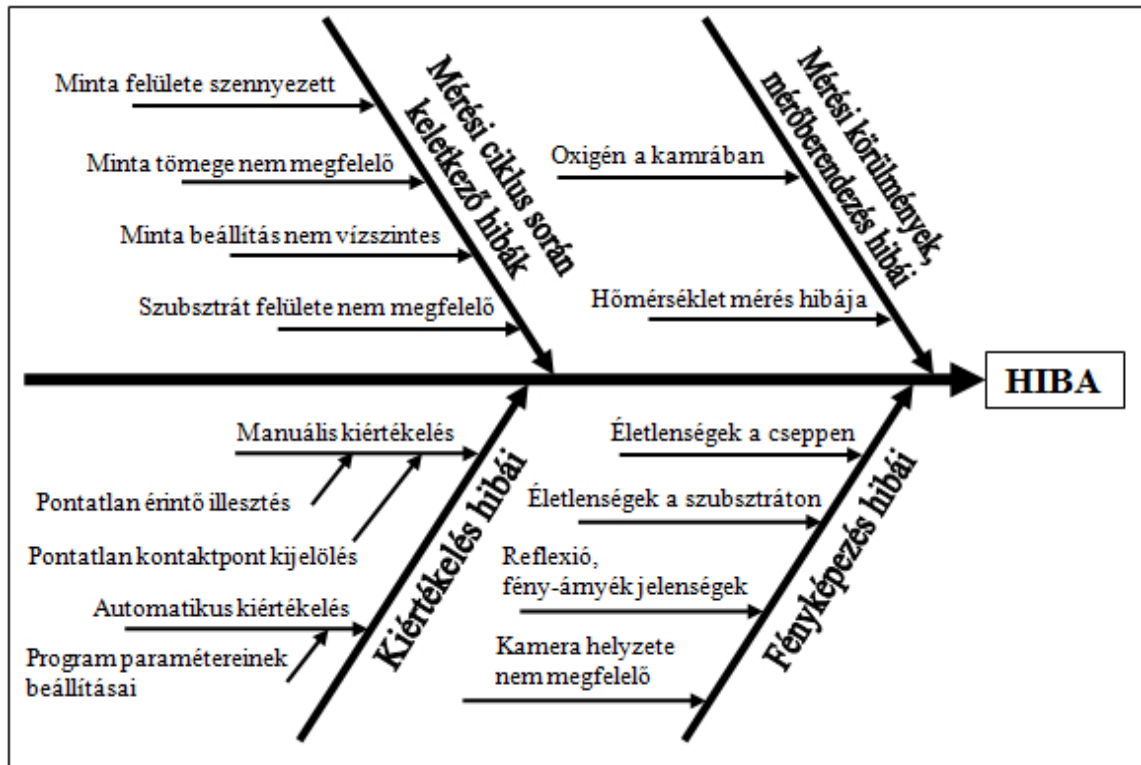


19. ábra: A nedvesedésmérés szórásának meghatározásakor mért eredmények

3.3.2. KIÉRTÉKELT EREDMÉNYEK SZÓRÁSA, HIBÁK OKAI

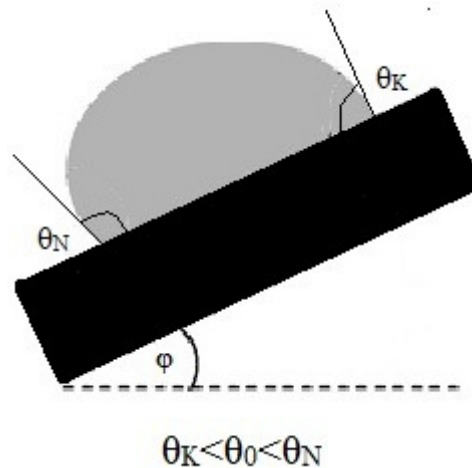
A nedvesedési peremszög mérések során kapott eredményeket sok tényező befolyásolhatja, melyek hibát visznek a mérésbe. Az eredmények hibásávja két fajta hibából tevődik össze, a mérési hibából és a kiértékelési hibából. A mérési hibát, a mérési körülmények tökéletlensége és nehéz megismételhetősége okozza. A vizsgálat során fellépő lehetséges hibák okai a 20. ábrán egy Ishikawa diagramon láthatók. Az eredményekre nagy befolyással bíró tényezők kis különbözősége is nagy eltéréseket okozhat. A kiértékelési hiba a különböző kiértékelési módok esetében eltérő. Manuális kiértékelés esetében a kiértékelő személy pontosságától függ, a nem nedvesítő

anyagpárok vizsgálatánál alkalmazott automatikus kiértékelés esetében megfelelő kiértékelési paraméterek beállítása mellett, geometriai számításokat felhasználva az eredmények szórása elhanyagolhatóra csökkenthető, illetve kizárható.



20. ábra: A peremszögmérés hibalehetőségeinek Ishikawa-diagramja

Ideális esetben a megolvadt minta szimmetrikus cseppet képez a szubsztrát felületén. Ha a kamrába helyezett szubsztrát felülete nem vízszintes a megolvadt csepp nem lesz szimmetrikus. A kialakuló peremszög nem nedvesítő anyagoknál igen érzékenyen reagál a vízszinttől való eltérésre, bizonyos esetekben a csepp le is gurulhat a szubsztrátról. A 21. ábrán látható egy igen nagy dőléssel rendelkező elhelyezés, szemléltetés céljából. A létrejövő kisebb és nagyobb peremszög átlaga kis vízszintezési hiba esetén a szimmetrikus csepp átlag peremszögértékét adja. Minél nagyobb a szubsztrát dőlése, annál nagyobb lesz a két mért peremszög átlagának különbsége a szimmetrikus csepp átlagos peremszögéhez képest.



21. ábra: Szubsztrát dőlésének hatása a peremszögre [23]

A mérési folyamat során készített fényképek minősége alapvetően meghatározza a kiértékelés pontosságát. A fényképezőgép felfogatásának a vízszintezettséget biztosítani kell, hiszen ha a fényképezőgép nincs vízszintben a szubsztrátot sem tudjuk megfelelően beállítani. További felfogási kitétel, hogy a fényképezőgéppel a szubsztrát tetejére ne lássunk rá, a felső felületét vonalként lássuk. Ha egy mérés során több hőmérsékleten kell képet készíteni, akkor a mérések során szerzett tapasztalatok alapján a fényképezőgép beállításait, élességet nem célszerű változtatni az aktuális mérés közben, mert az eredményeket befolyásolja. A fénykép készítésekor fontos, hogy a csepp kontúrja és a szubsztrát látható éle legyen éles (22. ábra). Ha ezek a feltételek nem teljesülnek, a kiértékeléskor bizonytalan a kontaktpontok és a kontúrhoz húzott érintő meghatározása.



22. ábra: Élességi problémák a mérési képeken [24]

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

Munkámban azt a kérdést vizsgáltam, hogy egy adott forraszfém összetételű pasztánál milyen nedvesedési tulajdonságbéli különbségek lépnek fel, ha különböző folyasztószerrel készítjük el a pasztát. Továbbá különböző forraszfém ötvözetekből, azonos típusú fluxszal készített forraszpasztákon összehasonlító nedvesedés méréseket hajtottam végre. Tehát különböző fluxok és a forraszfém összetételének nedvesedésre gyakorolt hatását vizsgáltam forraszpaszták esetében.

4.1. KÍSÉRLETEK SORÁN FELHASZNÁLT ANYAGOK

A mérések során szubsztrátként Cu-ETP R240 (CW004A) típusú 1 mm-es vastagságú rézlemezt használtam. Az alkalmazott rézre előírt kémiai összetétel a 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: Cu-ETP R240 (CW004A) kémiai összetétele

Cu	Pb	O	Bi	egyéb
min. 99,9	max. 0,005	max. 0,04	max. 0,0005	0,03

A Cu-ETP típusú lemezek jó elektromos vezetők, jól forraszthatók, villamosipari felhasználásra alkalmasak. Ahhoz, hogy a mérésekből kizárjuk a szubsztrátok felületének hatását, az összes réz minta a vizsgálat előtt csiszoláson és polírozáson esett át. A pasztafelvitel előtt közvetlenül pedig mosáson ment keresztül a rézlemez, hogy a felületet a zsírtól és egyéb szennyeződésektől megtisztuljon. Először Copperbrite marószeres, majd ioncserélt vizes, végül pedig alkoholos mosáson esett át. A mosás után a réz mozgatója csipesszel történt.

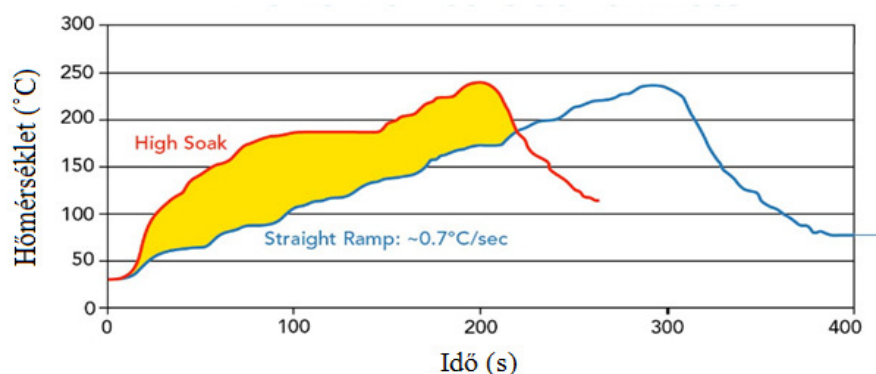
A méréseket nyolc különböző mintán végeztem, amelyek a 2. táblázatban láthatók.

2. táblázat: Vizsgált forraszanyagok

Különböző fluxok vizsgálata			Különböző ötvözetek vizsgálata		
Jelölés	Kód	Ötvözet	Jelölés	Kód	Ötvözet
A	54492	SAC305	E	158167	SAC305
B	149281	SAC305	F	161885.0	SACX0307
C	14996	SAC305	G	157940	InnoLot
D	158921	SAC305	H	158147	SAC305

A 2006-ban bevezetett RoHS direktíva szerint az addig jól bevált ólomtartalmú forraszanyagok alkalmazását meg kellett szüntetni és kizárólag ólommentes forraszanyagokat alkalmazni. A legelterjedtebb ólommentes forraszanyagok fő összetevői az ón (Sn), az ezüst (Ag), és a réz (Cu) valamint lehetőség szerint további mikroötvözők. A mindennapi gyakorlatban az ón, ezüst és réz tartalmú forraszanyagokat SAC névvel illetik. A forraszanyagok összetétele akkor ideális, ha eutektikus ponthoz közeli. Abban az esetben, ha a forraszanyag eutektikus összetételű, a likvidusz és a szolidusz hőmérséklet között nincs különbség, azaz ez a két érték azonos; a homogén fázis pedig rendkívül előnyös az újraömllesztéses forrasztási technológia esetében. A széles körben elterjedt SAC305 közel eutektikus ötvözet a forraszfém a fluxok összehasonlításánál alkalmazott pasztáknál. A SAC305 elnevezés Sn 96,5% Ag 3% Cu 0,5% összetételt jelent. A SACX0307 ötvözet esetében a forraszfém mikroötvözőket is tartalmaz. Az InnoLot ötvözet összetétele 90.95%Sn 3.8%Ag 0.7%Cu 1.4%Sb 0.15%Ni 3%Bi.

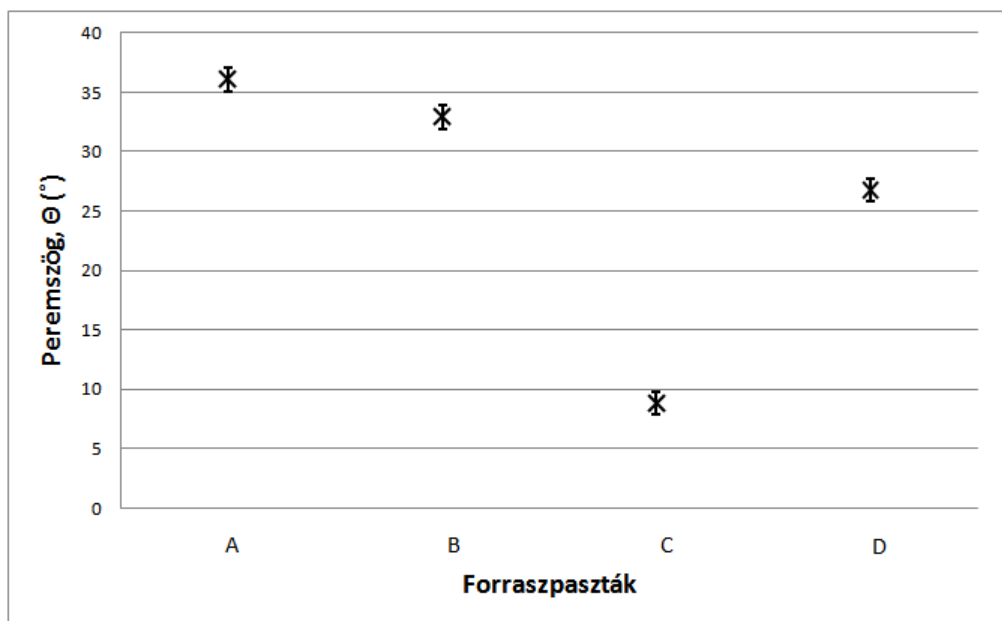
A 23. ábrán a forraszpaszta gyártója által, a forrasztáskor ajánlott hőmérséklet profil látható. A mérések során ezt a hevítési profilt alkalmaztam és a peremszögmérést 250°C-on végeztem. Kiemelt jelentőséggel bír az, hogy az összes mérés esetében ugyanolyan lépések történjenek, egyenlő hőmérsékleteken, egyenlő idővel, mivel a forrasztási hőmérséklet különbségeknek, valamint a forrasztási időnek is meghatározó szerepe van a forraszanyag nedvesedésében és a kötés kialakulásában.



23. ábra: A gyártó által javasolt forrasztási hőprofil [29]

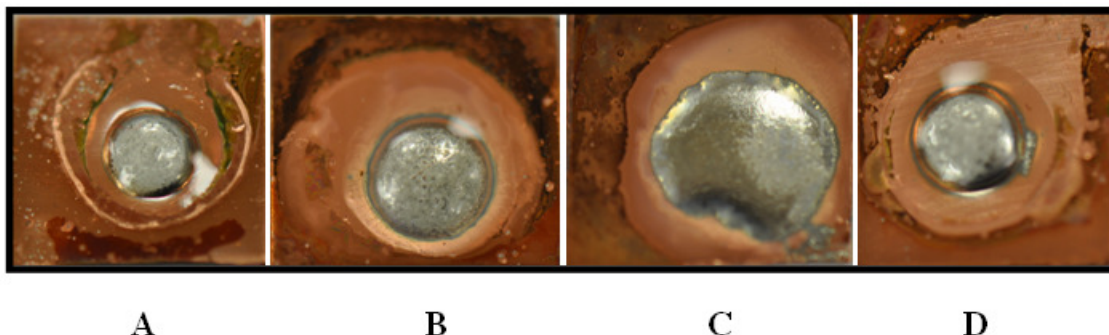
4.2. KÜLÖNBÖZŐ FLUXOK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A forraszpasztákban a forraszfém ötvözet folyasztószerrel van keverve. A folyasztószer feladatát és tulajdonságait a 2.1.2. fejezetben mutattam be részletesebben. Az alkalmazott flux jelentős befolyásoló tényezője a kialakuló forraszcsepp alakjának. A mérésekhez alkalmazott pasztákban egységesen SAC305 forraszfém van, de 4 különböző fluxszal keverve. A peremszögmérések eredményeit a 24. ábra mutatja. Látható, hogy az A és B minta eredményei közel azonosak, a peremszögértékek a mérés hibahatárán belül helyezkednek el egymáshoz képest, 35° körüli a mért peremszögérték. A D minta peremszögértéke valamivel kevesebb 27° . Nagy változás a C minta esetében tapasztalható, ahol 9° -os peremszögérték adódott. Tehát a C típusú flux jelentősen javította a nedvesedést.



24. ábra: Mért peremszögértékek különböző fluxokkal készített forraszpaszták esetén

A C minta kiugró nedvesedése érzékelhető a minták peremszögmérés utáni szemrevételezésénél is (25. ábra). Látható, hogy a csepp nagyobb felületet nedvesített a rézlemezen, mint az A, B és D esetben.



25. ábra: Minták peremszögmérés után

A peremszögmérések során többször végeztem tömegméréseket, amelyekből megadható a felvitt paszta mennyiség, valamint a mérés során eltávozott flux mennyisége. A tömegméréseket Mettler Toledo EL 204-IC típusú digitális analitikai mérlegen végeztem. A tömegmérések eredményeit a 3. táblázat mutatja. Az eredményekből látható, hogy a felvitt paszta mennyiség, valamint a mérések során a légkörbe távozó flux mennyisége is közel azonos, a különböző minták esetén.

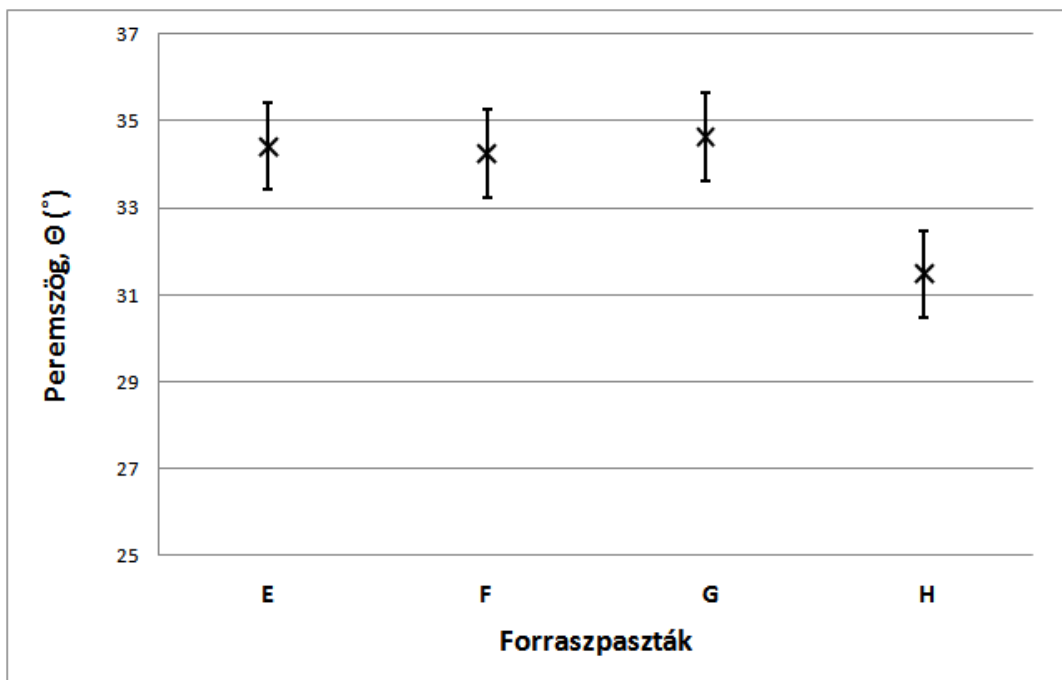
3. táblázat: Tömegmérések a nedvesedésmérés során

Tipus	Réz szubsztrát (g)	Pasztafelvitel után (g)	Nedvesedésmérés után (g)	Felvitt paszta (g)	Nedvesedésmérés során tapasztalt tömegváltozás (g)
A	1,4927	1,5888	1,5512	0,0961	0,0076
B	1,4109	1,5058	1,4983	0,0949	0,0075
C	1,4824	1,5783	1,5707	0,0959	0,0076
D	1,4937	1,5932	1,5863	0,0995	0,0069

4.3. KÜLÖNBÖZŐ ÖSSZETÉTELEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

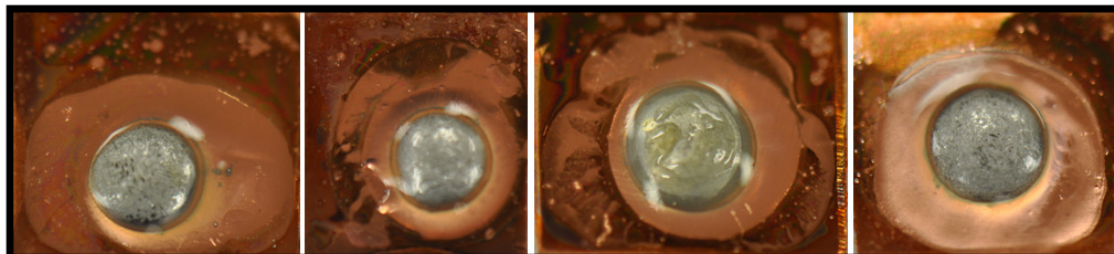
A forraszpasztákban a fluxon kívül a másik változtatható összetevő maga a forraszfém. A veszélyes anyagok korlátozásáról szóló (RoHS) direktíva miatt, az elmúlt években, az elektronikai iparban a lágyforrasztás anyagai között az ólommentes forrasztanyagok domináltak. A legelterjedtebbek az ón-ezüst-réz (SAC) forrasztótvözetek, ezek közül is

az eutektikus összetételek. A SAC305 a legelterjedtebb összetételű forrasztóanyag, azonban a 3%-os ezüst tartalma és az ezüst világpiaci árának növekedése valamint a forrasztásokat érő különböző külső hatások más ötvözetek kifejlesztésére is okot adtak. A SACX0307 ötvözetben a minimálisra csökkent az ezüsttartalom és emellett egyéb fémeket adagoltak mikroötvözőként a pasztába. Ez az összetétel esetenként kedvező árú alternatívája a SAC305 ötvözetnek az elektronikai ipar kommersz elektronikai termékeket gyártó területén. További optimalizálás eredményeként született meg az InnoLot névre keresztelt forrasztóötvözet, amelynek nagyobb a tartósfolyási ellenállása és csökkentette a magas felhasználói hőmérsékleten a korai meghibásodások valószínűségét [28]. A különböző forrasztóötvözetekkel végzett peremszögmérések eredményeit a 26. ábra mutatja. Látható, hogy minden ötvözet összetétel esetén a nedvesedés ugyanolyan jó, nincs kiugró érték. Mindegyik esetben 30° - 35° közötti peremszöget mértem. A különböző ötvözet összetételek nedvesedése között tehát nem találtam kiugró különbségeket, azonban ez nem jelenti azt, hogy minden tulajdonságuk egyezik a különböző ötvözetekkel készített kötéseknél. Ha egy meghatározott feladathoz választunk forrasztóanyagot szükséges figyelembe venni a forrasztott kötés további tulajdonságait, például a magas üzemi hőmérsékletnek való ellenállóság, vezetőképesség vagy gazdaságosság.



26. ábra: Mért peremszögértékek különböző forrasztóötvözetekkel készített forrasztópaszták esetén

A peremszögmérés utáni állapot, a megszilárdult forraszcseppek láthatóak a 27. ábrán. Látható, hogy amint a peremszögértékek közel azonosak és nincs közöttük kiugró különbség, a megszilárdult cseppek is vizuálisan hasonlítanak.



SAC305 (E)

SACX0307 (F)

InnoLot (G)

SAC305 (H)

27. ábra: Minták peremszögmérés után

A különböző forrasztótvözetek peremszögmérései során végzett tömegmérések eredményeit a 4. táblázatban foglaltam össze. Az eredményekből látható, hogy a felvitt paszta mennyiség közel azonos volt, valamint a mérések során a légkörbe távozó flux mennyisége is azonos, a különböző minták esetében.

4. táblázat: Tömegmérések a nedvesedésmérés során

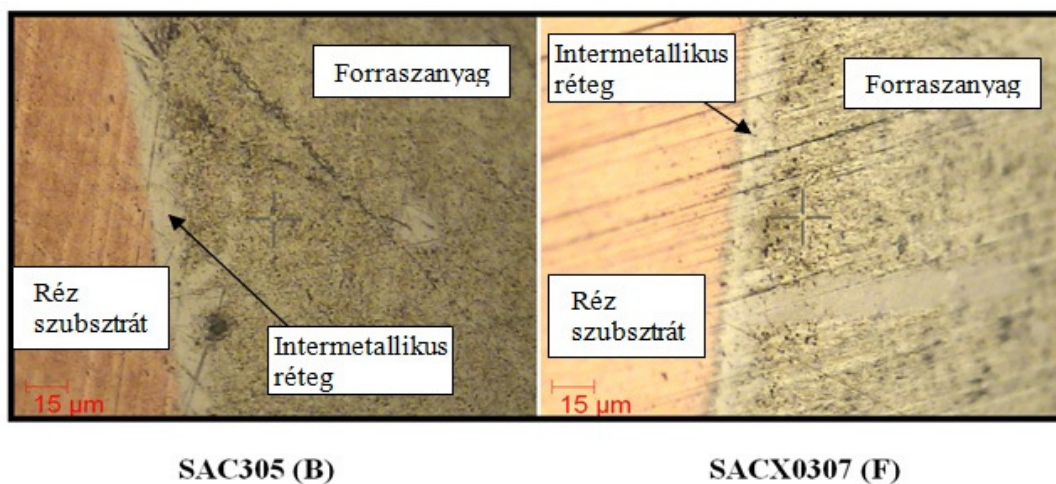
Típus	Réz szubsztrát (g)	Pasztafelvitel után (g)	Nedvesedésmérés után (g)	Felvitt paszta (g)	Nedvesedésmérés során tapasztalt tömegváltozás (g)
E	1,5065	1,5950	1,5884	0,0885	0,0066
F	1,3980	1,4905	1,4830	0,0925	0,0075
G	1,2853	1,3846	1,3767	0,0993	0,0079
H	1,4393	1,5304	1,5228	0,0911	0,0076

4.4. MINTÁK KERESZTMETSZETI VIZSGÁLATA

A forrasztások során a forrasz és a forrasztandó felületek határán intermetallikus réteg jön létre. Ez a réteg a diffúziós folyamatok során képződik. Ólommentes forrasztótvözetek alkalmazásakor a forrasz és a réz forrasztási felületei között az intermetallikus réteg fő összetevői a Cu_6Sn_5 vegyület, de képződhet Cu_3Sn vegyület is [25, 26]. Az intermetallikus réteg fontos része a forrasztott kötésnek. Ha nem alakul ki ez a réteg, akkor a forrasztás minőségét tekintve nem megfelelő. A megfelelő

vastagságra nincs írott szabály, de az iparban elfogadott érték, ha a kialakult réteg vastagsága 1 és 5 μm közé esik. Az intermetallikus réteg fontos szerepet játszik a kötés szilárdságában és a villamos vezetésben is, ugyanis ellenállása jóval magasabb, mint a forrasznak [27].

A 28. ábrán látható két lemért minta keresztmetszeti csiszolatának mikroszkópos felvétele. A felvételeket CSM Micro Combi Tester (MCT) video mikroszkópjával készítettem. Ahogyan a többi minta esetében is, az alábbi két mintán is látható, hogy az intermetallikus réteg kialakult.



28. ábra: Lemért minták keresztmetszeti csiszolata

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az anyagok nedvesítő tulajdonságainak és annak befolyásolásának ismerete a mai gyártási technológiák és korszerű anyagok ipari felhasználása mellett elengedhetetlen. A jármű- és elektronikai iparban a folyékony/szilárd anyagkapcsolatoknál, a forrasztások esetében a nedvesedési viszonyok változtatásának lehetőségére a megoldandó feladat függvényében szükség lehet. Ezért fontos, hogy ismerjük a nedvesedést befolyásoló körülményeket.

A dolgozatom irodalmi összefoglalójában ismertettem a forrasztások elméleti alapjait, majd a felületi feszültség és a határrétegek fiziko-kémiájának alapfogalmait és a nedvesedéssel kapcsolatban álló jelenségeket. Ezek után bemutattam a peremszögmérő berendezést, a mérési folyamatot, majd a méréseim eredményeit.

Különböző folyasztószerek nedvesedésre gyakorolt hatásának vizsgálatát négy forrasztással végeztem, melyekben a forraszfém ötvözet azonosan SAC305 volt, a fluxok pedig mindegyikben különbözőek. Méréseim azt mutatták, hogy a C jelű mintában lévő flux jelentősen javította a nedvesedést a másik három pasztához képest. A forraszfém összetételek vizsgálati sorozatában a folyasztószer volt azonos mind a négy mintánál. A peremszögmérési eredmények minden esetben 30° - 35° közé estek, tehát az ötvözetek esetében ugyanolyan jól nedvesített mindegyik paszta. A mérések azt mutatják, hogy a különböző összetételek ellenére azonos szintre sikerült optimalizálni a különböző ötvözetek nedvesedési tulajdonságait. Egyes pasztákban kisebb ezüsttartalom alkalmazása mellett a nedvesedési tulajdonságokat sikerült a többi értékéhez hasonlóvá tenni, ami gazdasági előnyt jelent, a paszta gazdaságosabbá vált, ára csökkent a magasabb ezüsttartalmú pasztához képest. A forraszötövözethez hozzáadott fluxszal a nedvesedést tovább lehet igény szerint alakítani.

A minták keresztmetszeti csiszolatai azt mutatják, hogy mindegyik esetben kialakult intermetallikus réteg a szubsztrát és forrasz között.

Kutatási munkámat a jövőben kiterjesztem más összetételű forrasztóanyagok peremszögeinek vizsgálatára valamint forrasztásokhoz alkalmazott gázok nedvesedés-változtató hatásának vizsgálatára. Terveim között szerepel a mérési folyamat teljes automatizálása, a fényképezés és hőmérséklet-beállítás számítógéppel való vezérlésével.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni a COOKSON ELECTRONICS HUNGARY KFT-NEK, DR. RÉDEY LÁSZLÓNAK ÉS BARNA KRISZTINÁNAK hogy a méréseimhez szükséges forrasanyagokat rendelkezésemre bocsátották és szakmai tapasztalatukkal segítették a munkámat.

Köszönöm a GÉPJÁRMŰVEK ÉS JÁRMŰGYÁRTÁS TANSZÉKNEK, hogy a kutatási munkám lehetőségét biztosította.

Valamint köszönöm értékes tapasztalatait és ötleteit, valamint a TDK dolgozat elkészítéséhez nyújtott tartalmi, formai tanácsait és útmutatásait WELTSCH ZOLTÁNNAK.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] H. D. Gibbs (1927): J. Phys. Chem. 1053
- [2] T. Young (1805): Phil. Trans. Roy. Soc.; An Essay on the Cohesion of Fluids
- [3] W. Kohlweiler: Principles of brazing technology, BrazeTech, www.brazetech.de, 2013. június 08.
- [4] Kelvin D. Spain (1999): Could your brazing application benefit from induction heating, Welding Journal, 78(10), pp.: 65-68.
- [5] G. Humpston, D.M. Jacobson (2004): Principles of Soldering, ASM International, ISBN 0-87170-792-6
- [6] M. Beckert, A. Neumann (1974): Forrasztás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [7] W. Kohlweiler: Selection rules for brazing alloys and fluxes, BrazeTech, www.brazetech.de, 2013. június. 08
- [8] E. Lüder (1964): Eigenschaften von Lötflusmittel-Substanzen (A forrasztáshoz használt folyasztószerek anyagainak tulajdonságai), Schweisstechnik 14, 135-137
- [9] E. Lüder (1952): Handbuch der Löttechnik (A forrasztás kézikönyve) Berlin, VEB Verlag Technik,
- [10] E. Wolfram (1971): Kontakt nedvesedés pp. 9-19.
- [11] Z. Weltsch (2008): Fémolvadékok és szilárd kerámiafázisok közötti nedvesedés vizsgálata nyugvó csepp módszer segítségével, diplomamunka, BME-KSK JJT
- [12] G. Kaptay (2010): Határfelületi nano-jelenségek előadás jegyzet, Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar
- [13] L. Eötvös(1886): Annalen der Physik und Chemie, 27, 448-459
- [14] Z. Vandrú (2009): Fémek felületi feszültsége, Szakdolgozat, ELTE Anyagfizikai Tanszék
- [15] N. Eustathopoulos, M.G. Nicholas, B. Drevet (1999): Wettability at High Temperatures, ISBN: 0-08-042146-6

- [16] G. Kaptay (2005): Classification and General Derivation of Interfacial Forces, Acting on Phases, Situated in the Bulk, or at the Interface of Other Phases – J.Mater.Sci, 2005, vol.40, pp.2125-2131
- [17] G. Kaptay (2005): Modeling Interfacial Energies in Metallic Systems – Mater. Sci. Forum, 2005, vols. 473-474, pp.1-10.
- [18] I. Egry, E. Ricci, R. Novakovic, S. Ozawa (2010): Surface Tension of Liquid Metals and Alloys - Recent Developments - Advances in Colloid and Interface Science Vol. 159 pp. 198–212
- [19] N. Eustathopoulos, N. Sobczak, A. Passerone, K. Nogi (2005): Measurement of Contact Angle and Work of Adhesion at High Temperature; Journal of Materials Science
- [20] N. Sobczak, J. Sobczak, R. Asthana, R. Purgert (2010): The Mystery of Molten Metal – China Foundry Vol. 7. No. 4.
- [21] J. Hlinka (2011): Peremszög változásának vizsgálata ezüst alapú fémolvadék-grafit rendszerben, TDK dolgozat, BME-KSK
- [22] J. Hlinka, Z. Weltsch, A. Szmejkál, J. Berzy (2011): Improvement of Sessile Drop Method for the Wetting Angle Determination; Perner's Contacts Special Issue 2, Volume VI, ISSN: 1801-674X, www.pernerscontacts.upce.cz/22_2011/Hlinka.pdf
- [23] J. Hlinka (2011): Nedvesedési tulajdonságok vizsgálata ezüst alapú ötvözetek és grafit között, Szakdolgozat, BME-KSK JJT
- [24] N. Sobczak, M. Singh, R. Asthana (2005): High-temperature Wettability Measurements in Metal/Ceramic Systems – Some Methodological Issues; Current Opinion in Solid State and Materials Science 9 pp. 241–253
- [25] P. Roubaud, G. Ng, G. Henshall, R. Bulwith, R. Herber, S. Prasad, F. Carson, S. Kamath, A. Garcia (2001): Impact of Intermetallic Growth on the Mechanical Strength of Pb-Free BGA Assemblies, Presented at APEX2001 San Diego
- [26] M.S. Park, R. Arroyave (2010): Formation and Growth of Intermetallic Compound Cu₆Sn₅ at Early Stages in Lead-Free Soldering, Journal of Electronic Materials, 2574-2582

- [27] Ph. Gasser, P. Jacob , D. Leroy, L. Oberli, C. Scheuerlein, M. Taborelli (2004):
The Effect of CuSn Intermetallics on the Interstrand Contact Resistance in
Superconducting Cables for the Large Hadron Collider (LHC), European
Organization for Nuclear Research -European Laboratory for Particle Physics
- [28] S. Brown, A. Plant (2013): Megnövelt megbízhatóságú fáradástűrő forraszanyag
fejlesztése, Elektronet, 2013/5-6
- [29] ALPHA® CVP-390 Technical Bulletin