



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék

Lágyforrasztott kötések javítása megelőző lézeres felületkezeléssel

TDK dolgozat

Szerző: Berczeli Miklós, Járműmérnök (Bsc)

Konzulensek: Dr. Weltsch Zoltán, egyetemi adjunktus

Hlinka József, doktorandusz

2014. November

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	4
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	6
2.1. A forrasztás elmélete	6
2.1.1. Forrasztás technológiája	6
2.1.2. Forrasztási folyamat lépései	7
2.2. Nedvesedési peremszög és a felületi feszültség elmélete	9
2.2.1. A nedvesedés elmélete	9
2.3. A határfelületi energia (γ)	13
2.4. Felületi érdesség és a nedvesedési peremszög kapcsolata	16
2.5. Lézer technológia	17
2.5.1. Lézerek működésének elméleti háttere	17
2.5.2. Lézerek sugárforrásai	22
2.5.3. Lézerek üzemmódjai	25
2.5.4. Lézerek alkalmazásai az iparban	26
2.5.6. Lézeres felületkezelési eljárások	26
2.6. A lézernyaláb és az anyag kölcsönhatása	27
2.7. Irodalmi eredmények összefoglalása, a kutatás célkitűzése	33
3. A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE	34
3.1. A szubsztrát és a forrasztóanyag kiválasztása	34
3.1.1. A felhasznált forrasztóanyag ismertetése	34
3.1.2. A réz, mint szubsztrát és annak szerepe a forrasztás technikában	34
3.2. Szubsztrátok előkészítésének ismertetése	35
3.3. Lézeres felületkezelés	37
3.3.1. Az alkalmazott lézer és a felületkezelés ismertetése	37
3.3.2. Felületi érdességmérés	39

3.4. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat (Scanning Electron Microscope = SEM)	41
3.4.1 Az elektronmikroszkóp működésének alapjai	41
3.4.2. Kezelt és kezeletlen mintáim SEM mérési eredményei	45
3.5. Metallográfiai vizsgálat	47
3.5.1 Csiszolatok elkészítése	47
3.5.2. A minták szövetszerkezetének a vizsgálat	49
3.6. A nedvesedési peremszögmérő berendezés és a peremszögmérési folyamat ismertetése	51
3.6.1. A peremszögmérő berendezés főbb részei	52
3.6.2. Mérési ciklus bemutatása a forraszpasztá nedvesedés-vizsgálatánál	53
3.6.3. Kézi peremszög kiértékelés folyamata	56
3.6.4. A vizsgálati folyamat hibái	58
4. NEDVESEDÉS MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	60
4.1. Bevezető mérések kezeletlen felületen	61
4.2. Lézerrel kezelt felületek vizsgálata	65
4.2.1. Lézeres felületkezelés hatása az előkészített mintákra	65
4.2.2. Lézeres kezelés hatása a csiszolatlan mintákra	69
4.2.3. Lézerrel kezelt minták nedvesedési vizsgálata más pasztával	70
4.2.4. Hidrogén atmoszférás hőkezelés hatása a lézerrel kezelt minták nedvesedésére	72
4.2.5. Lézeres felületkezelés megismételhetőségének vizsgálata	73
5. KUTATÁSI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA	74
6. IRODALOMJEGYZÉK	77

1. BEVEZETÉS

Napjaink fejlődő iparában a lágyforrasztással létrehozott kötések optimalizálásának lehetősége meghatározó kutatási területté vált, hiszen mind a járműipar, mind az elektronikai ipar területén egy nagyon elterjedt és - pozitívumainak köszönhetően - egyre gyakoribb kötéstípusról van szó.

A forrasztási eljárások során az összekötendő szerkezeti elemek között oldhatatlan és adhéziós kötést hozunk létre megömlesztett forrasztóanyag felhasználásával. A technológiára jellemző, hogy az összekötendő alkatrészek maguk a művelet során nem érik el a saját olvadáspontjukat. A forrasztási hőmérséklet az újrakristályosodási és egyéb kritikus hőmérsékletek alatt maradásával számos előnyös tulajdonsághoz juttatja ezt a kötési módot a többi megoldáshoz képest. Például, el lehet kerülni a belső feszültségeket, nem kívánatos szövetátalakulásokat és vetemedéseket, de fontos szempont az is, hogy a kisebb hőbevitel következményeképpen jelentősen gazdaságosabb eljárásról van szó, mint a hegesztés. A pozitívumok közé sorolhatjuk még a kötési művelet idejét és automatizálhatóságát, hiszen gondoljunk csak az elektronikában használatos szabad szemmel nem vagy alig lekövethető chip beültető gyártósorokra. Ezzel szemben pedig a nagy számban alkalmazott, jól tervezett kötések képesek szigorú minőségi és gazdasági kritériumoknak megfelelni a teljes élettartamuk során. Természetesen, ennek a kötéstípusnak is jelentkeznek az ipari alkalmazás során gyengeségei és hátrányai.

A forrasztott kötések minőségét a megfelelő alkalmazás-specifikus anyag megválasztásán (forrasztóanyagok, folyasztószerek) kívül nagymértékben befolyásolják a felület előkészítési műveletek is. Ebből kifolyólag a szubsztrát felületének tisztítása kiemelt jelentőségű a minőségi forrasztás érdekében. Mivel a forrasztóanyag tiszta, szennyeződésmentes fémfelületet nedvesít jobban, a forrasztandó részeket meg kell tisztítani a szennyeződésektől.

A forrasztások minőségét egyik legjobban befolyásoló fizikai tulajdonság a forrasztóanyagok nedvesedése. A nedvesedés fogalma abból a régi megfigyelésből származik, miszerint különböző anyagok különbözően folynak, illetve terülnek szét. Tiszta padlón például a kilocsant 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].

A nedvesedőképeességet a folyadék szilárd felületen való szétterülésével tudjuk legjobban jellemezni, melynek mérőszáma a nedvesedési peremszög, azaz a szilárd fázison elterülő folyadék illeszkedési szöge. A szétterülés mértékét a folyadék molekuláinak határfelületi adhézioja szabja meg. A határfelületi viszonyok megváltozásának nagymértékű hatása van a forrasztott kötéseink minőségére. A szakirodalom megállapításai alapján kijelenthető, hogy a forrasztás minősége és a mérhető peremszög nagysága, vagyis a forrasztóanyag nedvesítő képessége között fontos kapcsolat van. Minél kisebb a peremszög értéke, annál jobb nedvesítő képességű kapcsolatról beszélhetünk, ez hozzájárul forrasztott kötéseink optimalizálásához.

A tudományos közösség ezzel kapcsolatban sok munkát publikált, melyekben főleg a paszták összetételét, a műveletek javasolt paramétereit kutatták. Ezzel szemben léteznek, olyan kutatási irányzatok is, amelyek nem a forrasztópasztát helyezik a vizsgálat középpontjába, hanem magát a munkadarabot. Többféle módszerrel próbálják befolyásolni a szubsztrát nedvesedési peremszögét, ezek közül egy lehetőség, hogy felületkezelést alkalmaznak. A felületmódosításának egyik lehetséges megoldása, a felület lézeres besugárzása.

Kutatásaimmal szeretnék hozzájárulni ahhoz, hogy az iparban alkalmazott forrasztási technológiákat megfelelően tudjuk optimalizálni, a kialakult kötések minőségét javítani, más rokon kötéstechnológiáknál gazdaságosabbá tenni a forrasztást.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Dolgozatom a lágyforrasztott kötések vizsgálgja, ezért először ismertetem a forrasztások tulajdonságait és azt, hogy milyen eszközökkel lehet ezeket számunkra kedvező módon befolyásolni.

2.1. A FORRASZTÁS ELMÉLETE

Az egyes alkatrészek, szerkezeti elemek oldható vagy nem oldható kötéssel erősíthetők egymáshoz. Az oldható kötések (csavarozás, csapos kötés, szorítókötés) lehetővé teszik az alkatrészek szétszerelését vagy többszöri összeerősítését. Ezzel szemben a nem oldható kötések (hegesztés, forrasztás, ragasztás) csak a kötési helyek, illetve a szerkezeti elemek megsértésével vagy szétroncsolásával oldhatók [3]. Hegesztéskor mind az alap, mind a hegesztőanyag megömlik. Ezzel szemben a forrasztások olyan közvetett, anyaggal záró, feltételesen oldható kötések, amelyeket fémes vagy nemfémes, de ebben az esetben felületükön fémme bevont alkatrészekhez alkalmazunk. A kötés fémes adalékanyag (forrasz) segítségével jön létre, felületi ötvöző, adhéziós és diffúziós folyamat következtében [4]. Ennek köszönhetően az alapanyagok megolvadása nélkül lehet létrehozni a kötet. Éppen ebből adódik az előnye: a készre munkált alkatrészek lényeges alakváltozás nélkül köthetők össze, el lehet kerülni a nem kívánatos szövetátalakulások okozta belső feszültségeket és vetemedéseket, kisméretű tömegcikkék forrasztása könnyen gépesíthető, automatizálható. A kisebb hőbevitel következménye, hogy gazdaságosabb az eljárás. Fontos felhasználási területe az elektronikai-elektrotechnikai forrasztás [5]. Technológiai, valamint gazdasági előnyei miatt, egyre nagyobb mértékben alkalmazzák a különféle iparágakban.

2.1.1. FORRASZTÁS TECHNOLÓGIÁJA

Beszélhetünk kemény és lágyforrasztásról. Kemény forrasztás hőmérséklete 450°C fölött van (rendszerint 720°C, vagy annál magasabb). Az általam használt lágyforrasztás hőmérséklete ezzel szemben 450°C alatti.

A forraszanyagok gyártási alakja lehet, huzal, forrasztópáka, forrasztótuskó- merülő, hullámforrasztás, fólia, lemez, csík, zsugorcső vagy az általam használt forraszpaszta [4]. A forraszpaszták nagy sűrűségű paszta állapotban, összekeverve tartalmazzák a megfelelő forraszanyagokat és folyasztószereket a szilárd forraszanyaggal szemben [19]

A különböző technológiák közül megemlíteném a legfontosabbakat. Első a kézi forrasztás (pákás forrasztás), itt a pákacsúcsot felmelegítve, egyesével, lokálisan lehet végrehajtani a forrasztást, ezért viszonylag lassú. A tömeggyártásra már alkalmasabb megoldás a merülő forrasztás, ahol egy konvejjorra felfüggesztett, mechanikusan rögzített elemekkel beültetett nyomtatott lapot egy forraszfürdőbe merítik. A konvejjor mozgása folyamatos és kb. 15°-os szögben meríti be és emeli ki a fürdőből a lapkát. Hátránya, hogy a salak a fürdő felszínén úszik, rontja a kötés minőségét.

Számomra a legfontosabb az újraömllesztés (reflow) forrasztás [4-8]. Ezt az eljárást felületszerelési technológiákban alkalmazzák. A forrasztóanyag paszta alakban szita vagy stencilnyomtatással kerül a megfelelő helyre. A forrasztást infravörös sugárzásos, meleglevegős (konvekción) vagy védőgáz (N₂) szállítószalagos kemencében, ill. gőzfázisban végzik [10-11]. Ez a technológia az egyik legalkalmasabb a forrasztás ipari megvalósítására. Termelékeny, könnyen integrálható és gazdaságos. A dolgozatomhoz használt nedvesedés vizsgálati eljárás a reflow forrasztási technológiával közelíthető a legjobban.

2.1.2. FORRASZTÁSI FOLYAMAT LÉPÉSEI

A forrasztás - függetlenül a forrasztandó alaplémektől, szükséges hőmérséklettől és a felmelegítés módjától - technológiai lépései [4, 12]:

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

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 forrasztóanyagnak a kötési hézagba való elhelyezése és a folyasztószer felhordása is.

A tisztítás kiemelt jelentőségű a sikeres forrasztás érdekében. Minthogy a forrasztóanyag 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 forrasztóanyag folyását akadályozzák. Hasonló hatásúak a magas hőmérsékleten keletkező bomlási termékek is, mint szilárd kérgesedések, amelyek legtöbbször kivált karbonok alakjában jelentkeznek a felületen [13].

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 [14].

A technológiai segédanyagok közül számomra a folyasztószerek vagy folyósító anyagok (fluxok) szerepe fontos. Az iparban sok helyen előszeretettel alkalmazzák nedvesítőképesség javító hatásuk miatt [15, 16]. A folyasztószerek olyan nemfémes anyagok, amelyek a forrasztandó fémek felületének oxidrétegét távolítják el, vagy megakadályozzák annak képződését [17]. A folyasztószer egyúttal elősegíti a nedvesítést és a forrasztóanyag szétterülését a munkadarabon. Azonban nem alkalmas és nem használható a szennyeződés, vastagabb oxidrétegek eltávolítására. A folyasztószerekkel szemben támasztott követelmények közül az a legfontosabb, hogy kisebb olvadáspontúak legyenek, mint a forrasztóanyagok [18].

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 résbe helyezik el [14].

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 lassan kell lehűteni a forrasztási hőmérsékletéről szobahőmérsékletre.

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 [12].

A forrasztási technológia során alkalmazott forrasztóanyag egyik legfontosabb paramétere a nedvesedési tulajdonsága, vagyis a paszta szétterülése [20].

2.2. NEDVESEDÉSI PEREMSZÖG ÉS A FELÜLETI FESZÜLTSG ELMÉLETE

Mivel számomra a nedvesedési peremszög megváltoztatásának célja a legfontosabb, ezért ebben a fejezetben ismertetem a nedvesedés fogalmát és elméleti hátterét annak érdekében, hogy megértsük mi a nedvesedés feltétele és hogyan változtathatjuk ezt számunkra kedvező módon a forrasztott kötések esetében.

2.2.1. A NEDVESEDÉS ELMÉLETE

Folyadékok, illetve közel hasonló nagyságrendű viszkozitással rendelkező anyagok - esetünkben például a forrasztóanyagok - nedvesítő képességének mértékét legszembélyetesebben a szilárd felületen való szétterülés esetén vizsgálhatjuk. A szilárd fázissal történő érintkezés során a folyadékcsepp és a szilárd fázis, annak egy kis részén, közös felületen kontaktál. Továbbá, a fajlagos felületminimumra való törekvés elve alapján a csepp alakja gömbsüveg lesz, ami egy kör mentén fog érintkezni a szilárd fázissal. A csepp által felvett egyensúlyi alaknak a közvetlen jellemzésére használatos mérőszám a peremszög (Θ), ami az érintkezési körvonalra merőleges és a folyadék/gáz határfelülettel párhuzamos egyenes, valamint a szilárd felület síkja közötti szög, vagyis a két fázis érintkezése mentén kialakuló illeszkedési szög (1. ábra).

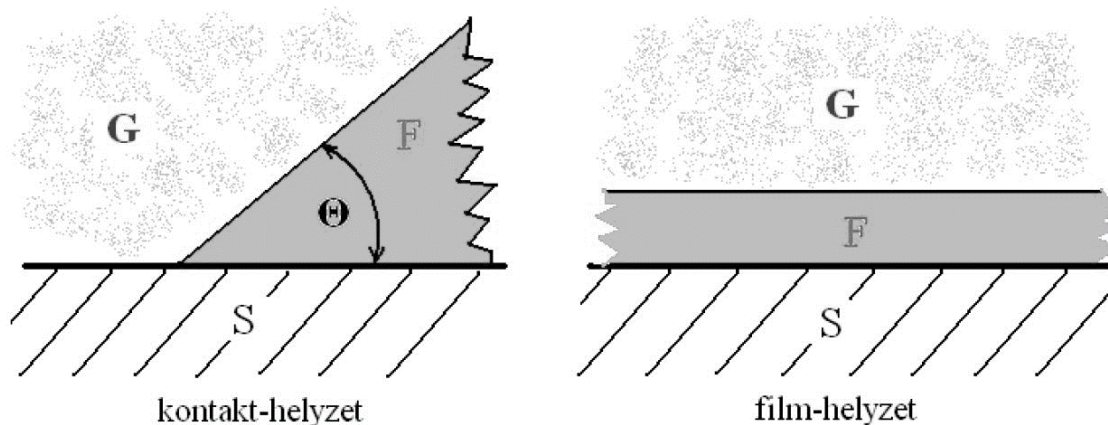
A független felületi hatások elméletének értelmében a határfelületek tulajdonságait a legszélsőbb, atomnyi távolságra lévő rétegek (azok közül is leginkább a folyadékkal közvetlenül érintkező atomcsoportok) határozzák meg. Ezt a független felületi hatások elvének

nevezzük [21]. Ezen elv elfogadása után könnyedén beláthatóvá válik az, hogy az esetleges szétterülés mértékét a szilárd test és a folyadék határfelületi molekulái között végbemenő kölcsönhatások határozzák meg. Ennek értelmében a szilárd fázis felületén létrehozott változások segítségével a nedvesítő képesség tudatosan tervezhető paraméterré válik.

A szilárd és folyadék fázis határfelületi kölcsönhatásait az érintkező geometriai és méret viszonyok alapján a következő 3 alaptípusba sorolhatjuk [22]:

- érintkezéses (adhéziós vagy kontakt) nedvesedés;
- bemerüléses (immerziós) nedvesedés;
- szétterüléses (film) nedvesedés.

Abban az esetben, ha háromfázisú rendszerünk (szilárd/folyadék/gőz) van, akkor - a fent említettek közül - csak kétfajta alaptípus valósulhat meg (1. ábra) a három fázis mechanikai és termodinamikai egyensúlyának együttes fennállása során. A folyadék vagy teljes mértékben szétterül a szilárd felületen, egybefüggő nedvesítő réteget (film-helyzetet) alkotva, vagy pedig kontakt-helyzet alakul ki.



1. ábra: A szilárd (S) - folyadék (F) - gőz (G) háromfázisú rendszer egyensúlyi konfigurációi [23]

A kontakt-helyzet egyensúlyi kritériumának kifejezése a Young-egyenlet [24] használatos:

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

Ahol Θ , a peremszög,

γ_{SV} , a szilárd-vákuum határfelületi feszültség,

γ_{SG} , a szilárd-gőz határfelületi feszültség,

$\pi_{SG} = \gamma_{SV} - \gamma_{SG}$, az adszorbeált gőz kétdimenziós felületi nyomása,

γ_{SF} , a szilárd-folyadék határfelületi feszültség,

γ_{FG} , a folyadék-gőz határfelületi feszültség [21].

A film-helyzet leírására a szétterülési együttható (S_{FSG}) definícióegyenlete lesz segítségünkre:

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

Ebből (2) viszont az következik, hogy a szétterülés szükséges és elégséges feltétele a következőképpen alakul:

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

Szükséges, (de nem elégséges) feltétele pedig:

$$\gamma_{SG} \geq \gamma_{FG} \quad (4)$$

Ennek értelmében, tehát a szétterülés csak olyan szilárd felszínen történhet meg, amelynek még a π_{AC} felületi nyomással csökkentett felületi feszültsége is nagyobb, mint a vizsgált folyadékoké. Amennyiben ez a feltétel nem teljesül, az ideális film-helyzet nem jön létre, vagyis a folyadék kontakt-helyzetbe kerül, ami során véges peremszöget fog bezárni a szilárd fázissal [21].

A kontakt-helyzetből kritikus átmenet során film-helyzetbe jutásból és a bekövetkező szétterülésből (2) adódóan,

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

A következőkben a tárgyalt jelenség még két jellemzőjének definiálása szükséges, a reverzibilis adhéziónak energiáé (7) és a nedvesedési feszültségé (8):

W_{FSG} , reverzibilis adhéziónak energia (munka)

$$W_{FSG} = \gamma_{SG} + \gamma_{SF} - \gamma_{FG} \quad (7)$$

T_{FSG} , nedvesedési feszültség

$$T_{\text{FSG}} = \gamma_{\text{SG}} - \gamma_{\text{SF}} \quad (8)$$

Végezetül pedig, ha a film-helyzetet leíró szétterülési együttható definícióegyenletét (2), továbbá a reverzibilis adhéziónak az energia (7) és nedvesedési feszültség (8) egyenleteket összevetjük a Young-egyenlettel (1), akkor megkapjuk a nedvesedés három alaptípusára vonatkozó definícióegyenleteket [21].

$$W_{\text{FSG}} = \gamma_{\text{FG}} \cdot (\cos\theta + 1) \quad (9)$$

$$S_{\text{FSG}} = \gamma_{\text{FG}} \cdot (\cos\theta - 1) \quad (10)$$

$$T_{\text{FSG}} = \gamma_{\text{FG}} \cos\theta \quad (11)$$

Megjegyezendő, hogy a fentebb felírt egyenletekben a γ_{SG} nem a szabad szilárd felületre vonatkozik, hanem a folyadék telített gőzével adszorpciós egyensúlyban álló felületre, így értéke kisebb az adszorbeált réteg π_{SG} felületi nyomásával kisebb az atmoszférával érintkező felület γ_{SF} értékénél:

$$\gamma_{\text{SG}} = \gamma_{\text{SF}} - \pi_{\text{SG}} \quad (12).$$

A teljesség jegyében még felírandó az úgynevezett Young-Dupré egyenlet, amely képlet lehetővé teszi számunkra azt, hogy két mért értékből az adhéziónak az energiát meghatározzuk.

$$W_{\text{FSG}} = \gamma_{\text{FG}} \cdot (\cos\theta + 1) \quad (13)$$

Az egyenlet kapcsán a definíció úgy szól, hogy a W_{FSG} egységnyi felületre vonatkoztatott értéke annál nagyobb, minél erősebb a kötés a szilárd és folyékony fázisok között.

Az adhéziónak az energia különböző fizikai és kémiai kölcsönhatások miatt lép fel. Két fém között fémes, két ionos anyag között ionos kölcsönhatásra vezethető vissza az adhéziónak az energia. Ezek a párosok a hasonló hasonlót vonz elvnek megfelelően erős adhéziónak az energiát adnak, ami így tökéletes nedvesítéshez vezet. Ha a két fázis különböző kémiai kötésű, akkor közöttük a kapcsolatot csak a gyenge Van der Waals erők teremtik meg, amelyek nagyságrendje $0,1 \text{ J/m}^2$. Összevetve ezt a fémek jellemzően 1 J/m^2 es felületi feszültségével a (13) egyenletből 154° -os peremszög érték adódik, azaz a fémolvadék cseppek jellemzően nem nedvesítenek semmilyen nem fémes felületet. (Vízcseppekkel példa erre a Lótusz-effektus. Ennek a növénynek a levelét és a virágát a víz és más folyadékok nem nedvesítik. A rossz nedvesítés

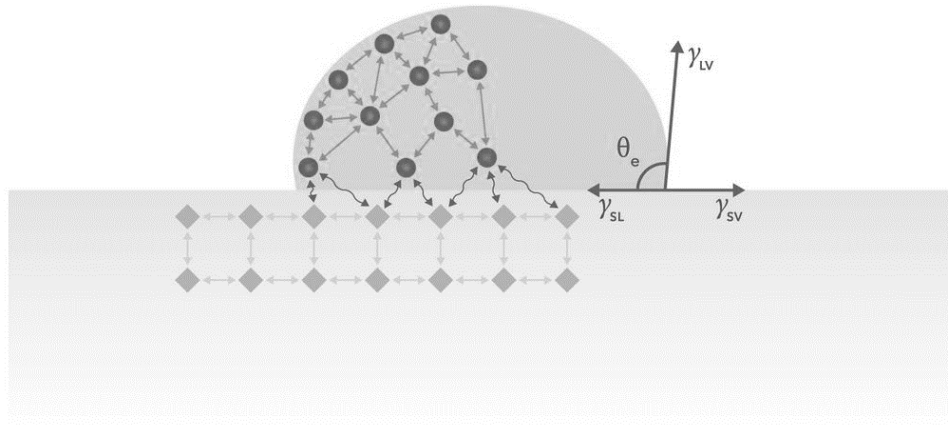
miatt gurulnak le a cseppek a felületen és viszonylag nagy méretüket is megtartják a nagy felületi feszültségük miatt.). A víz felületi feszültsége $0,07 \text{ J/m}^2$ körüli, amire a (13) egyenletből ($W = 0,1 \text{ J/m}^2$ érték mellett) 65° -os peremszög adódik. A víz tehát a szilárd anyagok többségét nedvesíti. Szinte feltétel nélküli, tökéletes nedvesítés a szerves folyadékoktól várható, melyek felületi feszültsége $0,03 \text{ J/m}^2$ nagyságrendű, azaz a képletből (továbbra is $W = 0,1 \text{ J/m}^2$ érték mellett) 0° -os peremszög adódik [16]. Azokat a felületeket, amelyeket a víz nem nedvesít hidrofób felületeknek, amiket pedig nedvesít, hidrofíl felületeknek nevezzük [25].

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

2.3. A HATÁRFELÜLETI ENERGIA (γ)

A termodinamikai rendszerek fázisai között elhelyezkedő közös felületeket határfelületeknek nevezzük. Mint már korábban a független felületi hatások elméletének kapcsán megemlítettem, a határfelületen elhelyezkedő ionok, atomok és molekulákat eltérő környezet jellemzi, mint a fázis belsejében találhatóakat. Így például a szomszédos folyadék-gőz fázisok határfelületén a kondenzált fázis nem teljesen lekötött erőterű szabad felületén lévő részecskékre a kölcsönhatási erők egyoldalú, a fázis belseje felé irányuló vonzást fejtenek ki. Ennek a jelenségnek a következménye, hogy egyrészt a felületi réteg energiatartalma eltér a folyadék belső részében található részecskék energiatartalmának összegétől, másrészt a folyadék szabad felszíne adott viszonyok mellett a lehető legkisebbre akar összehúzódní (felület minimumra törekedés elve - az elektronok a lehető legalacsonyabb energia szintű pályákon helyezkednek el). A fázishatáron az egységnyi felület energiatöbbletét a fázis belsejéhez képest határfelületi energiának nevezzük (jele: γ , mértékegysége J/m^2) [23].

A fémolvadék (forraszanyag) lehűlése eredményeként kialakult szilárd fázisban (csírában) a nedvesedési szög azt mutatja meg, hogy milyen mértékű túlhűléssel kezdődik a dermedés (2. ábra).



2. ábra: Az olvadék hűlése során kialakult felületi feszültségi viszonyok [26]

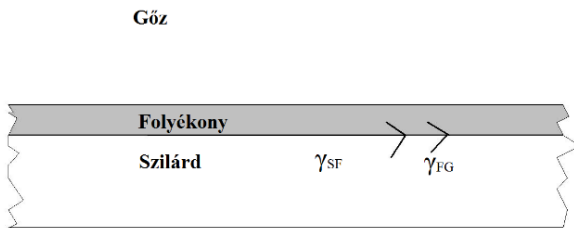
A szilárd-olvadék határfelületi energia (γ_{ak}) akár olyan nagyságú is lehet, amely mellett felléphet az úgynevezett heterogén nukleáció jelensége, vagyis a kristályosodás a falnál hamarabb elindul, mint az anyag belsejében, tehát kisebb túlhűléssel is megindul a dermedés.

A nedvesedés peremszög tartományai [23]

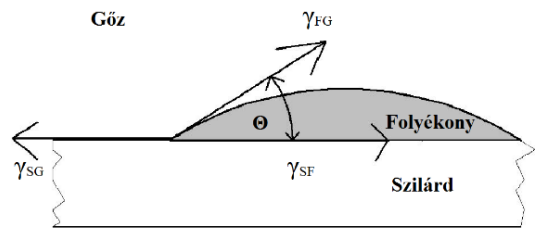
1. A peremszög értéke zérus, 0° (azaz olvadék tökéletesen nedvesít) akkor, ha az adhéziós energia legalább duplája az olvadék felületi feszültségének, vagyis az adhézió olyan erős, hogy a vékony, kötést nem létesítő rétegekben a szilárd fázis felszínére kényszeríti az olvadékot. Ha a 7. egyenlet értelmezési tartományát nézzük, akkor belátható, hogy ez csak abban az esetben lehetséges, ha a szilárd fázis felületi feszültsége nagyobb, mint a folyékony fázis felületi feszültsége (a fémek többségére ez nem teljesül, de igaz ez például karbidokra, nitridekre). Ebben az esetben lehetséges az is, hogy az adhéziós energia több mint kétszerese az olvadék felületi feszültségének. Ekkor a peremszög már nem ad reális információt a határfelület energetikai viszonyairól, hiszen attól függetlenül, hogy az adhéziós energia mennyivel nagyobb az olvadék felületi feszültségének a kétszeresénél, a peremszög a 0° -os geometriailag lehetséges határértéket mutatja (3/a ábra).
2. A peremszög értéke 0° és 90° közé esik (a folyékony fázis nedvesíti a szilárd fázist) abban az esetben, ha az adhéziós energia nagyobb (de kevesebb, mint az I. pontban részletezett kétszeres mérték) az olvadék felületi feszültségénél, azaz az adhézió elég erős ahhoz, hogy az olvadékot a szilárd fázis felületére kényszerítse (3/b ábra).

3. A peremszög értéke 90° és 180° közé esik (a folyékony fázis nem nedvesíti a szilárd fázis felületét), ha az adhéziós energia kisebb az olvadék felületi feszültségénél, vagyis, ha az adhézió annyira gyenge, hogy az olvadék inkább a gőzzel alakít ki közös felületet (3/c ábra).
4. A peremszög értéke 180° (a folyékony fázis egyetlen ponton érintkezik a szilárd fázis felületével), ha az adhézió mértéke zérus a két felület között, tehát nem alakul ki nedvesítés. Ez csak abban az esetben fordulhat elő, ha az olvadék megszilárdul, és szilárd-szilárd fázisokat vizsgálunk meg (3/d ábra).

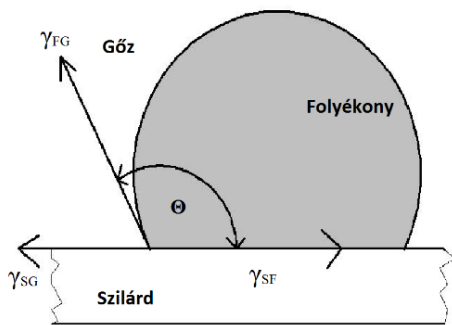
(a) $\Theta = 0^\circ$



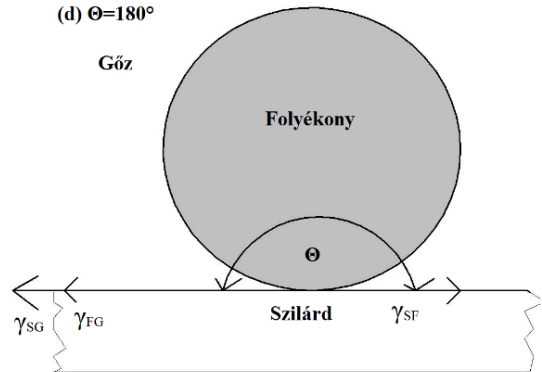
(b) $0^\circ < \Theta \leq 90^\circ$



(c) $90^\circ < \Theta < 180^\circ$



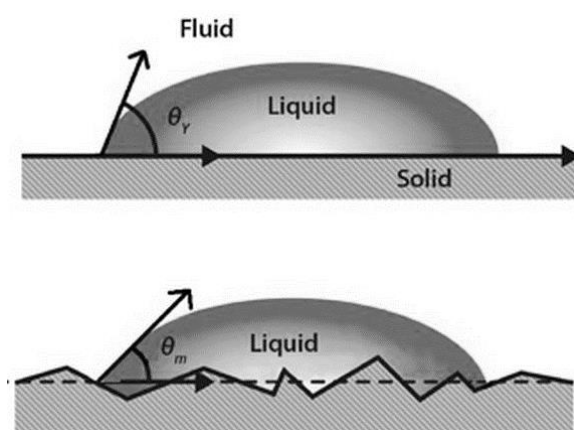
(d) $\Theta = 180^\circ$



3. ábra. A nedvesedési peremszög tartományai [23]

2.4. FELÜLETI ÉRDESSÉG ÉS A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖG KAPCSOLATA

A minták felületi érdessége nagymértékben befolyásolja azok nedvesedési tulajdonságait. Az előbb említett összefüggést Wenzel dolgozta ki 1936-ben, állítása szerint felület kémiaja által befolyásolt nedvesedést a felületi egyenetlenségek mindig felerősítik, vagyis például ha egy felület kémiaiilag hidrofób, akkor miután összekarcoljuk, még erősebben hidrofóbbá fog válni [27].



4. ábra. Csepp elterülése sima és érdesen felületeken [27]

$$\cos\theta_m = r\cos\theta_y, \quad (14)$$

ahol θ_m , a mért peremszög-érték,

θ_y , a Young peremszög-érték (4. ábra),

r , pedig egy teljesen sima felület esetén 1, érdes felület esetén 1-nél nagyobb az érdességi adatokból meghatározható paraméter.

A nedvesedés elméletéből látszik, hogy a forrasztások minőségét legjobban meghatározó tényező a nedvesedési peremszög. A nedvesítő képesség befolyásolását három dolog változásának tulajdoníthatjuk: (i) a felszín oxigéntartalmának; (ii) a felületi érdességnek; (iii) a felszín mikroszerkezetének [28-34]. Ezt a peremszöget sokféle képen lehet javítani [35-43]. Ilyen iparban alkalmazott eljárás például a lézeres felületkezelés [35].

Megjegyezném, hogy ez nem mindig igaz (14), mert ha mondjuk nem nedvesítő eset lenne, akkor a simább felület csak tovább rontaná a nedvesítést.

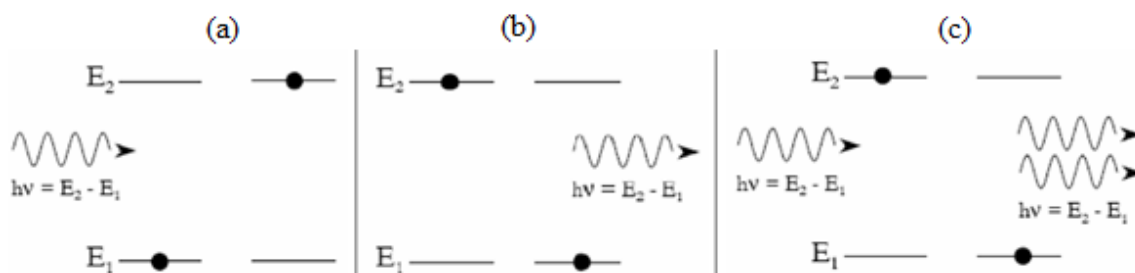
2.5. LÉZER TECHNOLÓGIA

Ahhoz, hogy megértsük, hogy, hogyan lehetne lézeres felületkezeléssel javítani a szubsztrát nedvesedési peremszögén és ez által a forrasztott kötés minőségén, elengedhetetlen, hogy áttekintsük a lézer működését és elméleti háttérét. Az összefoglalásomban az általam is alkalmazott Nd: YAG szilárdtest lézert mutatom be részletesebben.

2.5.1. LÉZEREK MŰKÖDÉSÉNEK ELMÉLETI HÁTTERE

Az angolszász országokban használatos *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* kifejezés kezdőbetűiből álló LASER betűszó rendkívül beszédes megnevezése az 1960-as években világhódító útjának induló technológiának. Ha megpróbálnánk lefordítani az elnevezést, akkor talán a „fényerősítés kényszerített fénykibocsátás útján” kifejezés állna a magyar nyelvben legközelebb az angol megfelelőjéhez. Ez a feloldás már rögtön elénk is tárja a lézerek működésének legalapvetőbb mozzanatát, az indukált fénykibocsátást. Az említett jelenség, akkor jön létre, ha valamely átlátszó anyagi közegben vannak olyan atomok vagy molekulák, amelyeknek két energiaszintje közötti energiakülönbség éppen megfelel egy olyan foton energiájának, amit a kisebb energiájú állapot elnyelni, a nagyobb energiájú állapot pedig kibocsátani képes. Ugyanis, ekkor egy ilyen foton indukálja a nagyobb energiájú állapot átmenetét a kisebb energiájú állapotba, melynek során az indukáló fotonnal azonos tulajdonságú: azonos hullámhosszú, irányú és fázisú foton bocsátódik ki. Verőné Wojtaszek Malgorzata cikkében [44] a következőképpen magyarázza meg bővebben a fénykibocsátás folyamatát:

“Az atommag és az elektronok közti kapcsolat energiaszintekkel jellemezhető. Az elektronok rendes körülmények között a lehető legalacsonyabb energiaszinteket foglalják el. Ebben az esetben az atom alapállapotáról beszélünk (5. ábra). Az elektronok azonban magasabb energiaszinteket is elfoglalhatnak, szabadon hagyva az alacsonyabb szintet. Az elektronok az energia elnyelésével (abszorpció) vagy kibocsátásával (emisszió) az egyik energiaszintről a másikkra válhatnak. Az atom energiaszintje változásának e két jól ismert módját nevezzük radiatív átmenetnek. A radiatív átmenetek harmadik fajtája un. stimulált emisszió a lézer működésének alapját jelenti.”



5. ábra: Abszorpció (a); Spontán emisszió (b); Stimulált emisszió (c) [45]

Az 5. ábra bal oldalán látható az abszorpció más néven az elnyelődés jelensége, amely során az atommag körül keringő elektron egy külső forrásból származó energiamennyiséget nyel el (pl.: foton). Az abszorpció az elektron energiájának megnövekedésével jár együtt, ami azt eredményezi, hogy a megfelelő mennyiségű abszorbeált energia segítségével egy magasabb energiaszintre lép, az atom pedig gerjesztett állapotba kerül. Fontos kihangsúlyozni az energiaszintek diszkrétiségét, vagyis azt, hogy csak a pontos energiamennyiség hatására fog az elektronunk energiaszintet lépni. Ennek a megállapításnak következménye az is, hogy az ütközés során csak az a foton nyelődhet el, amely az adott elektron számára megfelelő energiájú vagy hullámhosszú.

Az energiaminimum elve kimondja, hogy minden atomi szerkezet egésze a lehető legkisebb energiájú állapotra törekszik. Ennek értelmében egy gerjesztett atom magasabb energia szintű elektronjai mindig az alacsonyabb energiaszintekre próbálnak visszakerülni például az energiájuk bizonyos részének hővé alakításával vagy fotonok spontán emissziója útján. A diszkrét energia szintekből adódóan, a foton - amit a gerjesztett állapotát megszüntetni törekvő atom spontán emisszió útján kibocsát - energiája egyenlő lesz a gerjesztett és az alacsonyabb energiájú állapotok közötti energiakülönbséggel.

$$E_{\text{foton}} = h \cdot \nu = E_2 - E_1, \quad (15)$$

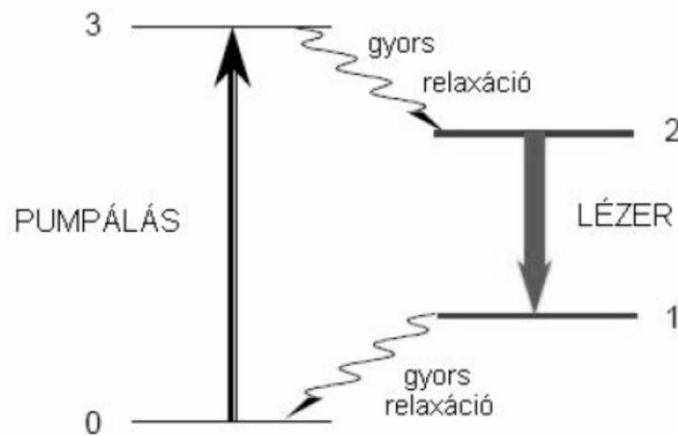
ahol h , a Planck állandó ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Js)

ν , a frekvencia (Hz).

Ha a fentebb említett folyamat minden külső behatás nélkül, önmagától lezajlik, akkor azt spontán emissziónak nevezzük (5. ábra (b)).

Einstein már egy 1917-es stimulált emisszióval foglalkozó munkájában [46] a mai modern lézerek működését lehetővé tevő megállapításra jutott: „ha a gerjesztett állapotban levő atomhoz egy olyan foton érkezik, amelynek frekvenciája megfelel a gerjesztett és az

alacsonyabb energiaszintű atom energiakülönbségének, akkor bekövetkezhet az indukált fotonemisszió. Ennek során az atom visszatér az alacsonyabb energiaszintű állapotába, s a gerjesztett állapot többletenergiáját egy kibocsátott foton viszi el. A folyamat eredményeként tehát két foton hagyja el a közeget, az eredeti beérkező foton és az emittált újabb foton. A másik atom által kibocsátott foton a frekvenciát, energiát, irányát és fázisát tekintve azonos lesz a hatást kiváltó fotonéval. A két foton útját folytatva további atomokat stimulál emisszióra.”



6. ábra: A lézer működésének elvi sémája [45]

A XX. század egyik legnagyobb gondolkodójának felfedezése mellett a lézerek működéséhez még egy további alap-elméleti megfontolás is szükséges, mivel például az előbb taglalt spontán emisszió során kibocsátott foton egy kisebb energiájú állapotban lévő atom vagy molekula is elnyelheti, ami indokoltá teszi, hogy a működési térben a foton kibocsátásra „rögtön” alkalmas energiájú atomok mennyisége magasabb legyen, mint a fényelnyelő kisebb energia állapotúaké. Másképpen fogalmazva a lézerünk működéséhez spontán teljesülni kell az úgynevezett populáció inverzió feltételének, ami kétnívós (nívós, energiaszintű) esetben nem, de 3 vagy többnívós esetben azonban megvalósítható. Erre megoldásként olyan rendszert (6. ábra) kell keresnünk, amelynél a 3-as gerjesztett állapot élettartama (ns) sokkal kisebb, mint az ún. metastabil 2-es állapoté ($\sim \mu s$). Ez két anyag keverékénél könnyen megvalósítható (pl. He-Ne, Nd:YAG). Az 0-3 átmenetek során történik meg a gerjesztés (pumpálás). A 3. állapotból az elektronok viszonylag gyorsan a 2-es metastabil állapotba, s kis részük az 1-es alapállapotba jutnak. A metastabil állapot magas élettartama miatt bekövetkezhet a populáció inverzió, és a stimulált fotonemisszió hatására ($h\nu = E_2 - E_1$) megtörténik a lézer átmenet [45]. Ezek a fotonok további fotonok kisugárzását indukálják és így egyre több energia koncentrálódik koherens fotonok formájában. Összefoglalva elmondható, hogy a populáció

inverzió jelensége akkor következik be egy rendszerben, ha több atom van gerjesztett állapotban, mint alapállapotban [47]. Az ily módon létrejövő stimulált emissziók láncolata jócskán megnövelheti egy bizonyos irányban haladó fotonok számát. A fotonok számának növelése során egy meghatározott irányt tükrök használatával magunk is előnyben részesíthetünk. Azok a fotonok, amelyek nem merőlegesek az általunk elhelyezett tükrökre, kiszöknek a rezonátorüregből. A két tükrő tengelye mentén oda-vissza verődő fotonok minden egyes áthaladás során további fotonok kisugárzását indukálják. Ha gondoskodunk a folyamatos gerjesztésről, vagy pumpálásról (a magasabb energiaszint betöltöttsége), akkor egyre több energia koncentrálódik a rezonátorüregben, koherens fotonok formájában. Ez az energiaforrás úgy „csapolható meg”, ha a rezonátorüreg egyik végén lévő tükrő részben áteresztő, így a keletkező fotonok adott intenzitás elérése után folyamatosan kiléphet a rezonátorüregből. Ezt a kilépő párhuzamos, monokromatikus és koherens sugárzást nevezzük lézersugárzásnak [44].

A rezonátorból kicsatolt lézerfényünk a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

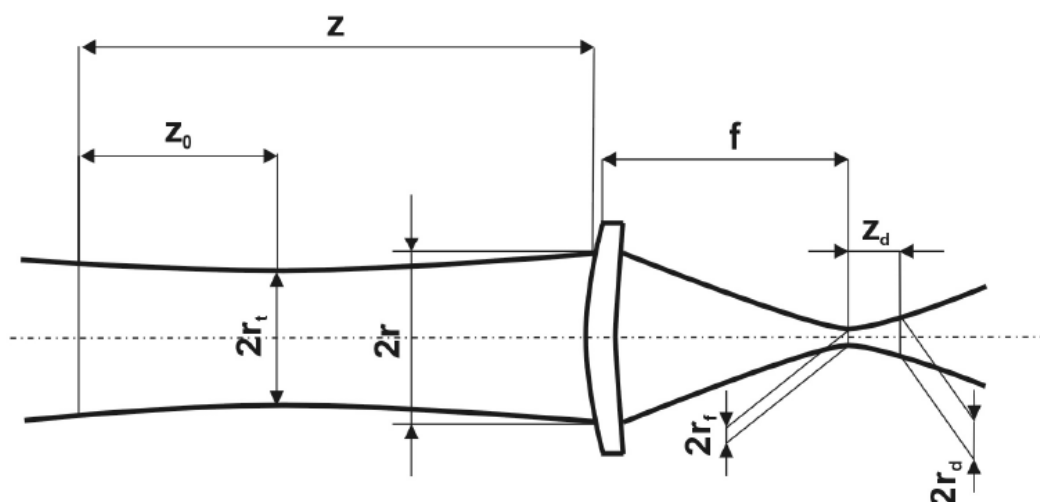
- Időben és térben koherens, a lézer által kibocsátott hullámok fázisa a sugár minden keresztmetszeténél azonos.
- A lézernyaláb keskeny és nagyon kis széttartású nyaláb (a lézerfény nagyrészt párhuzamos fénysugarakból áll). Ezzel nagy energiasűrűség érhető el szűk sugárban, a sugár által megtett távolságtól függetlenül.
- Közel egyetlen hullámhosszú összetevőből áll, ezért a lézerek fénye egyszínű, monokróm.
- Energiája kis térrészben koncentrálódik, a lézerfény teljesítménysűrűsége a megszokott fényforrásokénak sokszorosa lehet.
- A lézer által kibocsátott hullámok mágneses mezejének iránya állandó (polarizáció).

A fent említett tulajdonságok a kutatásom számára optimálisak, hiszen így a lézer segítségével mindig ugyan olyan minőségű kezelést tudok végrehajtani.

A lézer technológiák elméleti ismertetésében még fontos definiálni a lézernyaláb általános karakterisztikáját és annak mennyiségi jellemzőit. A lézersugár geometriai alakja remekül kivehető a 7. ábrán.

A képen látható mennyiségek közül szeretném kiemelni a lézerfényünk ipari felhasználásra fordíthatóságát leginkább meghatározó paramétereket:

- $2r$, a kicsatolt nyaláb átmérője,
- f , a vezető csatornából kilépő nyaláb fókusz távolsága,
- $2r$, a fókuszpontban mérhető sugár átmérője,
- továbbá z_d és $2r_d$ az újbóli defokuszáltság intervallumának kezdő értékei.



7. ábra: Lézersugár geometriája [48]

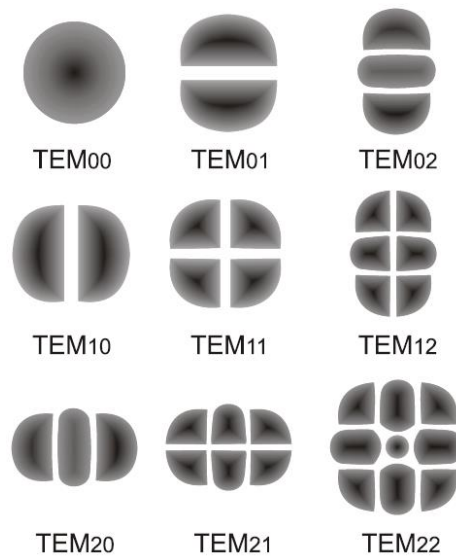
A felsorolt mennyiségek alapvetően meghatározzák a fókuszpontban elérhető teljesítmény-sűrűséget, amely a lézerek különböző feladatokhoz való kiválasztási folyamatában igen fontos szerepet játszik a másik kettő, a dolgozatomban kiemelésre kerülő jellemző mellett.

$$p = \frac{P}{Y \cdot (2r_f)^2} \quad \left[\frac{W}{mm^2} \right] \quad (16)$$

A 16. egyenletben szereplő Y változó, attól függően veszi fel az 1, vagy $\pi/4$ -es értéket, hogy négyzetfoltról, avagy kör alakú foltról van szó.

A kicsatolt energia mennyiség kiszámítására pedig szintén a teljesítmény adatokból van lehetőségünk:

$$E = P/t \quad [J] \quad (17)$$

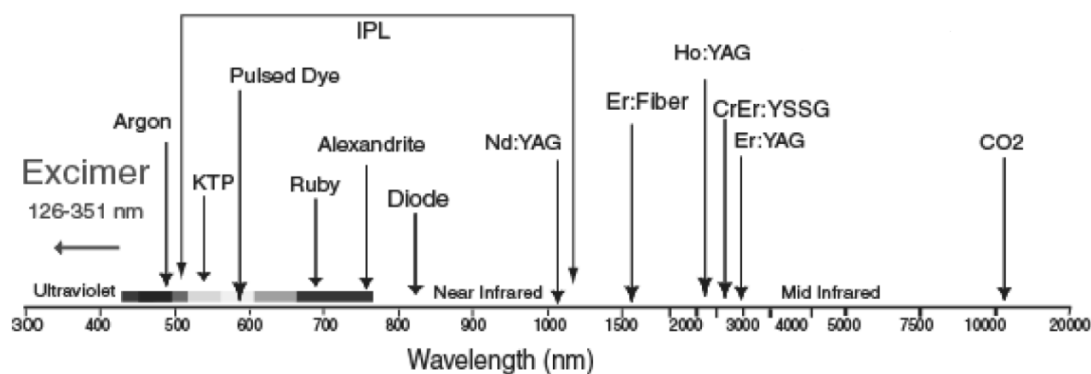


8. ábra: A lézersugár intenzitásprofilja [49]

A kiválasztási folyamatokban még további jelentős szerepet tulajdoníthatunk a lézersugár módusszerkezetének. Az indukált emissziós folyamattal keltett elektromágneses tér bizonyos megengedett konfigurációk (módusok) felvételére kényszerül, a peremfeltételeknek (pl.: csőátmérő, tükröablak, rezonátorerősítés, pumpálóteljesítmény) megfelelően. Mivel az ideálistól eltérően általában több átmenetből keletkezik a lézerfény - beleértve az egynél több axiális hullámból keletkező longitudinális, illetve a különböző keresztmetszeti intenzitáseloszlású transzverzális (TEM) módusokat -, így kisugározva bizonyos kitüntetett eloszlásokban lép ki, egyszerűbb vagy bonyolultabb alakzatokat felvéve. A módusszerkezet osztályozása a terjedési irányra merőleges síkban látható kimeneti eloszlásképen alapul. A Transzverzális Elektromágneses (TEM) módusszám jelölése (indexelése) e síkban lévő két merőleges tengelyen található zérushelyek számával történik, azaz a módusszámok eggyel kisebbek, mint a „fényes” zónák számai. A legegyszerűbb, jól fókuszolható, Gauss-energiaeloszlású TEM₀₀-módus, illetve -sugár instabil rezonátorral továbbformálható a még jobb fókuszolhatóság érdekében [49].

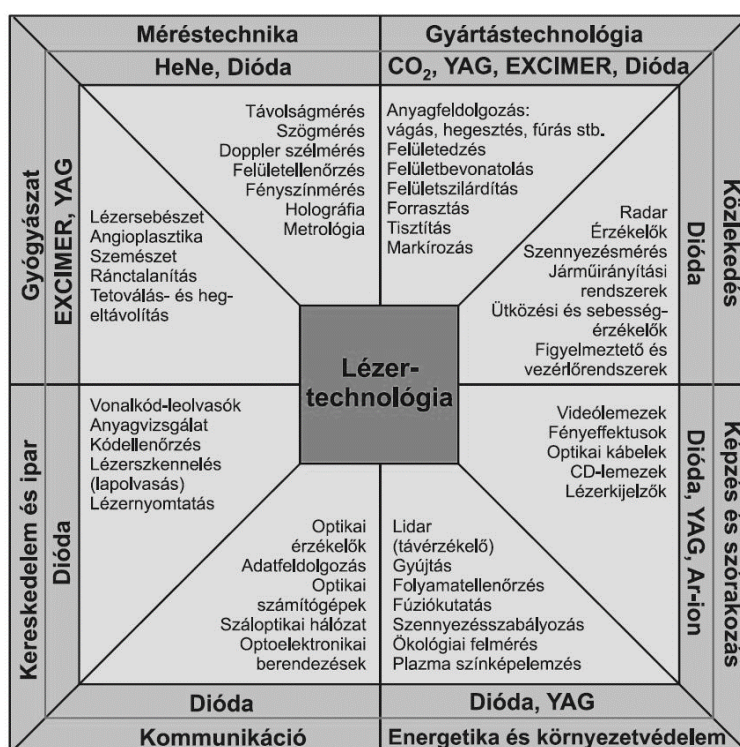
2.5.2. LÉZEREK SUGÁRFORRÁSAI

A lézerek talán legalapvetőbb osztályozásának tárgya a keletkező sugárnyaláb forrásának anyaga és annak halmazállapota. Vagyis, hogy az atomok stimulált emissziója milyen anyagi közegben játszódik le. Ez a jellemző meghatározó lézerünk legtöbb paraméterére nézve, mint az a 9. ábrán látható is (pl.: kicsatolható teljesítmény és sugárnyaláb hullámhossz).



9. ábra: Lézer sugárforrások áttekintése [48]

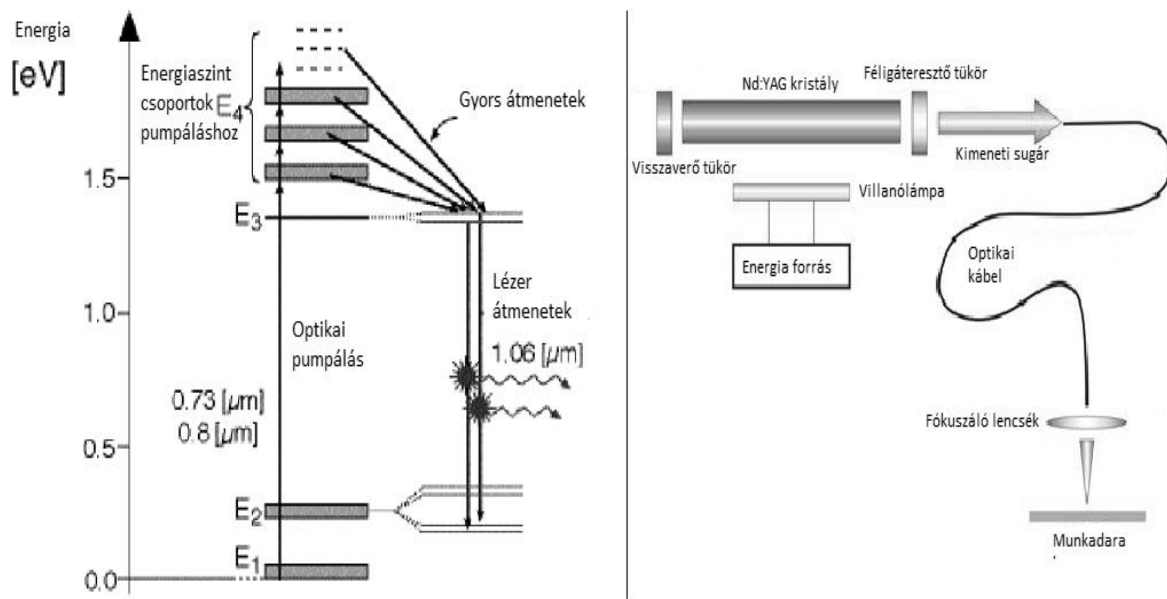
A 10. ábrán pedig a ma használatos lézer sugárforrások felsorolása látható, azok elterjedt alkalmazási területeinek megjelölésével.



10. ábra: Elterjedt lézer sugárforrások és azok alkalmazási területei [49]

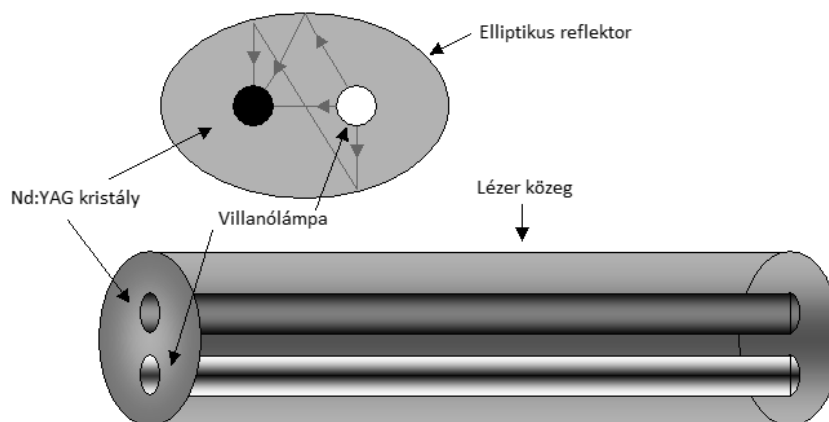
A fent említett lézer típusok közül szerintem az Nd: YAG lézer a legalkalmasabb, hiszen használata nagyon elterjedt az ipari világban, amit ideális teljesítmény tartományának (1 - 5 kW), kezelhetőségének és funkcióinak köszönhet. Ezeket a lézereket az ipari felhasználók sokszor használják különböző anyagok (fémek, műanyagok, stb.) gravírozására, jelölésére, vágására, hegesztésére, de akár fúrására is beállításoktól függően. Ez az egyik legelterjedtebb és legsokoldalúbb lézerfajta [1-2, 32-36]. Az Nd: YAG (teljesen képletével Nd: Y₃Al₅O₁₂, vagyis neodímium- ittrium-alumínium gránit) kristályt, mint sugárforrást felhasználó lézerek a

szilárdtest lézerek családjába tartoznak. Az első ilyen szennyezett ionkristály-lézer megépítése J.E. Geusic nevéhez fűződik 1964-ből. Működéséről röviden annyit érdemes tudni, hogy a lézer közegben lévő atomok pumpálása általánosságban optikailag történik dióda lézerek segítségével, aminek eredményeképpen 1064 nm hullámhosszágú lézerfényt kapunk [7]. A tárgyalt típusú lézerek sematikus felépítése és energiaszintjeinek jellemzése a 11. ábrán látható.



11. ábra: Az energia szintek és felépítésük [50]

A 12. ábrán látható, hogy a sokszor rúd alakú sugárforrásnak milyen a belső felépítése. Ezen könnyen kivehető, hogy a gerjesztő lámpa által kibocsátott fotonok a lézer közeg tükrös belső feléről oda- visszaverődve sokkal hatékonyabban képesek emisszióra kényszeríteni a kristály atomjait, ezzel is növelve lézer hatékonyságát.



12. ábra: A sugárforrás belső felépítése [50]

2.5.3. LÉZEREK ÜZEMMÓDJAI

A lézereket alapvetően folyamatos és pulzált üzemben működtethetjük, attól függően, hogy éppen melyik üzemmód előnyeit akarjuk hasznosítani munkánk során.

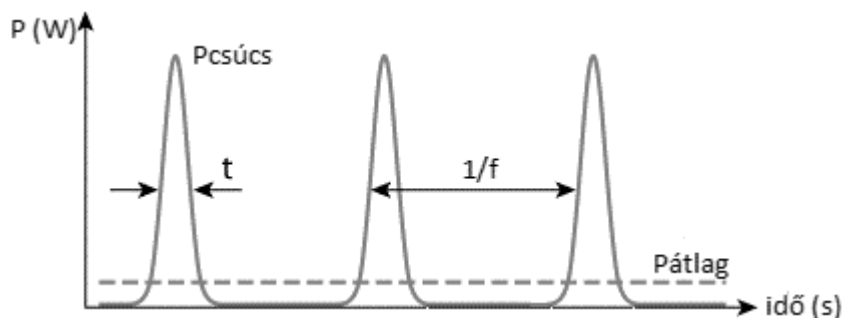
A folyamatos üzembről beszélhetünk, ha a működés során a kicsatolt teljesítmény jó közelítéssel időben állandónak mondható. Ennek a módozatnak feltétele a lézer médium folyamatosan történő pumpálása, aminek segítségével fenntartható a populáris inverzió jelensége. Ezt nem minden sugárforrás képes biztonságos kereteken belül elviselni, így nem minden lézer képes erre az üzemmódra.

Impulzus üzemben (13. ábra) lézerünk fénye nem folyamatos, hanem egy bizonyos f frekvencia függvényeként kerül kicsatolásra T periódusonként meghatározott t időtartamra. Mivel ekkor a két pulzálás között felgyülemlett fotonok teljes mennyisége kicsatolásra kerül ezért egy rövid időre (μs – ns tartomány) meglehetősen nagy teljesítményhez juthatunk.

$$E = P_{\text{csúcs}} \cdot t \quad (18)$$

$$P_{\text{átlag}} = E \cdot f \quad (19)$$

A fenti egyenletek segítségével könnyedén át tudjuk számítani a két üzem során kicsatolt energiák nagyságát, illetve gépünk teljesítményét, ha belátjuk, hogy CW üzemmód teljesítmény az impulzus módban használt lézerünk átlagteljesítményének feleltethető meg.

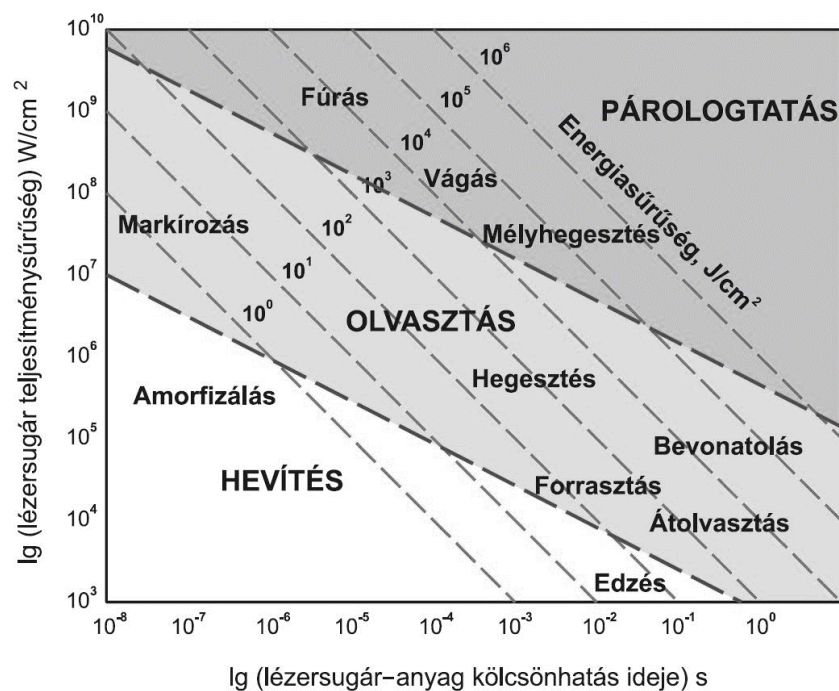


13. ábra: Impulzus üzemmód [49]

Az impulzus lézerek tárgyalása során érdemes még kitérni a Q-kapcsolt működési módokra is. Ezeknek lényege, hogy a sima impulzus üzemnél nagyobb csúcsteljesítmények kicsatolására nyílik lehetőség, de jóval kisebb frekvencia mellett.

2.5.4. LÉZEREK ALKALMAZÁSAI AZ IPARBAN

Napjaink ipari cégei a megrendelők számára végzett anyagmegmunkálások során egyre többször alkalmaznak lézereket. Ez nem is meglepő, hiszen szinte az összes megmunkálási mód elvégezhető lézerek segítségével. A technológia egyre növekvő versenyképességét az biztosítja, hogy a magas induló befektetést sokszor könnyedén ellensúlyozza a nagyfokú automatizálhatóság, a nagy darabszámok kezelhetősége, és a minden eddigi hagyományosnak mondható módszernél nagyobb pontosság.



14. ábra: Lézeres anyagmegmunkálások térképe [49]

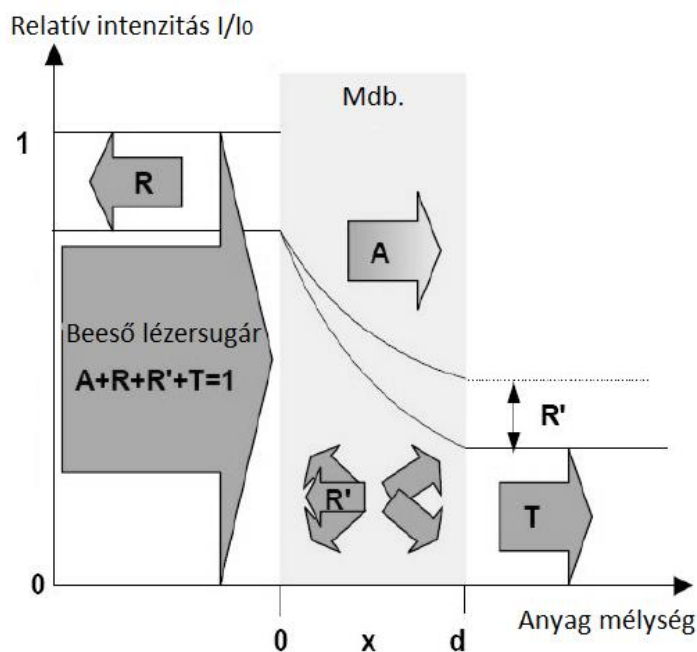
Tudományos munkám során felületkezelésre alkalmaztam a lézer technológiát, a felhasználhatóság ezen ágazatáról a következő fejezetben esik szó.

2.5.6. LÉZERES FELÜLETKEZELÉSI ELJÁRÁSOK

A felületkezelési módszereknek sokféle osztályozása fellelhető, de lényegében mind arra a megállapításra alapszik, hogy a lézernyaláb behatása során a felület hőmérséklete meghaladja-e az anyag olvadáspontját, avagy az alatt marad. Az egyszerű átláthatóság érdekében dolgozatomba a számomra letisztultabbnak ható felosztást írom le, amely aszerint bontja két fő csoportra az eljárásokat, hogy a kezelés során bevitt hő hatására létre jön-e halmazállapot-változással járó átalakulás az anyagunkban vagy sem.

2.6. A LÉZERNYALÁB ÉS AZ ANYAG KÖLCSÖNHATÁSA

Ebben a fejezetben bemutatom a lézernyaláb és az anyag felületének optikai és termikus kölcsönhatásaiból létrejövő változásokat, hiszen ezek felderítése és viszonyaiknak a vizsgálata az egyik legfontosabb pontja a kutatásomnak. Először az optikai kölcsönhatásokat tekintem át:

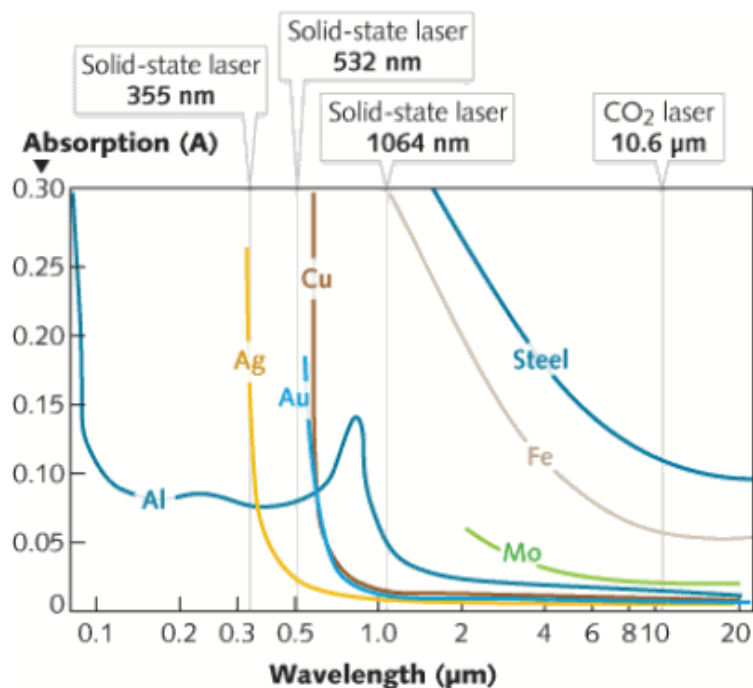


15. ábra: Lézersugár-anyag interakció [48]

A lézersugár a felületet elérve alapvetően háromféle módon viselkedhet: elnyelődik (absorption/A), átsugárzódik (transmission/T), vagy visszaverődik (reflection/R). Ezekben az esetekben beszélhetünk beesési és megtörési szögekről, amelyekkel mennyiségi módon jellemezhetjük a fázishatárral való találkozást. Továbbá, fontos tisztában lenni a lézersugár anyag interakció során a nyaláb intenzitás változásának alaptételével, ami a 15. ábrán látható. Általánosságban elmondható (fémek esetén ugyanis nincs átsugárzódás), hogy a relatív intenzitások (pl.: $A = I_a / I_0$) összege egyet ad, vagyis a beeső lézersugár eredeti intenzitását [51].

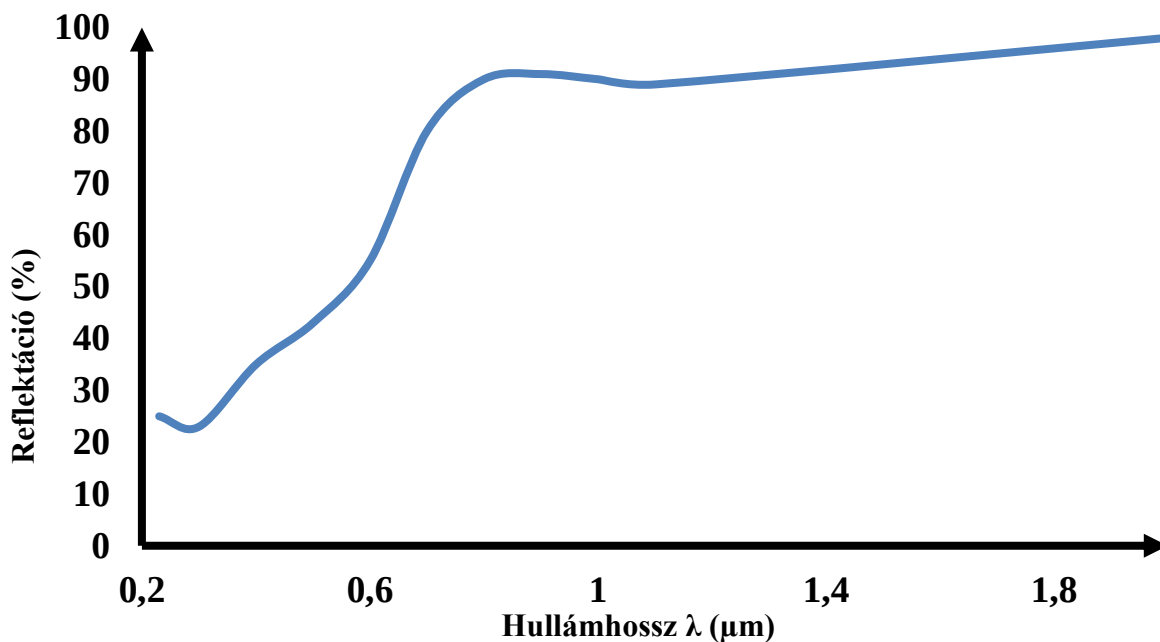
$$A + R + T = 1 \quad (20)$$

Az abszorpció, hullámhossz és az anyagi minőségek közötti összefüggést a 16. ábra mutatja. Különböző anyagok más és más hullámhosszon nyelik el jobban a besugárzott lézerek energiáit [51].



16. ábra: Abszorpció, hullámhossz és az anyagi minőség közti összefüggések [51]

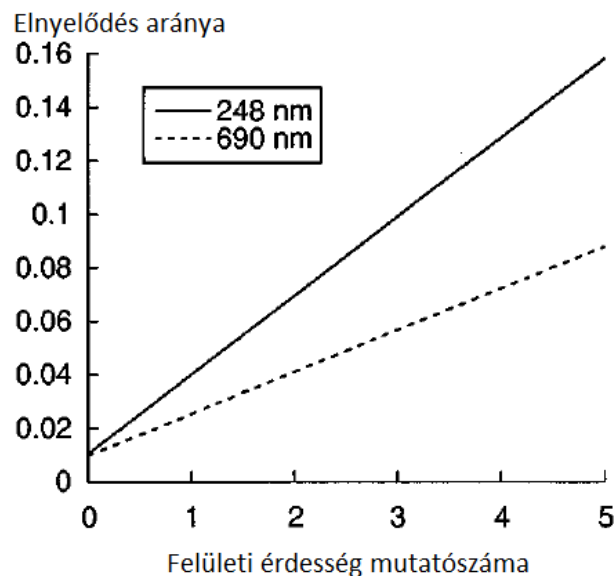
Esetemben a réz és Nd: YAG kölcsönhatásakor a réz csak kis mértékben tudja elnyelni a lézeres besugárzást. A 17. ábrán látható, hogy a réznek az 1064 nm-es hullámhosszon üzemelő Nd: YAG lézerrel szemben elég magas körülbelül 94%-os reflektáló képessége van.



17. ábra: A réz és különböző hullámhosszon üzemelő lézerek kölcsönhatásakor létrejövő reflektálódás mértéke [52]

Az elnyelt fotonok mennyisége, amellyel a kívánt változásokat idézhetjük elő a munkadarabon a következő paraméterekkel van kapcsolatban:

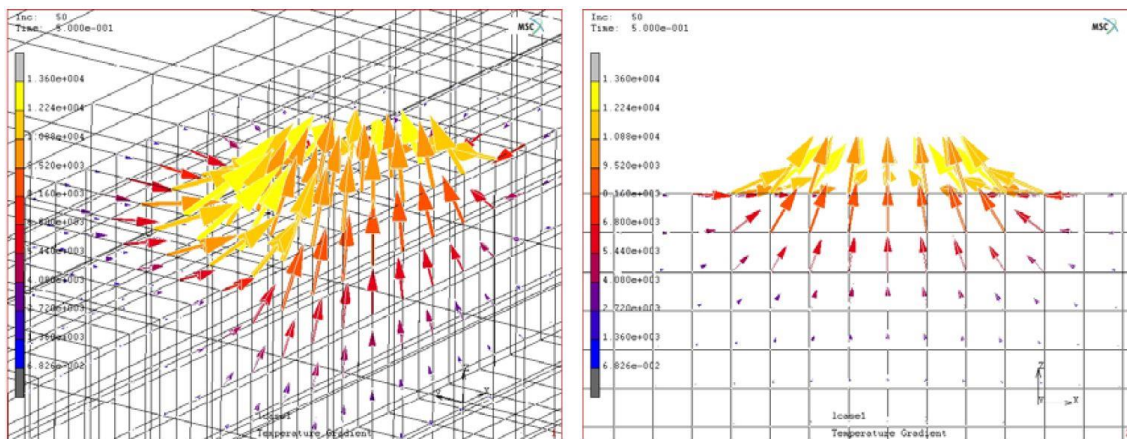
- hullámhossz, vagyis a lézer fajtája (16. ábra),
- hőmérséklet,
- a sugár beesési szöge,
- a sugár polarizációja,
- a munkadarab anyagminősége (16. ábra),
- a kezelendő felület minősége (18. ábra),
- a munkadarabon lévő bevonatok milyensége.



18. ábra: Abszorpció és felületi minőség kapcsolata [53]

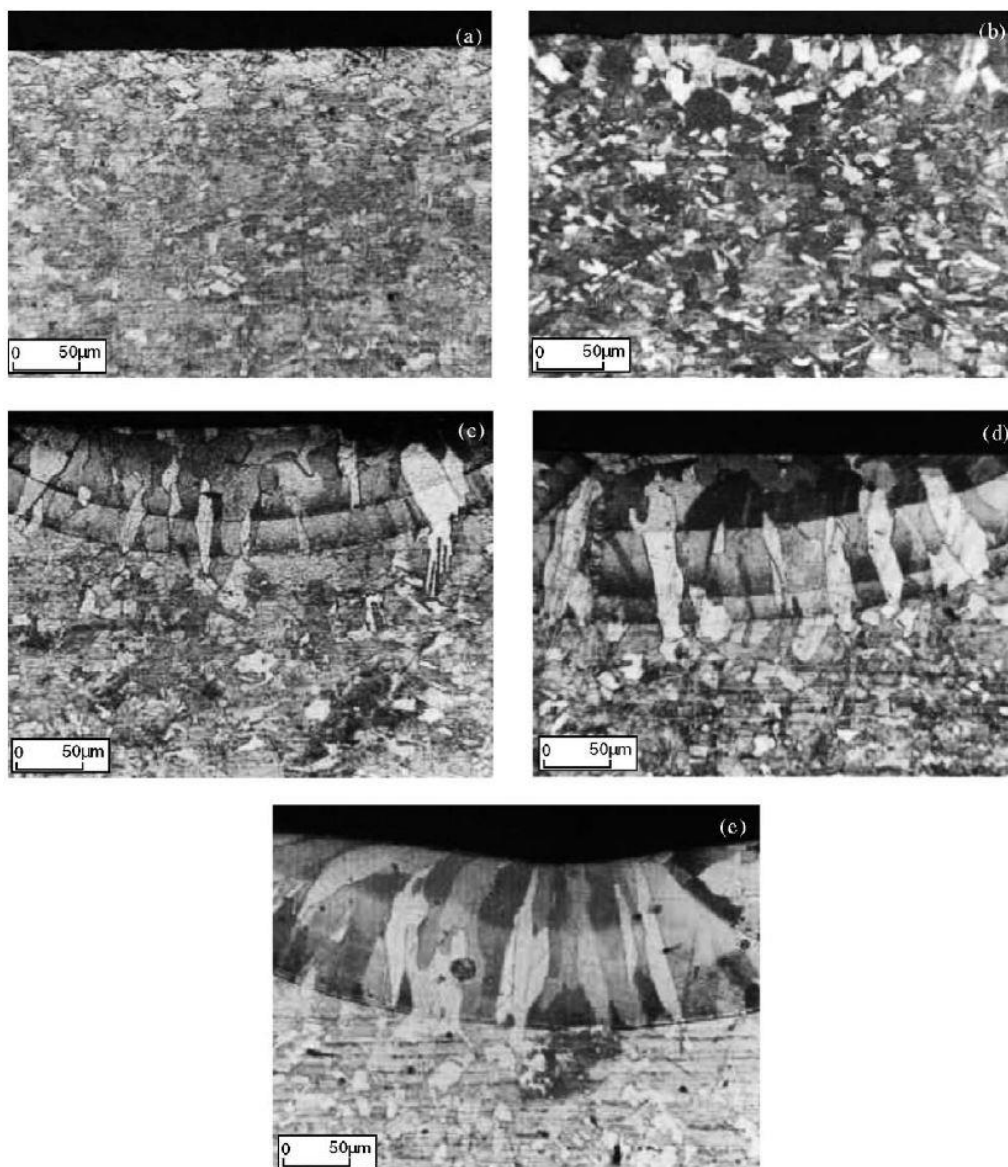
A lézernyaláb és a munkadarab termikus kölcsönhatása során az elnyelt energia hőenergiává alakul az anyagunkban. Ennek következtében beszélhetünk az anyag megolvadásáról, párolgásáról és végül plazma állapotba kerüléséről [53]. Kutatásom során a hőmérséklet csak az anyagszerkezet megváltoztatásának mértékéig megy el. Az Nd: YAG lézerrel felületkezelt réz esetében a megfelelő teljesítményszint kiválasztásával megtudjuk változtatni az anyag szemcseszerkezetét.

A metallográfiai vizsgálatok eredményét a 20. ábra mutatja. A felületi rétegek mikrostruktúrája a különböző lézer teljesítmény függvényében más és más. A 20. ábra (a) és (b) képen látható, hogy amikor a beállított teljesítmény csak 500 W akkor, az átolvasztás mértéke kicsi és nem látható egyértelmű határ (fúziós vonal) a kezelt és a kezeletlen szemcsék között. Azonban a felületen lévő szemcsék méretén nagyobb lett. Amikor a lézer teljesítmény szintje nagyobb volt, mint 1000 W akkor olvadék alakja nyilvánvaló lett, amelyben a mintadarab felületére merőleges, oszlopos szerkezetű szemcsesréteg alakult ki [35]. A teljesítmény növelésével az oszlopok mérete és az olvadék mélysége is tovább nőtt. Ennek az oszlopos szerkezet kialakulásának egyik oka lehet a lézeres felületkezelési technológia, ahol más a hő bevezetés, hűtés és megszilárdulás aránya, mint a hagyományos fűtési módszereknél. Jelen esetben az olvadékréteg növekedését a réz hő elvonó képessége gátolja meg [35]. A megszilárdulási folyamatban létrejövő orientált kristályosodást az olvadék réteg hőmérséklet gradienseinek alakulása okozza [54]. A gradiens véges elemes szimulációja a 19. ábrán látható.



19. ábra: A hőmérséklet gradiens eloszlása az olvadék rétegben a réz lézeres felületkezelése során [54]

A 20. ábrából látható, hogy az (100) kristálytani irányba nőnek a szemcsék a leggyorsabban, ami megegyezik hőmérséklet gradiens irányával [35, 54]. Megállapítható, hogy ezzel a szemcseszerkezet változással javíthatunk a szubsztrát nedvesítő képességén [28-34].

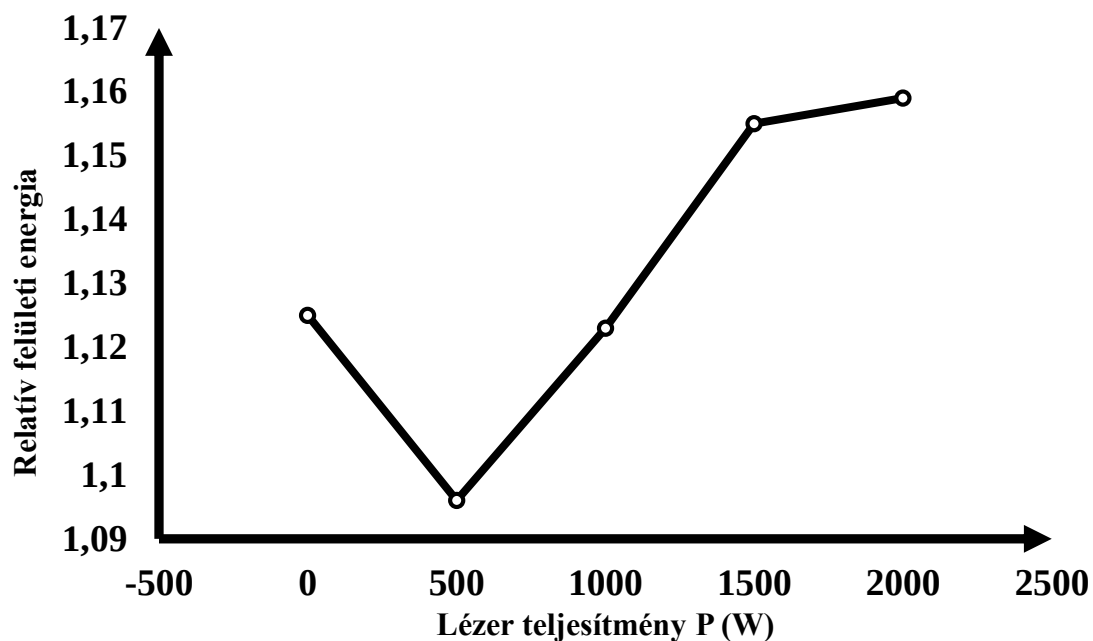


20. ábra: Optikai fényképek a lézeres kezelés után: (a) kezeletlen, (b) 500W, (c) 1000W, (d) 1500W és (e) 2000W [35]

A következőkben ismeretem a lézeres felületkezelés hatását a nedvesedési peremszög változására. Ennek a megváltozásnak az ismerete a legfontosabb számomra.

A peremszögérték csökkenésnek az okai a kristálytani síkok arányának megváltozásában keresendő, amelyet röntgen diffrakciós vizsgálatok segítségével lehet kimutatni. Ha megmérjük az egyes kristálytani síkok intenzitás értékét a különböző teljesítményű lézeres felületkezelés esetén, majd ezeknek a kristálytani síkoknak a relatív felületi energiájának ismeretében meghatározzuk a teljes felületek relatív felületi energiáit, akkor a kimért peremszögértékek csökkenése és a kiszámított relatív felületi energiák nagysága összhangban van, ezzel nyújtva elméleti megalapozottságot a gyakorlatban tapasztalt

nedvesedési viszonyok javulásának. A 21. ábrán láthatjuk, ahogyan a lézeres teljesítmény növelésével először csökken a relatív felületi energia és körülbelül 500 W-tól elkezdi növekedni [35]. Ezzel ellentétesen 500 W-os besugárzásnál magasabb peremszög értéket tapasztaltak, mint a kezeletlen mintadarabon és 1000, 1500 és 2000 W-os teljesítményen csökkenő értékeket mértek [35, 39, 41]. Ebből következik, hogy minél nagyobb a felületre besugárzott lézeres energia annál jobb az anyag nedvesítő képessége [38-40].



21. ábra: A relatív felületi energia a lézeres felületkezelés hatására [35]

2.7. IRODALMI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA, A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSE

A forrasztás egy kiemelkedő jelentőségű és egyre elterjedtebb technológia, amit számos helyen használnak az ipar különböző területein. Ennek egyik fő csoportja a lágyforrasztással készült kötések. Az így létrehozott kötések minőségének különböző befolyásoló paraméterei vannak, ezek közül számomra legfontosabb a nedvesedési tulajdonság. Különböző módon és eljárással tudjuk befolyásolni számunkra kedvező irányba. Ilyen lehetőség például a felületkezelés, aminek az egyik legújabb és legelterjedtebb módja a lézeres felületmódosítás.

Ezeknek az irodalmi forrásoknak az alapján az a célkitűzésem, hogy más irodalmakkal [20, 55] ellentétben, nem a forrasztást, hanem a munkadarabot helyezem a kutatásom középpontjába. Munkámat arra a feltevésre alapozom, hogy a határfelületi rétegek energiáinak módosításával, - a szövetszerkezet felületkezeléssel történő átalakítása révén - kedvezően befolyásolhatom a kialakuló nedvesedési viszonyokat és ezek alapján találjak egy olyan felületkezelési módot, amivel gazdaságosan, jól és lokálisan tudunk javítani a lágyforrasztott kötéseink minőségén. Tudományos munkámban részletesen megvizsgálom az Nd: YAG lézer különböző teljesítményszinteken - 100 W-tól 2500 W-ig - történő besugárzásának hatását a réz próbadarabokra és annak hatását a lágyforrasztás nedvesítőképességére. Továbbá metallográfiai és a pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálatok eredményeit felhasználva értékeltem az anyag és a lézer kölcsönhatását.

3. A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy milyen anyagokat és berendezéseket választottam a kutatásomhoz és ezekkel milyen kezeléseket és vizsgálatokat hajtottam végre.

3.1. A SZUBSZTRÁT ÉS A FORRASZANYAG KIVÁLASZTÁSA

A célkitűzés után beszereztem a kutatásomhoz szükséges két fő alapanyagot. Az egyik a forraszpaszt, a másik a réz, ezek közül először a forraszpasztát mutatom be.

3.1.1. A FELHASZNÁLT FORRASZPASZTA ISMERTETÉSE

A forrasztási vizsgálatokhoz 96,5% ón, 3% ezüst és 0,5% réz tartalmú forraszpasztát használtam, mely a legelterjedtebb és egyik legjobb forraszpaszta alapanyag az iparban [56-61]. A szakirodalom ezt a típusú forraszpasztát SAC305 (Sn96.5Ag3.0Cu0.5) néven ismeri és a továbbiakban én is ezt a megnevezését használom. Ez a keverék szinte az összes gyártásban alkalmazott specifikációt kielégíti [59]. Ilyen pasztát használnak például az újraömllesztéses (reflow) forrasztásokhoz és gyakori a nyomtatott áramköri elemek gyártásának iparában [68-70]. A paszta egyik legfontosabb jellemzője az ólommentesség, ami a mai műszaki követelményeknek és jogi szabályozásnak eleget tesz [71-72]. Gyakran alkalmaznak ehhez az anyaghoz a forrasztás ideje alatt inert atmoszférát, hogy csökkentsék a salakképződést [73]. A forraszpaszta viszkozitása olvadt állapotban nagyon sokáig nem ingadozik, stabil marad, ami előnyös volt a kísérleteim során, mert így több időm maradt a peremszög értékek kiértékeléséhez szükséges fényképfelvételek elkészítéséhez.

Több gyártó legfontosabb terméke ebből a paszta alapanyagból készül, ilyen például az Aimsolder, ALPHA, Farnell és a Senju is. Vizsgálataimhoz Senju M705-GRN360-KV forraszpasztát használtam.

3.1.2 A RÉZ, MINT SZUBSZTRÁT ÉS ANNAK SZEREPE A FORRASZTÁS TECHNIKÁBAN

A kísérleteim során szubsztrátként rezet, mint egy szimulált forrasztott kötés egyik összekötendő alkotóját használtam fel. Az olyan kiinduló alaplemezeket, amelyekre a későbbiekben valamilyen technológiai lépés eredményeként újabb anyagmennyiség kerül, szubsztrátoknak nevezzük. Azért ezt az anyagot választottam, mert a rezet és ötvözetait sokféle forrasztási művelethez alkalmazzák [74-75]. A réz gyakori előfordulása az iparban életszerűbbé

teszi a kutatást, hiszen egy igencsak elterjedt anyag, a mindennapos gyártási gyakorlat része [76-77].

A réz kohósítással érceiből előállított színesfém, amelyet elsősorban a villamossági célokra alkalmaznak, mindenekelőtt vezetékek készítésére. Villamos vezetőképessége igen jó $58 \text{ m} / \Omega\text{mm}^2$, szakítószilárdsága hidegalakítás nélkül $200 \text{ N} / \text{mm}^2$. A kohórezet elektrolízissel finomítják, és ekkor 99,00-99,99 %-os tisztaságú vörösrezet úgynevezett színrezet kapunk. Olvadás pontja 1083°C . A Cu rácsszerkezete felületén középpontos, köbös kockarács. Jól ellenáll a korróziónak. A nedves levegő ugyan megtámadja a felületét, a levegő CO_2 tartalmával azonban réz karbonát védőréteget „patinát” hoz létre, amely meggátolja a további korróziót. Fő ötvözői Zn, Sn, Al, Pb, Ni [67].

A kísérleteimhez használt vörösréz a katalógus adatok alapján $\geq 99,90 \%$ réz tartalommal és 0,015-0,040 %-os foszfor tartalommal rendelkezett, továbbá a szállítási alakját a gyártója kizárólag hideghengerléssel érte el [78].

Miután kiválasztottam a két fő alapanyagomat, azután elő kell készíteni őket. A forraszpasztta a kereskedelmi formájában előkészítés nélkül felhasználható, de a réz már nem. Következő fejezetben bemutatom, hogyan készítettem elő a réz mintadarabokat.

3.2. SZUBSZTRÁTOK ELŐKÉSZÍTÉSÉNEK ISMERTETÉSE

A felületkezelésekhez szükséges szubsztrátokat egy (400 mm x 200 mm x 3 mm) vörösréztáblából készítettem el annak mechanikus vágással történő feldarabolásával. A vágási műveletet nagyméretű, telepített, általánosan lemezvágására használt berendezéssel végeztem el. Ezzel a módszerrel sikerült kiküszöbölni a káros hőbevitelt és minimalizálni a lapkák anyagszerkezetében bekövetkezett változásokat. A kutatásomhoz 15 mm x 15 mm-es méretekkkel rendelkező próbadarabokat határoztam meg optimális méretűnek, mert az előkísérleteim alapján bebizonyosodott, hogy általánosságban a mintákra felvitt paszta mennyiség egy 1 cm^2 -es területet nedvesít. Elmondható, hogy a darabolással nem vihettem be a mérési értékeket befolyásolni képes deformációkat a lapkák a paszta által nedvesített felületének közelébe.

A darabolás után, a lapkákat annak érdekében, hogy a lehető legnagyobb homogenitást tudjam elérni a felületi minőségükben alapos és több szakaszból álló csiszolásnak és polírozásnak vettem alá. A csiszolási és polírozási eljárást minden alkalommal egy előre

eltervezett és egységes folyamat alapján végeztem el. Ez nagyon fontos lépés, ennek okát a későbbiekben mutatom be.

A megfelelő felületi minőség eléréséhez a tanszéken lévő Buehler Beta 2 tárcsás csiszoló és polírozó gépet használtam. A gépben a 2 forgó tárcsára ráfogattam sorban a P400, P800, P1000, P2500-as finomságú Buehler csiszoló korongokat (22. ábra) és egyenletes erővel nyomva addig csiszoltam a lapkákat, amíg a felületükön nem láttam a jelenlegi állapotnál mélyebb karcolásokat. A folyamat alatt bőséges hűtővizet alkalmaztam, nehogy az esetleges nem kívánt hőbevitel torzítsa a későbbi mérési eredményeimet. Végző műveletként polírozó korongot alkalmaztam.

Ezzel a módszerrel sikerült a munkám során a lehető legjobban homogenizálni a kiinduló, lézeres kezelésre szánt mintadarabok felületi minőségét.



22. ábra: Csiszoló, polírozó gép és a felhasznált korongok

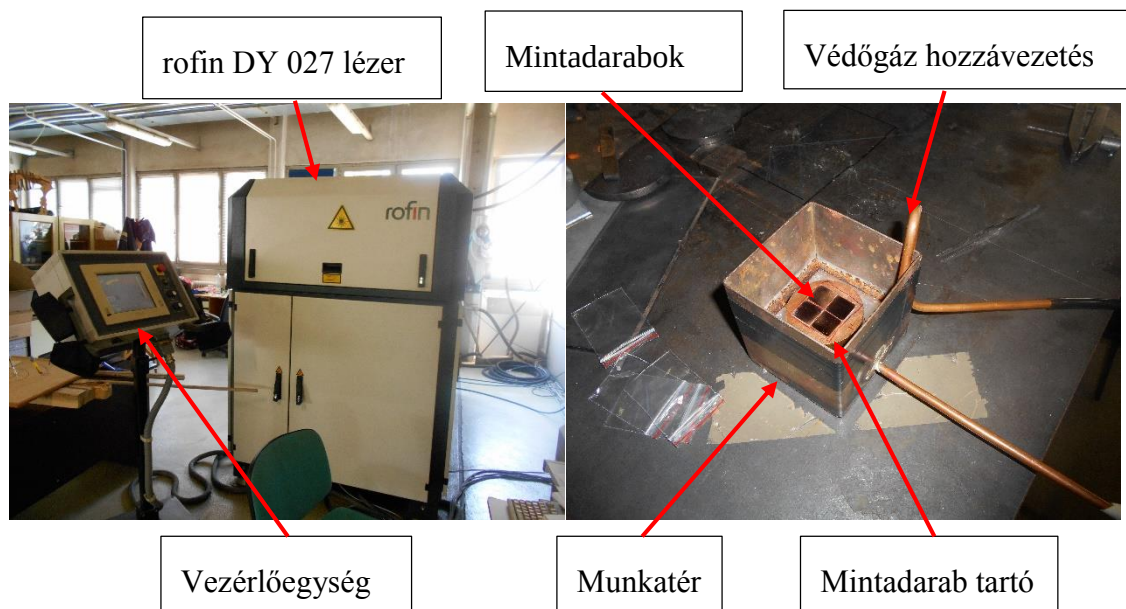
3.3. LÉZERES FELÜLETKEZELÉS

A megfelelő darabszámú mintadarab előkészítése után az következett, hogy elvégeztem rajtuk a lézeres felületmódosítást. Most ezt a kezelési folyamatot ismertetem.

A réz mintadarabok lézeres felületkezelését a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Magyarország vezető alkalmazott kutatóintézményének budapesti egységében, az Anyagtudományi és Technológiai Intézetben (BAY-ATI) végeztem el.

3.3.1 AZ ALKALMAZOTT LÉZER ÉS A FELÜLETKEZELÉS ISMERTETÉSE

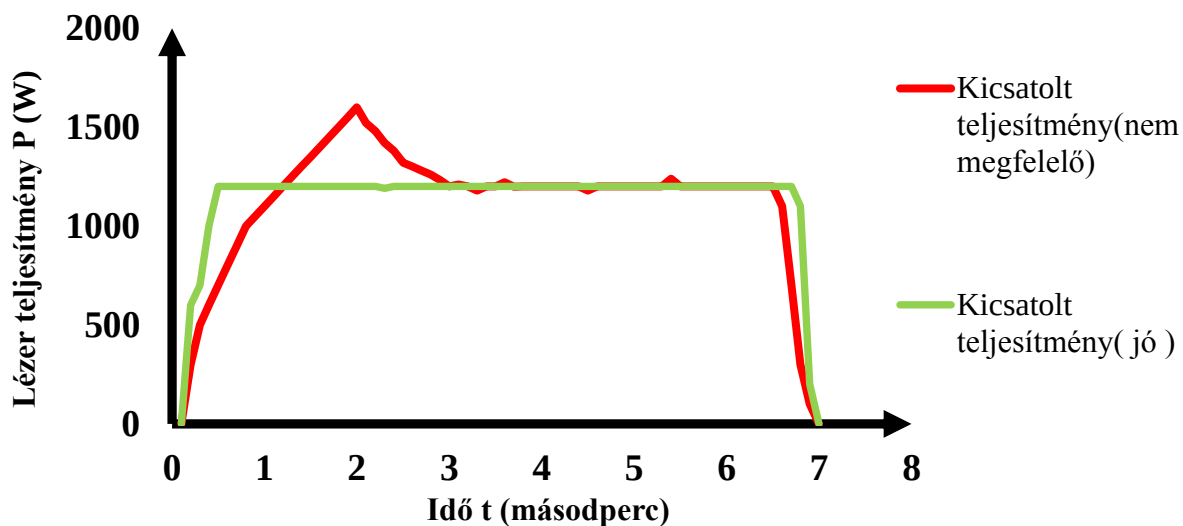
Az intézetben egy *rofin DY 027* 2,7 kW teljesítményű impulzus üzemű Nd: YAG szilárdtest lézer (23. ábra) segítségével végeztem el a szükséges felületkezeléseket. A lézer üvegszálas sugárvezetéssel és optikai szkennер fejegységgel volt szerelve. A szkennelő fejnek programozásának köszönhetően egyszerre több mintát is tudtunk egyidejűleg felületkezelní.



23. ábra: A felületkezeléshez használt lézer és annak munkatere

Az impulzus üzemű lézert 100%-os kitöltési beállítás mellett üzemeltettük, ami azt jelenti, hogy gyakorlatilag folyamatos (CW-Continuous wave) üzemben. Az alkalmazott előtolás sebességét 500 mm/min-re határoztam meg az átlapolódott hőhatás zónák minimalizálásának érdekében. A lézeres kezelés során 99,5% tisztaságú argon védőgázt alkalmaztunk, melynek átfolyása 12,5 liter/perc volt. Erre azért volt szükség, hogy a lézeres besugárzás alatt ne érintkezzen levegő a minta felületével, mert nem kívánatos oxidréteg alakulhatott volna ki a besugárzás hatására. A beállított lézernyaláb fókusz 410 mm volt. A lézersugár foltátmérője pedig 4 mm.

Mivel a dolgozatomban a réz és lézer kölcsönhatásakor létrejövő változásokat vizsgálja, számomra fontos volt, hogy egy részletes, egységes adatsort kapjak, amin látható, hogyan változik ez a nedvesedési peremszög a növekvő lézerteljesítmény hatására. Ehhez azonban körültekintéssel kellett eljárnom, hogy mind a 4 db minta azonos teljesítménysűrűségű kezelést kapjon. Ha nem így történt volna, akkor az egyidejűleg kezelt minták nem kaptak volna egységes besugárzást és a jónak hitt minták mérése hibaként jelent volna meg a kutatásomban. Voltak esetek, amikor az ingadozás miatt meg kellett ismételni a kezelést, de az esetek többségében azonos teljesítményt adott le a lézer. Ennek nyomán követésére-segítségemre volt a lézerbe beépített „Log” rendszer, ahol visszatekinthettem a lézer érzékelői szerint távozó teljesítményt. A 24. ábrán látható zöld színnel az a karakterisztika, amikor a lézer által leadott teljesítmény megfelelő volt. Néhány tized másodperc alatt elérte a beállított teljesítményt - jelen esetben 1200 W-ot - és azt kis ingadozás mellett stabilan szolgáltatta. A mintadarabok úgy voltak elhelyezve a kezelés területén, hogy a teljesítmény felfutás előtt még ne érje el a lézersugár a mintákat. A technikai specifikáció szerint a lézer teljesítmény ingadozása $\pm 2\%$ [79]. Ezzel szemben ritkán előfordult, hogy a teljesítmény felfutása csak pár másodperc alatt érte el a megfelelő értéket, ebben az esetben a kezelést meg kellett ismételni, új mintadarabokkal.

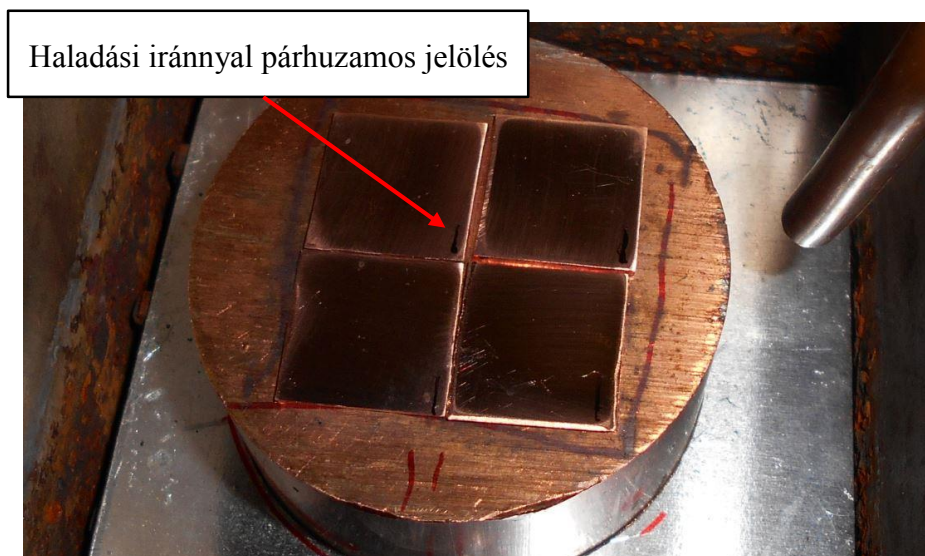


24. ábra: Lézerteljesítmény karakterisztikája

A kezelés során a beállított teljesítményt 100 W-ról indítottam és így növekedett 2500 W-ig. Ez az a felső határteljesítmény, amit a lézer berendezés még stabilan ingadozás nélkül le tud adni. Végezetül 100, 200, 300, 400, 430, 470, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1250, 1500, 1750, 2500 W-os teljesítmény szintek mellett végeztem el a próbadarabok

felületkezelését. A kutatásomban minden beállított teljesítménynél annyi mintadarab felületkezelését végeztem el, amelyek a nedvesedés vizsgálat során már kis szórású megbízható átlagértéket adtak.

Az optikai szkenneregység előre jelezte a lézer pásztázó, haladó mozgását, így mindig egy előre bejelölt területre helyeztem a mintákat, lehetőleg úgy, hogy a minta oldala merőleges legyen a lézer irányára, ezáltal is egységessé téve a kezelési eljárást. Továbbá fontos volt számomra, hogy a kezelés után, esetenként a mintadarabok szobahőmérsékletre hűlése bekövetkeztével bejelölni a lézer haladási irányát (25. ábra). Ez akkor vált jelentőssé, amikor a későbbi anyagvizsgálatokat végeztem a mintákon.



25. ábra: Megjelölt minták a felületkezelés után

3.3.2. FELÜLETI ÉRDESSÉGMÉRÉS

A kezelés után a szubsztrátok felületi érdességét jellemző átlagos felületi érdesség (R_a) és egyenetlenség magasság (R_z) értékek felvételét egy Mitutoyo Surftest 301 nevű tapintós érdességmérő készülék segítségével végeztem el. A polírozást követően 3 szubsztrát lapkán 5 különböző vonal mentén mértem, majd az ezen mért értékek átlagát tekintettem az adott lapka együttes felületi érdességének. A mérés úthossza 24 mm volt. Az eredmények az 1. táblázatban olvashatóak. A 26. ábrán pedig látható az alkalmazott vizsgálati elrendezés. Elmondható, hogy az előre eltervezett csiszolási és polírozási folyamat eredményeképpen sikerült elérnem, hogy gyakorlatilag minden későbbiekben felhasznált próbadarabnak az átlagos felületi érdessége $R_a=0,133 \mu\text{m}$ érték körül legyen. Ilyen polírozottsági szinten az esetleges szórás értéke már elhanyagolható és nem fogja befolyásolni a mérési eredményeimet.

1. táblázat: A felületi érdességmérés eredményei

Mért mintadarab megnevezése	Mérési sorozatok átlag értéke		Mérőhossz: 24 mm		
	Ra (μm)	Rz (μm)		Ra (μm)	Rz (μm)
Előkészített minta 1.	0,11	0,34	Előkészített minták átlaga:	0,133	0,373
Előkészített minta 2.	0,15	0,44			
Előkészített minta 3.	0,138	0,34			
Előkészített + 300W-on kezelt minta	0,127	0,38	Eltérés az átlagtól:	-0,043	0,007
Előkészített + 700W-on kezelt minta	0,142	0,34		0,009	-0,033
Előkészített + 1200W-on kezelt minta	0,1352	0,39		0,003	0,017



26. ábra: A felületi érdességmérés eszközei

Az 1. táblázatban az is látható, hogy megvizsgáltam három különböző teljesítményszinten kezelt mintadarab felületi érdességét. A felületkezelt minták R_a és R_z értékének eltérése az előkészített minták együttes átlagához képest kicsi. Ebből azt állapítom meg, hogy a lézeres besugárzás nem módosította annyira a réz lapkák felületét, hogy azokon jelentősen megváltozott volna az átlagos felületi érdesség értéke. Ellenben a tapintó tűs

mérőberendezés felületi felbontása nem elég pontos, illetve lehetséges, hogy oxidréteg alakult ki a felületen. Ezért tovább vizsgáltam és pásztázó elektron mikroszkópos képeket készítettem, hogy azokon meg tudjam vizsgálni, lett-e valami változás a minták felületén.

A felületi érdességmérést megpróbáltam a tanszéki Rodenstock RM600-as típusú lézeres szkennelvel is. Az említett készülék a Scanning Laser Microscope-ok (SLM) családjába tartozik, továbbá a topográfiai vizsgálati lehetőségek közül értelemszerűen a kontaktnélküli (optikai). Sajnálatos módon a polírozott, réz mintadarabok magas reflexiós értékének köszönhetően ez nem volt alkalmas arra, hogy megbízható eredményeket szolgáltatson.

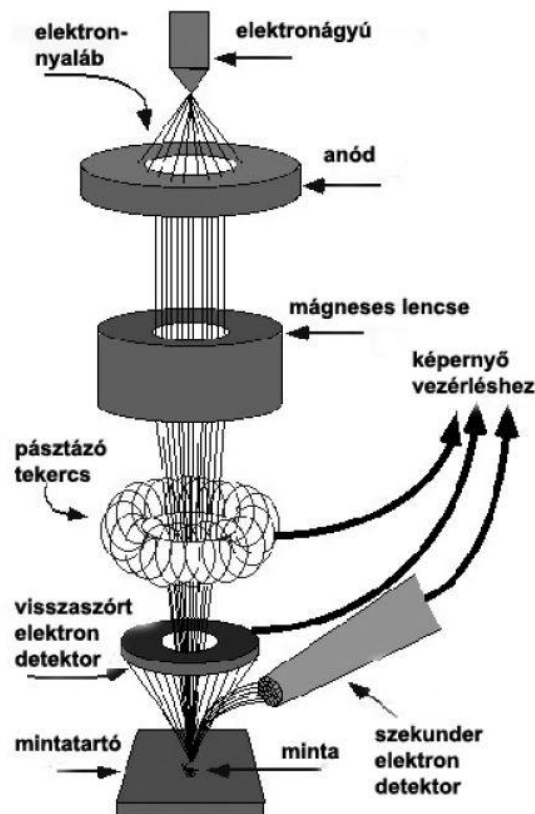
3.4. PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓPOS VIZSGÁLAT (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE = SEM)

Pásztázó elektronmikroszkópot alkalmaztam ahhoz, hogy jobb képet kapjak arról, mi is történt a réz mintadarabok felületén. Ebben a fejezetben bemutatom a mikroszkóp elvi működését és a számomra jelentős szekunder képalkotás módját.

3.4.1 AZ ELEKTRONMIKROSKÓP MŰKÖDÉSÉNEK ALAPJAI

A pásztázó elektronmikroszkóp olyan elektronoptikai eszköz, amely a vizsgált tárgy felszínének meghatározott területét irányított, vékony elektronnyalábbal pontos minta szerint végigpásztázza, az elektronsugár és a tárgy kölcsönhatásából származó jeleket erre alkalmas detektorokkal érzékeli [63], és ezeket megfelelően feldolgozva, az elektronsugár mozgásával szinkronizálva képileg (esetleg más formátumban, például spektrum) kijelzi.

A mikroszkóp fontosabb egységei: elektronforrás, objektív lencse, pásztázó tekercsek, detektor(ok), mintatartó. A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése 27. ábrán látható.



27. ábra: A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése [64]

A katódból kilépő elektronokat elektromos tér gyorsítja a szükséges energiára. A pásztázó elektronmikroszkópban elektronok maximális energiája általában $E_{\max} = (30 - 40) \text{ keV}$. A legtöbb mikroszkópban az elektronok energiája szabályozható. A forrásból kilépő nyalábot elektromágneses elven működő lencse fókuszálja. Az elektronmikroszkópokban alkalmazott elektron lencsék a Lorentz-erőhatás alapján működő mágneses lencsék. A lencse fókusz távolsága az elektromágnes áramával szabályozható. A nagyítástól függően a nyaláb átmérője a mintán az objektív lencse segítségével változtatható. A legjobb mikroszkópok esetén a nyaláb minimális átmérője a mintán $\sim 1 \text{ nm}$. Sokszor az objektív lencsével összeépített pásztázó tekercsek segítségével a nyaláb sorról-sorra végigpásztázza a minta felületét. Az elektronnyaláb a mintából különböző „termékeket” vált ki. A SEM-ben általában a szekunder elektronokat (SE), a visszaszórt elektronokat (backscattered electron = BSE) és a röntgen fotonokat használjuk a kép készzésére.

A minta felületét pásztázó elektronnyalábot a pásztázó generátor vezérli. A nyaláb által kiváltott elektronok vagy röntgen fotonok intenzitását az adott termékre érzékeny detektor

érzékel. A detektorok jele modulálja a megjelenítő képernyő pontjainak intenzitását. Ha a minta felületének emissziója megváltozik, akkor ez a változás látszik a képernyőn.

A pásztázó elektronmikroszkópos mintával szemben támasztott követelmények a következők:

1. Elektromos vezető mintára van szükség, máskülönben a rávitt elektronok miatt töltés halmozódik fel a mintában. Az így felhalmozott töltés torzítja a képet, különösen a szekunder elektronokkal létrehozott kép esetében.

2. A minta a legtöbb elektron-mikroszkópban vákuumban van, tehát el kell viselnie a vákuumot.

3. A mintának el kell viselnie az elektron besugárzást. A keV energiájú elektronok besugárzása változásokat idézhet elő a mintában. Az erre érzékeny minták esetében ezek a változások roncsolódást jelentenek.

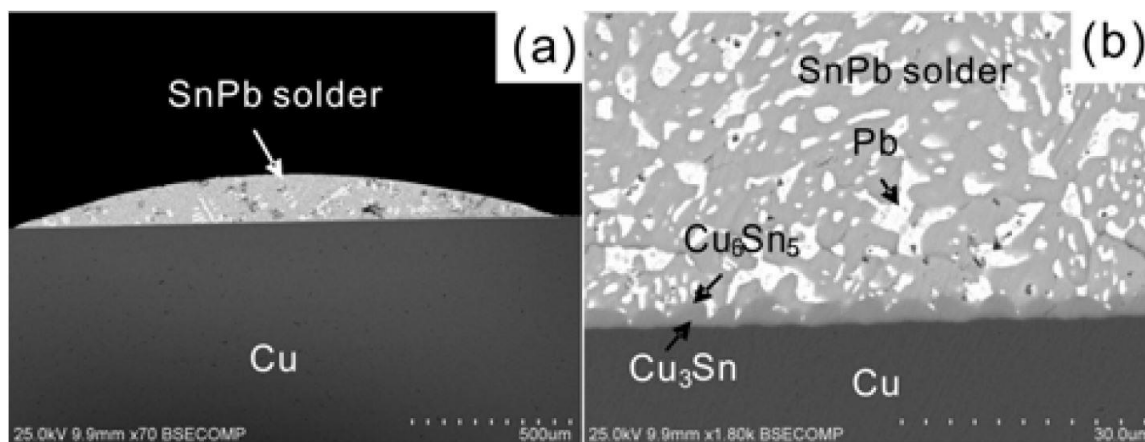
4. A vizsgálat során a minta felületét képezzük le. A felület kialakítása határozza meg elsősorban azt, hogy mit látunk a mikroszkópi képen. Az olyan minták esetében, amelyeknek a felületi topográfiáját vizsgáljuk legfeljebb a felület tisztítására van szükség.

Megjegyzendő, hogy az általam választott réz mintadarabok eleget tesznek a fent említett feltételeknek. Hiszen a réz jó vezetőnek minősül, szerkezetéből adódóan a vákuumot elviseli. A lézeres felületkezelés során megfelelő darabszámú mintát kezeltem, így az esetleges roncsolódás miatt továbbá nem használható mintadarabok száma nem okozott problémát. A lézeres felületkezelés előtt egységesre políroztam a mintákat és felületkezelés előtt megtisztítottam. Ezek alapján, ami a szekunder elektronok képalkotása során látható, az a lézer hatása a felületi topográfiára.

A visszaszórt (backscattered) elektronkép sajátosságai:

A visszaszórt elektronok átlagos energiája a nyaláb energiájának fele. Ezért, mivel a visszaszórt elektronok energiája viszonylag nagy ($E \sim 15 \text{ keV}$), összegyűjtésük nehezebb, mint a kis energiájú szekunder elektronoké. A visszaszórt elektronok esetén a gerjesztett térfogat nagyobb, mint a nyaláb átmérője a minta felületén, ezért a maximális felbontás általában kisebb, mint a szekunder elektronok esetén. Ugyanakkor, a visszaszórt elektronok hozama függ annak az atomnak a rendszámától (elektronszámától), amelyikről szóródik (28. ábra). Ezért a

visszaszórt elektron kép un. Z-kontrasztot mutat. Ahhoz, hogy a legjobb BSE képeket tudjuk előállítani polírozott felületű minták szükségesek, ahol nem jelenik meg a morfológia, csak az átlagrendszeny különbség [62-65].



28. ábra: SEM keresztmetszeti kép (a) teljes morfológia a SnPb forrasztanyaggal a rézen; (b) morfológia a forraszt/réz határfelületi régiójában [65]

Röntgen spektroszkópia:

A pásztázó elektronmikroszkópokat gyakran felszerelik röntgendetektorral is. A röntgen detektorral az elektronnyaláb által kiváltott röntgen fotonokat detektáljuk. A röntgen fotonok energiája jellemző arra az atomra, amelyből kiváltódott. A kapott spektrum tehát tükrözi a minta atomi összetételét. Ez az energia diszperzív röntgen mikro analízis alapja (energy dispersive X-ray microanalysis = EDX) [62]. A spektrumon kirajzolódó csúcsok helyéből azonosíthatjuk a mintában található elemeket. A csúcsok területe pedig az egyes elemek mennyiségével függ össze [64].

A szekunder elektron kép sajátosságai:

A pásztázó mikroszkópokban általában a szekunder elektron képet használják. A nyaláb által a külső elektronhéjakról kilökött szekunder elektronok energiája széles eloszlású, de kis energiával rendelkeznek ($E < 50 \text{ eV}$), így ezek az elektronok csak kis mélységből (1 - 10 nm) érik el a felszínt. Ezért a szekunder elektron kép elsősorban a felület közeli vékony rétegről hordoz információt.

Minthogy a pásztázó elektronmikroszkóp mélységélessége fordítottan arányos a nagyítással, ezért a szekunder elektron kép sajátossága, hogy kis nagyítás esetén nagy mélységélesség érhető el. A megfelelő beállításokkal részletes 3D minőségű képeket

kaphatunk. A SE segítségével alkotott képeket gyakran alkalmazzák a felületi morfológiai vizsgálatokhoz [62-63].

A szekunder elektronok segítségével megvizsgálhatjuk a felületen létrejövő elváltozásokat. A vizsgálat során látható például, hogyan válik ki a vas részecske a kerámiában [39]. Továbbá könnyedén analizálható a rézlap felületén történő CO₂ vagy Nd: YAG lézer besugárzásának hatása különböző számú impulzusoknál illetve különböző teljesítményeken történő kezelésnél [66, 35].

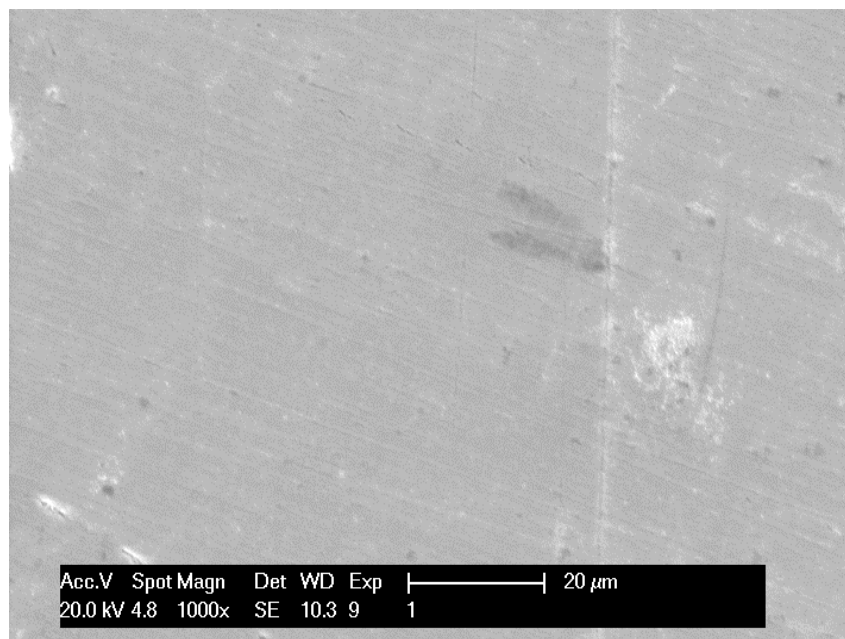
3.4.2. KEZELT ÉS KEZELETLEN MINTÁIM SEM MÉRÉSI EREDMÉNYEI

A pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálatot a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszéken végeztem. A berendezés egy Philips XL 30-as mérő eszköz volt. A vizsgálat során az elsődleges célom a felületkezelés nyomainak felderítése volt, illetve közeli képet kapni a felület topográfiájáról. Ezek felderítéséhez a szekunder elektronok képalkotását használtam fel.

A vizsgálatra 8 darab mintát választottam ki. A kezeletlen, 300, 400, 470, 500, 700, 1200 és 2500 W-on kezelt mintadarabot. Ezeket a mikroszkóp pozicionáló tálcájára (29. ábra) kétoldalú ragasztószalaggal rögzítettem az esetleges elmozdulás elkerülése végett.

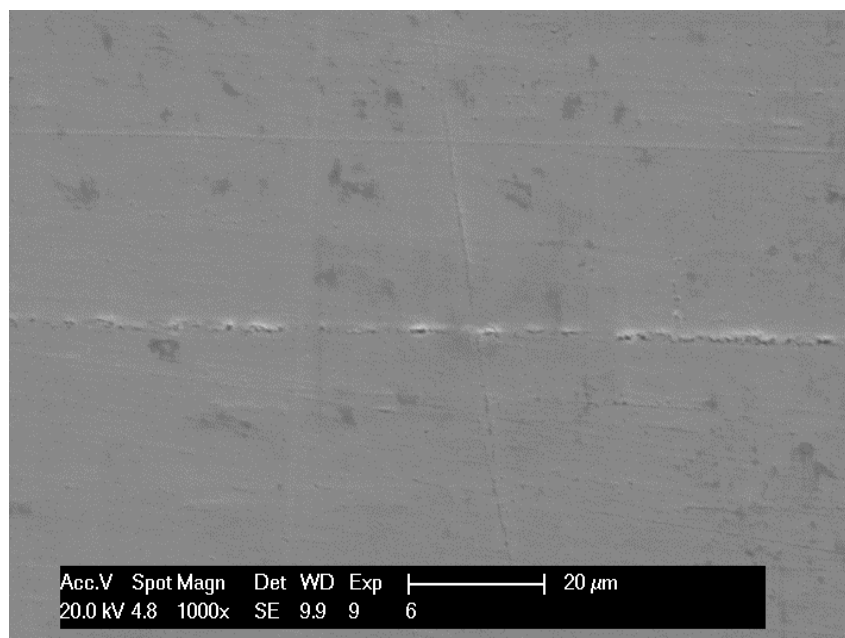


29. ábra: Az alkalmazott elektronmikroszkóp



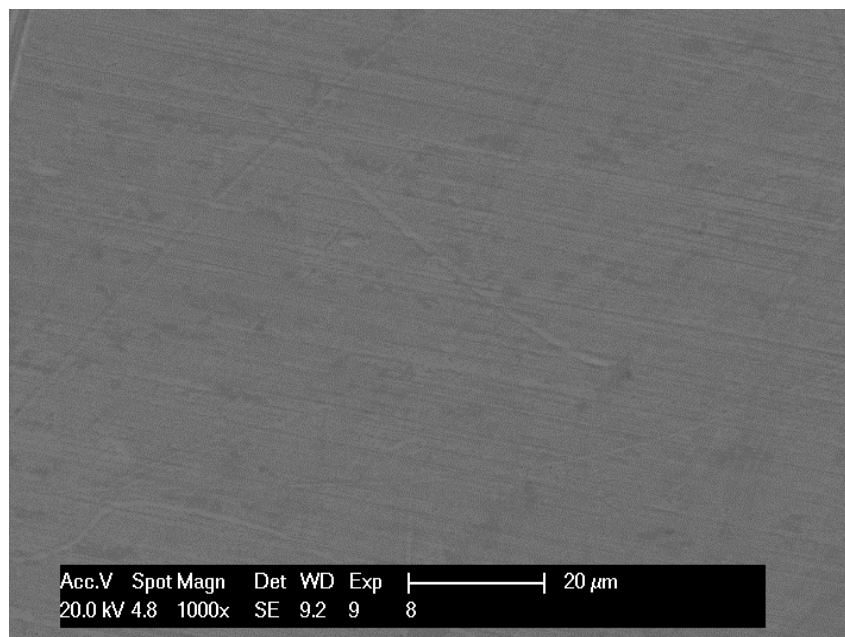
30. ábra: A kezeletlen mintadarab SEM felvétele

Összehasonlítva a kezeletlen (30. ábra) és a 600 W-os (31. ábra) mintadarab felületét, annyi különbséget fedeztünk fel, hogy a nagyobb teljesítményen kezelt minta felületén halvány fekete foltok jelentek meg. Ezek megjelenésének oka, (nagy valószínűséggel) a növekvő teljesítmény okozta hőbevitel.



31. ábra: A 600 W-on lézeres felületkezelt mintadarab SEM felvétele

A legnagyobb 2500 W-on (32. ábra) kezelt mintadarabok esetében a foltok száma tovább növekszik és nagyobb sűrűségben lehet felfedezni őket.



32. ábra: A 2500 W-on lézeres felületkezelt mintadarab SEM felvétele

Az itt látható eredményekből azt állapítom meg, hogy a lézeres felületkezelés nem hagyott maga után egyértelmű struktúrát a minta felszínén, de a sötét foltok megjelenését magyarázhatja a lézeres besugárzás. Néhány képen a felületi előkészítés tökéletlenségének nyomai látszanak, de ezek mértéke a nedvesedési vizsgálatok eredményeit nem befolyásolják. Ahhoz, hogy többet tudjak meg a kezelés hatásáról már nem a minta felszínét, hanem a szemcseszerkezetet kell megvizsgálnom.

3.5. METALLOGRÁFIAI VIZSGÁLAT

Az elvégzett optikai szövetvizsgálat célja, hogy olyan anyagjellemzőket állapítsak meg, amelyek segítségemre lesznek a lézeres felületkezelés hatásának kivizsgálása során. A mikroszkópos vizsgálat által képet kaptam a megváltozott szövetszerkezetéről, annak elrendeződéséről, kristályainak nagyságáról, mennyiségükről és azok irányítottságáról.

3.5.1 CSISZOLATOK ELKÉSZÍTÉSE

A minták mikroszerkezetének tanulmányozásához a kezelt rézlapokat a lézeres felületkezelés irányára merőlegesen félbe vágtam és műgyantába öntöttem. Ehhez szükségem volt arra, hogy az 3.3.1. fejezetben említett módon jelöljem a lézer haladási irányát.

A minták fixálásához a tanszéken megtalálható eszközöket alkalmaztam, ami az erre rendszeresített műanyagformákból, a leválasztó réteggént funkcionáló vegyszerből és a kétkomponensű műgyantából állt. Az alkalmazott anyagok és a kész minta a 33. ábrán látható. A henger alakú műanyag tömbökbe ágyazott mintadarabokat így már könnyedén lehetett készre munkálni, aminek köszönhetően a megfigyeléshez való beállítás is lényegesen egyszerűbbé vált.



33. ábra: Műgyantába öntés

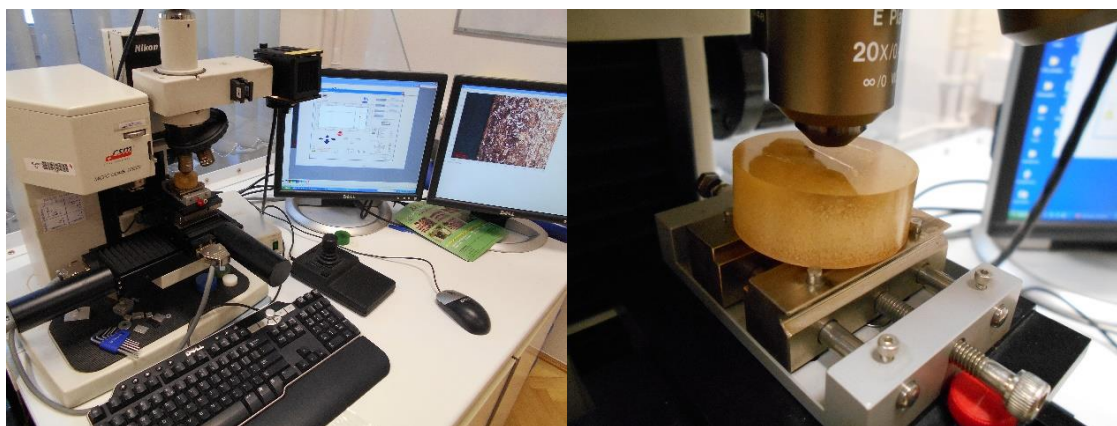
Az utómunkálás folyamata is több szakaszból tevődött össze. A megfelelő csiszolás eléréséhez, majdnem ugyanazt a sorrendet és eljárást alkalmaztam, amit a 3.2. fejezetben ismertetett réz mintadarabok előkészítéséhez alkalmaztam. A folyamat abban bővült ki, hogy a műgyantába öntött mintákat belehelyeztem a Buehler csiszoló gép tartójába, ami önmagában is forgatja azokat, így téve még egyenletesebbé a felület minőségét. Ahhoz, hogy a gyantában lévő lapkák közepét tudjam vizsgálni, le kellett csiszolnom őket egy adott mélységig. Miután a minták közepéhez értem a P120-as koronggal, további finomabb csiszoló korongokat használtam. A polírozáshoz a legfinomabb korongot és 1 - 5 μm -es vizes szuszpenziót használtam.

A soron következő lépésben a csiszolószemcsék kopásából adódó, lágyabb szövetelemek elkenődését kellett kiküszöbölnöm. A lágyabb szövetelemek rákenődnek a keményebbekre, ezáltal rontva a szövethatárok kivehetőségét. Ezt a réteget csak maratással lehet eltávolítani, amelyet nagy körültekintéssel kell végezni, mert nem szakszerű használat

esetén a mintánkat akár tönkre is tehetjük vele, túlmarathatjuk őket. A maratási folyamat után a mikroszkópos vizsgálat következett.

3.5.2. A MINTÁK SZÖVETSZERKEZETÉNEK A VIZSGÁLAT

A megfelelően formába öntött mintákat a CSM Instruments svájci illetőségű cég Micro-Combi Tester mérőberendezésével vizsgáltam meg. A mérési elrendezés az 34. ábrán látható. A szövetvizsgálat során az elsődleges célom a felületkezelés nyomainak felderítése volt. Továbbá az, hogy vizualizálhassam az egyes lézer teljesítmények okozta szövetszerkezetekben észlelhető változások egymáshoz képesti különbségét.



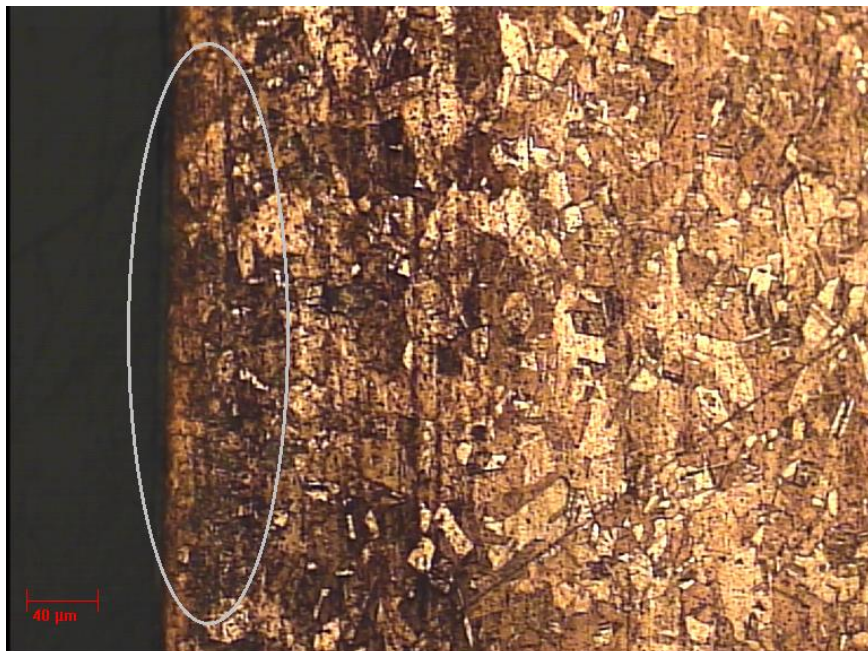
34. ábra: A szövetszerkezeti vizsgálat elrendezése

A 35. ábrán látható a kezeletlen minta szövetszerkezete. Ebben az esetben nem lehet észrevenni nagy eltérést a szövetek között, csak annyit, hogy a hideghengerlésből adódóan a külső felülethez közeli kristályok ellaposodtak.



35. ábra: Kezeletlen minta szövetszerkezete

Az 36. ábrán ezzel szemben viszont már látható eltérések vannak a külső felülethez közeli és a mintadarab belsejében lévő szövetelemek között. A kép baloldalán (a jelölt területen) látható sávban egyértelműen fel lehet fedezni a lézeres kezelés nyomait. A magas hőmérséklet és a gyors hűlés következtében a szövetszerkezet finomodott, kisebb kristályok alkotják, mint az anyag belseje felé haladva.

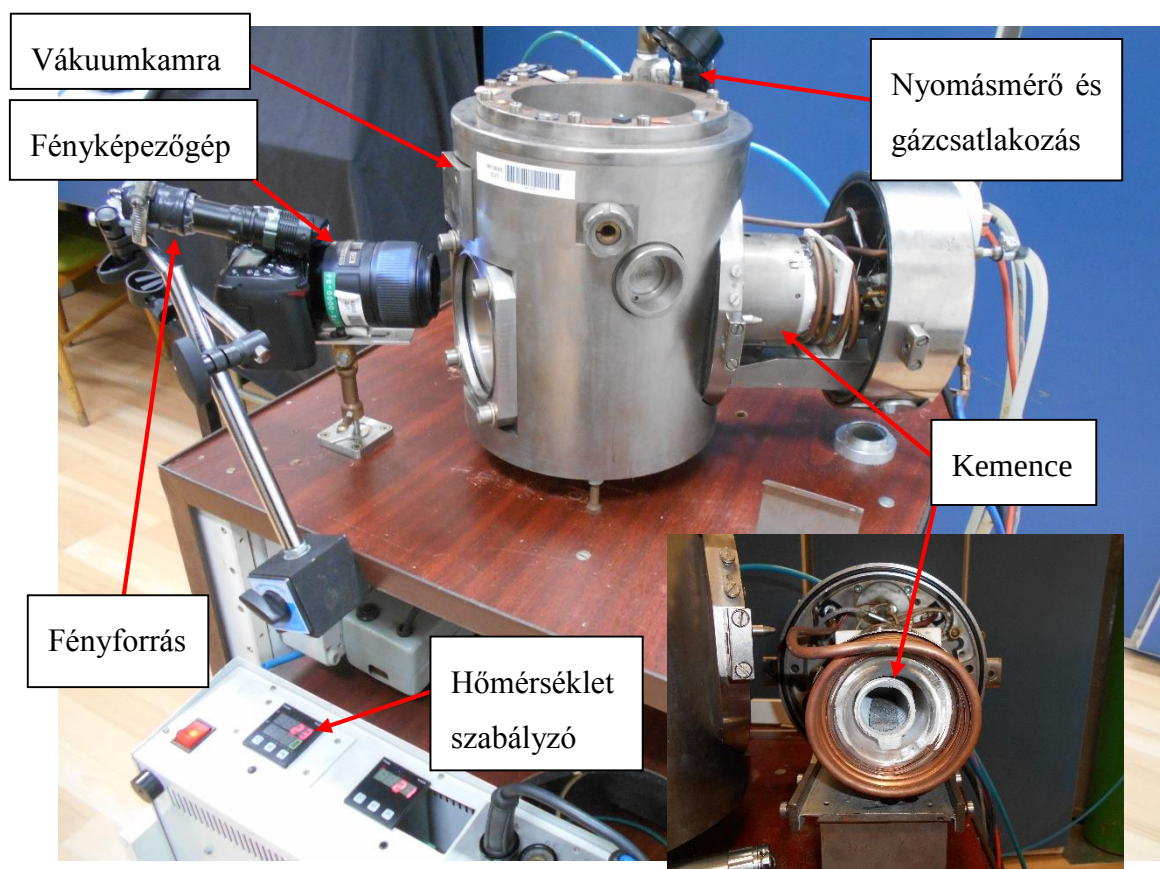


36. ábra: 1500 W-on felületkezelt minta szövetszerkezete

3.6. A NEDVESEDÉSI PEREMSZÖGMÉRŐ BERENDEZÉS ÉS A PEREMSZÖGMÉRÉSI FOLYAMAT ISMERTETÉSE

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. Több mérési eljárás létezik (adagolt csepp módszer, Wilhelmy folyadékba merített lemez módszer, nagy csepp módszer), ezek közül a nyugvócsepp módszert választottam, mert ez 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 (37. ábra), amellyel lehetséges a nedvesítési viszonyok vizsgálata [23-25].



37. ábra: A peremszögmérő berendezés részei

3.6.1. A PEREMSZÖGMÉRŐ BERENDEZÉS FŐBB RÉSZEI

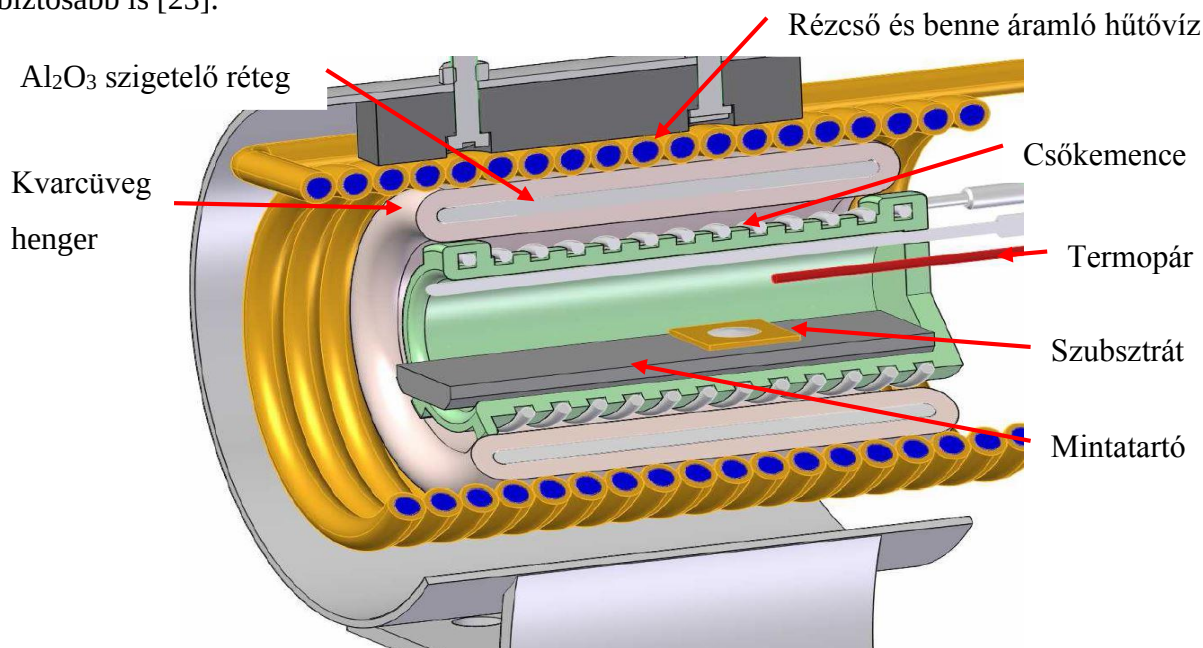
Ebben a fejezetben bemutatom a mérőeszközt, amin végeztem a nedvesedési vizsgálatot és a folyamat technológiai lépéseit.

A vákuumkamra a mérőgép főegysége, egy elektronmikroszkóp része volt. A kamra szigetelése megfelelő és belső tere jól megfigyelhető a hőálló vizsgáloüvegen keresztül.

Az ellenállás fűtésű kemence HAGA KD48D2 típusú szabályzóval szabályozott, ami 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 (38. ábra). A szabályzóval kis hőmérséklet kilengéssel ($\pm 2^\circ\text{C}$), rövid szabályozási idő alatt (~ 4 perc) 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 értékeket. 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 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 forrasztóanyag végzett mérések 250°C -on történtek. A kamra egész belső terének fűtése energiaigényes és a gépalkatrészek nem bírnák ki a hőt, másrészt számunkra csak a minta közelében kell biztosítani a méréshez szükséges hőmérsékletet. A szigetelés korlátozza a létrehozott hőmennyiség szóródását a kamrában, így koncentrálni tudjuk a kemence belsejéhez. A kemencében elhelyezett minta környezetében a méréshez szükséges hőmérséklet létrehozható úgy, hogy a kamra szigetelésen kívüli része sokkal kisebb hőmérsékletű marad. A mérések során a fényképek egy makró objektívvel (AF-S DX Micro NIKKOR 85 mm 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 [23].



38. ábra: Csőkemence és szigetelésének felépítése 3D CAD modelben [23]

3.6.2. MÉRÉSI CIKLUS BEMUTATÁSA A FORRASZPASZTA NEDVESEDÉS-VIZSGÁLATÁNÁL

A berendezés ismertetése után, a következőkben bemutatom a mérési ciklust és ismertetem annak lépéseit.

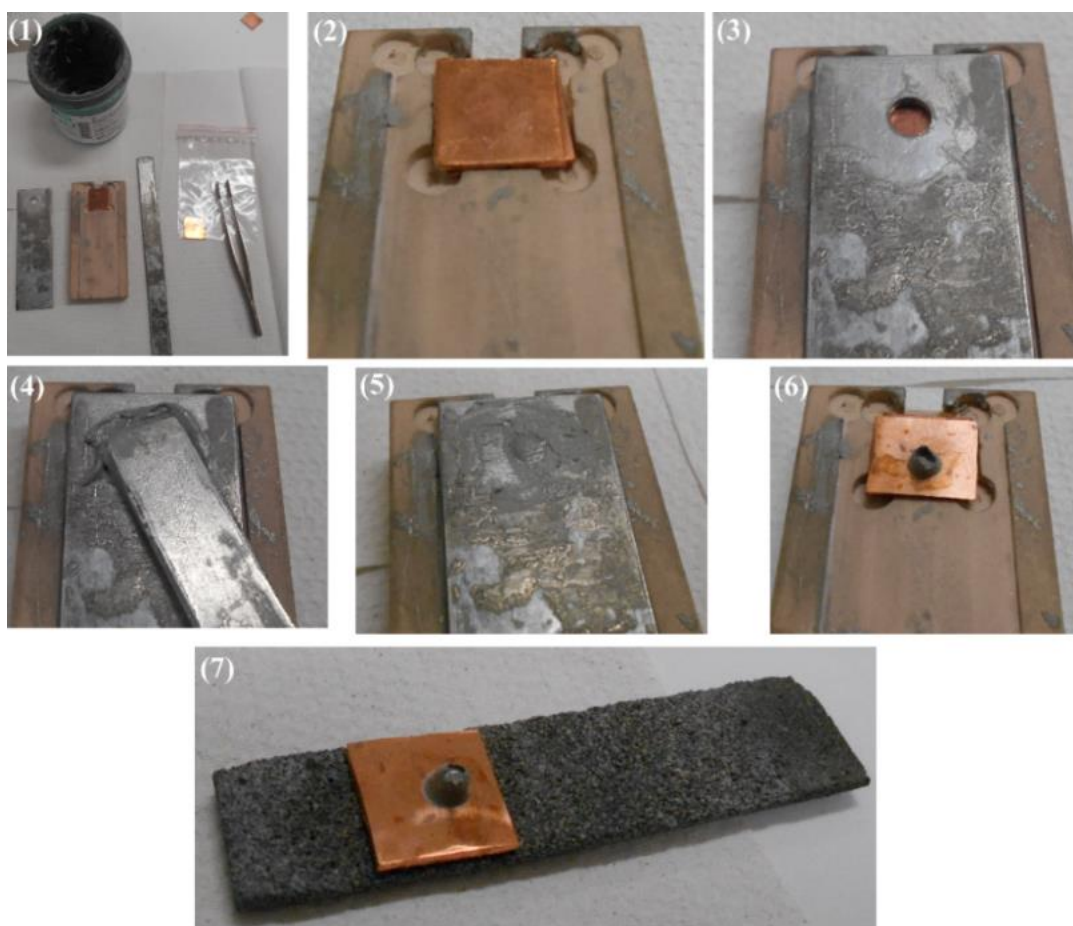
Fontos megemlítenem, hogy a forraszpasztát a beszáradás elkerülése végett hűtőben tároltam. Ahhoz, hogy az anyag viszkozitása megfelelő legyen, a mérés előtt legalább 1 órával ki kellett venni, hogy szobahőmérsékletre melegedjen fel. A peremszögmérések eredményeinek összehasonlíthatósága érdekében az összes mérésnél arra törekedtem, hogy a mérési folyamatok mindig ugyanúgy történjenek.

A mérési folyamatom a következő részekből épül fel:

- 1) előkészítés
- 2) forraszpasztta felvitele
- 3) nedvesedési vizsgálat elvégzése
- 4) vizsgálati eredmények kiértékelése.

Az első lépésben az előkészített réz szubsztrát felületét megtisztítottam alkohollal úgy, hogy az esetlegesen rákerülő zsírfoltok ne befolyásolják a nedvesedési tulajdonságokat. Az előkészítési eljárást a 3.2. fejezetben ismertetett módon végeztem el.

A forraszanyagot a rézlapra vittem fel. A művelet lépései a 39. ábrán láthatók. A nedvesedés vizsgálati eljárás betanulási folyamatában csináltam egy kísérletet, hogy megfelelő-e ez a felviteli móddal és mennyi pasztát sikerül felvinni és milyen szórással. Megmértem a szubsztrát tömegét paszta nélkül és pasztával. A 2. táblázatban látható adatok alapján elmondható, hogy 22 darab mintát vizsgálva az átlagosan felvitt paszta tömege 0,0863 g és ezeknek a szórása 0,0057 g. A szórás értéke abból adódott, hogy az összekevert paszta sűrűsége nem lesz azonos az egész mennyiségre nézve, ezért van, hogy kicsivel több- kevesebb kerül a szubsztrát felületére. Ezzel a felviteli megoldással biztosítható, hogy a lapkára felvitt forraszanyag mennyisége minden mérésnél közel azonos legyen.



39. ábra: A forraszanyag felvitelének lépései

2. táblázat: A felvitt paszta tömegének meghatározása

Mintadarabok sorszáma	Paszta nélkül [g]	Pasztával [g]	Paszta tömeg [g]
11	1,5899	1,6675	0,0776
12	1,2521	1,3269	0,0748
13	1,3074	1,3878	0,0804
14	1,4506	1,5342	0,0836
15	1,3718	1,4585	0,0867
16	1,4977	1,5759	0,0782
17	1,9312	2,0147	0,0835
18	1,8764	1,9667	0,0903
19	1,8827	1,9689	0,0862
26	1,2384	1,323	0,0846
27	1,0684	1,1523	0,0839
28	1,0662	1,152	0,0858
29	1,8598	1,9526	0,0928
30	1,9755	2,0628	0,0873
31	1,9346	2,0198	0,0852
32	1,8992	1,988	0,0888
33	1,8932	1,9397	0,0948
34	1,8592	2,0125	0,0805
35	1,9209	1,9387	0,0916
36	1,8443	1,9356	0,0944
37	1,8439	2,0447	0,0917
38	1,9485	1,998	0,0962
ÁTLAG:			0,0863
SZÓRÁSA:			0,005744665

A lapkát a felvitt forrasztanyaggal ezután egy mintatartóra tettem, majd a csökemencébe helyeztem. A kemencébe helyezésnél nagy figyelmet fordítottam a réz lap vízszintes elhelyezésére, ennek okait a későbbiekben magyarázom.

A kemence felfűtése és kívánt hőmérsékletre állítása következik. A hőmérsékletet fokozatosan 250°C-ig növeltem, amikor ugyanis a csepp megolvadt és körülbelül egy perc lefolyásával elkészítettem a fényképfelvételeket. A mérés befejezéseként, a fűtést le kell kapcsolni és várni 30-40 percet, amíg a kamra visszahűl a környezeti hőmérsékletig. A kontrollált lehűlési folyamatra azért van szükség, mert különböző problémák léphetnek fel a kötés minőségét illetően, ha nem megfelelő a hűtési folyamat.

Ezt követően a mintákat kivettem és újból megmértem a tömegüket, hogy kiszámíthassam az elpárolgott paszta tömegét. A 3. táblázatban a mérés előtti és utáni tömegek láthatóak, ezek alapján megállapítottam, hogy átlagosan 0,0036 g paszta párolog el a forrasztási folyamat során. Az elpárolgást a folyasztószer (flux) és a forrasztanyag szétterülése közben

távozó gázok okozzák. Az elpárolgás szórása 0,00031 g, ez alapján kimondhatom, hogy minden mérés során ugyanakkora mennyiségű gáz távozik a forraszpasztából. Végezetül a minták egyesével, felcímkézett tasakokban eltároltam a későbbi összehasonlítás érdekében továbbá a későbbi vizsgálatokhoz.

3. táblázat: A mérési ciklus során elpárolgott tömegek

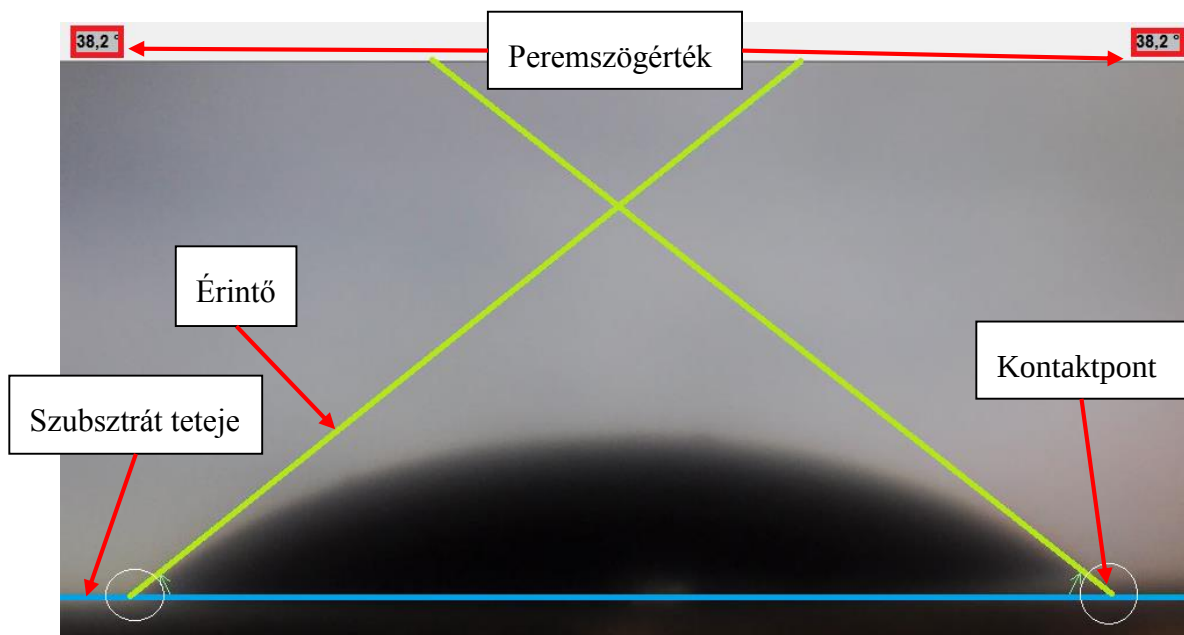
Mintadarabok sorszáma	Mérés előtt [g]	Mérés után [g]	Párolgás [g]
11	1,6675	1,6642	0,0033
12	1,3269	1,3236	0,0033
13	1,3878	1,3844	0,0034
15	1,4585	1,4547	0,0038
16	1,5759	1,5725	0,0034
17	2,0147	2,0108	0,0039
27	1,1523	1,1489	0,0034
28	1,152	1,1485	0,0035
29	1,9526	1,9485	0,0041
30	2,0628	2,0597	0,0031
31	2,0198	2,0161	0,0037
32	1,988	1,9843	0,0037
33	1,9814	1,9778	0,0036
34	1,9397	1,9365	0,0032
35	2,0125	2,0091	0,0034
36	1,9387	1,9347	0,004
ÁTLAG:			0,0036
SZÓRÁSA:			0,0003147

Végző lépésben a fényképek kiértékelését végeztem el. A folyamat módszereit és lépéseit a következő fejezetben mutatom be.

3.6.3. KÉZI PEREMSZÖG KIÉRTÉKELÉS FOLYAMATA

A kiértékelésnek azt a módját mutatom be, amely a mérések során készített fényképek számítógépen történő kézi kiértékelésén alapszik. A kézi kiértékelésnél egy számítógépes segédprogramot alkalmaztam, 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 40. ábrán a fehér körök jelzik a pontokat. Ez a két pont meghatároz egy egyenest, a szubsztrát tetejét (kék egyenes). Következő lépésként a két kontaktpontból érintőt húzunk a csepp kontúrjával (a zöld 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.



40. ábra: Kézi kiértékelés menetének bemutatása, a kiértékelő program futási képen

Minden mérés alkalmával több fotót is készítettem, hogy lehetőségem legyen válogatni, abban az esetben, ha a képek fókuszálatlanra sikerültek volna. A sok képből a kiértékelés során kiválasztottam a legjobban sikerültet, majd azon 4-szer végrehajtottam a kiértékelést, és az eredményeim közé ezek átlagát emeltem be. Minden alkalommal feljegyeztem a mérés idejét, sorszámát, a fénykép nevét és a kiértékeléshez tartozó mintadarab egyéni tulajdonságait. A 4. táblázatban látható mintadarab egy előkészített felületű (CS - csiszolt és polírozott) és 100 W-os teljesítménnyel felületkezelt minta.

4. táblázat: Kiértékelte adatok

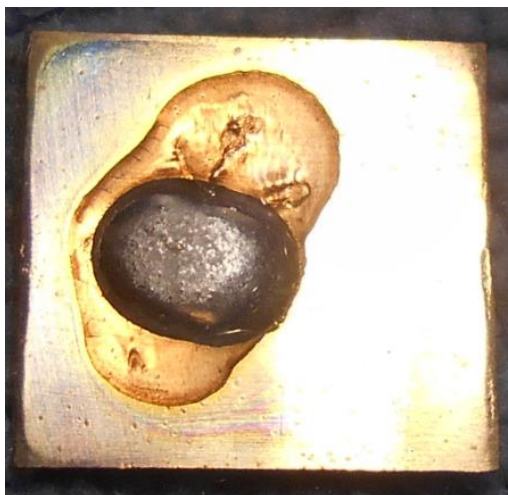
Mérés sorszám	Bal (°)	Jobb (°)	Átlag (°)				
1.	25,7	25,7	25,7			Átlagos eltérés (°)	0,39
DSC_3814.JPG	26,9	26	26,45	Mérés átlaga (°)	26,2	Szórás (°)	0,48
CS + L-100W	26,9	26,2	26,55				
	26,1	26,5	26,3				

3.6.4. A VIZSGÁLATI FOLYAMAT HIBÁI

Ebben a fejezetben ismertetem, hogy a forrasztási és kiértékelési eljárás során mik azok a legfőbb problémák, amikkel találkoztam a kutatásom során.

Az egyik leggyakoribb probléma, amit a betanulási folyamat alatt többször elkövettem, hogy a mintadarabot nem 250°C-on forrasztottam meg, hanem esetenként 300-400°C-on. Ez akkor történt, meg amikor a kemence hőmérsékletét nem fokozatosan növeltem, hanem hirtelen fűtöttem fel. Ennek következményeképp a nem ilyen hőmérséklet tartományra tervezett folyaszttószer túl gyorsan terült szét és megégett ezáltal nem tudta ellátni a feladatát és csak rontotta a nedvesedési paramétereket.

A mérési eredményeket szintén befolyásolja, ha a paszta nem kör alakban terül szét a szubsztráton (41. ábra). Hiszen ekkor, amit vizsgálunk peremszög értéket az vagy nagyobb lesz, mint a tényleges érték vagy kisebb, mivel nem ugyan azt a peremszöget látjuk két különböző oldalról vizsgálva. Ennek az oka az, hogy nem volt teljesen vízszintes a minta.



41. ábra: Mérés során fellépő hibák a szubsztráton

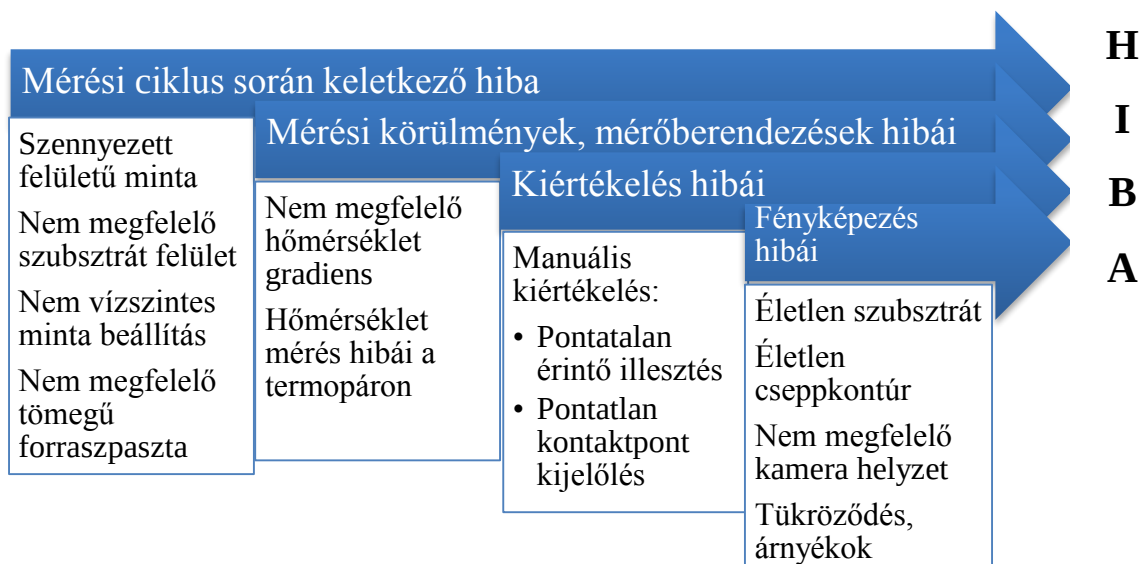
Probléma a paszta nem megfelelő tárolása. Hűtés nélkül könnyen be tud száradni. Ilyenkor a folyaszttószer és a forrasztanyag összeáll és az olvadási hőmérséklet elérése után nem terülnek szét rendesen, így a forrasztás nem lesz elfogadható minőségű.

A kiértékelési módszer problémája az emberi pontatlanság. Az eredmények személyi hibával terheltek, amely hiba mérőszemélyenként és mérésenként is különbözik. Ha tökéletes 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 függnék. Annak, hogy kétszer pontosan ugyanabba a pontba kattintunk, a valószínűsége csekély. Tökéletes 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.

Mint minden mérés esetében, a peremszög mérések eredményei is hibával terheltek. Az eredmények hibasávja két fajta hibából tevődik össze, a mérési hibából és a kiértékelési hibából. A mérési hibát, a mérési körülmények tökéletlensége és megismételhetetlensége okozza. A vizsgálat során fellépő lehetséges hibák okai a 42. ábrán egy Ishikawa diagramon láthatók.

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. A fénykép készítésekor fontos, hogy a csepp kontúrja és a szubsztrát látható éle éles legyen. Ha ezek a feltételek nem teljesülnek, a kiértékeléskor bizonytalan a kontaktpontok és a kontúrhoz húzott érintő meghatározása.



42. ábra: A peremszögmérés hibalehetőségeinek Ishikawa-diagramja [80]

4. NEDVESEDÉS MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

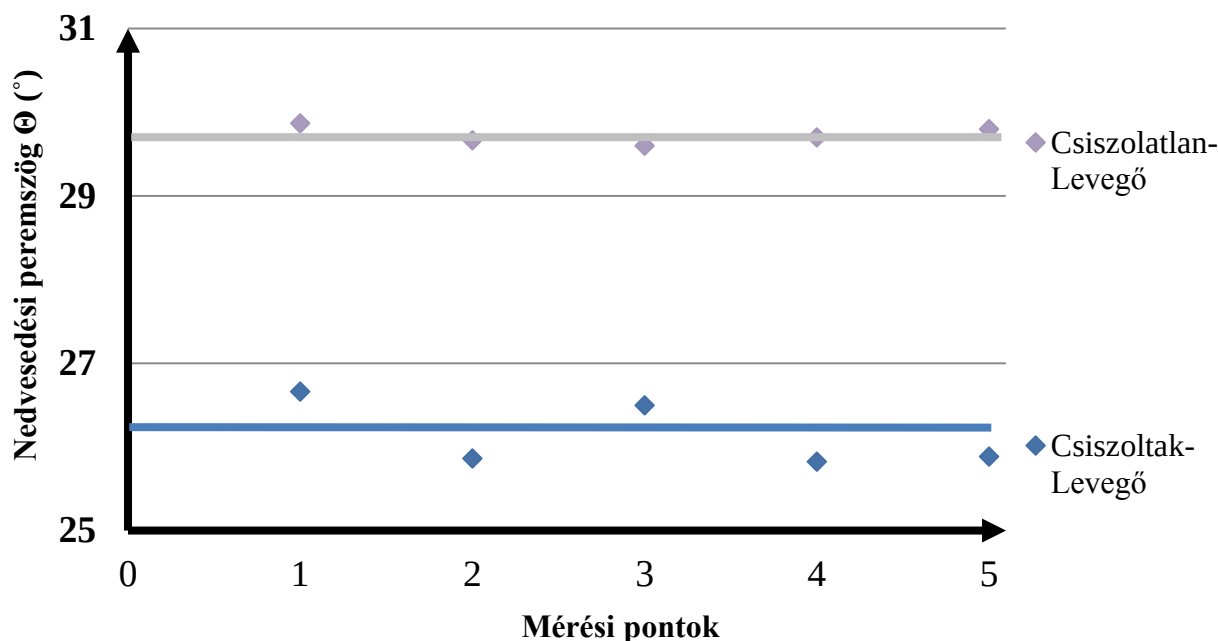
Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom során elért nedvesedés-vizsgálati eredményeket. Az eddigi fejezetekben vizsgált réz mintadarabokon nedvesedési vizsgálatot hajtottam végre, hogy megállapítsam mi lett a következménye a lézeres felületkezelésnek, azaz hogyan változnak a peremszög értékek. A mintadarabokat különböző szempontok szerint vizsgáltam:

- lézeres kezelés hatása megfelelően előkészített mintákra,
- lézeres kezelés hatása csiszolatlan mintákra,
- lézerrel kezelt minták nedvesedése más összetételű pasztával,
- lézerrel kezelt minták hőkezelése hidrogénben a nedvesedés mérés előtt,
- lézeres kezelés megismételhetőségi vizsgálata.

A lézerrel kezelt minták vizsgálata előtt végeztem egy bevezető mérés sorozatot, ahol lézerrel kezeletlen felületeken végeztem méréseket. Ez nagy jelentőségű, hiszen az ezek után elvégzett lézeres méréseket az itt megszerzett tapasztalatok alapján végeztem, annak érdekében, hogy mindegyik peremszögmérés esetében a mérési folyamat lépési és a körülmények azonosak legyenek. Mindenekelőtt ezeket az eredményeket mutatom be.

4.1. BEVEZETŐ MÉRÉSEK KEZELETLEN FELÜLETEN

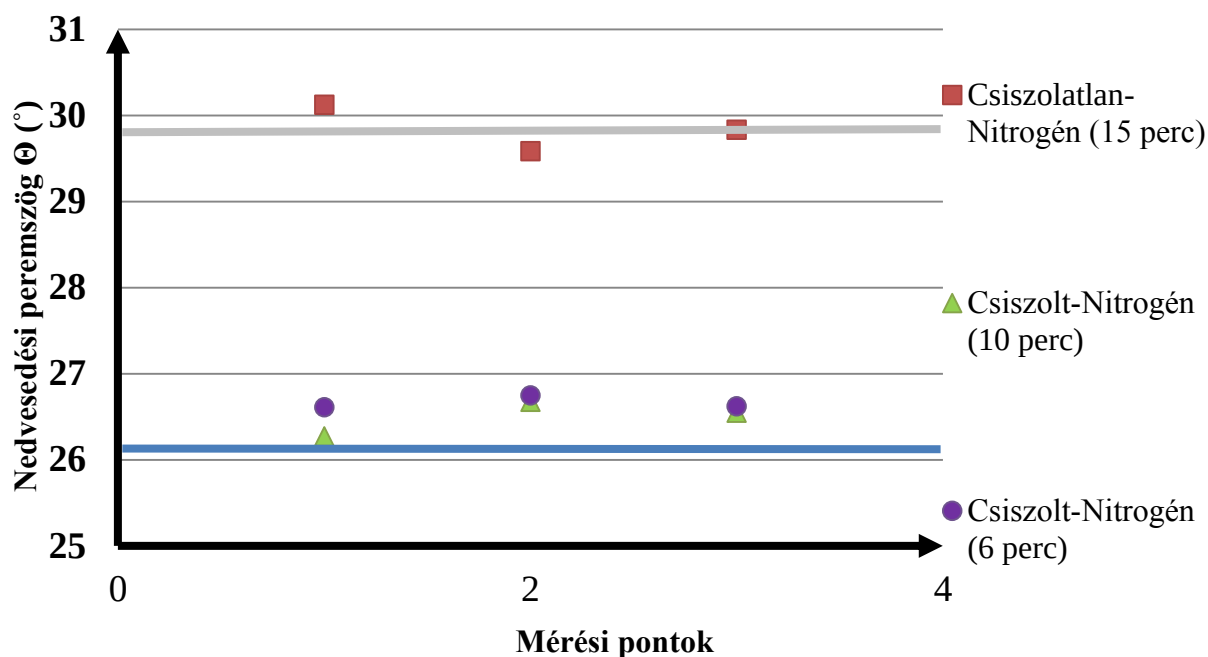
Az első fontos dolog, amit megvizsgáltam mintáimon az, hogy befolyásolja-e a nedvesedési peremszög értékeit a csiszolt és csiszolatlan felület (43. ábra).



43. ábra: A bevezető mérések során vizsgált mintadarabok: csiszolatlan, csiszolt és levegőn mérve

A csiszolt minták esetében a felület a 3.2. fejezetben leírtak szerint lett előkészítve. A csiszolt minták esetében levegő atmoszférában mérve átlagosan $26,2^\circ$ -os peremszög adódott. Ezzel szemben a csiszolatlan levegőn mért mintákon az átlag érték $29,7^\circ$. Erre az eredményre számítottam, hiszen, ennek okát az 2.4. fejezetben ismertetett tulajdonságok magyarázzák, miszerint a tisztább felület jobban nedvesít, mint az egyenetlen és koszos. Ezek alapján megállapítottam, hogy a jobb nedvesedés elérése érdekében elengedhetetlen a felület előkészítése és tisztítása.

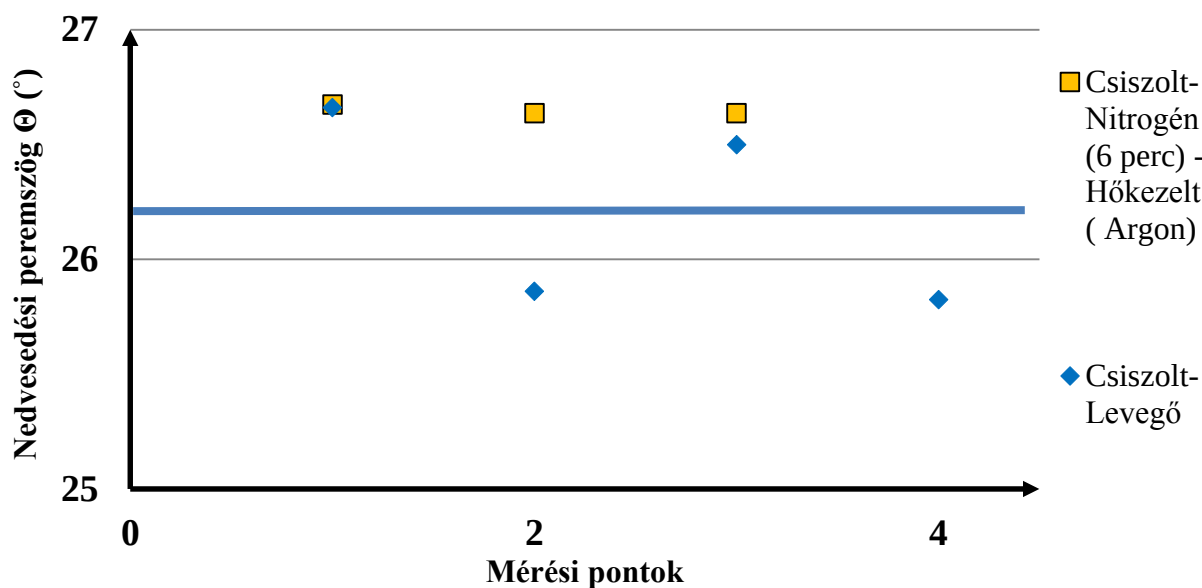
A csiszolt és csiszolatlan mintadarabok peremszögértékeinek alakulását inert atmoszférában is megvizsgáltam. A védőgáz előkészítéséhez háromszor öblítettem át a kamrát és mind a három alkalommal a feltüntetett percreig vákuumoztam a rendszert, hogy a kamrában lévő oxigén mennyiségét minél inkább lecsökkentsem. A 44. ábrán látható, hogy ezeken a mintadarabokon mért peremszög értékek megegyeznek az ugyan olyan előkészítésen átesett, de levegőn mért minták eredményeivel. A szürke vonal a csiszolatlan, levegőn mért értékek átlagát jelzi, míg a kék vonal a csiszolt és levegőn mért értékek átlagát.



44. ábra: Inert atmoszféra hatása a nedvesedési peremszögre

Különböző vákuumozási időtartamok mellett vizsgáltam az inert atmoszféra hatását. A vákuumozás ideje 6. 10 illetve 15 perc volt. A mérési eredmények alapján, úgy állapítom meg, hogy a peremszögmérések során a nitrogén atmoszféra alkalmazásának nincs hatása a mért peremszögértékekre, így a nedvesedési viszonyokra. Ezért a továbbiakban a vizsgálatokat levegő atmoszférában végeztem.

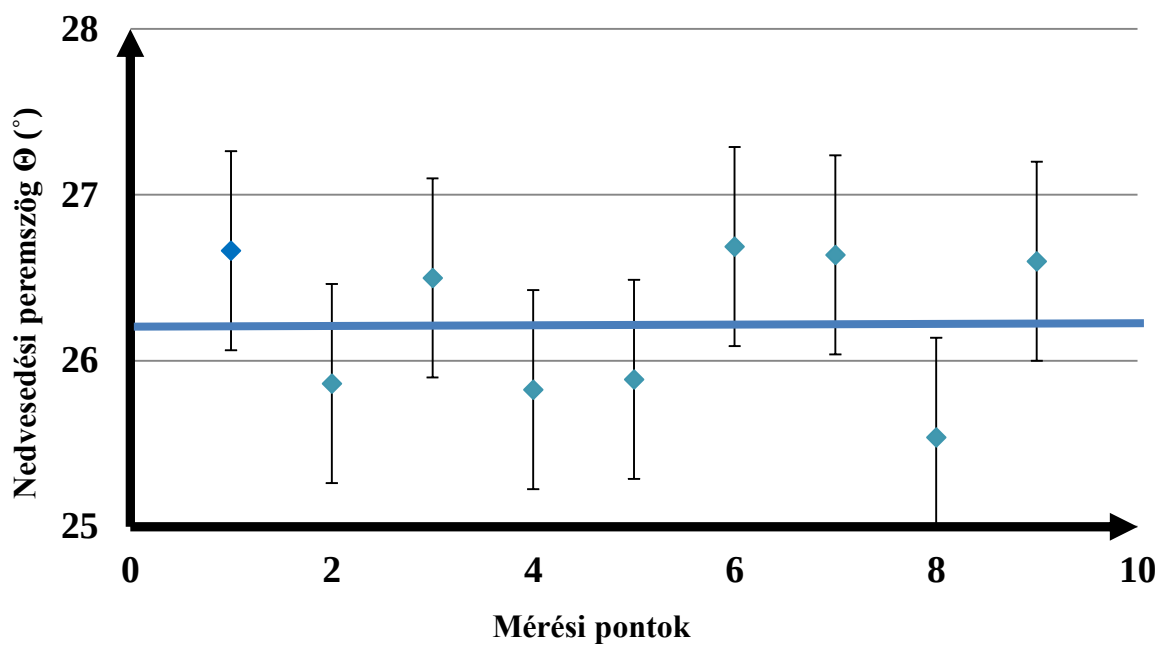
Még azt a tényezőt vizsgáltam, hogy mi a befolyása, annak, ha a nedvesedésmérési vizsgálatok előtt, a már előkészített mintákat 30 percre 380°C-on argon védőgáz átfolyatása mellett hőkezelem. Ezt azért gondoltam fontosnak, hogy megtudjam, befolyásolja-e a réz mintadarabokat, hogy hideghengerlési technológiával lettek alakítva. A hőkezelést a tanszéken felépített cserélhető atmoszférájú hőkezelő kemencében végeztem. Arra az eredményre számítottam, hogy a hengerlés során megváltozott szemcseszerkezet a hőkezelés hatására ismét megváltozik. Ezzel szemben az 45. ábrán látható, hogy a hőkezelésnek nem volt befolyása a csiszolt és levegőn mért nedvesedési peremszögek értékére.



45. ábra: Csiszolt és argonban hőkezelt minták összehasonlítása

Az eddigi vizsgálatok alapján megállapíthatom, hogy legnagyobb mértékben annak van befolyása a nedvesedési tulajdonságokra és a mérési eredményeimre, hogy milyen a felület minősége. Néhány kivétellel, a további lézeres vizsgálataimnál a lézeres felületkezelést mindig csiszolással és polírozással előkészített mintadarabon végeztem.

Ahhoz, hogy a későbbi eredményeimet viszonyítani tudjam a kezeletlen minták peremszög értékeihez, meg kellett állapítanom a kezeletlen minták átlagát és megjeleníteni ezen értékek abszolút eltérését, ami a továbbiakban hibasávként jelenik meg a mért eredményeken. A mérési eredményeket az 5. táblázat és a 46. ábra mutatja. Ezek alapján a kutatásomhoz használt kezeletlen minták peremszög értékének átlaga $26,2^\circ$ és a hiba sávja $1,2^\circ$.



46. ábra: A kutatáshoz használt kezeletlen minták peremszögértékeinek viszonyai

5. táblázat: Csizolt minták peremszögértékei

Mérés száma	Θ Nedvesedési peremszögek
1	26,7
2	25,9
3	26,5
4	25,9
5	25,9
6	26,8
7	26,6
8	25,5
9	26,6
Átlag:	26,2

4.2. LÉZERREL KEZELT FELÜLETEK VIZSGÁLATA

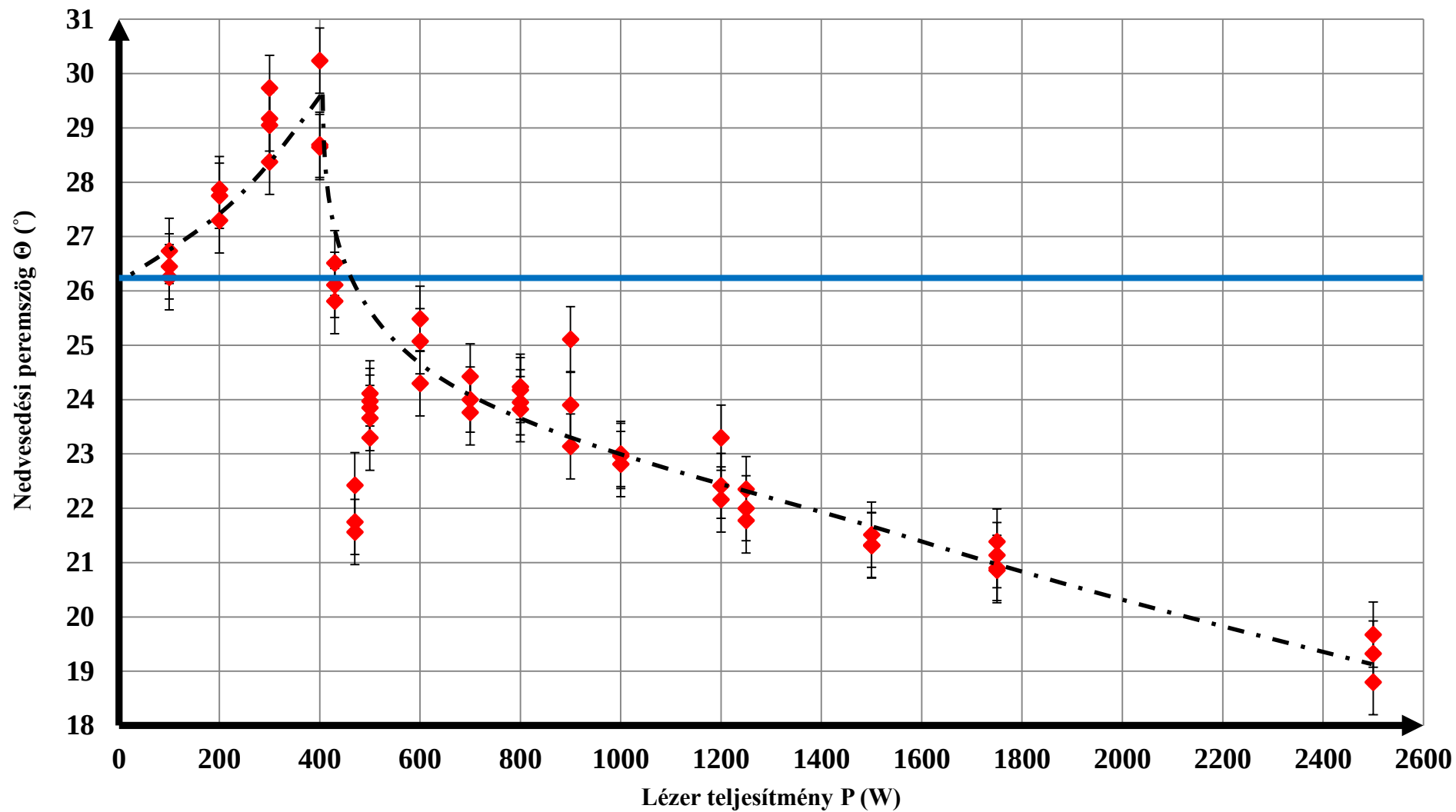
Az előmérési szakasz során megfogalmazott ismeretek után a következő lépés a lézerrel felületkezelt minták vizsgálatának ismertetése.

4.2.1. LÉZERES FELÜLETKEZELÉS HATÁSA AZ ELŐKÉSZÍTETT MINTÁKRA

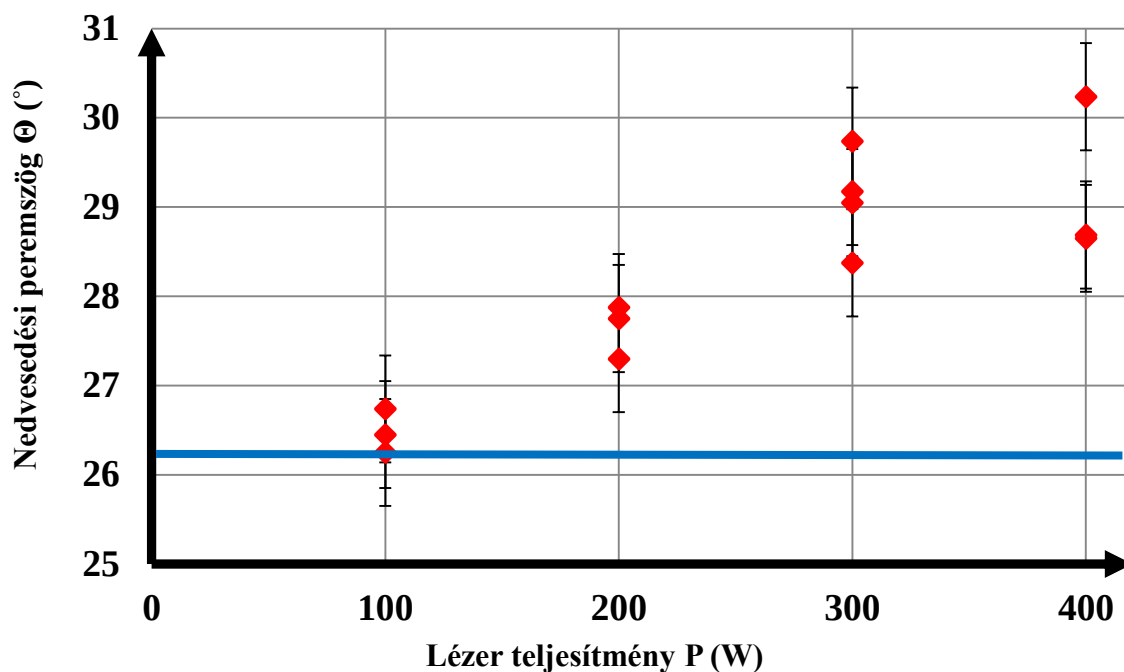
Az eddigi fejezeteken át vizsgált lézerrel felületmódosított mintadarabokat alávettem nedvesedési vizsgálatoknak is. Ez a kutatásom legfőbb része, hiszen ebben a fejezetben bemutatom, hogyan miként változik a lézeres besugárzás hatására különböző teljesítményszinteken a réz szubsztrát és az alkalmazott SAC305-ös forraszpasztta nedvesítő képessége. Az optimális eredmény megtalálása érdekében 17 különböző lézer teljesítmény szinten vizsgáltam meg a mintadarabokat: 100, 200, 300, 400, 430, 470, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1250, 1500, 1750 és 2500 W-on. Ezekből az adatokból egy átfogó, teljes képet kaphatok arról, hogy milyen változásokat okoz a felületkezelés a réz szubsztráton és ezáltal kitudjuk választani a lágyforrasztási technológia javítása szempontjából a legjobb eljárást. A kezelés hatása a SAC305-ös forraszpasztta nedvesítő képességére a 47. ábrán látható módon alakul és jelölve van a kezeletlen minták átlaga a kék folytonos vonallal és az értékek tendenciájának jelölése érdekében felvettem egy fizikai tartalommal nem rendelkező, pontvonallal ábrázolt trendvonalat is a diagramban.

Az eredményekből első ránézésre is egyértelműen látható, hogy a lézeres felületkezelés egyes teljesítményértékeknél csökkentette a nedvesedési peremszöget, de észre lehet venni lokális szélsőértékeket és ingadozásokat is az eredményekben. Valamint az is kitűnik, hogy a legnagyobb peremszögérték csökkenést a 2500 W-is lézerteljesítménnyel felületkezelt minták esetében tapasztalhatunk, a kezeletlen minták referencia adataihoz képest.

Végighaladva a mért adatokon szakaszonként értékelem ki az eredményeket.

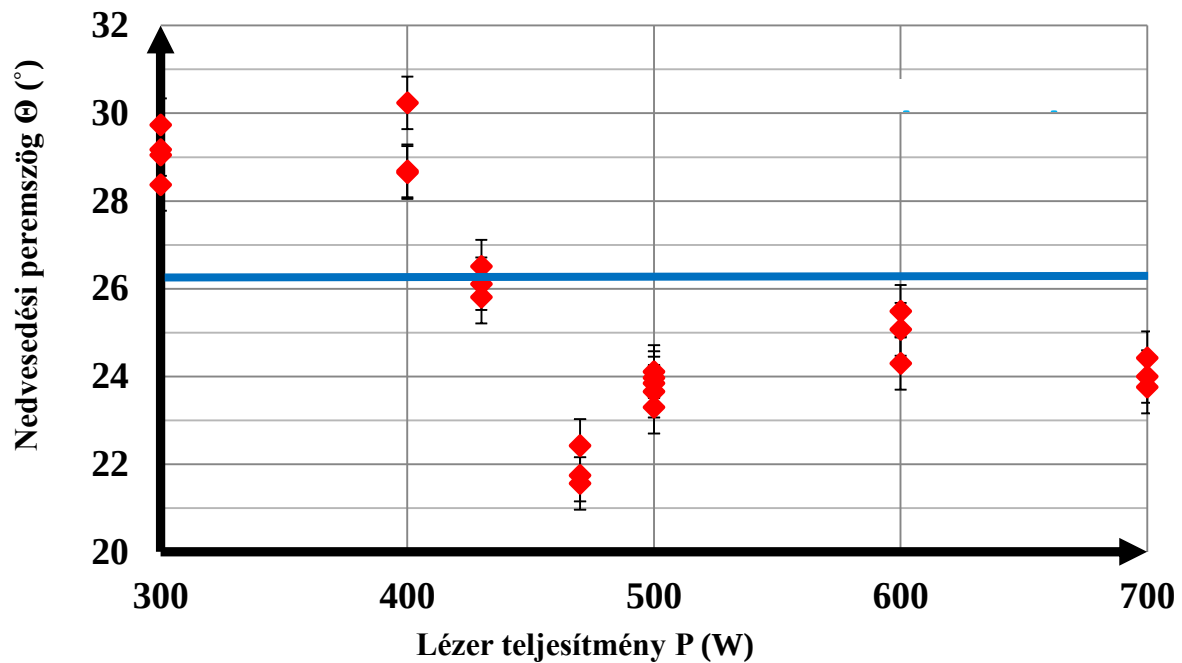


47. ábra: Lézerrel felületkezelt minták peremszögértékei



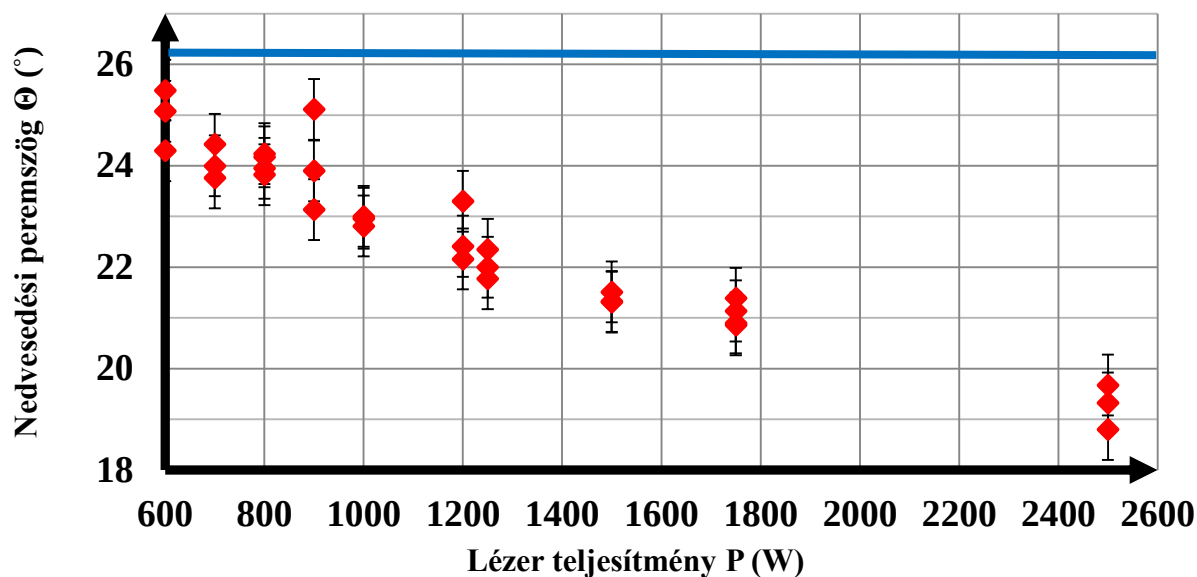
48. ábra: Lézerrel felületkezelt minták tendenciája: I. szakasz

Az I. szakasz a 100 W-tól 400 W-ig terjedő rész (48. ábra). Itt jól láthatóan a kezeletlen minták átlagához képest monoton növekvő tendencia mutatkozik. A peremszög maximuma 400 W-on jelentkezik és értéke $30,2^\circ$. Ennek a peremszögérték növekedésének az oka az lehet, hogy a lézeres kezelés hatására a felületi energiának csökkennie kellett a kezeletlen minták felületi energiáihoz képest. Valószínű, hogy a réztábla gyártásához alkalmazott hideghengerlési folyamat közben bevitt felületi energiákat az alacsony lézerteljesítmény leépítette, ahelyett, hogy növelte volna. Továbbá az alacsony teljesítmény a felületi oxidréteget kedvezőtlen irányba módosította. Ez az eredmény jól példázza azt is, hogy az ismerttetett peremszög csökkentési technika egy esetleges jövőbeli alkalmazása során mennyire fontos lesz a megfelelő folyamat specifikus beállítások megtalálása, hiszen a felületkezelés nem minden esetben eredményez javulást a nedvesedési körülményekben.



49. ábra: Lézerrel felületkezelt minták tendenciája: II. szakasz

A következő II. szakasz a 400 W-tól körülbelül a 600 W-os teljesítmény tartományig terjed (49. ábra). A 430 W-os kezelés már csökkenést mutat a 400 W-oshoz képest és értéke a kezeletlen mintákéhoz tart. A lézerteljesítmény kismértékű növelésével, 470 W-os szinten felfedezhető egy lokális minimum az eredményekben, aminek peremszög értéke: 21,6°. A hirtelen csökkenésnek az oka az lehet, hogy ezen a teljesítményen csökken a felületi oxidréteg vastagsága és hirtelen megugrik a felületi energia értéke. Innen növelve a teljesítményt ismét növekedést tapasztalhatunk, ami körülbelül a 600 W-os lézerteljesítményig tart.



50. ábra: Lézerrel felületkezelt minták tendenciája: III. szakasz

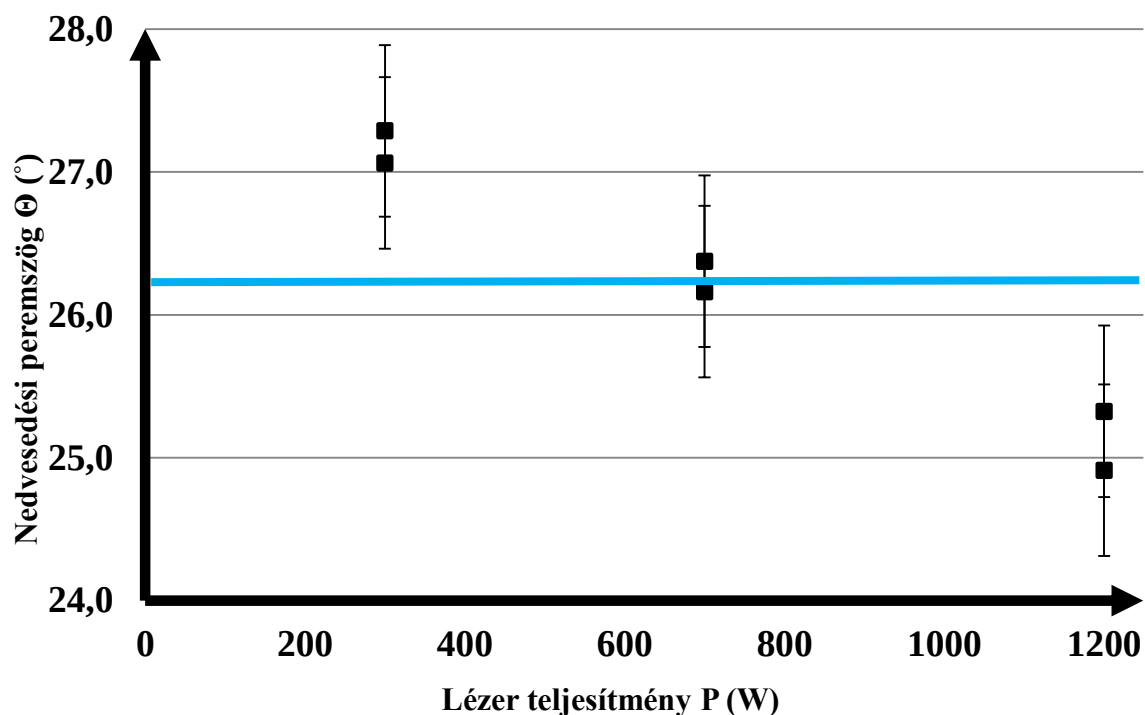
Az utolsó III. tartomány 600 W-tól a legmagasabb 2500 W-os kezelésig tart (50. ábra). Ebben a szakaszban a felületi energia tovább növekedéséből, az oxidréteg csökkenéséből és a szövetszerkezetben történő változásokból jól látszik, hogy a peremszögértékeknek szigorúan monoton csökkenése van. Ebből a tendenciából megállapítható, hogy növelve a lézer teljesítményt a csökkenés tovább folytatódik.

A következő fejezetekben bemutatnom a különböző paraméterek változtatásának hatását az előkészített és lézerrel besugárzott mintadarabokhoz képest. Erre a célra már kevesebb, de egyértelműen meghatározható vizsgálati pontokat jelöltem ki. Ez a 4 pont a lézerrel kezeletlen, a 300, 700 és 1200 W-os mérés. Azért ezeket választottam, mert a 300 W-on mért értékek egyértelműen az átlagtól pozitív irányban térnek el, míg a 700 és az 1200 W-on mért eredmények már az átlagtól lefelé helyezkednek el és csökkenő tendenciát mutatnak.

4.2.2. LÉZERES KEZELÉS HATÁSA A CSISZOLATLAN MINTÁKRA

Megvizsgáltam, hogy miként hat a lézeres besugárzás a csiszolatlan felületre. A 6. táblázatból és az 51. ábrából azt lehet megállapítani, hogy a kijelölt mérési pontokon a lézeres kezelés hatása megjelent hasonlóan, mint az előkészített mintáknál

Az 1200 W-on kezelt mintadarab peremszögértéke ismét csökkent az átlaghoz képest, de jóval kisebb mértékben. Ennek oka az lehet, hogy az előkészítés hiánya miatt nem tudtunk akkora energiát bevinni a minták felületébe, mint a csiszolt és polírozott minták esetében.



51. ábra: Csiszolatlan, lézerrel felületkezelt minták peremszögértékei

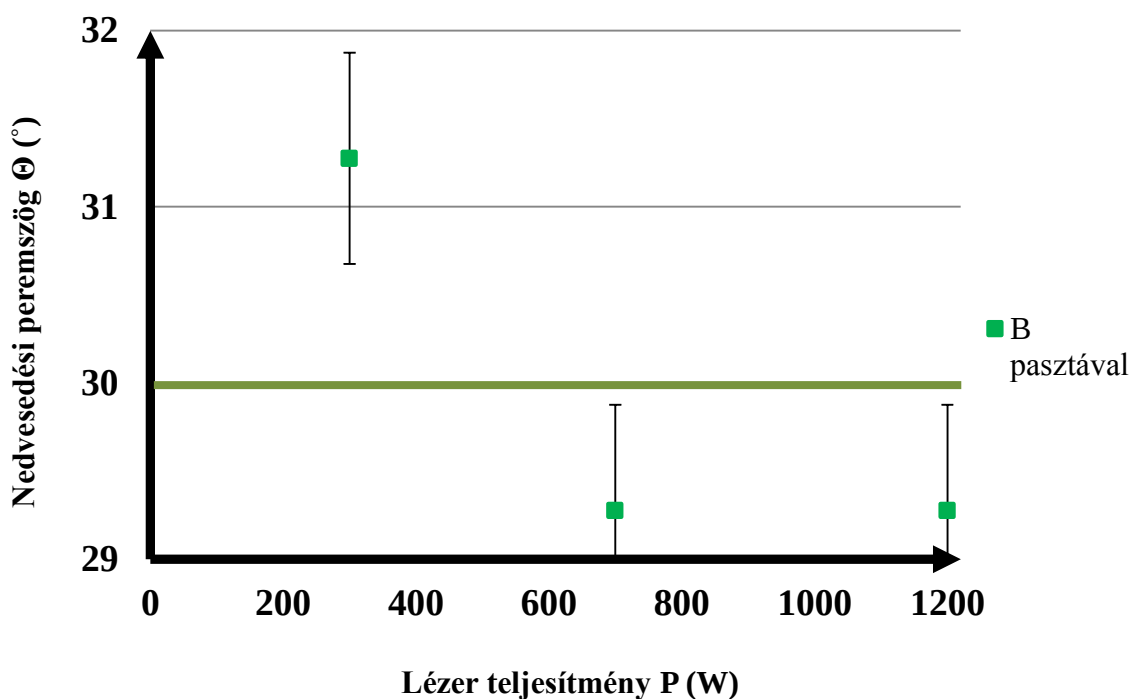
6. táblázat: Csiszolatlan, lézerrel felületkezelt minták peremszögértékei

Lézer teljesítmény P (W)	Mérés sorszáma	Nedvesedési peremszög Θ (°)
300	73	27,1
300	66	27,3
700	67	26,2
700	74	26,4
1200	75	24,9
1200	68	25,3

4.2.3. LÉZERREL KEZELT MINTÁK NEDVESEDÉSI VIZSGÁLATA MÁSPASZTÁVAL

Ebben az esetben nem a szubsztrát felületének minőségét tekintetem változó paraméternek, hanem a ráhelyezett forraszpaszta összetételét. Ezt a vizsgált sorozatot is lézerrel kezelt mintákon hajtottam végre. A mintákra felvitt forraszpaszta hasonlóan SAC305 típusú, azonban a pasztában lévő flux különbözik. A 7. táblázatban és az 52. ábrán láthatóak a másik („B”) pasztával mért eredmények, ahol a zöld folytonos vonallal feltüntettem a másik fluxot tartalmazó pasztával mért kezeletlen minta nedvesedési peremszögét. A tendenciát megfigyelve észre vehető, hogy a 300 W-os mérés átlag felett jelentkezik, a 700 W-os és 1200 W-os mérés

az átlag alatt. A fentebb részletezett tendencia továbbra is érvényes, attól függetlenül, hogy a felületen más anyagot használunk. Ebből arra lehet következtetni, hogy nem befolyásolja a lézeres felületkezelés hatását a folyasztószer összetétele.



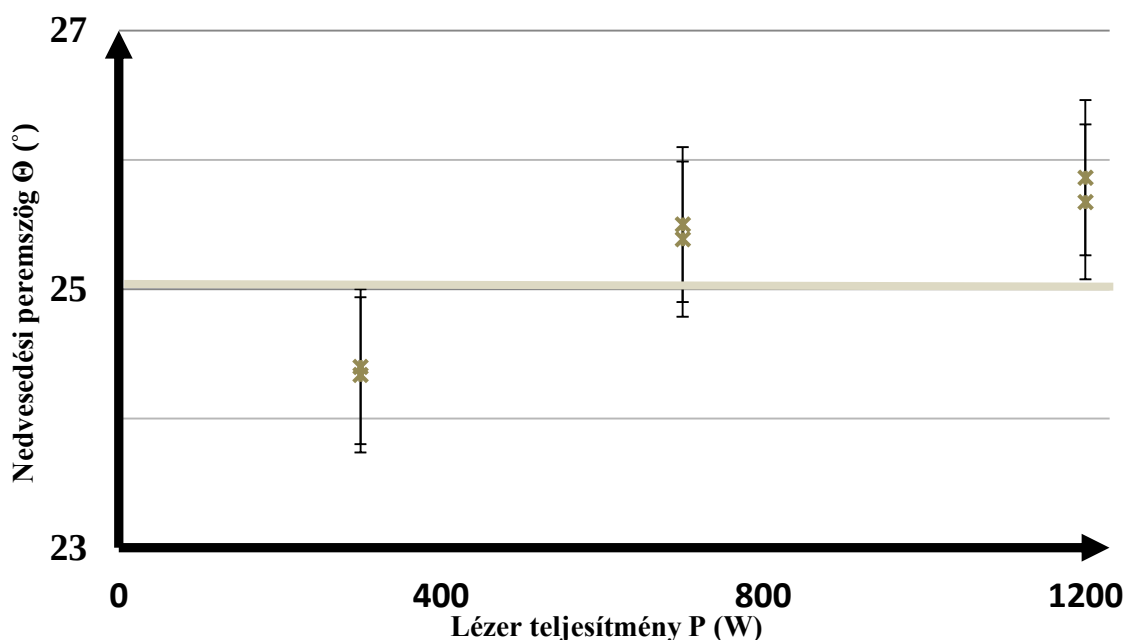
52. ábra: Más folyasztószert tartalmazó pasztával mért peremszögértékek

7. táblázat: Más folyasztószert tartalmazó pasztával mért peremszögértékek

Lézer teljesítmény P (W)	Mérés sorszáma	Nedvesedési peremszög Θ (°)
300	70	31,3
700	67	29,3
700	71	29,3
1200	72	27,9
Kezeletlen	80	29,9

4.2.4. HIDROGÉN ATMOSZFÉRÁS HŐKEZELÉS HATÁSA A LÉZERREL KEZELT MINTÁK NEDVESEDÉSÉRE

A 300, 700 és 1200 W-on felületkezelt mintákat hidrogén védőgáz alkalmazásával hőkezelttem. A kezelés eredményeképp azt feltételeztem, hogy a lézer által módosított felületi oxidréteg ismét módosulni fog, ezáltal semlegesítve a lézeres felületkezelés hatását. A hőkezelést a tanszéken lévő hidrogénes hőkezelőkamrában végeztem el. A hőtartás ideje 30 perc és a beállított hőmérséklet 350°C volt. Az eredmények az 53. ábrán és a 8. táblázatban láthatóak, a krémszínű vonal a lézerrel kezeletlen, de hőkezelt minták átlagos peremszögértékét mutatja. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a hőkezelés ismét megváltoztatta a minták felületi oxidrétegét és a szemcseszerkezetet, ezáltal semlegesítette a lézeres felületkezelés hatását.



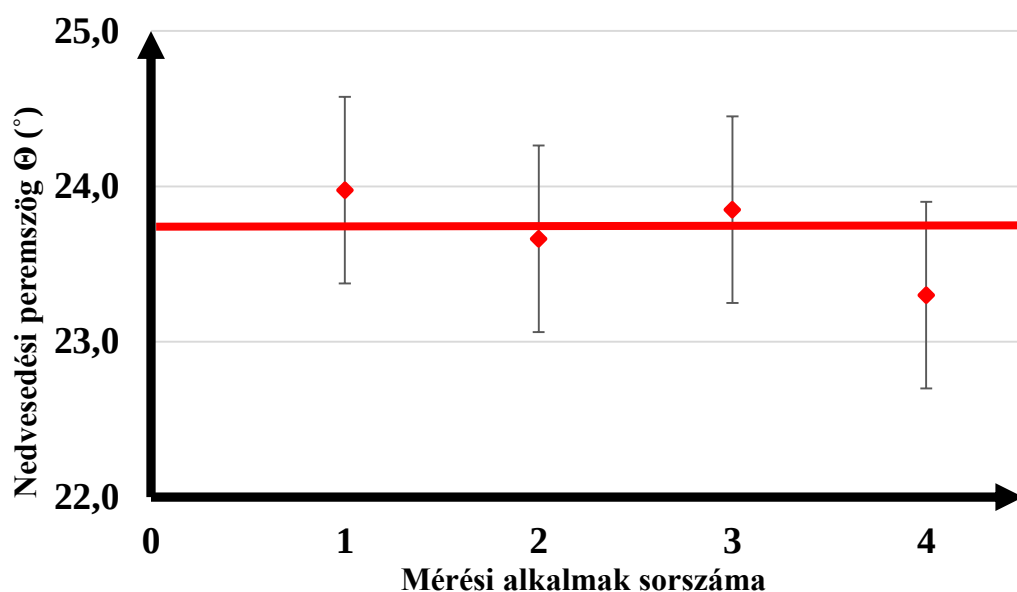
53. ábra: Hidrogén védőgáz hőkezelés hatásának eredményei

8. táblázat: Hidrogén védőgáz hőkezelésben részesült minták peremszögértékei

Lézer teljesítmény P (W)	Mérés sorszáma	Nedvesedési peremszög Θ (°)
300	86	24,3
700	87	25,4
700	88	25,5
1200	82	25,9
1200	83	25,7
Kezeletlen	81	24,2
Kezeletlen	85	26,1

4.2.5. LÉZERES FELÜLETKEZELÉS MEGISMÉTELHETŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA

Azt vizsgáltam, hogy a lézeres felületkezelések megismételhetőek-e és ugyanolyan hatást eredményeznek-e. Erre a célra az 500 W-on mért értékeket használtam fel, ahol 4 db mérési eredmény van (9. táblázat). Látható, hogy a pirossal jelölt vonalhoz - azaz az átlagot jelölő egyeneshez- közel helyezkednek el a mért értékek (54. ábra). A táblázatban feltüntettem a mérések átlagát, azok szórását és a mérésenkénti relatív eltérésüket. Az eltérések százalékos értékéből következtetve kimondható, hogy a lézeres felületkezelés megismételhető és mindig ugyanazokat a változásokat eredményezi a szubsztráton. A mérések 3%-os relatív eltérésen bévül vannak, tehát elfogadható az eljárás.



54. ábra: Különböző alkalmakkor besugárzott minták eredményeinek alakulása

9. táblázat: Különböző alkalmakkor besugárzott minták eredményeinek alakulása

Lézer teljesítmény P (W)	Mérés sorszáma	Nedvesedési peremszög Θ (°)	Relatív eltérés [%]
500	46	24	1,17
500	65	23,7	-0,14
500	64	23,9	0,64
500	25	23,3	-1,67

5. KUTATÁSI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A jármű- és elektronikai iparhoz kapcsolódó technológiák közül kiemelt jelentőségűek a kötéstechikák, ezeken belül is az oldhatatlan kötést létrehozó lágyforrasztott kötések. Az anyagok nedvesítő tulajdonságainak és azok módosításának ismerete a mai gyártási technológiák és korszerű anyagok felhasználása mellett nélkülözhetetlen. A nedvesedési viszonyok változtatásához ismernünk kell a nedvesedést befolyásoló paramétereket.

A kísérleti eredményeim alapján kijelenthető, hogy a célkitűzésben megfogalmazott feltételezésem, miszerint a szubsztrátok lézeres felületkezelésének hatására a forrasztóanyagok nedvesedési tulajdonságai javulhatnak, beigazolódott.

- A mérési eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy a besugárzott lézerteljesítmény függvényében először növekszik a peremszög értéke, 4° -al az átlaghoz képest, majd a teljesítmény növelésével folyamatosan csökken. A legnagyobb peremszög változás 28%-os javulást eredményezett.
- Kijelenthető, hogy a csiszolatlan minták lézeres felületkezelésének hatása megegyezik a csiszolt és polírozott mintákéval. Annyi különbséggel, hogy a változás kisebb mértékben módosítja a csiszolatlan mintákat.
- A lézeres felületkezelés nedvesedés javító hatása ugyanolyan összetételű, de más folyasztozszer tartalmazó forrasztópaszta esetén is fennáll. Ugyanaz a tendencia jelentkezik mind a két esetben.
- A hidrogén atomszférás hőkezelés következményeképp kiderült, hogy a hőkezelés ismét módosítja a felületi oxidréteget és a szemcseszerkezetet, ezáltal semlegesítve a lézeres felületkezelés hatását.
- Továbbá megállapítottam, hogy a több alkalommal - napokkal később - megismételt lézeres kezeléseknél mindig ugyan az a módosító hatása a szubsztrátra.

A réz szubsztrát metallográfiai és SEM felvételeiben láthatóak a lézeres besugárzás hatásai a különböző beállított lézerteljesítményen. Az eredmények azt mutatják, hogy a határfelületen lévő szemcseszerkezet megváltozik a besugárzott energia hatására.

A dolgozatomban legnagyobb eredményeképpen jellemezhető $7,4^\circ$ körüli peremszögérték csökkenés pozitív hatással lehet majd a forrasztási technika világára. A megfelelő paraméterek beállításával (forrasztóanyag összetétele, lézerteljesítmény) ez a javulás tovább növelhető, talán

egészen a 10° - 13° -os tartományig. Egy ilyen jelentős peremszögérték csökkenés számottevően alakíthatná át a ma használatos forrasztási technológiákat és új, a végletekig kioptimált műveletek bevezetését tenné lehetővé az iparban, amely a kötések minőségének javulásával és a költségek csökkenésével járna együtt.

A lézeres felületkezelésen átesett mintám vizsgálatát a kutatásom folytatásaként kiterjesztem a röntgen diffrakciós és a transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálatokra. Továbbá a lézeres felületkezeléseket más lézertípusok - pl.: dióda lézer - bevonásával is elvégzem. Ezen vizsgálatokkal a jelenlegi eredményeket ki lehetne terjeszteni és a háttérben lévő anyagtudományi jelenségeket magyarázni lehetne.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom a Gépjárművek és Járműgyártás Tanszéknek, hogy lehetővé tették számomra ebben az igen érdekes és izgalmas kutatási projektben való részvételt.

Köszönöm a BAY-ATI intézetnek és Dr. Buza Gábor, Zahorszki Gábor és Ott Róbert Uraknak, hogy a mintáim lézeres felületkezelését lehetővé tették.

Köszönöm Dr. Májlinger Kornélnak (BME ATT) a SEM mérések elvégzésében nyújtott segítségét.

Köszönöm Dr. Vehovszky Balázsnak (BME GJT) a hidrogén védőgázos hőkezelésben való segítséget.

Végezetül pedig, külön köszönöm a konzulenseimnek, Dr. Weltsch Zoltánnak és Hlinka Józsefnek a dolgozatom elkészítéséhez nélkülözhetetlennek bizonyuló teljes körű útmutatásukat és folyamatos támogatásukat.

A dolgozat lezárásra került 2014. október 27.-én.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1]: E. Wolfram: Kontakt nedvesedés, Akadémiai Kiadó, 1971, 71.71828
- [2]: P. O. Hiemenz, R.D. Vold: Journal of Colloid Science, 1965
- [3]: G. Humpston, D.M. Jacobson (2004): Principles of Soldering, ASM International, ISBN 0-87170-792-6
- [4]: http://mti.kvk.uni-obuda.hu/adat/tananyag/anyag/banki/8_forrasztas.ppt, 2014.08
- [5]: K.Narayan Prabhu, Rantej Bali, Rajat Ranjan: Effect of substrate surface texture and flux coating on the evolution of microstructure during solidification of lead free Sn-3.5Ag solder alloy, Materials & Design, Volume 25, Issue 5, August 2004, Pages 447-449, ISSN 0261-3069, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2003.11.008>.
- [6]: O. Krammer: Modelling the self-alignment of passive chip components during reflow soldering, Microelectronics Reliability, Volume 54, Issue 2, February 2014, Pages 457-463, ISSN 0026-2714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2013.10.010>.
- [7]: H. Amalu, W.K. Lau, N.N. Ekere, R.S. Bhatti, S. Mallik, K.C. Otiaba, G. Takyi: A study of SnAgCu solder paste transfer efficiency and effects of optimal reflow profile on solder deposits, Microelectronic Engineering, Volume 88, Issue 7, July 2011, Pages 1610-1617, ISSN 0167-9317, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2011.02.104>.
- [8]: A.S.M.A. Haseeb, M.M. Arafat, Mohd Rafie Johan: Stability of molybdenum nanoparticles in Sn-3.8Ag-0.7Cu solder during multiple reflow and their influence on interfacial intermetallic compounds, Materials Characterization, Volume 64, February 2012, Pages 27-35, ISSN 1044-5803, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2011.11.006>.
- [9]: W.H. Zhong, Y.C. Chan, M.O. Alam, B.Y. Wu, J.F. Guan: Effect of multiple reflow processes on the reliability of ball grid array (BGA) solder joints, Journal of Alloys and Compounds, Volume 414, Issues 1-2, 13 April 2006, Pages 123-130, ISSN 0925-8388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.07.047>.
- [10]: Yu-Fang Chiu, Ying-Ling Tsai, Weng-Sing Hwang: Mathematical modeling for the solidification heat-transfer phenomena during the reflow process of lead-tin alloy solder joint in electronics packaging, Applied Mathematical Modelling, Volume 27,

- Issue 7, July 2003, Pages 565-579, ISSN 0307-904X,
[http://dx.doi.org/10.1016/S0307-904X\(03\)00087-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0307-904X(03)00087-8).
- [11]: Francis K.H Lau, Vincent W.S Yeung: A hierarchical evaluation of the solder paste printing process, Journal of Materials Processing Technology, Volume 69, Issues 1-3, September 1997, Pages 79-89, ISSN 0924-0136, [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00045-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00045-3).
- [12]: G. Humpston, D.M. Jacobson (2004): Principles of Soldering, ASM International, ISBN 0-87170-792-6
- [13]: M. Beckert, A. Neumann (1974): Forrasztás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [14]: E. Lüder (1952): Handbuch der Löttechnik (A forrasztás kézikönyve) Berlin, VEB Verlag Technik
- [15]: J. Shen, Y.C: Chan, Effect of metal/ceramic nanoparticle-doped fluxes on the wettability between Sn-Ag-Cu solder and a Cu layer, Journal of Alloys and Compounds, Volume 477, Issues 1-2, 27 May 2009, Pages 909-914, ISSN 0925-8388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.11.015>.
- [16]: K.Narayan Prabhu, Rantej Bali, Rajat Ranjan: Effect of substrate surface texture and flux coating on the evolution of microstructure during solidification of lead free Sn-3.5Ag solder alloy, Materials & Design, Volume 25, Issue 5, August 2004, Pages 447-449, ISSN 0261-3069, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2003.11.008>.
- [17]: http://stmt.hu/bz/allvizsga/modszertan/barath_tomitol/Technika_modszertan/06/Lagyforrasztas.ppt, 2014.08
- [18]: <http://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forgacs.htm>, 2014.08
- [19]: E. Lüder (1964): Eigenschaften von Lötflussmittel-Substanzen (A forrasztáshoz használt folyasztószerek anyagainak tulajdonságai), Schweisstechnik 14, 135-137
- [20]: Z. Weltsch, A. Lovas, J. Takács, Á. Cziráki, G. Tichy, A. L. Tóth, L. Illés (2010): Wetting Ability of Ag Based Molten Alloys on Graphite Substrate, Solid State Phenomena, Vol. 159, pp.117-120
- [21]: E. Wolfram: Kontakt nedvesedés, Akadémiai Kiadó, 1971, 71.71828
- [22]: P. O. Hiemenz, R.D. Vold: Journal of Colloid Science, 1965
- [23]: Z. Weltsch (2008): Fémolvadékok és szilárd kerámiafázisok közötti nedvesedés vizsgálata nyugvó csepp módszer segítségével, diplomamunka, BME-KSK JJT
- [24]: H. D. Gibbs: J. Phys. Chem. 1053, 1927

- [25]: G. Kaptay (2010): Határfelületi nano-jelenségek előadás jegyzet, Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar
- [26]: <http://www.biolinscientific.com/attension/applications/?card=AA7>
- [27]: Robert N. Wenzel: Surface Roughness and Contact Angle, 1949
- [28]: J. Lawrence, L. Li, J.T. Spencer, in: Proceedings of ICALEO 96: Laser Materials Processing, Detroit, MI, October, 1996, pp. 138-148.
- [29]: J. Lawrence, L. Li, Opt: Lasers Eng. 32 (2000) 353-365.
- [30]: J. Lawrence, L. Li, J.T. Spencer: Surf. Coat. Technol. 115 (1999) 273-281.
- [31]: J. Lawrence, L. Li, J.T. Spencer: Mater. Sci. Technol. A266 (1999) 167-174
- [32]: J. Lawrence, L. Li, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) 2311- 2318.
- [33]: L. Hao, J. Lawrence, J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004) 86-92
- [34]: L. Hao, J. Lawrence, Mater: Sci. Eng. A 364 (2004) 171-181.
- [35]: Zhenqing Zhao , Chunqing Wang, Mingyu Li, Lei Wang, Lingchao Kong: The effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation on surface energy of copper
- [36]: Dr. G. Buza: Lézersugaras felületötvöztetés, ILAS - 3. Ipari Lézer Alkalmazási Szeminárium, ILAS, Budapest, 2006.
- [37]: Shwin-Chung Wong, Yu-Chung Lin, Effect of copper surface wettability on the evaporation performance: Tests in a flat-plate heat pipe with visualization, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 54, Issues 17-18, August 2011, Pages 3921-3926, ISSN 0017-9310, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.033>.
- [38]: S.Y. Wang, Y. Ren, C.W. Cheng, J.K. Chen, D.Y. Tzou, Micromachining of copper by femtosecond laser pulses, Applied Surface Science, Volume 265, 15 January 2013, Pages 302-308, ISSN 0169-4332, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.200>.
- [39]: Changwoo Lee, Handong Cho, Dongseob Kim, Woonbong Hwang: Fabrication of patterned surfaces that exhibit variable wettability ranging from superhydrophobicity to high hydrophilicity by laser irradiation, Applied Surface Science, Volume 288, 1 January 2014, Pages 619-624, ISSN 0169-4332, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.084>.
- [40]: A. Kearns, C. Fischer, K.G. Watkins, M. Glasmacher, H. Kheyrandish, A. Brown, W.M. Steen, P. Beahan: Laser removal of oxides from a copper substrate using Q-switched Nd:YAG radiation at 1064 nm, 532 nm and 266 nm, Applied

- Surface Science, Volumes 127-129, May 1998, Pages 773-780, ISSN 0169-4332, [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332\(97\)00741-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332(97)00741-1).
- [41]: Ali Atta, Yasser H.A. Fawzy, Alpan Bek, Hassan M. Abdel-Hamid, Mohamed M. El-Oker: Modulation of structure, morphology and wettability of polytetrafluoroethylene surface by low energy ion beam irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 300, 1 April 2013, Pages 46-53, ISSN 0168- 583X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.02.004>.
- [42]: Zhenqing Zhao, Chunqing Wang, Mingyu Li, Lei Wang: Nd:YAG laser surface treatment of copper to improve the wettability of Sn3.5Ag solder on copper, Surface and Coatings Technology, Volume 200, Issue 7, 21 December 2005, Pages 2181-2186, ISSN 0257-8972, <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.01.006>.
- [43]: Ziheng Huang, Jiaoru Zhang, Jiang Cheng, Shouping Xu, Pihui Pi, Zhiqi Cai, Xiufang Wen, Zhuoru Yang: Preparation and characterization of gradient wettability surface depending on controlling Cu(OH)₂ nanoribbon arrays growth on copper substrate, Applied Surface Science, Volume 259, 15 October 2012, Pages 142-146, ISSN 0169-4332, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.006>.
- [44]: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_FOI3/ch01s02.html, 2014.07.25.
- [45]: http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2005_cikkek/nanai_laszlo.pdf, 2014.07.25.
- [46]: Einstein: On the Quantum Theory of Radiation, 1917
- [47]: http://en.wikipedia.org/wiki/Population_inversion, 2014.07.25.
- [48]: Dr. Markovits Tamás: Lézer technológiák előadás jegyzet és diáorok, 2012
- [49]: Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés, Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2007
- [50]: <http://www.directindustry.com/prod/continuum/solid-state-nd-yag-lasers-27505-592231.html>, 2014.07.25.
- [51]: <http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/laser-marking-how-to-choose-the-best-laser-for-your-marking-application.html>, 2014.07.25.
- [52]: B. Genc Oztoprak, E. Akman, M.M. Hanon, M. Günes, S. Gümüş, E. Kacar, O. Gundogdu, M. Zeren, A. Demir: Laser welding of copper with stellite 6 powder and investigation using LIBS technique, Optics & Laser Technology, Volume 45, February 2013, Pages 748-755, ISSN 0030-3992

- [53]: L.K.Ang, Y.Y.Lau, R.M.Gilgenbach, H.L.Spindler: Analysis of laser absorption on a rough metal surface, 1996
- [54]: Zhenqing Zhao, Chunqing Wang, Mingyu Li, Lei Wang: Nd:YAG laser surface treatment of copper to improve the wettability of Sn3.5Ag solder on copper, Surface and Coatings Technology, Volume 200, Issue 7, 21 December 2005, Pages 2181-2186, ISSN 0257-8972, <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.01.006>
- [55]: József Hlinka, László Rédey, Zoltán Weltsch: Wettability Tests Of Different Solder Compositions Of Lead-Free Solder Paste. In: Stanisaw Borkowski, Dorota Klimecka-Tatar (szerk.) QUALITY IMPROVEMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS. Lengyelország, 2014.05.21-2014.05.23. Czestochowa: pp. 66-74. ISBN: 978-83-63978-12-9
- [56]: Jeong-Won Yoon, Bo-In Noh, Bong-Kyun Kim, Chang-Chae Shur, Seung-Boo Jung: Wettability and interfacial reactions of Sn-Ag-Cu/Cu and Sn-Ag-Ni/Cu solder joints, Journal of Alloys and Compounds, Volume 486, Issues 1-2, 3 November 2009, Pages 142-147, ISSN 0925-8388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.159>.
- [57]: Gang Chen, Lin Yu, Yun-Hui Mei, Xin Li, Xu Chen, Guo-Quan Lu: Reliability comparison between SAC305 joint and sintered nanosilver joint at high temperatures for power electronic packaging, Journal of Materials Processing Technology, Volume 214, Issue 9, September 2014, Pages 1900-1908, ISSN 0924-0136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.007>.
- [58]: Thawatchai Plookphol, Sirikul Wisutmethangoon, Sarawut Gonsrang: Influence of process parameters on SAC305 lead-free solder powder produced by centrifugal atomization, Powder Technology, Volume 214, Issue 3, 25 December 2011, Pages 506-512, ISSN 0032-5910, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.09.015>.
- [59]: L. Meinshausen, H. Frémont, K. Weide-Zaage: Migration induced IMC formation in SAC305 solder joints on Cu, NiAu and NiP metal layers, Microelectronics Reliability, Volume 52, Issues 9-10, September-October 2012, Pages 1827-1832, ISSN 0026-2714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.127>.
- [60]: H. Zhang, H.Y. Jing, Y.D. Han, L.Y. Xu, G-Q. Lu: Interfacial reaction between n- and p-type thermoelectric materials and SAC305 solders, Journal of Alloys and Compounds, Volume 576, 5 November 2013, Pages 424-431, ISSN 0925-8388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.129>.

- [61]: Yue-ting Chen, Ya-ting Chan, Chih-chi Chen: Wettability and interfacial reactions between the molten Sn-3.0%wt%Ag-0.5%wt%Cu solder (SAC305) and Ni-Co alloys, Journal of Alloys and Compounds, Volume 507, Issue 2, 8 October 2010, Pages 419-424, ISSN 0925-8388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.08.006>.
- [62]: http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAGM5/letoltes/Pasztazo_elektronmikroszkop.pdf, 2014.08.02
- [63]: http://hu.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1szt%C3%A1z%C3%B3_elektronmikroszk%C3%B3p. 2014.08.02
- [64]: <http://szft.elte.hu/oktat/www/Mscfizikalabor/meresleirasok/SEM3.pdf>
- [65]: Lei Zhang; Guangwei Sun; Li Li; Shang, J.K.: "Effect of Copper Oxide Layer on Solder Wetting Temperature under a Reduced Atmosphere," Electronic Packaging Technology, 2007. ICEPT 2007. 8th International Conference on, vol., no., pp.1,4, 14-17 Aug. 2007 doi: 10.1109/ICEPT.2007.4441423
- [66]: M. Momcilovic, M. Trtica, J. Ciganovic, J. Savovic, J. Stasic, M. Kuzmanovic: Analysis of copper surface features obtained using TEA CO₂ laser at reduced air pressure, Applied Surface Science, Volume 270, 1 April 2013, Pages 486-494, ISSN 0169-4332, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.067>.
- [67]: Kiss Gyula, Pálfi János, Tóth Lajos: Szerkezeti anyagok technológiája 2., Műegyetemi Kiadó, 2005
- [68]: A.S.M.A. Haseeb, Y.M. Leong, M.M. Arafat: In-situ alloying of Sn-3.5Ag solder during reflow through Zn nanoparticle addition and its effects on interfacial intermetallic layers, Intermetallics, Volume 54, November 2014, Pages 86-94, ISSN 0966-9795, <http://dx.doi.org/10.1016/j.intermet.2014.05.011>.
- [69]: S. Chavali, Y. Singh, G. Subbarayan, A. Bansal, M. Ahmad: Effect of pad surface finish and reflow cooling rate on the microstructure and the mechanical behavior of SnAgCu solder alloys, Microelectronics Reliability, Volume 53, Issue 6, June 2013, Pages 892-898, ISSN 0026-2714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2013.02.006>.
- [70]: Gang Chen, Lin Yu, Yun-Hui Mei, Xin Li, Xu Chen, Guo-Quan Lu: Reliability comparison between SAC305 joint and sintered nanosilver joint at high temperatures for power electronic packaging, Journal of Materials Processing Technology, Volume 214, Issue 9, September 2014, Pages 1900-1908, ISSN 0924-0136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.007>.
- [71]: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/alloy_sac305_rev_5.pdf, 2014.08.05

- [72]: http://www.ewh.ieee.org/r5/denver/rockymountainemc/archive/2007/May_2007/Lead-free_Solder.pdf, 2014.08.05
- [73]: http://www.airliquide.hu/file/otherelement/pj/pdf_az_olommentes_forraszanyagra_atallas_buktatoi226093.pdf, 2014.08.05
- [74]: Iroshi Nishikawa, Noriya Iwata: Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn-Ag Cu solder on a Cu Pad, Journal of Materials Processing Technology, Volume 215, January 2015, Pages 6-11, ISSN 0924-0136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.007>.
- [75]: C. Key Chung, Y.J. Chen, C.C. Li, C.R. Kao: The critical oxide thickness for Pb-free reflow soldering on Cu substrate, Thin Solid Films, Volume 520, Issue 16, 1 June 2012, Pages 5346-5352, ISSN 0040-6090, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2012.03.034>
- [76]: W.A. Lanford, P.J. Ding, Wei Wang, S. Hymes, S.P. Murarka: Alloying of copper for use in microelectronic metallization, Materials Chemistry and Physics, Volume 41, Issue 3, August 1995, Pages 192-198, ISSN 0254-0584, [http://dx.doi.org/10.1016/0254-0584\(95\)01513-2](http://dx.doi.org/10.1016/0254-0584(95)01513-2).
- [77]: M. Domínguez, E. Márquez, P. Villares, R. Jiménez-Garay: Influence of the copper content on the electrical conductivity of amorphous semiconductors from the system CuAsSe, Materials Chemistry and Physics, Volume 43, Issue 3, March 1996, Pages 287-291, ISSN 0254-0584, [http://dx.doi.org/10.1016/0254-0584\(95\)01628-8](http://dx.doi.org/10.1016/0254-0584(95)01628-8).
- [78]: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/275000-299999/297844-da-01-de-Kupferblech_1_0_mm.pdf, 2014.08.14
- [79]: rofin: ROFIN DY 027 Nd:YAG-Laser Operating manual.
- [80]: Salacz Illés: Az összetétel és a hőmérséklet hatása rézalapú forraszanyagok nedvesedési tulajdonságaira Szakdolgozat, 2012