



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Gépjárműtechnológia tanszék

Nedvesítési tulajdonságok vizsgálata acél alapanyagon

Készítette: MIHÁLY LEVENTE

Konzulens: HLINKA JÓZSEF

**Tudományos Diákköri Konferencia
Budapest, 2017**

Tartalmi kivonat

A mai ipari környezetben kiemelten fontos, hogy a különböző alkatrészek kötése az adott célnak megfelelő tulajdonságokkal rendelkezzenek. A kötések anyagpárosításainak sokfélesége és a különböző kötéstechnológiák alkalmazhatósága miatt, forrasztáskor, a lehetőségek széles tárháza áll rendelkezésünkre. A lágyforrasztással létrehozott kötések mind a járműipar, mind az elektronikai ipar területén fénykorukat élik, így a kötések kialakíthatóságának és folyamatok paramétereinek változtatása kutatási területté vált. A forrasztási technológia mai fejlettségi szintjét új, az alapfémekhez és a kötések igénybevételéhez igazodó forrasztóanyagok, nagyfokú automatizálás és célszerű technológia jellemzi. A forrasztás a fémek megömlés nélküli egyesítése, megömlésztet forrasztóanyaggal, amelynek olvadási hőmérséklete kisebb, mint a forrasztandó fémeké. A forrasztásnál olvadt forrasztófém nedvesíti az összekötendő alkatrészek felületeit és alakítja ki a kötést. A forrasztások minőségét egyik legjobban befolyásoló fizikai tulajdonság a forrasztóanyagok nedvesedése.

A nedvesedőképességet 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 adhéziója szabja meg. A határfelületi viszonyok megváltozásának nagymértékű hatása van a forrasztott kötések 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. Az elmúlt évtizedek alatt a korszerű felülettudomány és felülettechnológia, komplex szemléletmódú, interdiszciplináris szakterületté vált. Felületkezelés segítségével az alkatrészek összekötendő felületeinek tulajdonságai változtathatóak. Ez a változás hatással lehet a nedvesedési tulajdonságokra, így egy adott forrasztott kötés minőségére is.

Korábbi vizsgálatok kimutatták, hogy réz felületén alkalmazott lézersugaras felületkezelésnek hatása van a réz felületén alkalmazott ólommentes forrasztóanyag nedvesedési tulajdonságaira. Dolgozatomban azt a kérdést vizsgálom, hogy a lézersugaras felületkezelés más alapanyag esetében is hatással van-e a rajta alkalmazott forrasztóanyag nedvesedési tulajdonságaira, például az iparban sokoldalúan használt acél esetében.

A TDK dolgozatomban DC01 anyagminőségű acéllemezre CO₂ lézerrel, különböző teljesítményszinteken, majd a mintákon ólommentes forrasztóanyaggal nedvesedési vizsgálatokat végeztem. A kísérletsorozat eredményeit összehasonlítottam a korábbi, más anyagokon végrehajtott kísérletek eredményeivel. A kapott eredmények alapján a különböző lézerekkel végzett felületkezelés eltérő hatást mutat a nedvesedési peremszög alakulására acél és réz szubsztrátokon. A korábbi vizsgálatoknál a réz mintadarabokon nagymértékű változás történik a teljesítmény szintek változtatásával, kezdetben növekszik, majd egy határt elérve csökkenni kezd a peremszög értéke. Ezzel szemben, az általam elvégzett vizsgálatok során növekvő teljesítményszintek esetén a peremszög értékek is növekedést mutatnak.

Abstract

In today's industrial environment, it is of the utmost importance for the joints of the various components to possess properties corresponding to the given purpose. Due to the variety of the material pairing of the joints and the applicability of the various binding technologies, there is a wide range of possibilities for soldering. Nowadays, joints made by soft soldering are very popular in the automotive and the electronics industry as well. Consequently changing the components or the process parameters, became a research field.

Today's level of soldering technology is characterized by new solders adjusted to the basic metals and the stresses of the joints, high level of automation and subservient technology.

Soldering is a process in which metal items are joined together without melting the work pieces, but melting a filler metal (solder) into the joint, the filler metal having a lower melting point than the adjoining metal. During the soldering, the melted solder wets the surfaces of the components to be joined and creates a joint. One of the most influential physical properties of the soldering quality is the wetting of the solder materials.

The wettability is best characterized by spreading the liquid on a solid surface, that indices is the contact angle, the angle at which the liquid-vapor interface meets the solid-liquid interface. The extent of spread is determined by the surface adhesion of the molecules of the liquid. According to the literature, it can be stated that there is an important relationship between the quality of the soldering and the extent of the measurable contact angle, which is the wettability of the solder. The lower the angle of the contact angle, the better the wetting contact, which contributes to the optimization of our soldered joints. Over the last few decades, modern surface science and surface technology – which have a complex approach – have become an interdisciplinary field of expertise. Surface treatment can be used to change the properties of the joining surfaces of the components. This change may affect the wetting properties, including the quality of a soldered joint.

Previous experiments have shown that the laser beam surface treatment on the copper surface has an impact on the wettability of the lead-free solder on the copper surface. In my dissertation, I examine whether laser beam surface treatment also has an effect on the wetting properties of the solder used on other materials, for example in case of steel that is widely used in industry.

In my paper, I treated DC01 material grade steel plate with CO₂ laser, with power levels, and then I subjected the samples to lead-free soldering paste wetting studies. I compared the results of the experiment series with the results of previous experiments on other materials. Based on the results obtained, surface treatment with different lasers, cause a different effect on the contact angle on steel and copper substrates. In previous studies, copper specimens changed very much due to changes in power levels, the contact angle initially increases and after a limit, decreases. Contrary to this, in my study, in case of increasing power levels, the contact angle also show an increase.

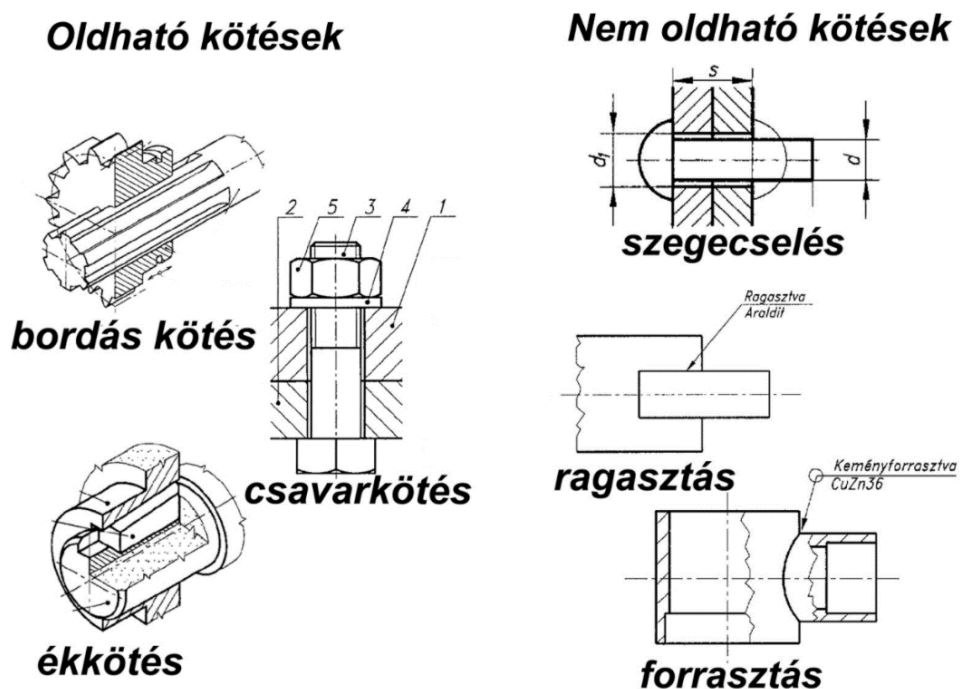
Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS	1
2.	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	3
2.1.	A FORRASZTÁS	3
2.1.1.	<i>A keményforrasztás</i>	4
2.1.2.	<i>A lágyforrasztás</i>	4
2.1.3.	<i>A forrasztóanyagokkal szemben támasztott elvárások</i>	5
2.1.4.	<i>A forrasztás elmélete</i>	5
2.1.5.	<i>A folyasztószerek (Fluxok)</i>	6
2.1.6.	<i>Forrasztási technológiák</i>	7
2.1.7.	<i>A forrasztási folyamat lépései</i>	10
2.2.	NEDVESÍTÉS	12
2.2.1.	<i>A felületi feszültség</i>	12
2.2.2.	<i>A határfelületi energia (γ)</i>	13
2.2.3.	<i>A nedvesítés elmélete</i>	14
2.2.4.	<i>A nedvesítési peremszög tartományai</i>	16
2.2.5.	<i>A felületi érdesség és a nedvesítési peremszög kapcsolata</i>	18
2.2.6.	<i>A forrasztás és a nedvesítés kapcsolata</i>	20
2.3.	A LÉZEREK	21
2.3.1.	<i>A lézerek működésének elméleti háttere</i>	21
2.3.2.	<i>Lézer technológia a megmunkálásban</i>	23
2.3.3.	<i>Lézeres felületkezelés</i>	26
2.3.4.	<i>Lézerek sugárforrásai</i>	28
2.3.5.	<i>Lézeres felületkezelés és a nedvesítési peremszög kapcsolata</i>	29
2.4.	AZ IRODALOMKUTATÁS ÖSSZEFOGLALÁSA, A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSE	32
3.	A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE	33
3.1.	A SZUBSZTRÁT ÉS A FORRASZANYAG KIVÁLASZTÁSA	33
3.1.	A SZUBSZTRÁTKÉNT ALKALMAZOTT ACÉL	33
3.2.	A FELHASZNÁLT FORRASZPASZTA ISMERTETÉSE	34
3.3.	A SZUBSZTRÁTOK ELŐKÉSZÍTÉSÉNEK ISMERTETÉSE	35
3.4.	A KEZELÉS SORÁN ALKALMAZOTT LÉZER ÉS FOLYAMAT ISMERTETÉSE	36
3.5.	FELÜLETI ÉRDESSÉGMÉRÉS	38
3.6.	A PEREMSZÖGMÉRŐ BERENDEZÉS FŐBB RÉSZEI	39
3.7.	A NEDVESÍTÉSI PEREMSZÖGMÉRÉSI VIZSGÁLAT	41
3.7.1.	<i>Előkészítés</i>	41
3.7.2.	<i>Forrasztás felvitele</i>	41
3.7.1.	<i>Nedvesítési vizsgálat elvégzése</i>	43
3.7.1.	<i>Vizsgálati eredmények kiértékelése</i>	43
3.8.	A MÉRÉS FŐ HIBÁI [29]	45
4.	ÖSSZEFOGLALÁS	47
5.	ÁBRAJEGYZÉK	48
6.	IRODALOMJEGYZÉK	51

BEVEZETÉS [1]

A gépészeti szerkezetek megfelelő és megbízható működését döntően befolyásolják az adott szerkezet egyes elemeinek kötése. Kötések alatt a külön legyártott alkatrészek tartós, működés közben is megvalósuló kapcsolatát értjük. Elsősorban a szerkezetek funkciói alapján választjuk ki, hogy pontosan milyen kötésre van szükségünk. Továbbá fontos szem előtt tartani, hogy milyen követelményeket kell teljesítenie az adott kötésnek, ilyenek például: a tömítő képesség, a szilárdság, a nyúlás, a mozgathatóság, a lazulás elleni biztonság, a szerelhetőség, valamint a gazdaságosság, a kivitelezhetőség, a kinézet stb.

A kötések oldható és nem oldható kategóriákba sorolhatjuk. Ha egy kötés valamilyen szerszámmal vagy segédeszközzel roncsolásmentesen megszüntethető, akkor az adott kötés típust az oldható kötések közé soroljuk, ha viszont a kötést csak roncsolással szüntethetjük meg, a nem oldható kötések közé tartozik. Tehát az oldható és nem oldható kötés elnevezés valójában csak arra utal, hogy a kötés roncsolásmentesen oldható-e, mert roncsolással, a megfelelő eszközök használata mellett, minden kötés megszüntethető. Oldható kötés technológiák közé tartoznak például a bordás kötések, a csavarkötések és a reteszkötések. A nem oldhatóak közé pedig a szegecseles, a hegesztés, a forrasztás és a ragasztás. A szilárd illesztésű kötések pedig mindkét csoportba besorolhatóak, ugyanis az alkatrészek túlfedésének mértékétől és az összeszerelés technológiájától függ, hogy roncsolás-mentesen meg tudjuk-e szüntetni ezt a kötés típust.



1. ábra: Keményforrasztás (balra) és lágyforrasztás (jobbra) berendezései; *Forrás: [A1]*

Egy másik csoportosítás szerint léteznek anyaggal záró, alakkal záró és erővel záró kötések. Az anyaggal záró (anyagzáró) kötések minden esetben roncsolásmentesen oldhatatlanok is, és akkor beszélhetünk erről a kötés típusról, amikor anyag hozzáadásával vagy anélkül, az alkatrészeket egymáshoz rögzítve egy egységgé építjük össze. Az anyagzáró kötés technológiák csoportjába tartozik például a hegesztés, a forrasztás és a ragasztás. A második csoport, az alakkal záró (alakzáró) kötések. Ezek legfontosabb jellemzője, hogy az alkatrészek közti terhelésátadást és kötést az elemek alakja teszi lehetővé. Az alakzáró kötések általában oldhatóak is, például a csapszeg kötések, a reteszkötések vagy a bordás tengelykötések, esetleg ritkán lehetnek nem oldható kötések, mint például a szegecskötés. A harmadik csoportról, az erővel záró (erőzáró) kötésről, pedig akkor beszélünk, amikor a kötés megvalósításához erőkifejtésre van szükség és ennek hatására súrlódásos kapcsolat jön létre az alkatrészek között. Ezen kötések leggyakrabban oldhatóak, mint például a csavarkötések, a túlfedéses kötések, kúpos, illetve kúpos-gyűrűs kötések, de előfordulnak oldhatatlanok is, mint például a szegecskötés.

Dolgozatom során a forrasztást - amely az előbb bemutatott két csoportosítás alapján egy anyagzáró, oldhatatlan kötés -, annak technológiáját és főbb jellemzőit fogom részletesen bemutatni. Valamint azt a kérdést vizsgálom, hogy acél alapanyagon különböző teljesítményszinteken végzett lézersugaras felületkezelés hatással van-e az alapanyagon létrehozott forrasztás tulajdonságaira. Ezt a témát azért választottam, mert úgy gondolom, hogy a forrasztás egy sokoldalú kötéstechnológia, amelyben még rengeteg lehetőség rejlik, mivel alacsony hőmérsékleten, így a forrasztandó anyagok deformációja nélkül képes, különböző anyagok között anyagzáró kötések létrehozására.

1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

1.1. A forrasztás [2][3]

Forrasztás során kettő vagy több, fémes vagy nemfémes, de ebben az esetben fémmel bevont alkatrész között hozunk létre közvetett anyagzáro kapcsolatot, a forrasztandó alapanyagok megolvasztása nélkül (szolidusz hőmérsékletnél kisebb hőmérsékletre hevítve). Ennek hatására a készre munkált alkatrészeket lényegesebb alakváltozás nélkül köthetjük össze. A kötés létrehozásához egy összekötő anyagra, úgynevezett forrasztanyagra van szükség, melynek a forrasztandó fémekénél mindenképpen alacsonyabb olvadásponttal kell rendelkeznie, így létrejöhét az az állapot, amikor a forrasztanyag olvadék állapotban van jelen, de a forrasztandó fémek még szilárdak. Forrasztásnál fontos, hogy gondoskodjunk a forrasztási hely megfelelő oxidmentesítéséről, ehhez védőgázokat vagy úgynevezett folyasztószereket szokás alkalmazni, azonban ezek működéséhez is megfelelő hőmérsékletre van szükség. Tehát a forrasztáshoz optimális hőmérséklet tartomány az, amelyben az alapanyag szilárd halmazállapotú marad, a forrasztanyag olvadék állapotba kerül és a védőgáz vagy a folyasztószer eltávolítja a megfelelő oxidréteget és lehetővé teszi a forrasztanyag szétterülését, a kötés létrejöttét. A forrasztás előnye a hegesztéssel szemben, hogy amíg utóbbival túlnyomórészt azonos alkatrészeket köthetünk össze, forrasztással elég gyakran különböző anyagokból készült alkatrészeket egyesítünk, valamint, ahogy azt már említettem, az alkatrészek nem szenvednek lényegesebb alakváltozást a kötés létrehozása során.

A forrasztásokat két kategóriába sorolhatjuk. Létezik keményforrasztás és lágyforrasztás. Azt, hogy a forrasztás lágynak vagy keménynek számít, a forrasztanyag olvadáspontja határozza meg. Amennyiben a forrasztanyag olvadáspontja 450°C alatt van, lágyforrasztásról, felette keményforrasztásról beszélünk.



2. ábra: Keményforrasztás (balra) és lágyforrasztás (jobbra) berendezései; *Forrás: [A2][A3]*

1.1.1. A keményforrasztás [4][5]

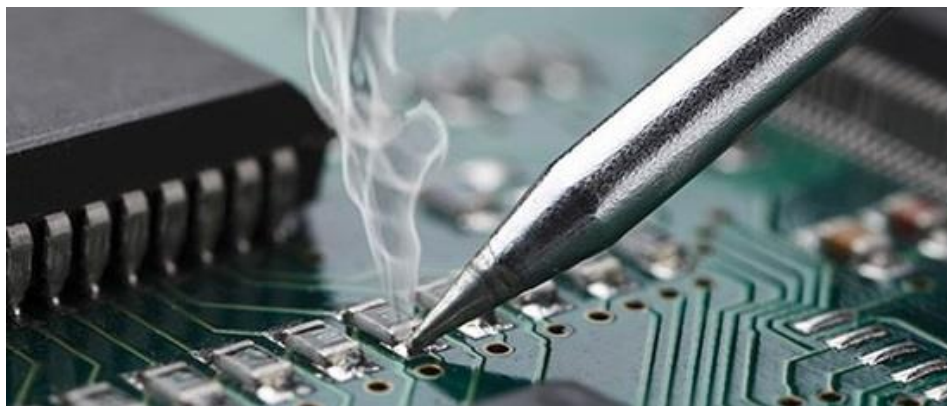
Keményforrasztásnál a hegesztett kötést megközelítő nagy szilárdságú kapcsolatot hozunk létre, viszont ehhez magas olvadáspontú forrasztóanyagot kell alkalmazni. Ilyen forrasztóanyag az ezüst (olvadáspontja $960\text{ }^{\circ}\text{C}$), az arany ($1063\text{ }^{\circ}\text{C}$) és a réz ($1083\text{ }^{\circ}\text{C}$), valamint ötvözeteik. Ahhoz, hogy a forrasztóanyag elérje ezeket a magas hőmérsékleteket, viszonylag nagy hő bevitelre van szükség és ennek következtében az egyesítendő alkatrészek jobban deformálódnak, mintha lágyforrasztást alkalmaztunk volna.



3. ábra: Keményforrasztás (lángforrasztás); *Forrás: [A4]*

1.1.2. A lágyforrasztás [4][5]

Lágyforrasztással kevésbé nagy szilárdságú kötések lehet létre hozni, amelyhez alacsonyabb olvadáspontú forrasztóanyagra lesz szükségünk. A lágyforrasztók közé tartozik az ón (olvadáspontja $231,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), a bizmut ($271,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), a kadmium ($320,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), az ólom ($327,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) és a cink ($419,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), valamint ezek ötvözetei. A lágy forrasztóanyagok megolvasztásához és a forrasztott kötés létrehozásához kisebb hő bevitelre van szükség, így lehetővé válik, hogy hőforrásként, kis teljesítményű, elektromos fűtésű forrasztópákákat használjunk, valamint kisebb lesz a forrasztandó elemek deformációja is.



4. ábra: Lágyforrasztás (forrasztás pákával); *Forrás: [A5]*

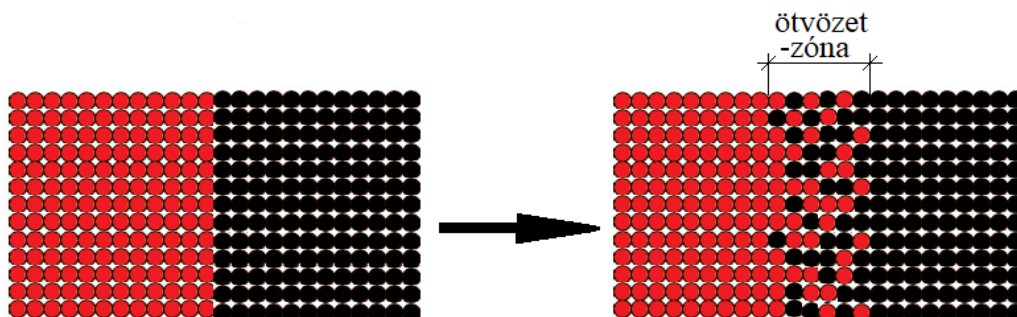
1.1.3. A forraszanyagokkal szemben támasztott elvárások [6]

Amint azt már korábban említettem, a forraszanyagokkal szemben támasztott legfontosabb követelmény, hogy az egyesítendő elemek olvadáspontjánál kisebb hőmérsékleten olvadjanak. Fontos még, hogy a forraszanyag a forrasztás hőmérsékletén alacsony viszkozitással rendelkezzen, és szilárd oldatot képezzen az alapfémekkel. Ezenkívül olyan fémnek kell lennie, amely nem hajlamos oxidációra, továbbá nem keletkezik a felszínén stabil oxidréteg, amely ugyan javítja a korrózióállóságot, de csak 2050°C-on olvad, így a fém felszínéről forrasztás előtt feltétlenül el kell távolítani (pl.: alumínium, magnézium). A forrasztás egy másik fontos követelménye, hogy a forraszanyag jól nedvesítse a forrasztandó alapfémeket. Ez azt jelenti, hogy a forraszanyag a forrasztási hőmérsékleten szétterül az alapfém felületén. Továbbá a forraszanyag nem tartalmazhat olyan szennyeződést, amely az elemek kötését akadályozná.

Napjaikban megjelent egy új lényeges elvárás a forraszanyagokkal szemben, mégpedig az, hogy a forraszanyag nem tartalmazhat a környezetre vagy az emberi szervezetre káros alkotóelemeket (pl.: kadmium). A fejlődés másik jellemző eleme, hogy manapság a forraszanyagokat egyre változatosabb kiszerezési módokban lehet kapni, például huzal, szalag vagy paszta formájában. Az előbb említett két fejlődési irányt segíti a gyorshűtés technológiája, melynek segítségével olyan ötvözetekből is állíthatunk elő például nagyon vékony huzalt, amelyekből hagyományos módon nem lehetséges.

1.1.4. A forrasztás elmélete [7][8][9]

A legtöbb fém esetében az alapanyag és a forraszanyag, a köztük lévő határretegen keresztül lép kapcsolatba egymással, mégpedig úgy, hogy a két anyag között úgynevezett diffúzió jön létre. A diffúzió egy anyagáramlási folyamat, mely során az anyagi részecskék a nagy kémiai potenciálú helyről a kis kémiai potenciálú helyre áramlanak, ezzel növelve a rendszer rendezetlenségét, entrópiáját. A kölcsönös diffúzió következtében egy ötvözetzóna jön létre, melynek vastagsága anyagpárosítástól, időtől és hőmérséklettől függ. Tehát, a kötés az alapanyagok és a forraszanyag részecskéinek kicserélődésével jön létre, a molekuláris felületi kötőerők kisebb szerepet játszanak.



5. ábra: Diffúzió és ötvözet zóna

Az ötvözetfázis szövetszerkezetét az ötvözetképződés, a hűlési viszonyok és az esetleges utólagos hőhatások okozta diffúziós folyamatok együttesen határozzák meg. A forrasztott kötés általánosságban öt szerkezeti részre bontható:

- Újrakristályosodott, de változatlan vegyi összetételű **alapanyag**
- Az alapanyag és a forrasztóanyag határfelületén képződött **diffúziós zóna**
- Változatlan vegyi összetételű **forrasztóanyag**



6. ábra: A forrasztási zónák; *Forrás: [A6]*

Forrasztás során az úgynevezett forrasztási rés szélességét a felhasznált forrasztóanyag függvényében optimalizálni kell, ugyanis a forrasztóanyag a munkadarabok között kialakított résbe a kapillaris hatás segítségével jut be. Viszont ez a hatás csak akkor érvényesül, ha a forrasztandó alkatrészek és a forrasztóanyag között megfelelő a nedvesítés. Mivel a kötés szilárdsága függ attól, hogy a forrasztóanyag mekkora felületen érintkezik az alapanyagokkal, fontos, hogy megfelelő legyen a kapillaris hatás és így a nedvesítés is. A kapillaris hatás fordítottan arányos a rés szélességével, tehát minél kisebb a rés szélessége a kapillaris hatás annál jelentősebb. Ennek ellenére nem célszerű túl keskeny forrasztási rést tervezni. Előfordulhat ugyanis, hogy a túl keskeny résben a forrasztóanyag szilárdan rátapad néhol a felületre, így nem tölti ki a rést teljes mélységében, ezzel pont a célnak ellentétes hatást váltva ki. A kapillaris hatás a forrasztási rés szélességén túl, függ a rés alakjától, a hőmérséklettől, a nedvesítés időtartamától és a felületek tisztaságától is. Általánosságban megállapítható, hogy a rés szélességének körülbelül 0,05 és 0,5 mm között kell lennie és a gépi forrasztáshoz kisebb résre van szükség (0,05-0,2 mm), mint a kézi forrasztáshoz (0,2-0,5 mm).

1.1.5. A folyasztószerek (Fluxok) [7][4]

Forrasztásnál egy bizonyos hőmérséklet felett gondoskodnunk kell a forrasztás helyének oxidációtól való védelméről, ehhez védőatmoszférát és/vagy folyasztószereket (idegen szóval fluxokat) szokás alkalmazni. A kettő közül a védőatmoszféra létrehozása sokkal nehezebben kivitelezhető, mint a flux használata, így az utóbbit alkalmazzák gyakrabban.

Ahhoz, hogy a folyasztószer elláthassa feladatát a forrasztás hőmérsékletén folyékony halmazállapotúnak kell lennie és a forrasztóanyag megszilárdulásáig annak is kell maradnia, tehát a forrasztóanyagnál alacsonyabb olvadásponttal kell rendelkeznie. További elvárás a folyasztószerrel szemben, hogy jól nedvesítse a forrasztandó felületeket, védje meg a forrasztás helyét az oxidálódástól és eközben ne lépjen káros reakcióba az alapfémekkel. Csökkentse a megolvadt forrasztóanyag felületi feszültségét, javítsa annak területi képességét és kis viszkozitással rendelkezzen. Ezen felül ne legyen káros a környezetre vagy az emberekre, forrasztás után legyen könnyen eltávolítható és tárolása se okozzon jelentős problémát.

A fluxok lehetnek vegyileg aktív vagy passzív anyagok. Az aktívak feloldják és eltávolítják a már meglévő oxidokat a felületről, míg a passzív anyagok a már előzetesen oxid mentesített felületet védik meg az újabb oxid réteg kialakulásától. Mivel a passzív folyasztószer hatékonyabban működnek a frissen keletkezett oxidrétegen, a forrasztás előtt érdemes aktív folyasztószerrel előzetes oxidmentesítést végezni. A flux működése során, a megtisztított munkadarab felületén megolvadva, reakcióba lép a kis oxid részecskékkel és kicsit felemeli őket a felületről, így beékelve magát az oxidok és a munkadarab közé. Ekkor a folyasztószer elektrolitként funkcionál az oxid, mint katód és az alapanyag, mint anód között, ezzel csökkentve a határfelületi feszültséget és javítva a forrasztóanyag területi képességét, valamint véd az újraoxidálástól is. A fluxok jellemzően valamilyen alacsony olvadáspontú klór vagy fluor alapú vegyületből állnak. Melyek közül kisebb hatékonyságuk ellenére a fluor alapú folyasztószereket alkalmazzák elterjedtebben, kedvezőbb korrózióállóságuk miatt. A folyasztószer felvitele történhet alkohol vagy víz hozzáadásával, esetleg szárazon vagy a forrasztóanyaghoz keverve.

1.1.6. Forrasztási technológiák [2][7]

- **Lángforrasztás**

Ezt a forrasztási technikát nagyméretű munkadarabok, csőrendszerek kötéseinek létrehozásához alkalmazzák kis sorozatokban. A lángforrasztás hőforrásaként leggyakrabban hegesztőpisztolyhoz hasonló égőket, úgynevezett forrasztópisztolyokat használnak. Azonban ezekhez a forrasztópisztolyokhoz égőgáz helyett megfelel a világítógáz (redukáló gázkeverék) is, mivel a forrasztáshoz jóval kisebb hőmérsékletre van szükség, mint a hegesztéshez. Az eljárás előnye, hogy erős kötés hozható létre vele és akár gépiesíteni is lehet. Hátránya, hogy a forrasztópisztollyal történő hevítés hatására nagy hőhatás-zóna jön létre és egyes folyasztószereket közvetlen láng nem érhet.

- **Újraömllesztéses forrasztás (Reflow)[25]**

A mai ipari környezetben ez a leggyakrabban alkalmazott lágyforrasztási technológia. Legfontosabb előnye, hogy használatával egyszerre valósítható meg a felületre szerelhető alkatrészek mechanikus rögzítése, valamint az érintkező felületek közötti elektromos kapcsolat létrehozása. Ezzel szemben ragasztás során például, csak a mechanikus rögzítést, míg hullámforrasztás során csak az elektromos bekötést valósíthatjuk meg. A reflow forrasztásnál, forrasztóanyagként forrasztóanyagot alkalmaznak, melyet általában stencilnyomtatással visznek fel a panelekre. A stencilnyomtatás során, egy sok helyen kilyukasztott „maszkon” keresztül juttatjuk a megfelelő mennyiségű pasztát a felületre, ezután pedig automatizált gépek helyezik rá az alkatrészeket a számukra kialakított helyre. Végül kemencében megtörténik a forrasztóanyag újraömllesztése. Az eljárást elsősorban nyomtatott áramkörök gyártásánál alkalmazzák.

- **Forrasztás pákával**

A lágyforrasztáshoz hőforrásként legelterjedtebben használt eszköz, a forrasztópáka feje mindig rézből készül, ugyanis a réz nagy hőkapacitással rendelkezik és nagyon jó a hővezető képessége, így a fejet felmelegítve a tárolt hőmennyiséggel megolvasztható a forrasztóanyag. A forrasztópákákat kompakt, kisméretű kályhával, fűtő berendezéssel szokás felmelegíteni a kívánt hőmérsékletre. Azonban az így felmelegített páka munka közben egy bizonyos idő után lehűl és a forrasztáshoz újra fel kell melegíteni azt, ezzel jelentős idővesztést okozva a kötés létrehozása során. Annak érdekében, hogy folyamatosan lehessen forrasztani, úgynevezett villamos forrasztópákát szokás alkalmazni. Mivel ennél a pákatípusnál, a fejben ellenállásfűtés került elhelyezésre, mely folyamatosan melegíti azt és biztosítja a forrasztáshoz szükséges megfelelő hőmérsékletet. Ezzel az eljárással kis szilárdságú mechanikus kötéseknel, valamint a nyomtatott áramkörök elektromos kötéseinél találkozhatunk.

- **Indukciós forrasztás**

Elektromágneses térben, indukciós tekercsek segítségével hevülnek fel a munkadarabok és a forrasztóanyag, de a munkadarabokat viszonylag pontosan, csak a felülethez közeli rétegekben hevítik fel az örvényáramok, tehát nem hevül fel a teljes munkadarab. A forrasztás történhet védőgáz, levegő vagy vákuum atmoszférában is. Előnye, hogy hőre érzékeny anyagok is forraszthatók vele és könnyen automatizálható. Hátránya, hogy bonyolult munkadarabok esetében, az indukciós tekercsek optimális kialakítása nehézkes.

- **Kemenceforrasztás**

Kiseb tárgyak tömeges forrasztásához, vagy amennyiben egy nagyobb munkadarabon nagyszámú forrasztási hely van, a kemencében való forrasztást célszerű alkalmazni. Kemencében való forrasztás során a forrasztandó darabokat forrasztóanyaggal vonják be (például folyékony forrasztóanyagba mártással). Majd a felületeket összeillesztik és összeszorítják. Ezután az előkészített munkadarabokat szállítószalagra teszik és áthúzzák egy kemencén. A kemence első felében a megfelelő hőmérséklet hatására, a forrasztóanyag olvadék állapotba kerül, majd a második felében a forrasztóanyaggal összekötött munkadarabok lehűlnek, és a szállítószalag végéről kész darabok vehetők le. Előnye a nagy termelékenység, a gyorsaság és az egyenletes minőség. Hátránya, hogy nagy az energiaigénye és magas a beruházási költsége.

- **Mártóforrasztás**

A munkadarabokat és a forrasztóanyagot egy 20-30 perces, 500°C-os légfűvós kemencében történő előmelegítés után, 20 másodpercre folyékony, előhevített folyasztószerbe kell mártani, ahol a munkadarab és a forrasztóanyag felhevül a forrasztás hőmérsékletére, aminek hatására létrejön a diffúziós kapcsolat. Ezután a sófürdőből óvatosan ki kell emelni a munkadarabokat, hogy azok lehűljenek és megszilárduljon a forrasztott kötés. Előnye, hogy viszonylag termelékeny, egyszerre több forrasztott kötetet tud létrehozni és kicsi a művelet során kialakuló vetemedés mértéke. Hátránya, hogy a munkadarab teljes tömegében felhevül és a folyasztószer eltávolítása költséges, utóhőkezelést igényel, valamint nem környezetbarát.

- **Ellenállás forrasztás**

Ellenállás forrasztás során azt használjuk ki, hogy az anyagokon átfolyó áram hőenergiát fejleszt, amely fejlődő hőenergia a munkadarab elektromos ellenállásától és az áramerősségtől függ. A kötés létrehozásához a munkadarabok közé forrasztóanyagként fém fóliát vagy fémport kell helyezni, majd a munkadarabokat a köztük lévő forrasztóanyagból készült, vízzel hűtött elektródák között össze kell szorítani és feszültséget kell az elektródákra kapcsolni. Mivel a legnagyobb ellenállás a munkadarabok között lesz, a hőmérséklet is itt lesz a legmagasabb, aminek köszönhetően a forrasztóanyag megolvad. A kialakuló nyomás hatására kiszorul a forrasztóanyag a munkadarabok közül. A kitüremkedett, megszilárdult, felesleges forrasztóanyagot le kell munkálni. Ezzel a forrasztás típusal például keményfém lapkák szerszámtestre való forrasztásakor találkozhatunk.

- **Borítóforrasztás**

Ennél a forrasztási eljárásnál a forrasztóanyag bevonatként, előre felkerül az alapanyagokra külön-külön, majd a forrasztás során az alapanyagokat összeszorítva a forrasztási hőmérsékleten a forrasztóanyag bevonatok olvadnak meg és a munkadarabok így létesítenek egymással kötést. A forrasztóanyagot meleghengertel vagy hegesztéssel vihetjük fel a munkadarabok felületére, a hevítést pedig kemencében vagy folyasztószeres sófürdőben végezzük. A sófürdőben ugyan a munkadarabok egyenletesebben melegednek fel, de mégis a kemencés hevítés terjedt el jobban, mert kevesebb folyasztószer igényel, így költséghatékonyabb. Ezt az eljárást főként hőcserélők forrasztásánál alkalmazzák.

1.1.7. A forrasztási folyamat lépései [2]

- **1. Előkészítés**

Előkészítés során összeszorításra, rögzítésre kerülnek a forrasztandó elemek úgy, hogy azok a forrasztás szempontjából a legmegfelelőbb helyzetben legyenek. Ezen felül az előkészítéshez tartozik a folyasztószer felhordása és a forrasztóanyag elhelyezése a kötési hézagban.

- **2. Tisztítás**

A forrasztáskor a forrasztandó fém felületének tisztának kell lennie, mivel a forrasztóanyag a tiszta felületeket jobban nedvesíti. Ennek érdekében a felületeket a forrasztás előtt tisztítani és zsírtalanítani kell. A vastag oxid-, reve- és salakrétegek eltávolításához mechanikus felület-előkészítésre van szükség, ami köszörüléssel, reszeléssel vagy hántolással végezhető el, de használható kémiai tisztítás is, pl. savas pácolás. Frissen megmunkált munkadarabokat nem szükséges jelentősebb tisztításnak alávetni, azonban ügyelni kell arra, hogy a forrasztási felületeken ne legyen zsír vagy olaj, mert ezek megkötik a port és az egyéb szennyeződések, melyek a forrasztóanyag folyását akadályozzák, de hasonló a hatásuk a szilárd kérgesedéseknek is. Zsírtalanító anyag például a benzin, a szén-tetraklorid és a nátronlúg.

- **3. Felmelegítés**

Ahhoz, hogy a forrasztás kifogástalan legyen, fontos, hogy a munkadarabokat egyenletesen hevítsük fel a forrasztási hőmérsékletre. A hőátadás szerint megkülönböztetünk direkt és indirekt melegítést. Direkt melegítéskor a munkadarabokat és a forrasztóanyagot egyidejűleg melegítjük fel. Ezzel az a probléma, hogy a nagyobb munkadarabok forrasztása esetén a forrasztóanyag kisebb tömege miatt jóval előbb éri el a forrasztási hőmérsékletet, mint a munkadarabok, így hamarabb kerül ömledék állapotba és mire a munkadarabok is elérnék a forrasztási hőmérsékletet, a folyékony forrasztóanyag cseppekben eltávolodik a forrasztási hézagtól, így nem nedvesít és ezért

előfordulhat, hogy nem áll rendelkezésünkre elég forrasztóanyag a forrasztási hézag kitöltésére. Ezzel szemben indirekt melegítéskor először a munkadarabokat melegítjük fel és csak hővezetés útján a forrasztóanyagot. A forrasztóanyag megolvadása után szétterül és kitölti a forrasztási hézagot. Így megállapítható, hogy az indirekt felmelegítés előnyösebb a direkt felmelegítésnél, főként nagyobb munkadarabok esetében.

- **4. Tisztítás folyasztószerrel**

A tisztítás után visszamaradt és a felmelegítéskor újraképződött oxidréteget folyasztószer segítségével távolíthatjuk el. Továbbá a flux védi az alapanyagokat és a forrasztóanyagot az oxidációtól és elősegíti a nedvesítést és a forrasztóanyag szétterülését. Azonban a folyasztószer nem alkalmas a szennyeződés vagy reverétegek eltávolítására.

- **5. A kötés készítése**

A forrasztási hőmérséklet elérése után következhet a forrasztóanyag adagolása, megolvasztása és a kötés megkötése, azaz a lehülés. A forrasztóanyag adagolására nincs szükség, ha azt előkészítéskor már elhelyezték a megfelelően kialakított forrasztási részben. Eltérő anyagok forrasztásakor feszültségek keletkezhetnek, amely akár töréshez is vezethet. Ennek elkerülése végett a munkadarabokat lassan kell lehűteni a szobahőmérsékletre.

- **6. A forrasztási helyek utánkezelése**

Utánkezelésként meg kell tisztítani a forrasztott kötések a folyasztószer maradványaitól, mert azok korróziós jelenségeket idézhetnek elő. Tisztítás alatt vegyi utókezeléssel történő közömbösítést vagy lemosást kell érteni.

1.2. Nedvesítés

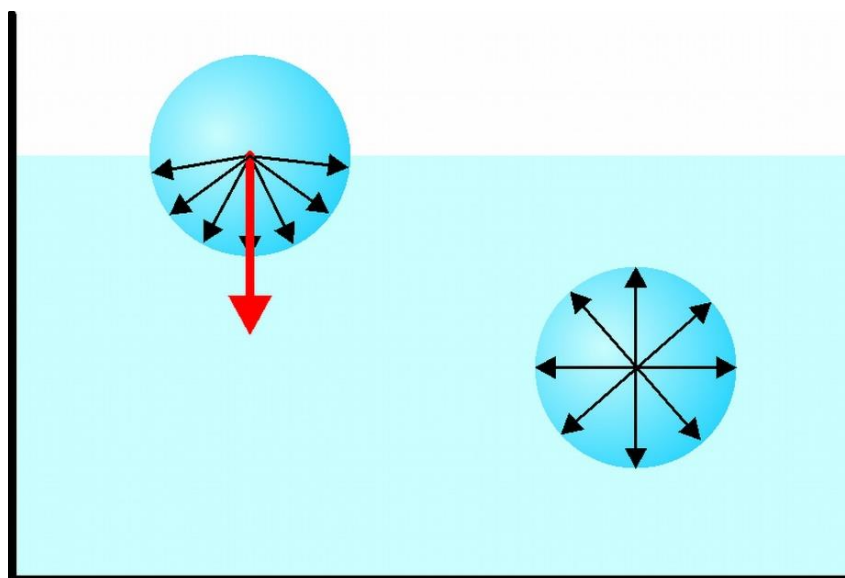
1.2.1. A felületi feszültség [10-13]

Számos a természetben vagy a mindennapi életben megtapasztalható jelenség utal a határfelületi feszültség létezésére. Ezeknél a jelenségeknél azt tapasztalhatjuk, hogy a víz sűrűségénél nagyobb sűrűséggel rendelkező bizonyos tárgyak és élőlények nem süllyednek el a folyadékban, hanem lebegnek a felszínén. Szemléltető példa erre a molnárka járása a víz tetején, a víz felszínén lebegő egy pengős vagy a szappanbuborékok gömb alakja.



7. ábra: Molnárka, egy pengős érme, szappanbuborék; *Forrás: [A7][A8][A9][11]*

A felületi feszültség a molekuláris erőkkel függ össze. A folyadék részecskéi minden irányból molekuláris vonzással hatnak egymásra, ezt az összetartó erőt kohéziós erőnek nevezzük. Az azonos molekulák között fellépő kohéziós erő nagysága egyenlő, így a folyadékok belsejében ezek kiegyenlítik egymást és az eredőjük zérus lesz. Azonban a mindennapi tapasztalataink és a nanotechnológiai kutatások alapján megállapítható, hogy a cseppfolyós halmazállapotú anyagok határfelülethez közeli, körülbelül 100nm vastagságú rétegeiben más erőhatások érvényesülnek, mint az anyag tömbi részében. Ennek oka az, hogy a folyadék belsejében levő molekulákra a szomszédos részecskék által gyakorolt erőhatás gömbszimmetrikus, a felületi (vagy a felület közeli) rétegben viszont aszimmetrikus. Ugyanis a felületen lévő molekulákra az anyag belseje felől, annak saját részecskéi által kifejtett kohéziós, míg a másik oldalról valamilyen, a felülettel érintkező gáz vagy gőz által kifejtett adhéziós erő hat. Az utóbbi általában lényegesen kisebb vonzó erőhatást fejt ki a folyadék molekuláira, mint a folyadék molekulái egymásra, így a határrétegben található részecskékre ható erők eredője nem zérus, hanem a folyadék belseje felé, a felszínre merőleges irányból mutat.



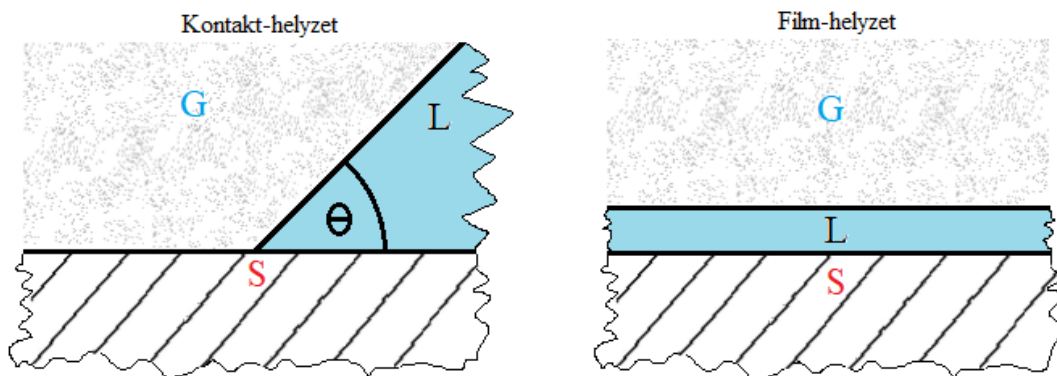
8. ábra: A kohéziós erő hatása tömbi és határfelületi molekulára; *Forrás: [A10][11]*

1.2.2. A határfelületi energia (γ) [10][13]

Ahogy arról az előző fejezet végén már szó volt, a határfelületben található részecskékre ható erők eredője nem zérus. Ebből az következik, hogy a határfelületi részecskék nagyobb helyzeti energiával rendelkeznek, mint az anyag belsejében található, kiegyensúlyozott társaik. Ez a megnövekedett energia metastabil állapothoz vezet. Emiatt a határrészecskék a folyadék belseje fele törekszenek és a folyadék vékony felszíni rétege egy rugalmas hártyához hasonlítható. A határfelületi folyadékmolekulák egységnyi felületre vonatkoztatott többletenergiáját a γ határfelületi energiával, más néven felületi feszültséggel jellemezhetjük. A felületi feszültség elnevezés azonban csak részben helytálló, ugyanis valójában nem feszültség jellegű mennyiségről, hanem energiáról van szó. A határfelületi energia két alsó indexével jelöljük, hogy melyik két fázis határfelületére vonatkozik, például a γ_{gl} esetében az l : liquid (folyadék) és a g : gas (gáz) fázisok közötti határfelületi energiáról beszélünk. Ha ezek az indexek nincsenek megadva, akkor a levegő-folyadék fázis közötti felületi feszültségről van szó, mert legtöbbször ezek érintkezése fordul elő. Mivel határfelületi energia alatt, az egységnyi felületre (m^2) ható többlet energiát (J) értjük így mértékegysége J/m^2 . Ez az energia megegyezik azzal a munkával, amit a folyadékfelület egységnyi megnöveléséhez be kell fektetni. Ezt matematikailag a $\gamma = dw/dA$ összefüggéssel írhatjuk fel, ahol dw a befektetett egységnyi munka, dA az egységnyi felület és γ a határfelületi részecskék egységnyi felületre vonatkoztatott többletenergiája.

1.2.3. A nedvesítés elmélete [10]

A részecskék egymásra ható molekuláris vonzó erejét azonos molekulák esetén kohéziós erőnek, különböző molekulák esetén adhéziós erőnek nevezzük. Ahogy azt már a korábbi fejezetekben is megállapítottam, egy szilárd felületen elhelyezkedő, véges számú részecskéből álló folyadék esetében, a folyadék határfelületi molekuláira ható, levegő által kifejtett adhéziós erő kisebb, mint a folyadék molekulái között ható kohéziós erő. Ezért a folyadék részecskéi nem terülnek szét teljesen a szilárd felületen, hanem igyekeznek a folyadék belseje felé elmozdulni és minél inkább csökkenteni a folyadék felszínének területét. A folyadékok szilárd felületeken történő szétterülésének mértéke kiválóan alkalmas a nedvesítő képesség szemléltetésére. Ennek közvetlen mérőszáma a két fázis érintkezése mentén kialakuló illeszkedési szög, azaz a peremszög (θ). Amennyiben a folyadék teljesen szétterül, és a szilárd felületen összefüggő réteget alkot, a peremszög zérus, ezt az állapotot film helyzetnek nevezzük (tökéletes nedvesítés). Ha viszont nem terül szét teljesen és a peremszög felvesz valamilyen értéket, kontakt helyzetről beszélünk.



9. ábra: Szilárd/folyadék/gáz háromfázisú rendszer két formája [A11]

Kontakt helyzet esetén az egyensúly feltételét a Young-egyenlet határozza meg:

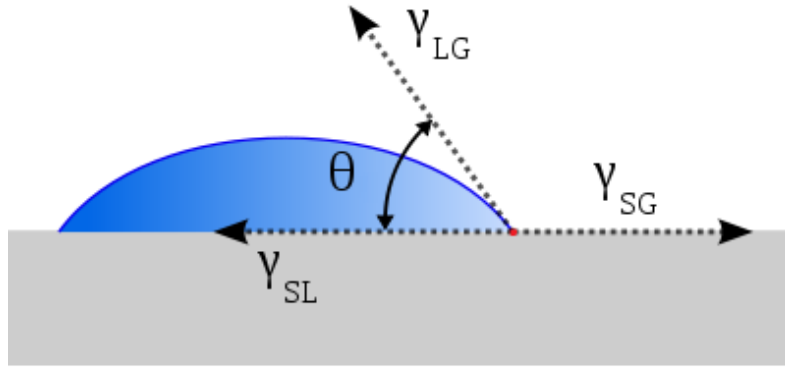
$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (1)$$

A film helyzet kialakulásának szükséges és elégséges feltétele:

$$\gamma_{sg} \geq \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \quad (2)$$

Ahol:

- θ : peremszög (nedvesítési szög)
- γ_{sg} : szilárd és gáz fázis közötti határfelületi energia
- γ_{sl} : szilárd és folyadék fázis közötti határfelületi energia
- γ_{lg} : folyadék és gáz fázis közötti határfelületi energia



10. ábra: A határfelületi energiák vektorosan egy háromfázisú rendszer esetén; *Forrás: [A12]*

Megfigyelhető, hogy a kontakt helyzet és a film helyzet közötti határhelyzetben, tehát amikor a szétterülés éppen bekövetkezik, a (2) összefüggésből adódóan igaz, hogy:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \quad (3)$$

Azonban ebből az egyenletből csak γ_{lg} mérhető valamilyen módon, γ_{sl} és γ_{sg} nem, így sajnos az összefüggés nem igazolható közvetlenül. Ennek a problémának a megoldására kellett bevezetni az úgynevezett adhéziós energia fogalmát, melynek mértékegysége megegyezik a határfelületi energia mértékegységével (J/m^2) és az alábbi képlettel számítható ki:

$$W_{slg} = \gamma_{sg} + \gamma_{lg} - \gamma_{sl} \quad (4)$$

Mivel a Young egyenletben szereplő mennyiségek közül a γ_{lg} határfelületi energián kívül csak a θ peremszöget tudjuk mérésrel meghatározni, ezért célszerű az (1) és a (4) összefüggést kombinálni és az adhéziós energiát θ peremszög és a γ_{lg} határfelületi energia függvényében meghatározni. Így kapjuk meg a Young-Dupré egyenletet, melynek segítségével, a két mért értékből meghatározható az adhéziós energia.

$$W_{slg} = \gamma_{lg}(1 + \cos\theta) \quad (5)$$

Az adhéziós energia fizikai és kémiai kölcsönhatások következtében alakul ki és annál nagyobb, minél erősebb a kötés a folyékony és a szilárd fázisok között, egységnyi felületen. Azonban, hogy milyenek ezek kémiai és fizikai kölcsönhatások, azt az egyes fázisok jellege és a rájuk jellemző kötéstípus határozza meg. Például két ionos anyag között ionos, két fém anyag között fém kötés jön létre és mivel ez a két kötéstípus elég nagy adhéziós energiával bír, a nedvesítés is kielégítő lesz. Ezzel szemben, ha két olyan anyag találkozik, amelyek különböző kötéstípust alakítanak ki, akkor csak gyenge Van der Waals kötés alakul ki köztük, amely alacsony adhéziós energiával bír, így a nedvesítés is gyenge lesz.

1.2.4. A nedvesítési peremszög tartományai [10]

- **Teljes nedvesítés ($\theta = 0^\circ$)**

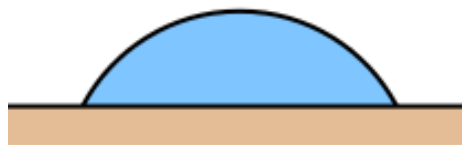
Ebben az esetben az olvadék tökéletesen nedvesíti a szilárd fázist. Ahhoz, hogy ez létrejöhessen, a (2) összefüggés teljesülésére van szükség. Tehát a szilárd és gáz fázis közötti határfelületi energiának nagyobb vagy egyenlőnek kell lennie, a szilárd és folyadék fázis valamint a folyadék és gáz fázis közötti határfelületi energiák összegével. Így a szilárd fázis felületére kényszerítve az olvadékat. Ebben az esetben az (5) összefüggés alapján az is megállapítható, hogy az adhéziós energiának (W_{slg}) legalább kétszer akkora kell lennie, mint amekkora az olvadék és gáz fázis közötti határfelületi energia (γ_{lg}). Ez a feltétel a legtöbb fémre azonban nem teljesül. Teljes nedvesítés esetén vizsgálnunk kell azt a lehetőséget is, amikor az adhéziós energia (W_{slg}) több, mint kétszerese az olvadék és gáz fázis közötti határfelületi energiának (γ_{lg}). Ugyanis ebben az esetben a peremszög már nem ad valós információt az energetikai viszonyokról, mert a peremszög minden esetben 0° lesz. Függetlenül attól, hogy az adhéziós energia (W_{slg}) mennyivel nagyobb, mint az olvadék és gáz fázis közötti határfelületi energia (γ_{lg}) duplája.



11. ábra: Szilárd/folyadék/gáz háromfázisú rendszer teljes nedvesítés esetén; *Forrás: [A13]*

- **Részleges nedvesítés ($0^\circ > \theta > 90^\circ$)**

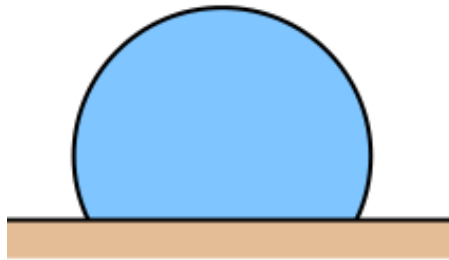
Ebben az esetben azt mondhatjuk, hogy az olvadék nedvesíti a szilárd fázist. Ehhez pedig arra van szükség, hogy az adhéziós energia (W_{slg}) nagyobb legyen, mint az olvadék és gáz fázis közötti határfelületi energia (γ_{lg}), de ne legyen nagyobb annak duplájánál. Ekkor az adhéziós erő még elég nagy ahhoz, hogy az olvadékat egyre inkább a szilárd fázishoz kényszerítse. Érdemes azonban megjegyezni, hogy kielégítő nedvesítésről csak akkor beszélhetünk, ha θ peremszög kisebb, mint 30° .



12. ábra: Szilárd/folyadék/gáz háromfázisú rendszer részleges nedvesítés esetén; *Forrás: [A13]*

- **Részleges nem nedvesítés ($90^\circ \geq \theta > 180^\circ$)**

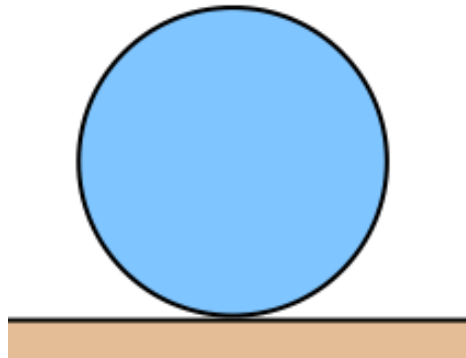
Sajnos ebben az esetben az olvadék már nem nedvesíti megfelelően a szilárd fázist. Ennek az állapotnak az energetikai feltétele, hogy az adhéziós energia (W_{slg}) kisebb vagy egyenlő legyen a folyadék és gáz fázis közötti határfelületi energiával (γ_{lg}). Ekkor az adhézió olyan gyenge, hogy az olvadék inkább a gázzal képez nagyobb közös felületet.



13. ábra: Szilárd/folyadék/gáz háromfázisú rendszer részleges nem nedvesítés esetén; *Forrás: [A13]*

- **Nincs nedvesítés ($\theta = 180^\circ$)**

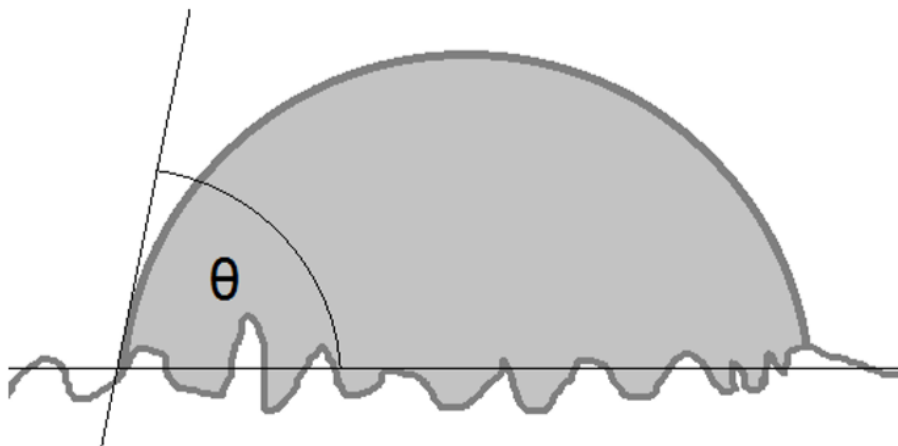
Ebben az esetben az olvadék csak egy ponton érintkezik a szilárd fázissal, amihez az adhéziós energiának (W_{slg}) zérusnak kell lennie. Ekkor semmilyen nedvesítés nem jön létre. Ilyen eset akkor fordulhat elő, ha az olvadék megszilárdul, és szilárd-szilárd fázisokat vizsgálunk. Ugyanis, ha a rendszer tartalmaz valamilyen olvadék fázist, akkor minden esetben létrejön valamekkora nedvesítés.



14. ábra: Szilárd/folyadék/gáz háromfázisú rendszer abban az esetben, ha nincs nedvesítés; *Forrás: [A13]*

1.2.5. A felületi érdesség és a nedvesítési peremszög kapcsolata [14-17]

A szilárd testek felületei csak látszólag simák. Nagyító, esetleg mikroszkóp segítségével megállapítható, hogy még a legnagyobb pontosságú szerszámmal, legnagyobb odafigyeléssel megmunkált felület sem lesz tökéletesen sima és egyenes. A felületi érdességet legegyszerűbben felületérdesség-mérő műszer segítségével határozhatjuk meg. Mégpedig úgy, hogy a műszer nagyon kis lekerekítési sugarú tapintó érzékelőjét a felületen végigvezetjük. A tapintófej által rögzített felületprofil, a tapintócsúcs lekerekítése miatt kissé torzított, de elfogadható a valódi profilnak. A gyakorlatban a felületi érdesség mérőszámaként a temérdek lehetőség közül az általános érdesség (Ra) és az egyenletlenség-magasság (Rz) terjedt el. Az általános érdességet (Ra) egy adott hosszon, a névleges mérettől mért magasság különbségek abszolút értékének átlagaként számíthatjuk ki. Az egyenletlenség-magasság (Rz) kiszámításához pedig, az adott hosszon mért öt legmagasabb pont alapvonalától mért magasságának összegéből kell kivonni az öt legmélyebb pont alapvonalától mért mélységét, majd a kapott értéket el kell osztani öttel. A két mérőszám közötti kapcsolat az $Rz \approx 4,5 \cdot Ra$ összefüggéssel becsülhető.



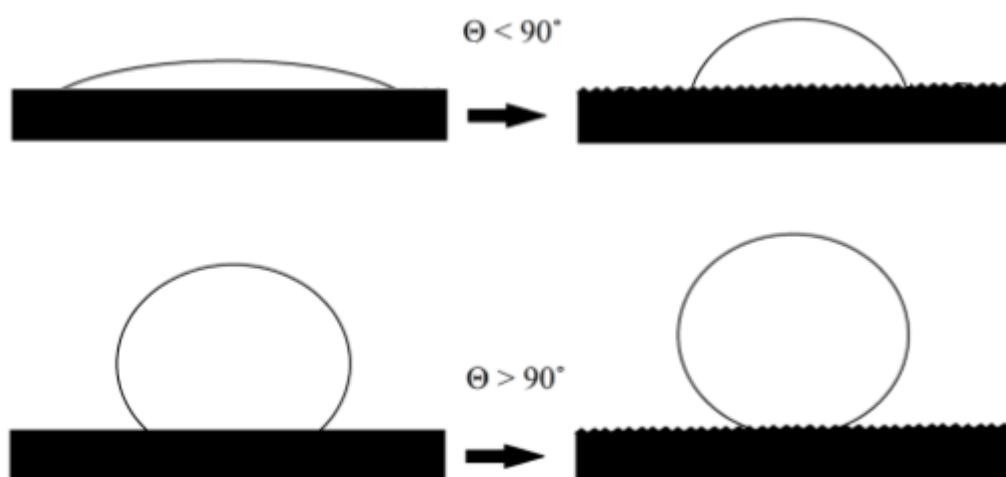
15. ábra: Folyadék érdes felületen; *Forrás: [A14]*

Ahogy arról már a korábbi fejezetekben is szó volt, a nedvesítő képességet, a mérhető nedvesítési peremszög (θ) segítségével lehet legegyszerűbben meghatározni. Azonban a gyakorlati megfigyelések azt mutatták, hogy érdes felületek esetén, a mérhető peremszög nem minden esetben ad pontos képet az adott folyadék nedvesítő képességéről. Ugyanis ugyanannak a folyadéknak más lesz a nedvesítési peremszöge érdes felületen, mint sima felületen, akkor is, ha a két szilárd felület minden más tulajdonsága megegyezik. Tehát szükség van egy olyan összefüggésre, amelynek segítségével az érdes felület által okozott hatásokat is figyelembe tudjuk venni a nedvesítő képesség vizsgálatakor. Ennek első modelljét Robert N. Wenzel alkotta meg 1936-ban. Az ő elmélete azon alapult, hogy a durva felület hatására megnő a szilárd és folyadék fázisok közötti felület nagysága és ez megváltoztatja a folyadék szétterülési tulajdonságait.

Ennek számszerűsítéséhez be kell vezetni a látszólagos peremszög (θ_A) fogalmát. Ez az a szög, amit a folyadék, a gáz és a durva felület találkozásánál mérni tudunk. A látszólagos és a valódi peremszög közötti kapcsolatot a felület érdessége határozza meg, melyet az r felületi érdességi arányszámmal jellemzünk. Az r arányszám megmutatja, hogy az érdes felület kifizítve hányszorosa lenne a tökéletesen sima, elméleti felületnek Ennek méréséhez azonban, lézeres felületi topográfia van szükség. Ha az adott felület tökéletesen sima, akkor: $r = 1$, ebben az esetben a látszólagos peremszög (θ_A) megegyezik a valódi peremszöggel (θ), ha viszont a felület nem tökéletesen sima, akkor: $r > 1$ és a látszólagos peremszög (θ_A) nagyobb lesz a valódi peremszögnél (θ). Tehát minél érdesebb a felület, annál nagyobb lesz a látható peremszög. Fontos megjegyezni, hogy a Wenzel által megalkotott modell, csak $0^\circ < \theta < 90^\circ$ peremszög értékek között tekinthető érvényesnek. A felírható összefüggés:

$$\cos(\theta_A) = r \cdot \cos(\theta) \quad (6)$$

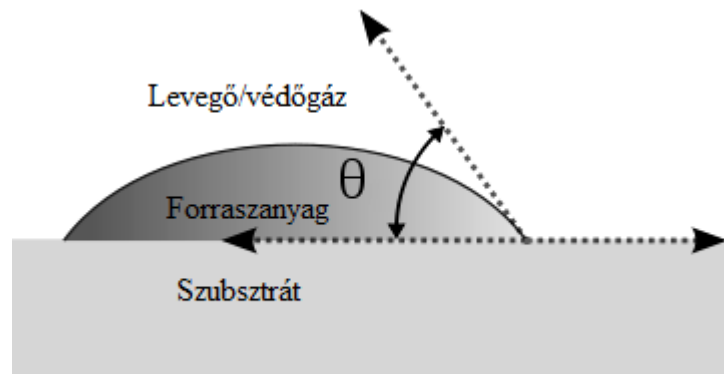
Ez a modell azért nem alkalmazható a $90^\circ < \theta < 180^\circ$ peremszögek esetén, mert ebben a tartományban a folyadék nem tölti ki jól az érdes szilárd felület barázdáit és gáz molekulák szorulhatnak a folyadék és a szilárd felszín közé. Ennek eredményeképpen a folyadék és a szilárd felszín közötti határfelület nem lesz folytonos és a nedvesítési peremszög más lesz. Ezt a jelenséget A. B. D Cassie és Samuel Baxter vizsgálták és modellezték, azonban jelen dolgozatomban jó nedvesítő képességgel rendelkező folyékony anyagokkal fogok foglalkozni, melyeknek nedvesítési peremszöge 90° alatt van, így az általuk kialakított elmélet most nem kerül ismertetésre.



16. ábra: A felület érdességének változásának hatása a nedvesítési peremszögre; *Forrás: [A15]*

1.2.6. A forrasztás és a nedvesítés kapcsolata

Forrasztás esetén a folyadék fázis a forrasztóanyag, a szilárd fázis a szubsztrát, a gáz fázis pedig a levegő vagy valamilyen védőgáz. A forrasztási folyamat során a folyékony halmazállapotú forrasztóanyag lehűl és megszilárdul. A végleges, megszilárdult kötés alakját erősen befolyásolja, hogy a forrasztóanyag még folyékony állapotban mennyire terült szét az alapfém felületén. Ez azért fontos, mert az alapanyag és a forrasztóanyag, a köztük lévő határretegen keresztül lép kapcsolatba egymással, mégpedig úgy, hogy a két anyag között a korábban már bemutatott diffúziós kapcsolat jön létre. Minél nagyobb az érintkező felület, annál nagyobb területen jöhet létre a diffúzió és annál erősebb lehet a kötés, ehhez pedig arra van szükség, hogy a forrasztóanyag minél jobban nedvesítse az alapfém felületét, vagyis minél kisebb legyen a nedvesítési peremszöge. Felmerül a kérdés, hogy a nedvesítőképességet milyen módon lehet befolyásolni, amely nem okoz a felületen káros változást. Korábbi kutatások [26, 27] kimutatták, hogy erre kiválóan alkalmas lehet a lézeres felületkezelés. Ugyanis a megfelelő beállításokkal végzett lézeres felületkezelés nem okoz látható vagy mérhető változásokat a felületen, mégis megváltoztathatja annak nedvesítő képességét.



17. ábra: A felület érdességének változásának hatása a nedvesítési peremszögre; *Forrás: [A12]*

1.3. A lézerek

A lézer szó az angol LASER szóból származik, amely a Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation szavak kezdőbetűiből eredő mozaikszó. Jelentése: fényerősítés a stimulált fénysugárzás emissziójával. A lézer egy olyan speciális elektromágneses energiaforrás, amely stimulált emisszióval hoz létre egybefüggő fénysugarat. A lézerekkel foglalkozó kutatások a 30-as években kezdődtek meg. Ekkoriban egy erős reflektor fényének szóródását vizsgálták meg az atmoszférában, amely jó idő esetén akár 30km-re is eljutott. Az első lézerjelenségre azonban 1960. május 16-ig kellett várni, amikor Theodor Maiman és munkatársai, a kaliforniai Hughes Research Laboratories-ban először detektálták emittált spektrum egy vonalának szokatlan erősödését, ez azonban még nem rendelkezett a műszaki szempontból értékelhető lézersugár tulajdonságaival. Az ipar által használható lézerhez még néhány év munkájára szükség volt. Azonban azóta is töretlen az új lézersugaras technológiák fejlődési üteme, a fejlesztés hajtóerejét pedig az ipar igényei jelentik. [18][20]

1.3.1. A lézerek működésének elméleti hátttere [7][18][19][31][32]

A lézerek működésének megértéséhez le kell mennünk az atomok szintjére. Az elektronok állapota az atommag körül energiaszintekkel jellemezhető. Az elektronok normál körülmények között igyekeznek a lehető legalacsonyabb energiaszinteket elfoglalni, ebben az esetben az atom alapállapotban van. Az elektronoknak azonban nem kell minden esetben a legalacsonyabb energiaszinteken lennie, az egyik energiaszintről a másikra válhatnak energia elnyelésével (abszorpció) vagy kibocsátásával (emisszió). Az atomok energiaszint változásának imént bemutatott módjait összefoglalóan radiatív átmenetnek nevezzük. Azonban a radiatív átmenetnek létezik egy harmadik típusa, a stimulált emisszió, és valójában ez a jelenség szolgál a lézerek működésének alapjával.

Abszorpció során egy elektron például elnyelheti egy foton teljes energiáját, ami az elektron energiájának megnövekedését eredményezi, és arra készíti az elektront, hogy magasabb energiaszintre lépjen. Ekkor az atom úgynevezett gerjesztett állapotba kerül. Hasonló eredmény érhető el elektromos kisüléssel is, ekkor az energiát elektromos mező által gyorsított elektronok ütközése biztosítja. A két gerjesztési módszer esetében ugyanolyan gerjesztett állapot érhető el.

Azonban az atomi szerkezet energiaminimumra törekszik, ami az elektronokat arra készíti, hogy alacsonyabb energiaszintekre ugorjanak. Ez történhet az energia egy részének hővé alakításával vagy foton spontán emissziója útján. Ha az atom a gerjesztett állapotát foton kibocsátásával veszíti el, akkor a kibocsátott foton energiája pontosan meg fog egyezni az atom magasabb és alacsonyabb energiaszintű állapotai közötti energiakülönbséggel.

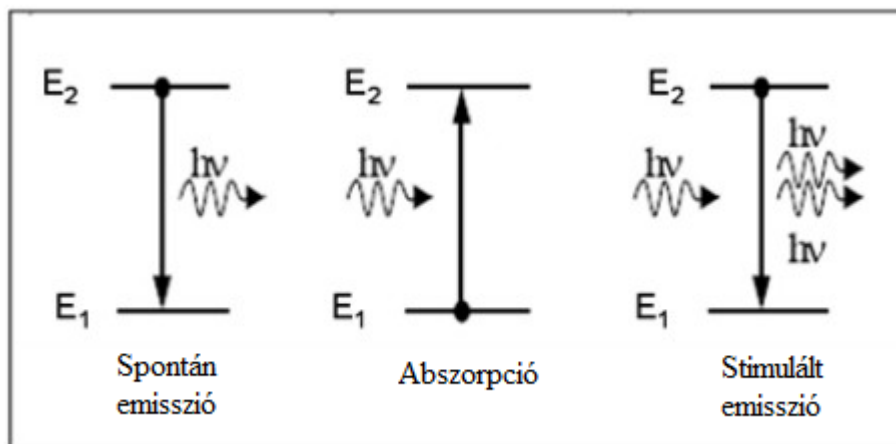
Ez az energia kizárólag a foton frekvenciájától függ és a fotonnak ezt a felszabadulását nevezzük spontán emisszióknak:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (7)$$

Ahol:

- h : Planck állandó ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Js),
- ν : A kibocsátott foton frekvenciája [Hz]
- $E_2 - E_1$: Az atom két energiaszintje közötti energiakülönbség [J]

Einstein elmélete (1917) szerint, ha egy gerjesztett állapotú atomhoz olyan foton érkezik, amelynek frekvenciája olyan, hogy az adott foton energiája megegyezik a gerjesztett és az alacsonyabb energiaszintű atom energiakülönbségével (tehát $h \cdot \nu = E_2 - E_1$ teljesül), akkor bekövetkezik az indukált fotoemisszió, amely során az atom visszatér az alacsonyabb energiaszintű állapotába és a többletenegriát egy kibocsátott foton viszi el. Tehát a folyamat eredményeként két foton hagyja el az atomot egy helyett. Fontos, hogy az emittált foton frekvenciája, iránya, fázisa azonos lesz a hatást kiváltó fotonéval. Majd ezután a két foton újabb gerjesztett atomokat stimulál emisszióra.

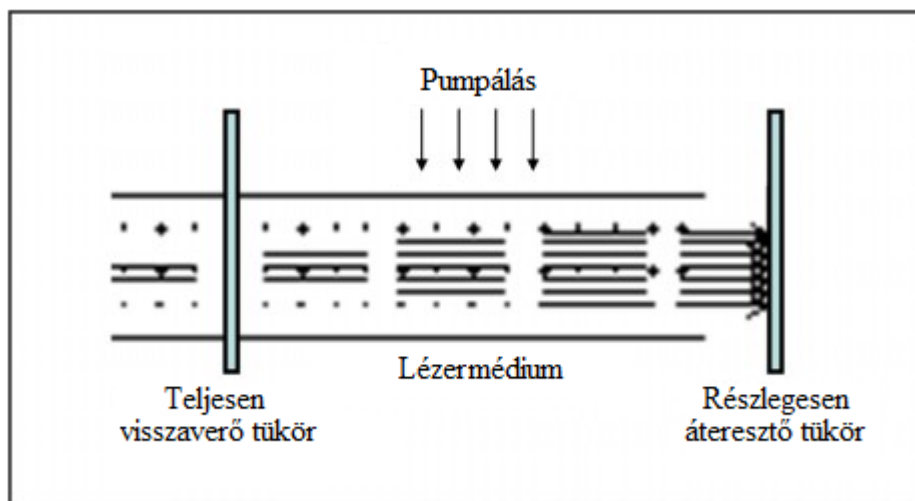


18. ábra: Egy atom két energiaszintje között lezajló jelenségek; *Forrás: [A16]*

A gerjesztett közeget lézermédiumnak nevezzük, amely lehet egy kristály (Nd:YAG, Nd:YLF, stb.) vagy valamilyen gáz keverék (CO₂, Hélium-neon, stb.). A gerjesztő foton-forrás pedig lehet valamilyen világító test, lámpa vagy lézerdíóda, Azonban előfordulhat, hogy a lézermédium tartalmaz alapállapotú atomokat, amelyek elnyelhetik azokat a fotonokat, amelyeknek be kellene indítania stimulált emissziót. Ezért arra van szükség, hogy a gerjesztett közegben nagyobb számban legyenek a magasabb energiaszinten lévő atomok.

A folyamatot elősegíti, hogy a magasabb energiaszinteken lévő atomok a korábban bemutatott módon, spontán is bocsáthatnak ki fotonokat, ezek pedig további fotonok emisszióját indukálják, így növelve az energia koncentrációját.

Spontán emisszió során a kibocsátott fény véletlenszerű és körülbelül minden irányban egyenlően terjed. A stimulált emisszió folyamata azonban megnövelheti egy meghatározott irányba haladó fotonok számát. Emellett egy irányt előnyben részesíthetünk tükrök felhasználásával is. Ekkor lesznek fotonok, amelyek viszonylag hamar kikerülnek a rezonátorüregből, míg mások sokszor oda-vissza pattognak a tükrök között és minden áthaladás során újabb fotonok emisszióját indukálják. Ha gondoskodunk a folyamatos pumpálásról, tehát a magasabb energiaszint betöltöttségéről, akkor koherens fotonok formájában egyre több energia koncentrálódik a rezonátorüregben. Ez az energia, úgy csapolható meg, hogy az üreg egyik végén található tükör részben áteresztő, így a keletkező fotonok adott része folyamatosan kiléphet a rezonátorüregből, ahol egy fókuszáló lencsén halad át és alakul át nagy energiájú sugárzássá. Ezt a koherens, monokromatikus sugárzást nevezzük lézersugárzásnak. Amely lézersugárzás, a gerjesztő fényforrástól függően lehet folytonos vagy impulzus üzemű (a nagy frekvenciával megszagatott lézertényt kvázifolytonosnak is szokás nevezni). A folyamat eredménye pedig egy tökéletesen rendezett kis széttárású nyaláb, amely a megfelelő optikával nagyon apró foltra fókuszálható.

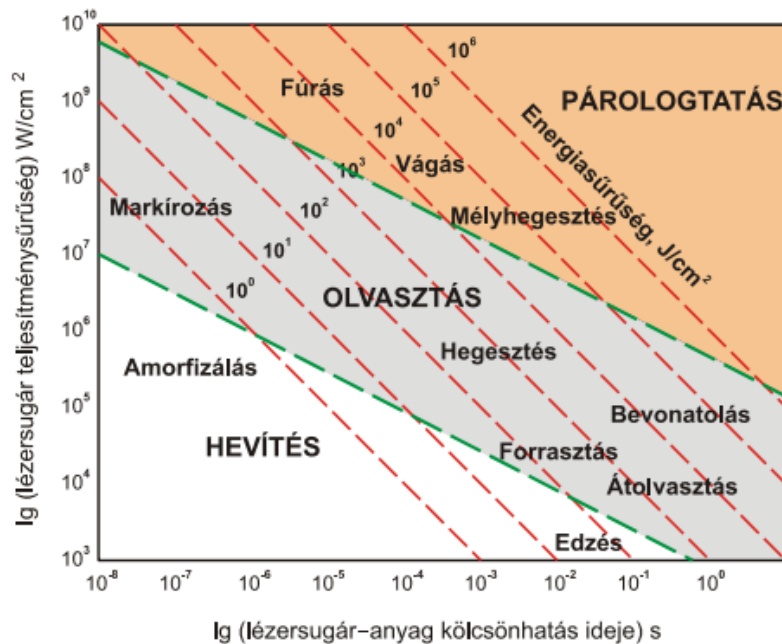


19. ábra: Rezonátorüreg; Forrás: [A17]

1.3.2. Lézer technológia a megmunkálásban [19][20]

A lézersugár az anyagmegmunkálás sokoldalú, érintésmentes és soha el nem kopó "szerszáma", amelynek üzembe helyezése viszonylag egyszerűen kivitelezhető, és üzemeltetése megfelelő használat esetén gazdaságos. A lézersugaras technológiáknál általánosan kijelenthetjük, hogy a lézersugár energiáját a munkadarabon, lokális hőmérséklet növelésre használjuk. Az, hogy

mi történik a munkadarab lézerrel kezelt részével, az a lézer és a munkadarab tulajdonságaitól valamint az anyag-lézersugár kölcsönhatás időtartamától függ. Ezek az összefüggések nem lineárisak és elmondható, hogy összességében rendkívül bonyolultak. Azonban segítségünkre vannak bizonyos „ököltszabályok”, melyekkel körülhatárolhatóak az egyes technológiák lézersugárra vonatkozó igényei. Az egyik ilyen ökölszabály grafikusan határozza meg az egyes általános lézersugaras technológiák lézer teljesítménysűrűségének és kölcsönhatási idejének szükségletét. Ez látható a 20. ábrán.

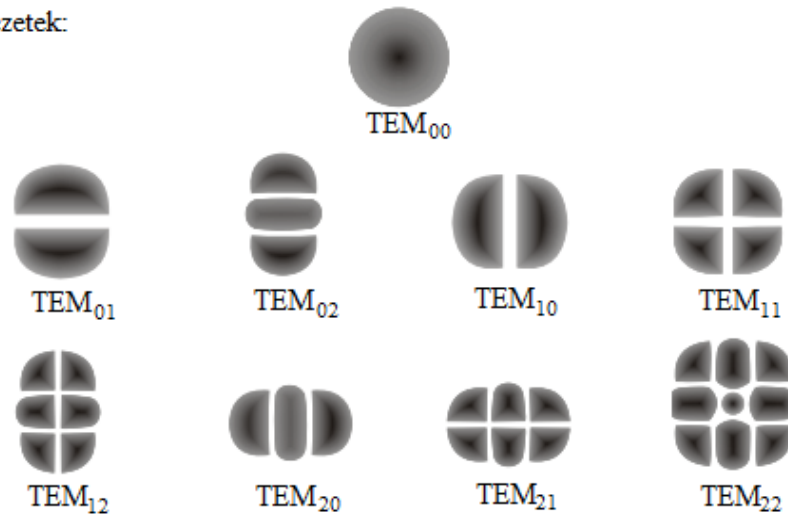


20. ábra: Lézersugaras technológiák teljesítménysűrűség és kölcsönhatási idő igénye; *Forrás: [A18]*

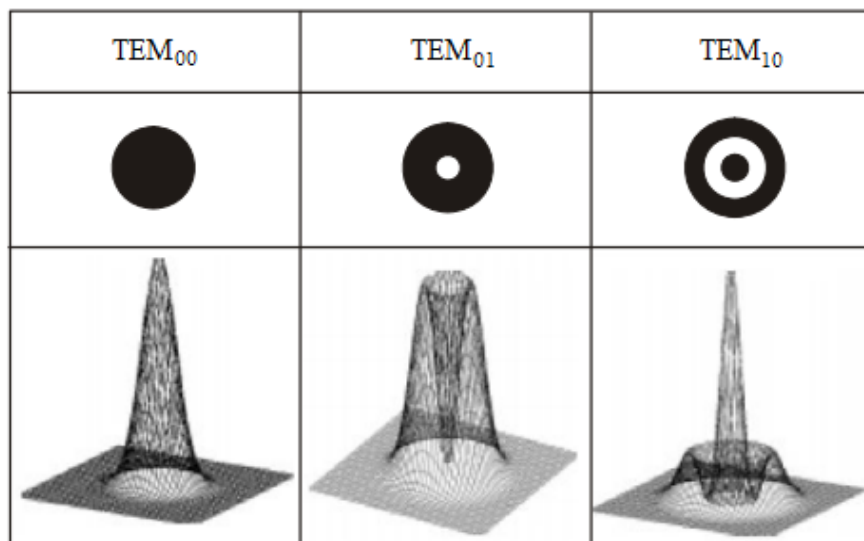
Az ábráról leolvasható, hogy a bevonatoláshoz, átolvasztáshoz, edzéshez, forrasztáshoz és hegesztéshez hosszabb anyag-lézersugár kölcsönhatási időre van szükség, ezért érdemes ezeknél a technológiáknál folytonos lézersugár üzemmódot választani. Edzésnél fontos megjegyezni, hogy nem érdemes egy alkatrész teljes felületét lézersugárral kezelni, mert a lézersugaras edzés legnagyobb előnye, hogy az energiabevitel koncentrált jellegű, így akkor érdemes használni, ha csak bizonyos helyeken szeretnénk beedzeni a munkadarabot. Továbbá fontos figyelembe venni a gazdaságossági szempontokat is, ugyanis a lézersugár-energia előállítása viszonylag drágának mondható, ezért a teljes felület beedzése esetén érdemes más edzési módot választani. A mélyhegesztéshez és a lézeres vágáshoz hasonló teljesítménysűrűségekre van szükség, azzal a különbséggel, hogy a vágáshoz kevesebb időre van szükség, valamint a megolvadt olvadékot munkagázzal ki kell fújni a vágórésből. Az alacsony időszükségletű technológiáknál, mint például az amorfizálás, a fúrás és a markírozás csak rövid lézerimpulzusokat alkalmazunk, és a teljesítménysűrűséggel határozzuk meg, hogy melyik műveletet hajtjuk végre. A felsoroltakon kívül a lézer ideális a gravírozáshoz, jelöléshez, maráshoz, karcoláshoz és fába égetéshez.

A lézer által leadott teljesítmény a lézerre merőleges metszetben általában nem állandó. A keresztmetszet teljesítmény-eloszlását az úgynevezett TEM_{ij} Transzverzális Elektromágneses Módusszámmal jellemezhetjük, ahol az indexben rejlő számok az intenzitás minimumok számát jelölik a nyáláb terjedésére merőleges keresztmetszetben. Léteznek négyszögszimmetrikus és körszimmetrikus módusok. Négyszögszimmetria esetén a TEM_{ij} kifejezésben szereplő első index az x, a második index az y tengelyen található intenzitás minimumok helyét jelölik, körszimmetrikus esetben pedig az első index a sugár irányú, a második index a kerület menti intenzitás zérushelyek számát adja. Az intenzitásprofil a rezonátor hosszától és felépítésétől, a tükör kiképzésétől és a sugárzott fény hullámhosszától függ. A különböző intenzitásprofilokra, a 21. ábrán láthatunk példákat.

• **Négyszögszimmetrikus módusszerkezetek:**



• **Körszimmetrikus módusszerkezetek:**



21. ábra: Példák négyszögszimmetrikus és körszimmetrikus intenzitásprofilokra; *Forrás: [A19]*

A valóságos lézernyalábok az egyes alapeloszlások szuperpozíciójából állíthatóak elő. A legegyszerűbb, jól fókuszálható Gauss-eloszlású lézernyaláb módusa TEM_{00} . Amennyiben az ilyen módusszerkezetű sugarat fókuszáljuk, akkor az optikai elem után egy másik szintén TEM_{00} eloszlású lézersugarat kapunk. Az így kapott fókuszált lézernyaláb legkisebb átmérőjét fókuszátmérőnek nevezzük. Ennek számítására a következő összefüggés szolgál:

$$r_F = \frac{r_T \cdot f}{\sqrt{(z_0 - f)^2 + z_R^2}} \approx \frac{\lambda \cdot f}{\pi \cdot r_L} \quad (8)$$

Ahol:

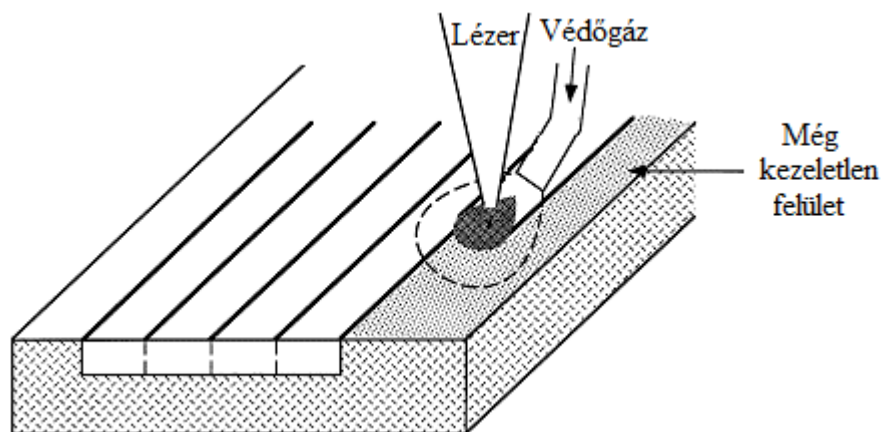
- r_F : a fókusz sugara [mm]
- r_T : a lézersugár nyalábderekának a sugara [mm]
- f : fókusz távolság [mm]
- z_0 : a lézer terjedési irányában mérhető úthossz [mm]
- z_R : fókuszálatlan lézersugár Rayleigh-hossza [mm]
- r_L : a fókuszáló lencse megvilágított felületének sugara [mm]
- λ : a lézer hullámhossza [mm]

Ahogy az összefüggésből kiderül, a fókuszált lézernyaláb sugara csökkenthető a fókusz távolság és a hullámhossz csökkentésével vagy a fókuszáló lencsére érkező lézernyaláb sugarának növelésével. A fókuszátmérő körültekintő megválasztása rendkívül fontos, mert meghatározza a megmunkáláskor kihasználható maximális teljesítménysűrűség értékét.

1.3.3. Lézeres felületkezelés [7][21]

A felületkezelés célja, hogy a munkadarab majdnem teljes tömegének tulajdonságait változatlanul hagyva, a felületi jellemzőket az igénybevétel szempontjából legoptimálisabb tulajdonságkombináció elérésével megváltoztassuk. A lézerek alkalmazásának egyik legfontosabb területe a lézeres felületkezelés. Acél alapanyagok lézeres felületkezelése során a munkadarab felületét úgy tesszük ki a lézersugárnak, hogy az ne olvadjon meg, de a megnövekedett hőmérséklet hatására, a felületi rétegekben először ausztenites, majd a gyors hűlést követően martenzites szerkezet alakuljon ki, tehát a felületi réteg beedződjön. Emiatt nő a felület kopásállósága és kevésbé lesz hajlamos kifáradásra is. Az eljárás előnye abban rejlik, hogy kizárólag a felülethez közeli pár mikrométeres zóna edződik be és vesz fel a tömbi anyagtól eltérő fizikai, kémiai és mechanikai tulajdonságokat, a munkadarab közel teljes tömegének tulajdonságai változatlanok maradnak. A lézeres felületkezelés nem használható hatékonyan a teljes tömegű tulajdonságmódosításra, mivel hagyományos edzési módszerekkel ezek sokkal

költséghatékonyabban megoldhatók. Ezzel szemben a lézeres felületkezelés kiválóan alkalmas például nagy pontosságú vagy jól szabályozott felületkezelések megvalósítására főként, ha a kezelendő terület, viszonylag kicsi vagy fontos, hogy az anyag tömbi részének tulajdonságai ne változzanak meg. Továbbá hagyományos edzési módszerek esetén, a nagyon keskeny, illetve a nagyon nagyméretű alkatrészeknél fennáll a hőkezelés hatására létrejövő vetemedés veszélye, a nagy bevitt hőmennyiség okozta feszültségek miatt. Mivel lézerrel csak a felületi rétegek tulajdonságait változtatjuk meg, és csak ezt a részt hevítjük fel, sokkal kevesebb hőt kell bevinnünk így a vetemedés elkerülhető. Tehát a problémás alkatrészek felületei is beedzhetők.



22. ábra: Lézeres felületkezelés; Forrás: [A20]

A lézersugár egy monokromatikus elektromágneses energianyaláb, amely optikai eszközök segítségével könnyen terelhető a megfelelő helyre, ahol az általa szállított fotonok átadják energiájukat a felületnek, amely ennek hatására felmelegszik. A lézersugár és az anyag kölcsönhatását alapvetően a következő technológiai paraméterek határozzák meg:

- Lézerteljesítmény [W]
- Hullámhossz [m]
- Sugárnyaláb alakja, mérete [m]
- A besugárzott területen belüli intenzitás-eloszlás jellege (TEM_{ij})
- Pásztázási (előtolási) sebesség [m/s]

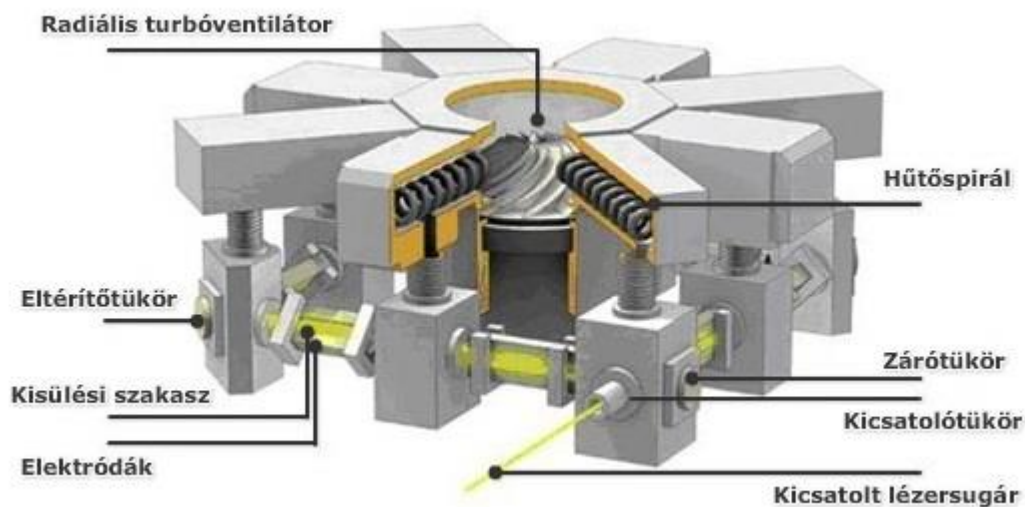
A felsorolt jellemzőkből származtatható paraméterek:

- Hatóidő = nyomvonal hossza / pásztázási sebesség [s]
- A lézer munkája = lézerteljesítmény · hatóidő [J]
- Teljesítménysűrűség = lézerteljesítmény / besugárzott felület, [W/mm²]
- Egységnyi felületen végzett munka = A lézer munkája / besugárzott felület [J/mm²]

Amennyiben két különböző lézer által megvalósított felületkezeléseket szeretnénk összehasonlítani energetikai szempontból, akkor erre az egységnyi felületen végzett munkák összehasonlítása a leginkább alkalmas.

1.3.4. Lézerek sugárforrásai [20]

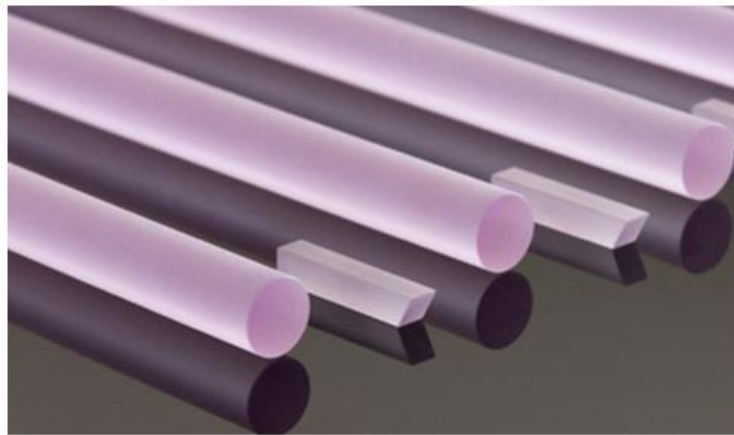
Sugárforrás alatt a lézer gerjesztett közegét, a lézermédiumot értjük. Ez lehet valamilyen kristály (szilárdtest-lézerek) vagy valamilyen gáz keverék (gázlézerek). Időrendben először a gázlézerek fejlesztése kezdődött meg (1970-es évek). Ebben az időszakban a He-Ne- és a CO₂ lézersugár-források kezdtek elterjedni, melyek közül, viszonylag magas fénytéljesítményük miatt csak a CO₂ lézerek voltak alkalmasak az ipar igényeinek kielégítésére, új technológiák fejlesztésére. Az évtized végére ezek a lézerek el is érték a P = 1000W-os teljesítményt. Ezt követően (1980-as években) jelentek meg a nagy teljesítményű szilárdtest-lézerek, a legelterjedtebben alkalmazott lézermédium pedig az Nd:YAG (neodímiummal ötvözött YAG kristály) lett. Ekkoriban még problémát okozott ezen kristályok gerjesztése, ugyanis lézerdiodák hiányában villanólámpákkal kellett gerjeszteni őket, amelyek nem bizonyultak elég hatékonyak, megbízhatónak. A villanólámpás gerjesztés miatt ezeket a lézereket csak impulzus üzemben lehetett használni, ezzel szemben a CO₂ gázos lézerek kezdettől fogva képesek voltak folytonos és impulzus üzemi működésre is. Azonban az Nd:YAG lézerek rendelkeznek egy jelentős előnnyel a CO₂ lézerekhez képest, az Nd:YAG lézerek által kibocsátott lézer hullámhossza tizede csupán a CO₂ lézerek által kibocsátott lézer hullámhosszának. Ez lehetővé teszi a hajlékony optikai szálakban több kilowattos teljesítményű fény vezetését is, valamint kedvezőbbek az abszorpciós viszonyok is fémek esetében.



23. ábra: Nagyfrekvenciás gerjesztésű CO₂-lézersugárforrás; *Forrás: [A21]*

A következő évtizedben még a gyors axiális áramlású CO₂ lézerek uralták a piacot, melyeket elsősorban síklemezek vágására használtak. Azonban ezeket a lézereket csak hűtött réztükrökkel lehetett irányítani, melyek irányításához CNC vezérlésű számítógépekre volt szükség.

Ennek ellenére az ezredfordulón, a CO₂ lézerek elég közkedveltek voltak jó hatásfokuk miatt, így továbbfejlesztették őket és kifejlesztették a diffúziós hűtésű CO₂ lézereket, azaz a SLAB lézereket. Ezeknek a sugárminősége jobb, üzemeltetése gazdaságosabb volt, mint axiális áramlású elődjének. Ezzel nagyjából egy időben jelentek meg a hosszú élettartalmú, megbízható, nagy teljesítményű lézerdiódák. Ugyan a lézerdiódából kilépő lézersugár igencsak rossz minőségű volt, így önmagában lézerként nem állta meg a helyét, de a szilárdtest-lézermédiumok gerjesztésére mégis kiválóan alkalmas volt. Ezzel sokat javult a szilárdtest-lézerek sugárminősége, valamint elérhetővé vált a folytonos üzemmód is.



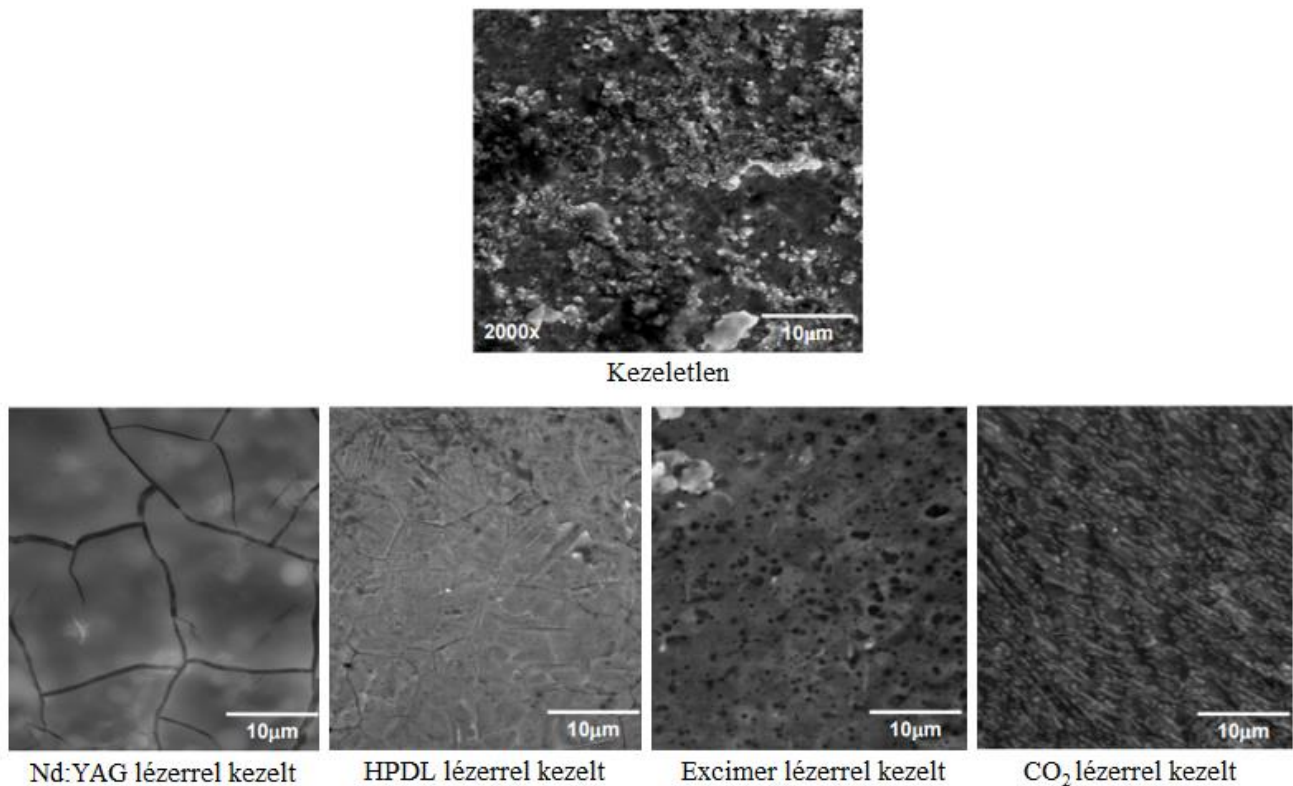
24. ábra: Nd:YAG rúd; *Forrás: [A22]*

A XXI. században a szállézer és a koronglézer (szilárdtest lézerek) jelentik a lézeres technológiák új szintjét. Melyekben a gerjesztésről az Nd:YAG lézerekhez hasonlóan, lézerdiódák gondoskodnak és lézermédiumának anyaga, így hullámhossza is hasonló az Nd:YAG lézerekéhez. A különbség a lézermédium geometriájában keresendő. Az egyik esetben a lézermédium egy nagyon vékony, de hosszú szál, míg a másik esetben egy 10 mm átmérőjű 0,5 mm vastagságú korong. Előnyük a jó sugárminőség és az akár 10kW-os lézerfény-teljesítmény.

1.3.5. Lézeres felületkezelés és a nedvesítési peremszög kapcsolata [28][29][30]

Ideális esetben lézeres felületkezelés hatására a kezelt felületen nem észlelhető változás, azonban a keletkező felület egyes tulajdonságai mégis eltérnek az eredeti felület tulajdonságaitól, és ezen tulajdonságok változásának hatására akár a felület nedvesítő képessége is megváltozhat. A lézeres felületkezelés során a legfontosabb változások a felületi érdességben, a felület oxigén tartalmában és a felületi energiában figyelhetőek meg.

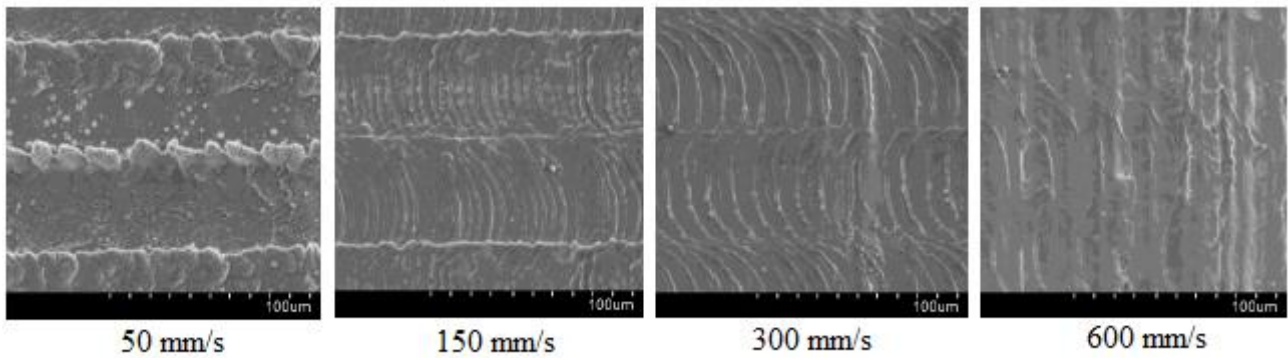
A lézeres felületkezelés hatását a kezelés számtalan paramétere befolyásolja, ezek közül is a legalapvetőbb, az alkalmazott lézer típusa. Korábbi mérések ugyanis kimutatták, hogy a különböző lézerek különböző módon és mértékben befolyásolják a felület nedvesítését.



25. ábra: SEM felvételek a kezelt felületek mikroszerkezetéről; *Forrás: [A23]*

Korábbi mérések alapján megállapítható, hogy az Nd:YAG lézerral és a HPDL (nagy teljesítményű diódalézer) típusú lézerral kezelt felület érdessége csökkent a kezeletlen felületekéhez képest, ennek hatására, ahogy azt már a 2.2.5. fejezetben is megállapíthattuk, a kezelés miatt a nedvesítési peremszög is kissé csökkenni fog. Ezzel szemben az excimer és a CO₂ lézerek hatására a felületi érdesség növekedik, ebből következően a mérhető nedvesítési peremszög is növekedni fog. Ezek az érdességbeli különbségek a 23. ábrán megfigyelhetők.

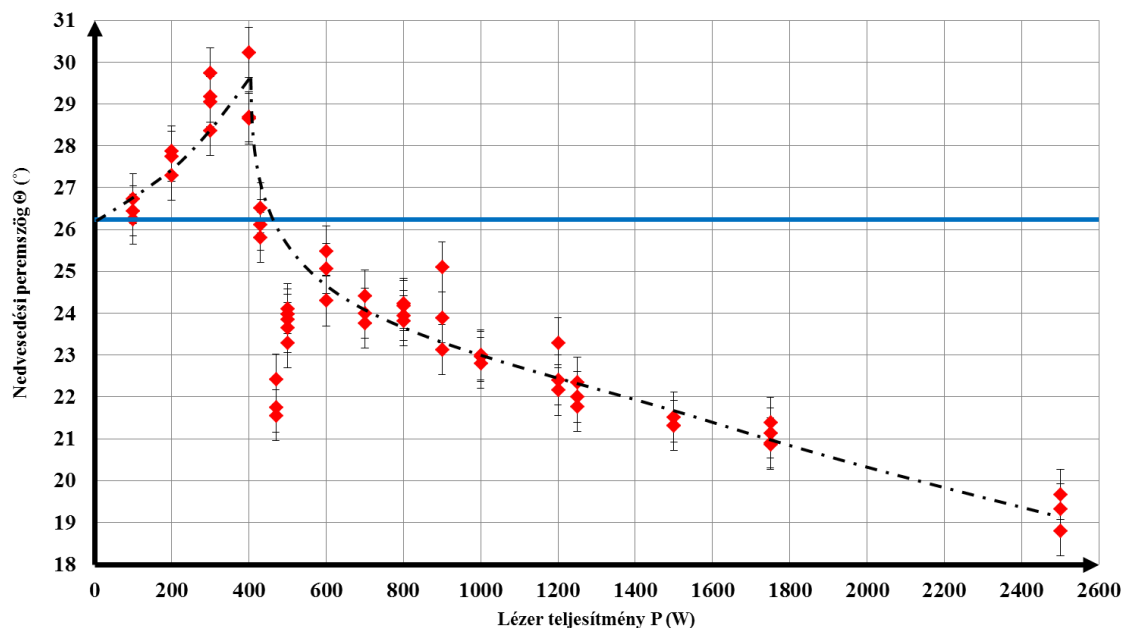
A különböző típusú lézerekkel elvégzett kezelések minden működési paraméterükben megegyeztek, a köztük lévő egyetlen különbséget, az általuk kibocsátott fény hullámhossza jelentette. Emiatt a vizsgálatok arra engednek következtetni, hogy a nedvesítési tulajdonságok és a felületkezelő lézer hullámhossza között valamilyen kapcsolat áll fenn. Azonban a lézerral felületkezelt felület érdessége nem kizárólag a lézer hullámhosszától függ. Korábbi tanulmányok kimutatták, hogy fontos befolyásoló paraméter, többek között, a lézer előtolási sebessége is. A 26. ábrán látható felületeket ugyanazzal a lézerral, egyforma teljesítménnyel kezelték (Violinolaser; 2,7W). A négy kép között az egyetlen különbség, hogy más-más előtoló sebességgel történt a felületkezelés.



26. ábra: A kialakuló mikroszerkezetek különböző előtolási sebességek esetén; *Forrás: [A24]*

A felvételeken jól látható, hogy minél kisebb az előtoló sebesség, annál jelentősebb lesz a felületkezelés hatása, ugyanis nagy sebesség esetén nem tud annyi energia átadódni, mint kis sebességnél. Így a lézer kevesebb munkát végez a felület egységnyi részén. Logikusan ebből az következik - valamint korábbi mérések alá is támasztották -, hogy minél nagyobb a lézer előtolási sebessége, annál kisebb lesz a mérhető felületi érdességbeli változás.

Végül, de nem utolsó sorban a korábban elvégzett kutatások alapján megállapítható, hogy a lézeres felületkezelésnél alkalmazott lézerteljesítmény is komoly hatással van a felület nedvesítési peremszögére. Például réz szubsztrát Nd:YAG lézeres felületkezelése esetén, a teljesítmény növelésével a peremszög egy bizonyos teljesítményértéig növekszik majd csökkenésnek indul és onnantól a teljesítmény növelésével folyamatosan csökken.



27. ábra: Felületkezelt réz szubsztrátok peremszöge értékei, különböző lézerteljesítményeknél; *Forrás: [A25]*

Fontos még megjegyezni, hogy a lézeres felületkezelés csiszolatlan minták esetében hasonló, de kisebb mértékű hatást fejt ki, mintha polírozott felületet kezelnénk.

1.4. Az irodalomkutatás összefoglalása, a kutatás célkitűzése

A forrasztás az iparban folyamatosan terjedő és rendkívül széleskörűen alkalmazott technológia, melynek fő előnye, hogy segítségével a készre munkált alkatrészeket lényegesebb alakváltozás nélkül, mégis alakzáró kötéssel köthetjük össze. A technológia egyik fő csoportját a lágyszerasztott kötések alkotják. Az elkészült kötések minősége nagyban függ a forrasztóanyag nedvesítési tulajdonságától. Ezt a tulajdonságot az adott feladathoz szükséges kedvező irányba szeretnénk befolyásolni. Erre kiváló lehetőség lehet a felületkezelés, amelynek egyik legújabb, folyamatosan terjedő és egyszerűen kivitelezhető módja a lézeres felületmódosítás.

A dolgozatom további részében azt a kérdést vizsgálom, hogy acél alapanyagon végzett lézeres felületkezelés hatással van-e az alapanyagon létrehozott forrasztás peremszögére. Kísérleteimet arra alapozom, hogy korábbi kutatások már kimutatták más anyagpárosítások esetében, hogy a lézeres felületkezelés hatására változás történik a nedvesítési tulajdonságokban. Vizsgálataimban részletesen utánajárok, hogy acél munkadarabokon elvégzett CO₂ lézerezéssel történő besugárzás, különböző teljesítményszinteken, milyen hatással van a rajta szétterülő forrasztóanyag nedvesítő képességére.

2. A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE

2.1. A szubsztrát és a forraszanyag kiválasztása [2][25]

A szubsztrát az a kiinduló alaplemez, amelyen a forrasztást végrehajtjuk. Ennek kiválasztásánál olyan fémes anyagot igyekeztem választani, amelyet az iparban előszeretettel és sokoldalúan használnak. A könnyűfémek és kompozit anyagok térnyerésének ellenére az acélok nagy szilárdságuk és sokoldalúan változtatható tulajdonságaik miatt az utóbbi években megerősítették vezető szerepüket a jármű- és gépiparban. Az imént felsoroltaknak és a könnyű hozzáférhetőségének köszönhetően esett a választás egy acél anyagra, konkrétan a DC01 jelölésű hidegen hengerelt ötvözetlen lágyacélra.

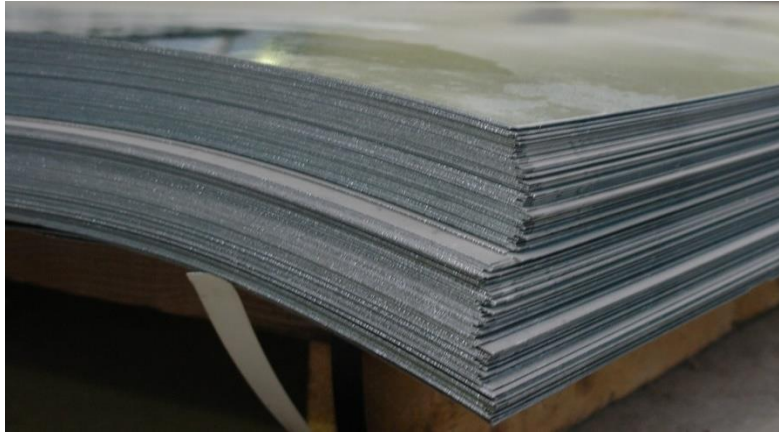
A megfelelő forraszanyag kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy a forrasztások minél egyszerűbben megvalósíthatóak legyenek, és lehetőleg ne legyen szükség oxidáció elleni védőgázra. Valamint fontos, hogy a forraszanyag rátapadjon a szubsztrát sík felületére, ne csússzon le róla könnyedén. Így esett a választás a forraszpasztára. A forraszpaszták összetételüket tekintve fémporból, folyasztószerből és különböző szerves adalékanyagokból állnak. Így az oxidáció elleni védelemmel nem kell különösebben foglalkozni, amivel forrasztás jelentősen leegyszerűsödik. A forraszpaszták további előnye a többi forraszanyaggal szemben, hogy paszta állaguk miatt bármilyen alakú részbe behelyezhetőek és a síkfelületre is rátapadnak, tehát alkalmazhatóságuk kifejezetten sokoldalú. A forraszpaszták közül a Senju Eco Solder M705-GRN360-K1-V típusú pasztát használtam a vizsgálatok során.

2.1. A szubsztrátként alkalmazott acél [22][24]

A DC01 típusú acél szakító szilárdsága $R_m = 270-410 \text{ MPa}$ között van, maximális folyáshatára pedig $R_{eH} = 270 \text{ MPa}$. Ezt az acél típust elsősorban lemezalkatrészek sajtolására valamint mélyhúzásra használják. Fontos tulajdonsága még, hogy egyenletes anyagstruktúrával és jó minőségű felülettel rendelkezik, aminek köszönhetően a járműiparban és az elektronikaiparban is előszeretettel alkalmazzák. Vegyi összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

%	C	P	S	Mn
DC01 acél	0,12	0,045	0,045	0,6

1. táblázat: DC01 acél vegyi összetétele; *Forrás:* [22]



26. ábra: DC01 acéllemez; *Forrás: [A26]*

2.2. A felhasznált forraszpaszta ismertetése [23]

Az SMIC által kifejlesztett, ólommentes Eco Solder forraszpaszták nagy forrasztási megbízhatósággal rendelkeznek a múltban elterjedt Sn-Pb sorozathoz képest, és széles termékválasztékban kaphatóak a különböző forrasztási hőmérsékletnek megfelelően. Az általunk használt forraszpaszta típuszáma M705-GRN360-K1-V, melynek olvadáspontja a gyártó adatai szerint 220°C körül van. Ennek a pasztának egyik fő előnye, hogy nagy nedves tapadás jellemzi és annyi folyasztószer tartalmaz, hogy nincs szükség más oxidáció elleni védőeszközre. Tárolásuk során azonban hűtést igényelnek. Ez általában hűtőszekrényben történik 0-10°C közötti hőmérsékleten. Vegyi összetételét a táblázat tartalmazza.

%	Sn	Pb	Sb	Bi	Cu	Au	In	Ag	Al	As	Cd	Fe	Ni	Zn
M705	96,5	0,05 max	0,1 max	0,1 max	0,5 max	0,05 max	0,1 max	3 max	0,001 max	0,03 max	0,002 max	0,02 max	0,01 max	0,01 max

2. táblázat: Senju Eco Solder M705-GRN360-K1-V forraszpaszta vegyi összetétele *Forrás: [23]*



27. ábra: Senju Eco Solder M705-GRN360-K1-V forraszpaszta; *Forrás: [A27]*

2.3. A szubsztrátok előkészítésének ismertetése

A szubsztrátokat, a 3.1.-es fejezetben már nagyvonalakban ismertetett DC01-es acéllemezről, mechanikus úton vágtam ki egy általános lemezvágásra használható berendezéssel. A mechanikus vágás nagy előnye, hogy az anyag szétválasztása hőbevitel nélkül történik, ezzel pedig minimalizálhatóak az anyagszerkezetében bekövetkező változások. Az acéllemezről a lemezvágó segítségével nagyjából egyforma méretű, 12mm x 15 mm-es téglalap-alakú lapkákat vágtam ki, mégpedig azért, mert az ilyen méretű lapkák még kiválóan elférnek a mintatartóban, de már elég nagyok ahhoz, hogy a mechanikus vágás során létrehozott deformációk ne befolyásolják a forrasztvány által a lapka közepén elfoglalt, körülbelül 100 mm²-es terület tulajdonságait.

A mérések pontosságának érdekében olyan próbatesteket igyekeztem előállítani, melyek felületi minőségükben a lehető legjobban hasonlítanak egymásra, mivel a nedvesítési tulajdonságok nagyban függenek az alapfém érdességétől, ahogy az már a 2.2.5-fejezetben is ismertetésre került. Az egyforma és minél simább felület elérésének érdekében alapos, több szakaszból álló csiszolást és polírozást végeztem, gondosan ügyelve arra, hogy minden szubsztrát esetén azonosan járjak el. Ehhez a tanszék Buehler Beta 2 tárcsás csiszoló, polírozó gépét használtam. A csiszolás során először durva csiszoló papírt (P400) használtam majd folyamatosan, egyre nagyobb finomságú csiszolópapírokkal távolítottam el az előző papír által hátrahagyott karcokat (P800, P1000, P2500). Végül lepolíroztam a szubsztrátok felületét.

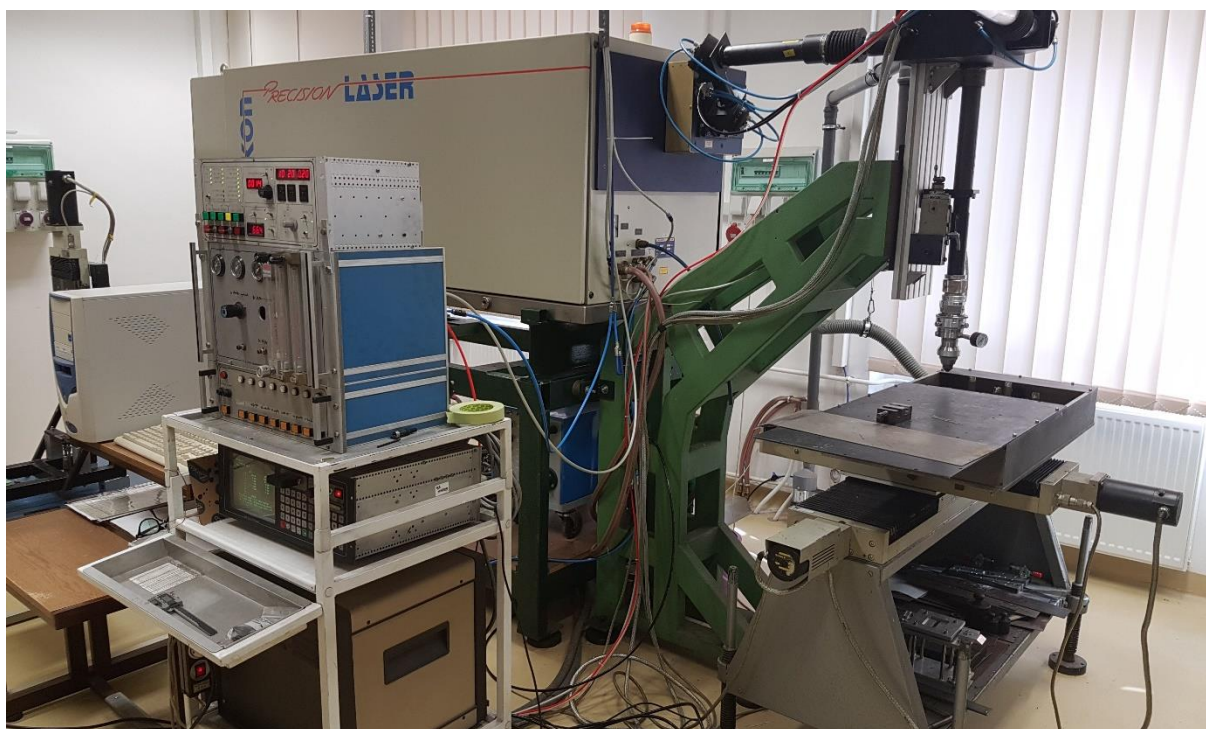
Ezzel az eljárással az oxid réteget is eltávolítottam a szubsztrátok felületéről és a lehetőségekhez képest a lehető legjobban homogenizáltam azokat. Az előkészítés utolsó lépéseként a lapkák felületét alkohollal megtisztítottam a szennyeződésektől, zsíroktól, olajoktól.



28. ábra: Buehler Beta 2 csiszoló-polírozó gép; *Forrás: [A28]*

2.4. A kezelés során alkalmazott lézer és folyamat ismertetése

A lézeres kezelések megvalósításához egy CO₂ sugárforrású, LE2000T000AA típusú Oerlikon precision laser-t használtunk. Amely lézer elméletileg maximálisan 1,8 kW fény teljesítmény kibocsátására képes. A lézersugarat tükrök vezetik a megmunkáló fejhez. A fókuszálásról pedig, a fejben elhelyezkedő 5"-os fókuszávval rendelkező cink-szelenid lencse gondoskodik. A munkadarab és a berendezés közötti relatív elmozdulást a két tengely mentén mozgatható, SM2000-s vezérlővel irányított munkaasztal végzi. Ugyanis a berendezés fixen rögzített optikával rendelkezik.



29. ábra: Oerlikon precision laser

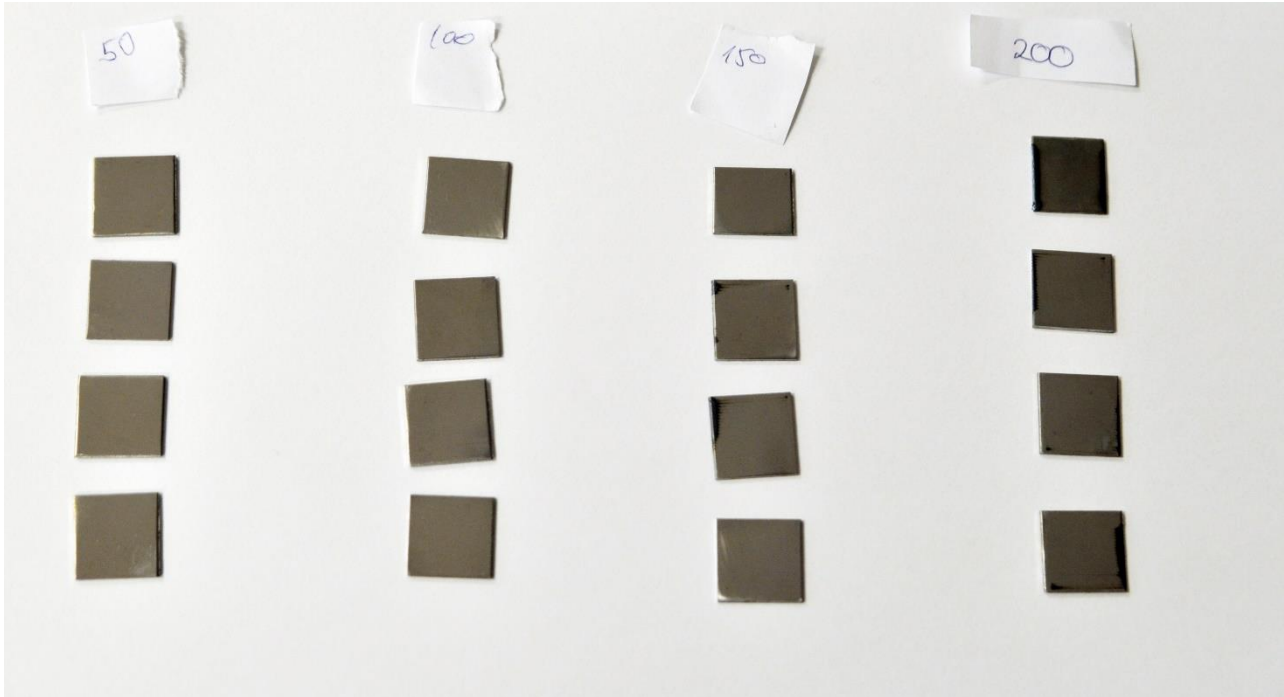
A lézeres felületkezelés első lépésként elvégeztük a berendezés teljesítményének kalibrálását egy Prometec gyártmányú UFF 100-as laserscope-pal és egy Labmaster típusú teljesítménymérő berendezéssel. Ezen mérés eredményeit a 3. táblázat tartalmazza.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Névleges teljesítmény [W]	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	850	900	990
Mért teljesítmény [W]	50	102	156	210	264	314	372	432	488	525	560	520	515

3. táblázat: A kezelendő felületén megjelenő lézeres teljesítmény lézer névleges teljesítményének függvényében

A táblázatból jól látszik, hogy egy bizonyos névleges teljesítményszint felett (850W) már nem növekszik a kezelendő munkadarabon mérhető teljesítmény.

A felületkezelést 50, 100, 150, és 200 Watt névleges teljesítménnyel végeztük el. Minden teljesítményszinten négy szubsztrátot kezeltünk, hogy a későbbi vizsgálatok során elegendő felületkezelt lapkával rendelkezünk. A felületkezelés során 20 mm/s-os pásztázó sebességgel, 0,4 mm-es lézerfolt átmérővel és 0,3 mm-es sávközzel dolgoztunk és a szubsztrátok teljes felületét kezeltük.

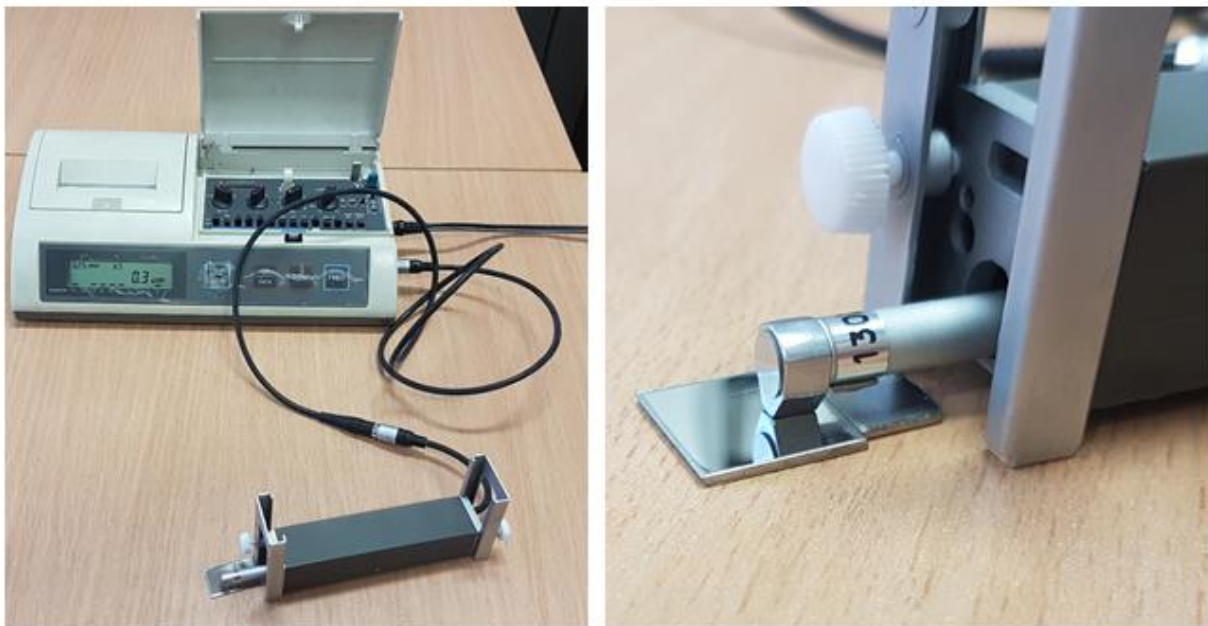


30. ábra: A kezelt szubsztrátok

A 30. ábrán jól látható, hogy a magasabb teljesítmény szinten kezelt szubsztrátok szélén kicsi elszíneződések alakultak ki, ez elsősorban annak köszönhető, hogy a pásztázási sebesség nem tökéletesen egyenletes. Ugyanis a munkaasztal mozgása az egyes irányváltások és megállások előtt lelassul, így az ekkor besugárzott részek a többi résznél hosszabb ideig kaptak lézeres felületkezelést. Ez a jelenség azonban nem befolyásolja érdemben a vizsgálatainkat, mert a forrasanyagot a lapkák középső részén helyeztem el, ahol a lézerrel bevitt teljesítmény még egyformának.

2.5. Felületi érdességmérés

A felületi érdességet legegyszerűbben felületérdesség-mérő műszer segítségével határozhatjuk meg. Mégpedig úgy, hogy a műszer nagyon kis lekerekítési sugarú tapintó érzékelőjét végig vezetjük a felületen. A vizsgálatoknál használt, kezeletlen és a lézeres felületkezelésen átesett szubsztrátok felületi minőségének meghatározásához egy Mitutoyo Surfest 301 típusú tapintócsúcsos érdességmérőt használtam. Ezzel a mérőműszerrel a felület általános érdessége (Ra) valamint az egyenletlenség-magasság (Rz) mérhető le. Ezek pontos jelentését a 2.2.5. fejezetben már ismertettem.



31. ábra: A szubsztrátok felületének érdességmérése

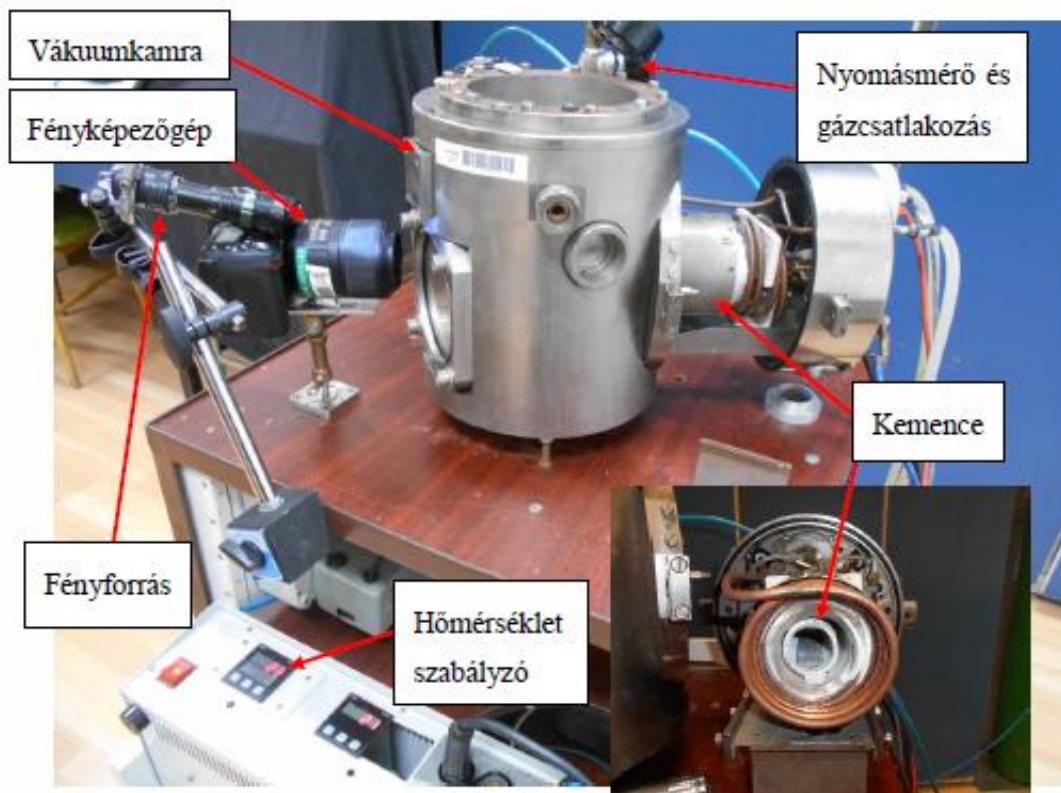
A méréseket $n = 5 \text{ mm}$ mérési úthossz és $\lambda_c = 0,25 \text{ mm}$ „cut off” értékek mellett végeztem el. Az eredmények kiértékelésével bizonyossá vált, hogy az előzetesen elvégzett csiszolás és polírozás elérte célját, ugyanis a mérés szerint az átlagos érdesség minden lapka esetében $Ra = 0,05 \mu\text{m}$; az egyenletlenség-magasság pedig $Rz = 0,3 \mu\text{m}$. Ebből levonható az a következtetés, hogy a lézeres felületkezelés nem befolyásolta mérhetően a szubsztrátok felületének érdességét valamint, hogy a felületek csiszolása és polírozása megfelelő volt.

Fontos azonban megjegyezni, hogy a mért értékek elég közel esnek a mérőműszer alsó méréshatárához, ezért az érdességek között valójában lehetnek minimális eltérések, de ezek bőven kívül esnek azon a tartományon, amely jelentősen befolyásolná a peremszög mérést.

2.6. A peremszögmérő berendezés főbb részei [10][29]

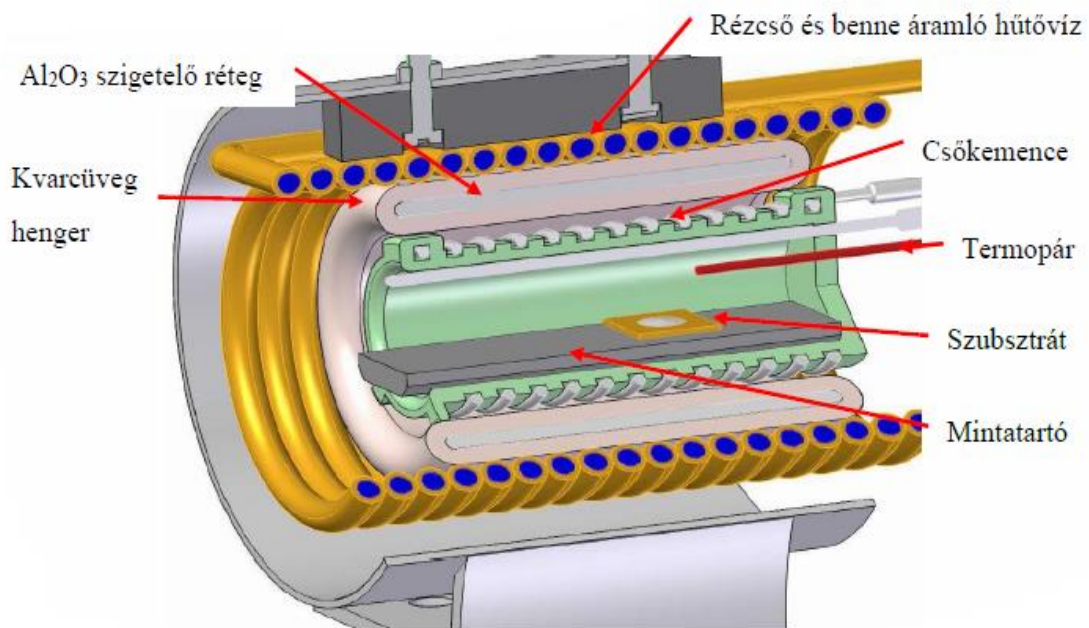
A nedvesítési tulajdonságok méréséhez olyan berendezés szükséges, amellyel magas hőmérsékleten is tanulmányozhatók a kerámiák és fémolvadékok. Ugyanis egyes mérések során a berendezésnek 1200°C-os hőmérsékletet is el kell viselnie. Azonban méréseim során, lágyforrasztó anyagok szétterülését vizsgáltam, így a forrasztó megolvadásához ennél jóval alacsonyabb 220-300°C hőmérséklet is elegendő volt.

A mérőgép fő egysége egy vákuumkamra, amely korábban egy elektronmikroszkóp része volt. Erre azért van szükség, mert egyes peremszög méréseket csak inert atmoszférában lehet elvégezni, így a mérőberendezésnek vákuumozhatónak kell lennie, amihez természetesen nagyon jól tömítő szigetelésre is szükség van. A méréseimhez használt kamrában, körülbelül 2 mbar-os vákuum hozható létre, a kamrához csatlakoztatott háromfázisú rotációs szivattyú segítségével. A vákuum létrehozása után, a minta környezete rotaméter segítségével tetszőleges gázzal vagy gázkeverékkel tölthető fel. Az én vizsgálataim során azonban a mérőgépnek ezt a funkcióját nem használtam ki, mert a forrasztóanyagként használt forrasztó már tartalmaz oxidáció ellen védő folyasztozszert.



32. ábra: A peremszögmérő berendezés részei; *Forrás: [A29]*

A vizsgálatokhoz kellően magas hőmérsékletről egy elektromos, ellenállás-fűtésű csőkemence gondoskodik, melynek fűtőszála 1,4 mm-es átmérőjű kantálból (FeCrAlCo) készült. A kemence vezérléséért pedig egy HAGA KD48D2 típusú szabályzó felel, amely a kamra hőmérsékletének kijelzésére is alkalmas. A kemence hőmérsékletének mérése egy szilikon köpenyszigeteléssel, teflon érszigeteléssel és árnyékoló fémharisnyával ellátott valamint kompenzációs vezetékkel toldalékolt, N-típusú (NiCrSi-NiSi) köpenyhőelem használatával valósul meg. A szabályzó használatával a kemence pár fokos hőmérséklet kilengéssel körülbelül 3-4 perc alatt felfűthető a kívánt hőmérsékletre. A szabályzóval egyébként állítható a fűtési teljesítmény is, de az optimális felfűtés érdekében a berendezést önszabályzó üzemmódban használtam. A magasabb hőmérséklet tartományokban fontos, hogy felügyeljük, a korlátozott hőállósággal rendelkező gumitömítések épségét. Erre a célra egy, a kemencén kívül, a kamra falánál elhelyezett hőmérsékletérzékelő áll rendelkezésre.



33. ábra: A csőkemence és szigetelése CAD modellben; *Forrás: [A30][A31]*

A kamra teljes térfogatának felfűtése, túl sok energiát venne igénybe, valamint nem tenne jót a berendezés alkatrészeinek sem, továbbá a mérésekhez kizárólag a minta közelében van szükség magas hőmérsékletre, ezért fontos a kemence hőjének koncentrációja. Ennek megfelelően a csőkemence által előállított hőt egy AL₂O₃-al kibélelt, vákuumozott, duplafalú kvarcüveg szigetelés tartja a mintatartó és a szubsztrát közelében. A kamra csőkemencén kívüli részének hűtéséről pedig a szigetelést körbe vevő rézcsőben áramló hűtővíz gondoskodik. A szigetelésnek és a hűtésnek köszönhetően a minta közelében létrehozható magas hőmérséklet úgy is, hogy a kamra további részében a hőmérséklet alacsony marad.

A mintákról a vizsgálóüvegen keresztül készítettem fényképeket, amelyekből a későbbi kiértékelés során meghatároztam a nedvesítési peremszögeket. A fényképek egy Nikon D90 típusú fényképezőgéppel készültek, amely makró objektívvel (AF-S DX Micro NIKKOR 85 mm f/3.5G ED VR) volt felszerelve. A 12,3 megapixel és a makró objektív segítségével lehetőségem volt nagy felbontású képek készítésére a vizsgálandó csepről, továbbá a kamerára fényforrás is volt erősítve, a megfelelő fényviszonyok biztosítása érdekében Mindezekre azért volt szükség, mert a nagy felbontású és jó minőségű képek megbízhatóbban értékelhetőek ki.

2.7. A nedvesítési peremszögmérési vizsgálat

A mérési eredmények kiértékelhetőségének érdekében kiemelten fontos, hogy a mérés folyamata ne változzon az egyes szubsztrátok esetében.

2.7.1. Előkészítés

A mérés végrehajtásának előkészületi lépéseként, a mérés előtt legalább fél órával kivettem a forraszpasztát a hűtőszekrényből, hogy a mérésre szobahőmérsékletűre melegedjen. Majd közvetlenül a paszta használata előtt alaposan összekeverem azt. Továbbá a peremszögmérési vizsgálat előkészítésébe tartozik a szubsztrátok előkészítése és lézeres felületkezelése is. Ezeket azonban már ismertettem a 3.3. és a 3.4. fejezetben.

2.7.2. Forraszpaszta felvitele

A peremszög mérés hatékonysága érdekében elengedhetetlen, hogy a szubsztrátokon végrehajtott lézeres felületkezelés teljesítményén kívül, a forrasztás semmilyen paramétere ne változzon az egyes mérések között. Ennek megfelelően gondoskodnunk kell arról, hogy minden szubsztrátra ugyanannyi forraszpaszta kerüljön. Ezt két egyszerű eszköz használatával oldottam meg. Az egyik eszköz, egy lapkatartó segítségével a lapkát stabil helyzetben pozicionáltam, majd egy 2mm vastag, furattal ellátott acéllemezt ráhelyezve rögzítettem. A két eszköz úgy van kialakítva, hogy illeszkedésükkor a lemez furata a rögzített szubsztrát közepére essen. A forraszpasztát ezután behelyeztem, a lemez furatába, gondosan ügyelve arra, hogy a furatot teljesen kitöltse, de ne türemkedjen ki belőle. Ezután a furatos lemezt óvatosan eltávolítottam a szubsztrát felületétől úgy, hogy a forraszpaszta a szubsztráton maradjon. Ezenfelül egy precíziós mérleg segítségével ellenőriztem, hogy minden szubsztrát felületére ugyanannyi forraszpaszta kerüljön. Ehhez a szubsztrátok tömegét a forraszpaszta felhelyezése előtt és után is lemértem és a kettő különbségéből megállapítottam a felhelyezett paszta tömegét.



34. ábra: A forraszpaszta felviteléhez használt eszközök használat közben

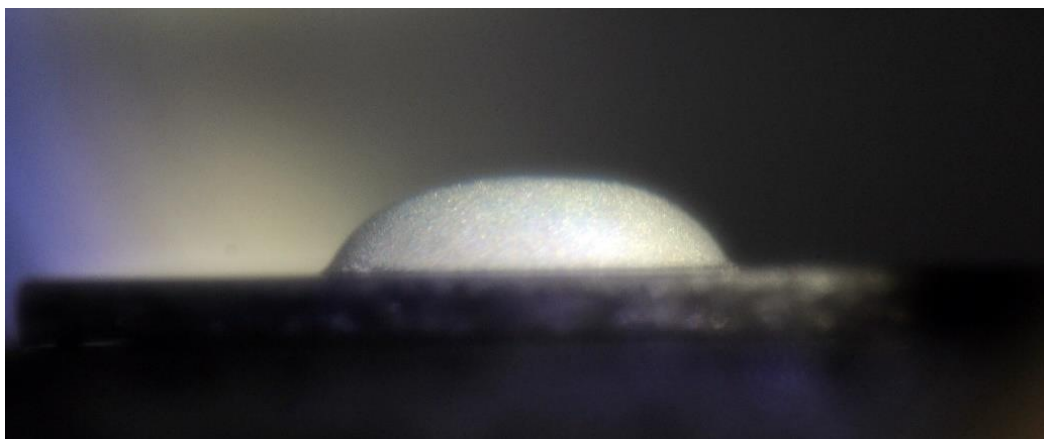
	Üres szubsztrát tömege [g]	Forraszpasztás szubsztrát tömege [g]	Forraszanyag tömege [g]	Forrasztott lapka tömege [g]	Elpárolgott tömeg [g]
1	1,6973	1,8231	0,1258	1,8186	0,0045
2	1,9874	2,1135	0,1261	2,1082	0,0053
3	2,005	2,1194	0,1144	2,1147	0,0047
4	1,9748	2,0936	0,1188	2,0888	0,0048
5	1,9482	2,0667	0,1185	2,0618	0,0049
6	2,0292	2,1441	0,1149	2,14	0,0041
7	1,9867	2,1079	0,1212	2,1031	0,0048
8	1,9766	2,0989	0,1223	2,0943	0,0046
9	1,9502	2,0679	0,1177	2,0636	0,0043
10	1,6674	1,7867	0,1193	1,7806	0,0061
11	2,0068	2,128	0,1212	2,1222	0,0058
12	2,0166	2,1393	0,1227	2,1343	0,005
13	1,9642	2,0886	0,1244	2,0834	0,0052
14	1,7994	1,9137	0,1143	1,9085	0,0052
15	1,9975	2,1257	0,1282	2,12	0,0057

4. táblázat: Az egyes méréseknél használt forraszpaszta tömege

A mérések átlaga 0,121g, szórása pedig csak 0,00436g, amely mutatja, hogy az egyes szubsztrátokra felvitt forraszpaszta tömegek nagyon kicsi eltérést mutatnak, tehát a mérést nem torzítják nagymértékben. A táblázat utolsó két oszlopára a későbbiekben lesz szükség.

2.7.1. Nedvesítési vizsgálat elvégzése

A forraszpaszta szubsztrátra helyezése után a lapkát a felvitt forraszanyaggal együtt a berendezés mintatartójára helyeztem, majd a mintatartót a forraszanyagos lapkával együtt a csőkemencébe tettem, gondosan ügyelve a mintatartó vízszintességére.

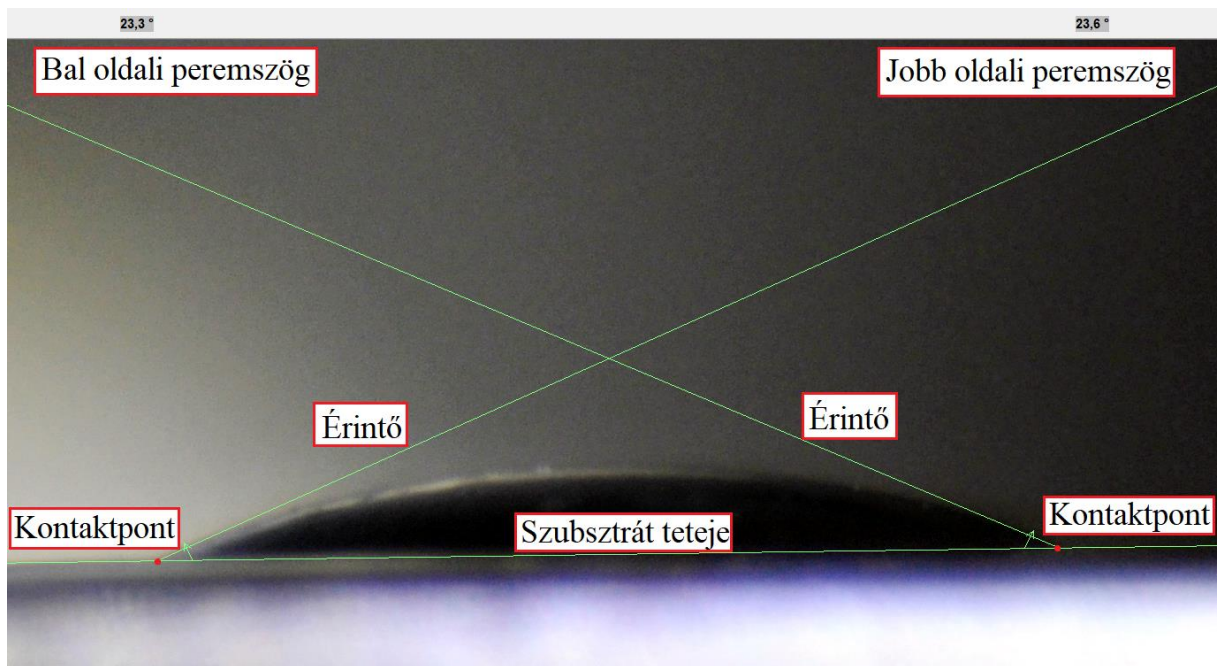


35. ábra: A forraszpaszta a szubsztráton a kemence belsejében

Ezután a kemencét fokozatosan felfűtöttem a kívánt hőmérsékletre (250°C), amelyen a forraszpaszta egy pillanat alatt megolvad. Majd körülbelül fél perccel az olvadás után elkészítettem a fényképeket, amelyeken később a kiértékelést elvégeztem. Ezt követően a kemencét lekapcsolva megvártam, hogy lehűljön. Amint ez megtörtént, a lapkát kivettem a mintatartóból és újra lemértem a tömegét, hogy meghatározhassam a forrasztás során elpárolgott forraszanyag tömegét is, ezek az adatok a 4. táblázat utolsó két oszlopában láthatóak. Az elpárolgott tömeg átlaga $0,005\text{g}$, szórása pedig csak $0,000561\text{g}$, tehát viszonylag állandó a mérés során. Végezetül a mintadarabokat felcímkézve kis zacskókban eltároltam későbbi összehasonlításokhoz és mérésekhez.

2.7.1. Vizsgálati eredmények kiértékelése

A forraszanyagos szubsztrátról készült fényképek közül kiválasztottam a legjobbat és számítógépen egy segédprogram segítségével ezt értékeltem ki. A program segítségével a készített képen kijelöltem a forraszanyag két kontaktpontját, amely két kontaktpont meghatározza a szubsztrát tetejét jelentő egyenest. Majd a két kontaktpontból érintőt húztam a forraszanyag kontúrvonalára. Ezen behúzott érintők és a korábban meghatározott, szubsztrát tetejét jelző egyenes által bezárt belső szögek a nedvesítési peremszögek. Ezeket a szögeket a program kiírja és elmenti egy szöveges, .txt kiterjesztésű fájlba.

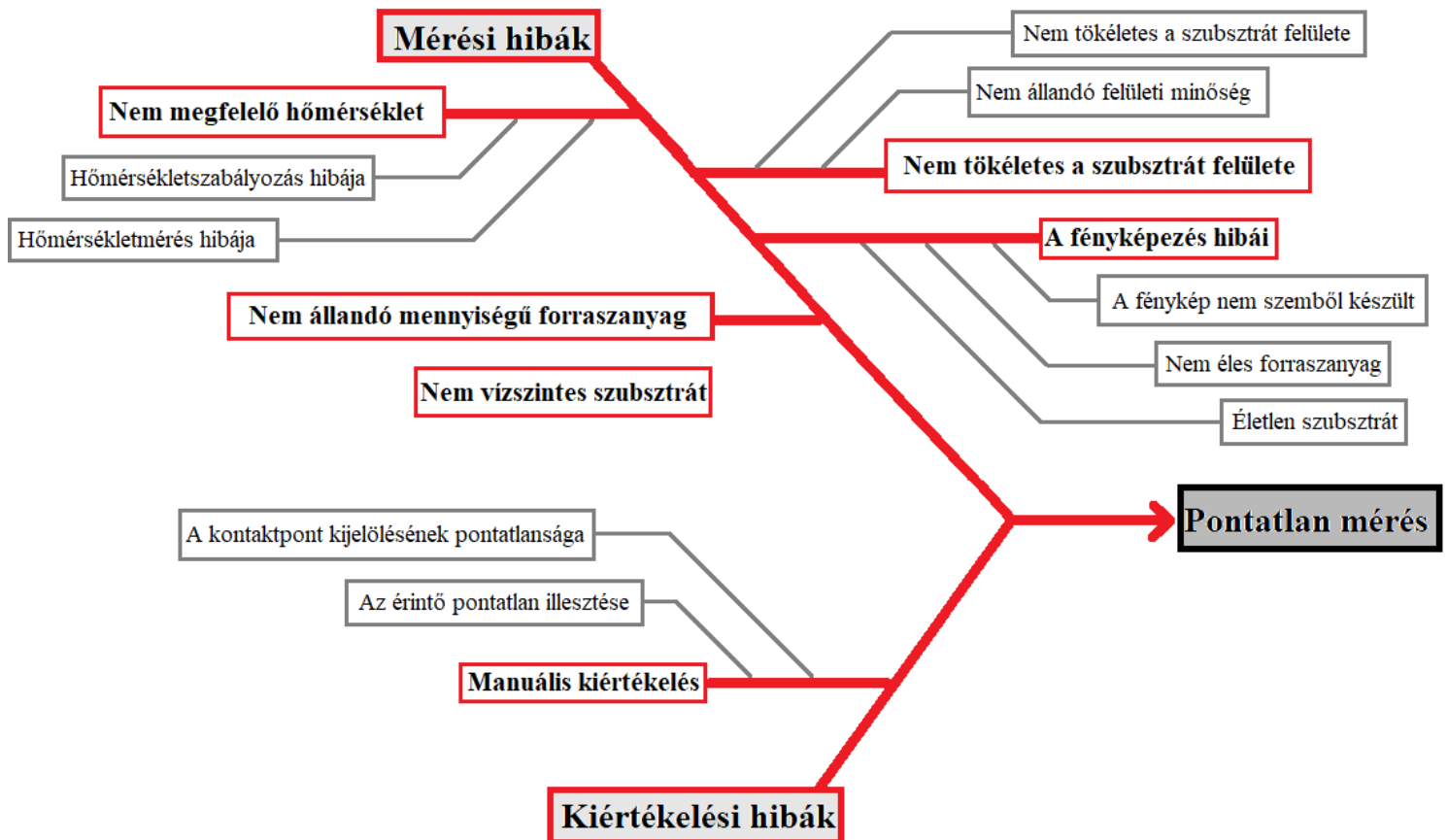


36. ábra: A számítógépes kiértékelés segédprogrammal

Egy szubsztrát esetén a mérést ötször végeztem el, a mérési hibák csökkentése érdekében, és mivel egy teljesítménnyel három lapkát kezeltünk, így egy teljesítményszinthez 45 bal és 45 jobb oldali peremszög érték állt rendelkezésemre. Ezeket az értékeket táblázatban összegeztem és átlagoltam.

2.8. A mérés fő hibái [29]

Minden mérés hibával terhelt és ez a megállapítás igaz az általam végzett peremszög mérési sorozatra is. Ennél a vizsgálatnál a hibákat mérési és kiértékelési hibákra oszthatjuk szét. A mérési hibák a mérőberendezés hibáiból és a mérési folyamat tökéletlenségéből fakadnak. Míg a kiértékelési hibák a kiértékelés pontatlanságából és annak reprodukálhatatlanságából erednek. A hibákat a 31. ábrán látható Ishikawa-diagramban ábrázoltam.



37. ábra: A mérés hibáinak Ishikawa-diagramja

A nem vízszintesen elhelyezett szubsztrát okozza az egyik legkellemetlenebb mérési hibát. Ugyanis emiatt a forrasztás nem tökéletesen kör alakban terül el és így a különböző irányokból különböző peremszög értékeket mérhetünk, ami torzítja a mérési eredményeket.

A mérés egy másik hibája a nem állandó forrasztóanyag mennyiség. Ezzel az a probléma, hogy a forrasztóanyag mennyisége és a mérhető peremszög között összefüggés van, tehát az ingadozó forrasztóanyag mennyiség is torzítja a mérést.

További gondot okozhat a szubsztrát felületének tökéletlensége, amely többek között a nem tökéletes csiszolásra és polírozásra vezethető vissza. Ugyanis ahogy azt már korábban a 2.2.5. fejezetben is bemutattam, a szubsztrát felületének érdessége befolyásolja az adott felület nedvesedési tulajdonságait és a felület érdessége elsősorban ezektől, valamint a lézeres felületkezelés paramétereitől függ. Ezenkívül a felületen található szennyeződések, elsősorban zsírok és olajok is befolyásolhatják a vizsgálat eredményét, tehát károsak a mérésre.

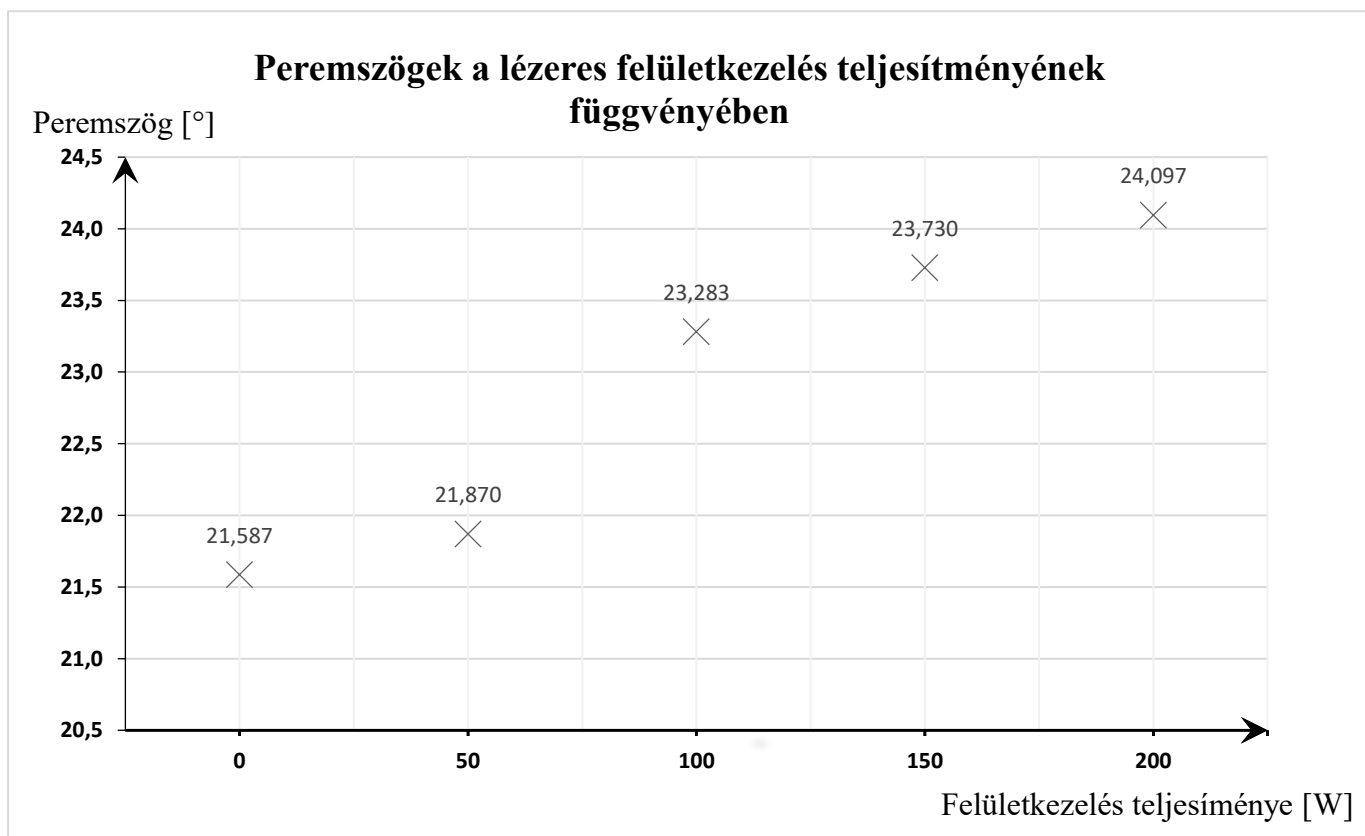
A mérési hibák egy másik jelentős része a nem megfelelő, általában túl magas hőmérsékletre vezethető vissza. Ennek a hibatípusnak két forrása van. Ezek közül az egyik a hőmérsékletmérésből fakad és azért lép fel, mert a kemencében található hőmérő a szubsztrátnál kicsit feljebb kapott helyet, így a hőáramlás miatt mindig magasabb hőmérsékletet fog mérni, mint amennyi a szubsztrát felületén valójában van. A hőmérsékletre visszavezethető hibák másik forrása a kemence szabályozásából ered. Ugyanis ez a berendezés, a nem fokozatos hőmérsékletemelést nem tudja lekövetni így nagyobb hőmérsékletugrások esetén előfordul, hogy a kemence a kívánt hőmérséklet fölé melegszik. Ebben az esetben a forrasztópasztában található folyasztószer nem megfelelően terül szét és esetleg meg is ég, ami miatt nem tudja tökéletesen ellátni feladatát és nem javítja, sőt akár rontja a nedvesítési tulajdonságokat.

A mérési folyamat során készített fényképek minősége alapjaiban határozza meg a kiértékelés pontosságát. Nem elegendő ugyanis, ha a szubsztrát vízszintben van, a fényképezőgépet is vízszintesen kell tartani/rögzíteni ahhoz, hogy szögek a lehető legpontosabban látszanak. Továbbá a kép elkészültekor a szubsztrát látható élének és a csepp kontúrjának élesnek kell lennie, kontúrponatok és érintők meghatározásához. Ezen felül fontos, hogy fényképezőgép a szubsztrátot pont szemből nézze, ugyanis ha a géppel a szubsztrát tetejére látunk rá, vagy esetleg alulról fotózzuk azt, akkor nem a valódi peremszög fog látszani.

A kiértékelés hibája az emberi tényezőtől való függésében rejlik, ugyan tökéletes kép esetén, sokkal kisebb mértékben, mint a rossz minőségű képnél, de mindig megjelenik valamilyen mértékű szórás a mért értékek között. Ez arra vezethető vissza, hogy a kontaktpontok helyének és az érintők szögeinek pontossága, kizárólag a kiértékelő személy pontosságán múlik.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Ahogy az a szakirodalom kutatás alapján várható volt, a mérések alapján megállapítható, hogy a szubsztrát felületén elvégzett lézeres felületkezelés, a CO₂ lézerekre jellemzően, kismértékben rontja a szubsztrát nedvesedési tulajdonságait. Ugyanis a rajta elterült forraszanyag nedvesítési peremszöge egyenes arányban növekszik a lézeres felületkezelés során bevitt teljesítménnyel. Ez a hatás azonban minimális, mert a változás közel van a mérés bizonytalanságához. Az egyes teljesítményszintekhez tartozó átlagolt nedvesítési peremszög értékek a 38. ábrán láthatóak.



38. ábra: A forraszanyag peremszögének változása a lézeres felületkezelés teljesítményének függvényében

Vizsgálataim eredményeit összehasonlítottam a korábbi kutatások során lézerkezelésen átesett réz szubsztrátok nedvesedési peremszög vizsgálatainak 27. ábrán látható eredményeivel. Fontos azonban, hogy a két mérés során különbözött az alapanyag és a felhasznált lézer típusa is. A kapott eredmények alapján a különböző lézerekkel végzett felületkezelés eltérő hatást mutat a nedvesedési peremszög alakulására acél és réz szubsztrátokon. A korábbi vizsgálatoknál a réz mintadarabokon nagymértékű változás történik a teljesítmény szintek változtatásával, kezdetben növekszik, majd egy határt elérve csökkenni kezd a peremszög értéke. Ezzel szemben, az általam elvégzett vizsgálatok során növekvő teljesítményszintek esetén a peremszög értékek is növekedést mutatnak. A továbbiakban szeretném kiterjeszteni a vizsgálataimat az acél alapanyag Nd:YAG lézerrel való felületkezelésére és nedvesedés vizsgálatára is.

4. ÁBRAJEGYZÉK

- [A1] http://cms.sulinet.hu/get/d/e8a88860-046d-4ad5-bac3-776be9d946fb/1/7/b/Large/nagy%C3%ADtott_m_965_k%C3%B6t%C3%A9sek%20t%C3%ADpusai.jpg
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A2] <http://www.cu-technik.hu/gallery/product/240x240/688/3136190579.jpg>
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A3] <http://www.rpelectronics.com/Media/400/wes51.jpg> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A4] https://3.bp.blogspot.com/-TBd5RLGkNzo/VwZm3E1ibxI/AAAAAAAAABqQ/lbbZYXyi41U80Xq4-URz3U19_93wBerNw/s1600/brazing.JPG (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A5] https://www.kruss.de/fileadmin/_processed_/csm_ext_soldering_electronic_628x412_09fe2af490.jpg (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A6] Markovits Tamás: Alumíniumötvözetek CO₂ lézeres forrasztása: Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki Kar, 2004. p.20.
- [A7] http://pctrs.network.hu/clubpicture/1/2/_molnarka_102368_41119_n.jpg
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A8] <http://www.doityourselfguttercovers.com/images/surface-tension-floating-coin.jpg>
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A9] <https://napocska.hu/uploads/2016/07/buborek2.jpg> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A10] http://cms.sulinet.hu/get/d/06e913e6-00fd-4ba0-a51b-5276a9b84028/1/4/b/Large/172-2_a%20fel%C3%BCleti%20fesz%C3%BClts%C3%A9g%20kialakul%C3%A1sa.jpg
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A11] Weltsch Zoltán: Nedvesedési jelenségek vizsgálata Ag-alapú olvadékok és kerámiák között a járműipari kötéstechológiák megalapozásához: Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére. Budapest: Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2013. p.15.
- [A12] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e4/Contact_angle.svg/400px-Contact_angle.svg.png (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A13] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/dd/Wetting.svg/2000px-Wetting.svg.png> (Letöltési dátum: 2017.10.29)

- [A14] Korózs József: Gravitáció hatása a strukturált és heterogén felületek nedvesíthetőségére: Szakdolgozat. Miskolc: Miskolci egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar, 2015. p.12.
- [A15] Weltsch Zoltán: Nedvesedési jelenségek vizsgálata Ag-alapú olvadékok és kerámiák között a járműipari kötéstechológiák megalapozásához: Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére. Budapest: Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2013. p.18.
- [A16] Verőné Wojtaszek, Malgorzata: Fotointerpretáció és távérzékelés 3.: A lézer alapú távérzékelés. Székesfehérvár: Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010. p.2.
- [A17] Verőné Wojtaszek, Malgorzata: Fotointerpretáció és távérzékelés 3.: A lézer alapú távérzékelés. Székesfehérvár: Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010. p.3.
- [A18] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés: A lézer alapú távérzékelés. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-egyesület, 2007. p.14. ISBN 973-8231-66-3
- [A19] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés: A lézer alapú távérzékelés. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-egyesület, 2007. p.35. ISBN 973-8231-66-3
- [A20] http://www.stt-inc.com/images/lisi/laser_2.gif (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A21] Búza Gábor: Lézersugaras technológiák I. Tatabánya: EDUTUS Főiskola, 2012. p.7.
- [A22] Búza Gábor: Lézersugaras technológiák I. Tatabánya: EDUTUS Főiskola, 2012. p.9.
- [A23] Lawrence, Jonathan, Lin Li: Wettability characteristics of a mild steel modified with CO₂, Nd:YAG, excimer and high power diode lasers. Manchester: Manufacturing Division, Department of Mechanical Engineering, University of Manchester, Institute of Science and Technology, 1999. p.14. M60 1QD, UK
- [A24] Jing Jia Liang: Wettability Studies of Laser-Treated Materials: A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Master of Philosophy. Manchester: University of Manchester, 2013. p.54.
- [A25] Berczeli Miklós: Lágyszerasztott kötések javítása megelőző lézeres felületkezeléssel: TDK dolgozat. Budapest: Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2014. p. 66.
- [A26] <http://www.constam.ro/wp-content/uploads/2013/11/DSC06573-site.jpg> (Letöltési dátum: 2017.10.29)

- [A27] <http://www.szjushi.com.img.800cdn.com/Uploads/59b7448679995.jpg>
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A28] <https://www.intechopen.com/source/html/18849/media/image5.jpeg>
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [A29] Berczeli Miklós: Lágyszerkezetek javítása megelőző lézeres felületkezeléssel: TDK dolgozat. Budapest: Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2014. p 51.
- [A30] Weltsch Zoltán: Nedvesedési jelenségek vizsgálata Ag-alapú olvadékok és kerámiák között a járműipari kötéstechológiák megalapozásához: Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére. Budapest: Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2013. p.49.
- [A31] Berczeli Miklós: Lágyszerkezetek javítása megelőző lézeres felületkezeléssel: TDK dolgozat. Budapest: Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2014. p 53.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/konnyuipar/muszaki-rajz/csavarok-es-szegecsek/a-kotesek-csoportositasa> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [2] Halmai Attila: Finommechanikai elemek. Tatabánya: EDUTUS Főiskola, 2012. p.17-25.
- [3] Beckert, M., Neumann, A.: Forrasztás. Budapest: Műszaki könyvkiadó,1974. ISBN 963-10-0418-X – Hivatkozva: [7]
- [4] Szabó László: Forgácsolás, hegesztés. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2000. (2.4. fejezet) <http://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forgacs.htm> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [5] <http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/faipar/gepeszeti-ismeretek/forrasztas/kemeny-es-lagyforrasztas> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [6] Balogh István, Fábíán Enikő Réka, Verő Balázs: Keményforrasztás-anyagok előállításának újabb lehetőségei. In: Fiatal műszakiak tudományos ülészsaka, 2002. március 22-23. p. 51.
- [7] Markovits Tamás: Alumíniumötvözetek CO₂ lézeres forrasztása: Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki Kar, 2004. p.10; 15; 17-20; 24-27;
- [8] Seppo Louhenkilpi, Verő Balázs: Anyagtudományi folyamatszimuláció: Diffúziós folyamatok modellezése. Helsinki: Aalto University, 2011. (1. lecke) http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0036_AFSZ_diffuzios_folyamatok_modellezese/1_lecke.html (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [9] Szántó Jenő: Javítástechnológia (Károsodás-elmélet). 2013. (10.3. fejezet) http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_javitastechnologia_karosodas_elmelet/10_3_a_feluleti_feszultseg_hatasa.html (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [10] Weltsch Zoltán: Nedvesedési jelenségek vizsgálata Ag-alapú olvadékok és kerámiák között a járműipari kötéstechológiák megalapozásához: Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére. Budapest: Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2013. p.8; 12-18; 35-37; 40-42; 48-50; 57.
- [11] Gombos Béla: Hidrológia – hidraulika. Gödöllő: Szent István Egyetem, 2011. p. 118-121.
- [12] László Krisztina: Felületek fizikai kémiája. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, 2011. ISBN 333-333-4444-22-1 – Hivatkozva: [10]

- [13] <http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/vegyipar/fizikai-kemia/a-folyadekok/a-feluleti-feszultseg-fogalma-a-feluleti-feszultseget-befolyasolo-tenyezok>
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [14] Kubiak, J. Krzysztof, Wilson, C.T. Mark, Mathia G. Thomas, Carval, Ph.: Wettability versus roughness of engineering surfaces. In: Wear, 2011. Vol. 271, Iss.3-4. p. 523-525.
- [15] Korózs József: Gravitáció hatása a strukturált és heterogén felületek nedvesíthetőségére: Szakdolgozat. Miskolc: Miskolci egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar, 2015. p.12-13.
- [16] <http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/mezogazdasag/muszaki-alapismeretek/feluleti-erdesseg/feluleti-erdesseg-es-jelolese> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [17] Wenzel, N. Robert: Resistance of solid surfaces to wetting by water. In: Industrial & Engineering Chemistry, 1936, Vol. 28, No. 8. p. 988
- [18] Verőné Wojtaszek, Malgorzata: Fotointerpretáció és távérzékelés 3.: A lézer alapú távérzékelés. Székesfehérvár: Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010. p. 1-3.
- [19] <http://precitrack.com/tudasbazis/lezer-technologia/> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [20] Buza Gábor: Lézersugár, mint az anyagmegmunkáló technológiák új szerszáma. In: Fiatal műszakiak tudományos ülészaka XIX, 2014. március 20-21. p. 26-29.
- [21] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés: A lézer alapú távérzékelés. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-egyesület, 2007. p.25; 33-36. ISBN 973-8231-66-3
- [22] http://www.dunaferr.hu/documents/hun/aceltermekek-ertesitese/aceltermekek/hidegen_heng.pdf (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [23] <http://www.senju-m.co.jp/en/product/ecosolder/> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [24] <http://www.ferropont.hu/hasznos-infok/accel-minosegek> (Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [25] <http://mti.kvk.uni-obuda.hu/adat/tananyag/eltech/szereles-elm.pdf>
(Letöltési dátum: 2017.10.29)
- [26] Hlinka József, Berczeli Miklós, Búza Gábor, Weltsch Zoltán: Wetting properties of Nd:YAG laser treated copper. In: SAC solders Soldering & Surface Mount Technology, 2017. Vol. 29, Iss. 2. p. 69-74.
- [27] Zhao, Z., Wang, C., Li, M., Wang, L. and Kong, L.:The effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation on surface energy of copper. In: Applied Surface Science, 2006. Vol. 252 No. 12, p. 4257-4263.

- [28] Lawrence, Jonathan, Lin Li: Wettability characteristics of a mild steel modified with CO₂, Nd:YAG, excimer and high power diode lasers. Manchester: Manufacturing Division, Department of Mechanical Engineering, University of Manchester, Institute of Science and Technology, 1999. p. 1-11. M60 1QD, UK
- [29] Berczeli Miklós: Lágyszerasztott kötések javítása megelőző lézeres felületkezeléssel: TDK dolgozat. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki kar, 2014. p. 51-59.
- [30] Jing Jia Liang: Wettability Studies of Laser-Treated Materials: A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Master of Philosophy. Manchester: University of Manchester, 2013. p. 53-57.
- [31] Keszte Róbert: A lézeres vágás továbbfejlesztése és folyamatdiagnosztikája: Doktori értekezés. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki Kar, 1999. – Hivatkozva: [7]
- [32] Kálazi Zoltán: A CO₂ lézeres lemezvágás vizsgálata: Doktori értekezés. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki Kar, 1995. – Hivatkozva: [7]