



Neumann János Egyetem
GAMF Műszaki és Informatikai Kar
Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

Ragasztott kötések húzószilárdságának fejlesztése világrekord szintre

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

Szerző:

Körömi Benjámin Márk

IV. Évfolyamos járműmérnök hallgató

Témavezető:

Dr. Berczeli Miklós

Adjunktus

Kecskemét

2023

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS.....	3
2.	IRODALMI ÁTTEKINTŐ	4
2.1.	AZ ACÉL LEGFŐBB TULAJDONSÁGAI.....	4
2.2.	A RAGASZTÁS ÁLTALÁNOS JELLEMZŐI.....	5
2.2.1.	<i>A ragasztott kötés előnyei, hátrányai.....</i>	<i>5</i>
2.3.	A RAGASZTÁS KÖTÉSI MECHANIZMUSAI.....	7
2.4.	A FELÜLETI ENERGIA MEGHATÁROZÁSA	9
2.4.1.	<i>A nyugvócsepp módszerrel történő peremszög mérés folyamata.....</i>	<i>9</i>
2.4.2.	<i>A felületi energia meghatározásának módszerei</i>	<i>10</i>
2.5.	NAGYSZILÁRDSÁGÚ RAGASZTÓK	14
2.6.	A NAGYSZILÁRDSÁGÚ-, SZERKEZETI RAGASZTÓK INNOVÁCIÓJÁNAK FELTÉRKÉPEZÉSE	15
2.7.	A LEGERŐSEBB RAGASZTOTT KÖTÉS JELENLEGI VILÁGREKORDJÁNAK ISMERTETÉSE.....	16
3.	A KUTATÁSOM CÉLKITŰZÉSEI.....	18
4.	FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK, MÓDSZEREK	19
4.1.	A KUTATÁSHOZ HASZNÁLT ACÉL	19
4.2.	A KUTATÁSHOZ HASZNÁLT RAGASZTÓANYAG	19
4.3.	A RAGASZTOTT PRÓBATESTEK ELKÉSZÍTÉSÉHEZ TERVEZETT KÖZPONTOSÍTÓ KÉSZÜLÉK	20
4.4.	ALKALMAZOTT FELÜLETKEZELÉSI MÓDSZEREK.....	21
4.4.1.	<i>Esztergált-alkohollal tisztított felület.....</i>	<i>21</i>
4.4.2.	<i>Esztergált-, homokszórt és alkohollal tisztított felület</i>	<i>21</i>
4.4.3.	<i>Esztergált-, homokszórt-, alkohollal tisztított és plazmasugárral kezelt felület.....</i>	<i>22</i>
4.5.	KUTATÁS SORÁN ALKALMAZOTT FELÜLETKEZELÉSI-, VIZSGÁLATI- ESZKÖZÖK, SZABVÁNYOK	22
4.5.1.	<i>Olympus LEXT OLS5000 Konfokális lézer pásztázó mérőmikroszkóp.....</i>	<i>22</i>
4.5.2.	<i>ZEISS Sigma 300 VP pásztázó elektronmikroszkóp</i>	<i>22</i>
4.5.3.	<i>Nyugvócsepp módszeres peremszög mérési rendszer.....</i>	<i>23</i>
4.5.4.	<i>Plasmatreat FG5001 plazmasugaras felületkezelő berendezés.....</i>	<i>25</i>
4.5.5.	<i>INSTRON 5900R 4482 univerzális mechanikai anyagvizsgáló gép</i>	<i>26</i>
4.5.6.	<i>Húzóvizsgálatra, próbatestekre vonatkozó egyedi kialakítás</i>	<i>26</i>
5.	EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA, KIÉRTÉKELÉSE	28
5.1.	RAGASZTOTT KÖTÉSEK SZILÁRDSÁGI EREDMÉNYEINEK ISMERTETÉSE.....	28
5.1.1.	<i>A hőkezelés időtartamának és hőmérsékletének hatása a szilárdságra.....</i>	<i>28</i>
5.1.2.	<i>Az optimális felületkezeléssel és hőkezelési technológiával elért legnagyobb szilárdságok</i>	<i>29</i>
5.1.3.	<i>A ragasztott kötések állandó terhelésen tartásának vizsgálata</i>	<i>30</i>
5.2.	EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE ÉS MEGVITATÁSA A FELÜLETI MÉRÉSEK FÜGGVÉNYÉBEN.....	31
5.2.1.	<i>Felületek érdességmérésének eredményei</i>	<i>31</i>
5.2.2.	<i>Nedvesítőképesség- és felületi energia mérések</i>	<i>32</i>
5.2.3.	<i>Felületek elektronmikroszkópiai vizsgálata.....</i>	<i>33</i>
6.	EREDMÉNYEK ÖSSZEHASZNÁLÁSA AZ IRODALOMMAL	38
7.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	39
8.	KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS	40
9.	ÁBRAJEGYZÉK	41
10.	IRODALOMJEGYZÉK.....	42

1. BEVEZETÉS

Napjaink egyre csak növekvő fogyasztótársadalma és az iparban zajló kiélezett küzdelem kettős kihívást jelent az ipar szereplői felé. Az egyre dinamikusabban változó fogyasztói preferenciák és piaci elvárások, folyamatos fejlesztésre és innovációra ösztönzik az iparágakat. A modern ipari hadviselés, arra készíti a szereplőket, hogy stratégiai lépéseket tegyenek, annak érdekében, hogy megfeleljenek a piac egyre növekvő és differenciált igényeinek.

Többek között, ennek a folyamatnak köszönhető, a ragasztás, mint kötéstechológia rendkívül dinamikus felfejlődése és alkalmazásának széleskörű elterjedése az elmúlt száz kettő évtized alatt. A ragasztást jelenleg a legkorszerűbb anyaggal záró, a felületi érdesség, miatt részben alakzáró, roncsolás nélkül nem oldható kötési technológia. Főbb előnyei közé tartozik a jó tömítőképesége, illetve a kifáradással szembeni nagyobb ellenállóképessége.

Dolgozatom elsősorban a különböző felületmódosító eljárásokkal kezelt acél felületek ragasztástechnológiájának kutatásáról és fejlesztéséről szól. A kutatómunkám kiindulásaként elvégeztem a szükséges irodalomkutatást, mely alapján meghatároztam a saját kísérleti tervemet, az elvégzendő felületkezelési és ragasztási technológiákat, valamint a mérési feladatokat. A dolgozatomban részletesen ismertetem az elvégzett mechanikai- és plazmasugaras felületkezelési technológiákat, az elkészített ragasztott húzószilárdsági próbatesteket, a kezelt felületeken mért peremszög értékeket, a felületek energiáját, a felületi érdesség méréseinek eredményeit, az elektronmikroszkópos felvételeket és elemanalíziseket, valamint a ragasztott kötések szilárdsági vizsgálatainak eredményeit. Az elvégzett méréseimet nem csupán bemutatom és szemléltetem, hanem magyarázom és meg is vitatom a kapott értékeket.

A kutatásom során motivációt a téma aktualitása és fejleszthetősége adta, hiszen az acél felületek ragasztása egy világszerte kutatott és jelenleg is kísérletek tárgyát képező technológia. Ennek megfelelően a különböző felületkezelési eljárások alkalmazásával szeretném növelni az acél ipari felhasználású ragasztástechnológiájának húzószilárdságát, hozzájárulva ezzel az innovációhoz és a technológia fejlődéséhez.

2. IRODALMI ÁTTEKINTŐ

2.1. Az acél legfőbb tulajdonságai

Az ipari forradalomtól kezdődően, egészen napjainkig számos ipari tevékenység leggazdaságosabb és legnagyobb tömegben alkalmazott alapanyaga az acél. Az acél a vas legfontosabb ötvözet, fő ötvözője, pedig a szén, melyből legfeljebb 2,06 tömegszázalékot tartalmaz. A tulajdonságai közül kiemelkedő az alakíthatósága és tartóssága, a jó szakítószilárdsága ($\approx 380-750 \text{ N/mm}^2$). Az alumíniumhoz képest magas olvadásponttal ($\approx 1450^\circ\text{C}$), nagyobb sűrűséggel ($\approx 7,85 \text{ g/cm}^3$), ellenben rosszabb hővezetési tényezővel ($\approx 50 \text{ W/mK}$) rendelkezik. Fontos megjegyezni, hogy a széntartalom mellett a különböző fajta és mennyiségű ötvözőkkel az acél számos tulajdonságát meg lehet változtatni, mint például a keménység, rugalmasság, hajlékonyság, szilárdság, hőállóság, savállóság, illetve a korróziómentesség. Többek között ilyen ötvöző a Króm (Cr), mely növeli a keménységet, kopásállóságot, meleg szilárdságot, a Volfrám (W), mely növeli a kopásállóságot, meleg szilárdságot és az éltartósságot. Továbbá a Mangán (Mn), mely képes a folyékony acélban lévő oxigén eltávolítására, kéntelenítésére, nagyobb mennyiségű alkalmazásának esetében növeli a szívósságot és a kopásállóságot, valamint a Nikkel (Ni), melynek köszönhetően csökkenthető az acélok hőtágulása, valamint növelhető a mágneses tulajdonsága, savállósága és a szívóssága [1–5].

Az acélokat jellemzően a vegyi összetételük és felhasználásuk szerint szokás csoportosítani. Vegyi összetételük szerint megkülönböztetünk ötvözetlen (szénacélok) acélokat ($\text{Mn} < 0,8\%$ és $\text{Si} < 0,5\%$), gyengén ötvözött acélokat (összes ötvöző $< 5\%$), ötvözött acélokat ($5\% < \text{összes ötvöző} < 20\%$), illetve erősen ötvözött acélokat (összes ötvöző $> 20\%$). Felhasználásuk szerint, pedig három csoportba sorolhatjuk őket, ezek a szerkezeti acélok ($\text{C}\% < 0,4-0,6\%$), a szerszámacélok ($0,4\% < \text{C}\% < 2,06\%$), valamint a különleges acélok (hőálló és korrózióálló acélok) csoportja [1,6].

Napjainkban az acélok a gépészeti anyagok legfontosabb csoportját képezik, mivel a ma ismert legkiválóbb tartószerkezeti építőanyag, akár önmagában acélszerkezetként, akár egyéb anyagokkal közösen is alkalmas a műszaki követelmények kielégítésére. Az acél az ipar más területein is az egyik legfontosabb, megkerülhetetlen alapanyagok egyike. A világ acéltermelése a 2016-os évben közel elérte az 1,7 milliárd tonnát, mely a népességre lebontva 225 kg/fő acélelőállítást jelent [3].

2.2. A ragasztás általános jellemzői

A ragasztás az egyik legmodernebb, alapvetően anyaggal záró kötés, a felületi érdekesség miatt részben alakzáró és roncsolás nélkül nem, vagy csak korlátozottan oldható kötésnek minősül. Egyaránt alkalmas a fémfelületek, fémes és nem fémes felületek, illetve a műanyagok összeillesztésének kialakítására. A ragasztott kötés a ragasztandó anyag(ok)ból, illetve a ragasztóból tevődik össze. A kötés vegyi reakció révén, szintetikus anyag jelenlétével jön létre. A ragasztott kötések széles körben való alkalmazása annak köszönhető, hogy számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek a többi technológiához képest. A legnagyobb előnye, hogy a folyamat során kevés esetben éri hőterhelés a darabot. Továbbá a ragasztóanyag rezgéscsillapító hatású a kötésben, jó a szigetelőképesége, zajcsökkentő hatással rendelkezik, jó a tömítési tulajdonsága és alacsony a gyártási költsége [1,2,7].

2.2.1. A ragasztott kötés előnyei, hátrányai

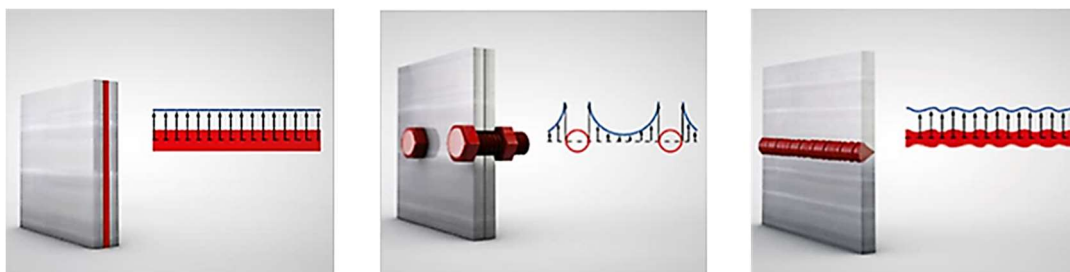
Az alábbiakban a ragasztott kötés előnyeit, illetve hátrányait ismertetem. A ragasztott kötések előnyei a következők.

Kiseb a kötésből adódó többletsúly, mint a hegesztési vagy a csavarozási eljárások esetében. Kevesebb szerkezeti elem szükséges a kötés kialakításához, nincs szükség alátétre, anyára, szegecsekre, csapokra. Egyenletes feszültségeloszlást eredményez, nincs feszültségcsúcsot kialakító furat, horony vagy egyéb megoldás. A kötni kívánt anyagok nem károsodnak, anyagtulajdonságuk nem romlik. A ragasztott alkatrész nem nyúlik, vetemedik. Lehetséges az eltérő anyagtulajdonságú darabok összeillesztése (pl.: fém, fa, műanyag, kerámia, bőr, üveg), ezek bármelyikének-bármelyikéhez való kötése. Rezgéscsillapító hatása magas. Kevésbé fontos a ragasztani kívánt alkatrészek tűrése. Az alkatrészek felületének mérete kis jelentőséggel bír, nagy felületű testek is jól ragaszthatók. A kötések létrehozása, nincs hőmérséklethez kötve. Cseppfolyós és légnemű közegek esetében a kötés kiváló tömítő és szigetelő tulajdonságú. Az illesztés esztétikusabb megjelenése, a hegesztett varratokkal, csavarokkal, szegecsekkel szemben. Továbbá beruházási és megmunkálási költsége is alacsony.

A ragasztott kötés hátrányai közé pedig a következőket soroljuk. A kötni kívánt felületek alapos előkezelést, előkészítést igényelnek a ragasztás előtt (felület tisztítása, mechanikai-, kémiai előkezelés). Magasabb hőmérséklet esetében, a kötés szilárdsága csökken. Öregedésre hajlamos, érzékeny az ultraviola sugárzásra, a levegő oxidációjára. A kikeményítés során esetleges nyomást vagy melegítést kell alkalmazni. Nagy a kivitelezési idő, meg kell várni a kémiai folyamatok végét. Főleg átlapolt kötés esetében alkalmazható, illetve gyártáskor, felhasználáskor, valamint a termék megsemmisítésekor egészségre ártalmas, környezetszennyező anyagok keletkezhetnek [7].

Sík felületek összeillesztésekor 3 féle kötéstípust különböztethetünk meg. A mechanikus kötés csoportjába tartozik a csavarokkal, szegecsekkel illesztett kötés. A termikus kötés

csoportjába tartozik a hegesztett, keményforrasztott és lágyforrasztott illesztés. A ragasztást a vegyi úton történő kötés foglalja magába. A hagyományos kötéstechnológiákkal szemben a ragasztott kötés nagyszámú előnnyel rendelkezik. A terhelésátadás egyenletesebb, mint a csavarozott, hegesztett kötések esetében. Az 1. ábra képeiről jól megállapítható, hogy a ragasztott kötés esetében elmarad a helyi feszültségkoncentráció, a csavarozásból adódó gyengítés, illetve feszültségelharmozódás[7–9].



1. ábra: Különböző kötéstechnológiák alkalmazásának feszültségeloszlása [7]

A ragasztóanyagok több évtizede tartó fejlesztése, kutatása során, rendkívül sok féle ragasztóanyagot hoztak létre, fedeztek fel. Napjainkban a ragasztóanyagok széles választéka lelhető fel a kereskedelmi forgalomban. A ragasztóanyagok olyan nemfémek anyagok, melyek a szilárd anyagok felületét tapadással és saját szilárdságukkal kötik össze anélkül, hogy az összekötött anyagok szerkezeti felépítése vagy eredeti tulajdonságai lényegesen megváltoznának. A természetes ragasztóanyagok lehetnek növényi alapúak, állati eredetűek és illetve ásványi alapúak. A szintetikus ragasztóanyagokhoz tartoznak a polikondenzációs, poliaddíciós és a polimerizációs anyagok [10].

A ragasztóanyagokat az alábbi 1. táblázat szerint csoportosíthatjuk.

1. táblázat: Ragasztóanyagok csoportosítása származása és készítésük alapján [10]

Ragasztóanyagok					
Természetes (módosított)			Szintetikus		
Növényi	Állati	Ásványi	Polikondenzáció	Poliaddíciós	Polimerizációs
Cellulózészsterk Cellulózéterek Keményítők Protein	Kazeinenyvv Gluteinenyvv Véralbumin enyvv	Üveg Kerámia Bitumen	Fenolplasztok Aminoplasztok Poliészterek Poliamidok Poliimidek Polisziloxánok Poliszulfidok	Poliuretánok Epoxigyanták	Polibutedién Poliizobutién Polikloroprén Polisztirol Poliakrilátok

Továbbá a hőhatással szembeni viselkedésük alapján megkülönböztethetők, a hőre keményedő műanyagragasztók, melyek a térhálósódás, keményedés után nem lágyulnak meg újra. A hőre lágyuló ragasztóanyagok, pedig hőhatásra ismét képlékennyé válnak.

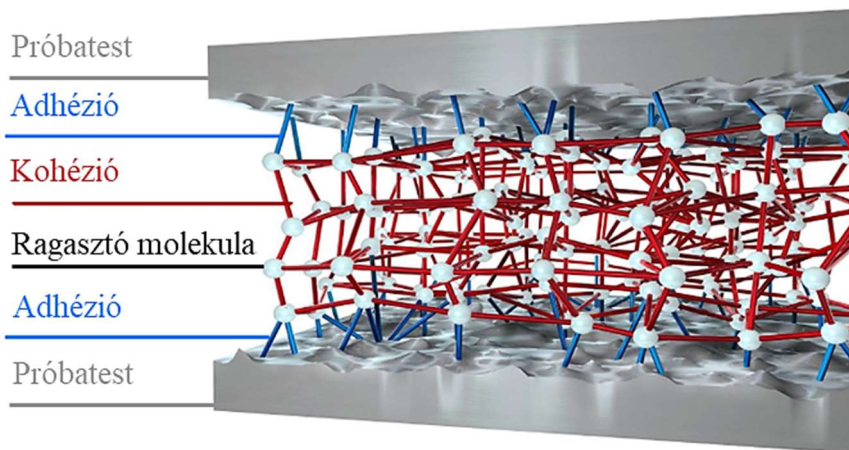
A reaktív ragasztók csoportosíthatók aszerint is, hogy egy- vagy kétkomponensű a ragasztó. Egykomponensű ragasztók általában hőhatással térhálósíthatók, a kétkomponensű

ragasztóknál a térhálósodási reakció megindítását adalékkal, keményítő anyag hozzáadásával biztosítható [7,10].

A ragasztóanyagnak folyékony halmazállapottal kell rendelkeznie a ragasztott kötés készítése során. A folyékony állapotnak köszönhetően szét tud terülni a ragasztani kívánt felületen, továbbá be tudja nedvesíteni azt, ezzel biztos érintkezést létrehozva a ragasztóanyag és az összeillesztendő felületek között. A kötés létrehozásához a ragasztónak a ragasztandó felülettel érintkeznie kell. Továbbá a ragasztónak a felülethez kell tapadnia, melyet az adhéziónak köszönhetően valósít meg. A ragasztóanyagnak ki kell töltenie a ragasztott felületeken található felületi hibákat, lyukakat, üres helyeket. Ha képes kitölteni ezeket a réseket, akkor tömítésként is alkalmazható. A fellépő fárasztó és dinamikus igénybevételeket a ragasztóanyagnak ki kell bírnia és el kell oszlatnia a kötésben résztvevő alkotóelemek között. A szerkezeti-, nagyszilárdságú ragasztás rendkívül népszerű a mai világban, ebből kifolyólag a dolgozatomban későbbi részei során az epoxi ragasztóanyagokat vizsgálom [7,8,10].

2.3. A ragasztás kötési mechanizmusai

A ragasztott kötések minőségét, milyenségét nagymértékben a ragasztandó anyag-ragasztó határfelületén fellépő, jelenlévő adhéziónak erőhatás határozza meg. Ahogy a 2. ábra is szemlélteti a ragasztásokban megtalálhatók mind az adhéziónak, mind a kohéziónak erők. A ragasztott kötés szilárdságát a két erőtípus aránya határozza meg, de főként az adhéziónak tulajdonságoktól függ. Adhéziónak erőknek tekintjük két anyag molekulái között létrejövő vonzóerőt. Kohéziónak erő esetében az anyagon belül jön létre a vonzóerő [1,2,11,12].



2. ábra: Adhéziónak és kohéziónak erők a ragasztott kötésekben [2]

Nemzetközi kutatások megállapították, illetve bebizonyították, hogy a ragasztott kötések három féle módon mehetnek tönkre. A kötések tönkremenetele bekövetkezik adhéziónak, kohéziónak, illetve adhéziónak-kohéziónak úton. Adhéziónak tönkremenetel alatt értjük azt a folyamatot, amikor a ragasztóanyag levál a ragasztott anyag felületéről. Kohéziónak tönkremenetel esetén a ragasztóanyag belsejében vagy a ragasztott anyagban keletkezik tönkremenetel. Az adhéziónak-kohéziónak tönkremenetel esetében, mind a kettő eset bekövetkezik, tehát a ragasztott felület egy

részéről leválik a ragasztóanyag, illetve a ragasztás belsejében vagy a próbatestben is tönkremenetel megy végbe (3. ábra.) [1,2,11,12].

a) Adhéziós tönkremenetel



b) Kohéziós tönkremenetel



c) Adhéziós/kohéziós tönkremenetel



3. ábra: Ragasztott kötések tönkremenetelének szemléltetése a) adhéziós, b) kohéziós és c) vegyes típusok esetében [2]

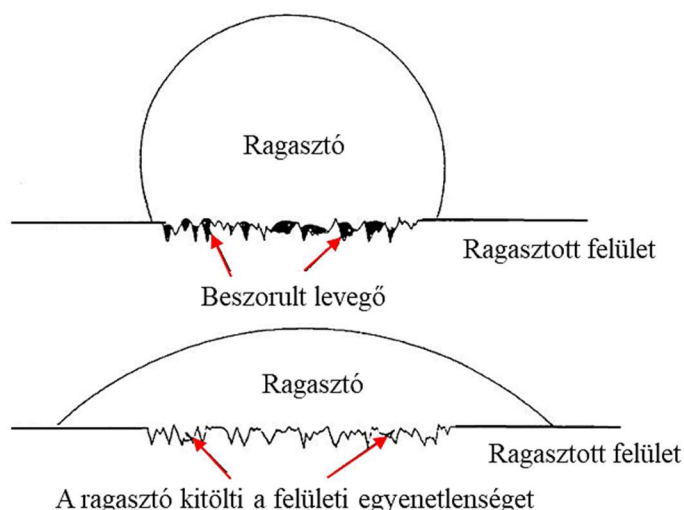
A ragasztott kötések tönkremenetelének számos oka lehet. Az alábbiakban ismertetem a ragasztott kötések tönkremenetelének okait.

A ragasztóanyag elégtelen kikeményedése, térhálósodása, a megengedettnél magasabb hőmérsékleti igénybevétel, hibásan illesztett alkatrész, mechanikus túlterhelés, korrózió, illetve kúszás, valamint folyékony és gáz közegekben a ragasztóanyag roncsolódása, ragasztás hibás végrehajtása, a ragasztásban levegőbuborék, szennyeződés jelenléte, a ragasztott alkatrész felülete szennyezett, nem megfelelő körülmények között végrehajtott felületkezelés, ragasztás, nem megfelelő ragasztási hézag alkalmazása [7].

A sikeres ragasztás első fontos követelménye a felület megtisztítása. A felületre rakódott por, olaj, a nedvesség, valamint a felülethez gyengén kötődő oxid-rétegek a kötés gyengüléséhez vezetnek. Ha a felület a ragasztás előtt nincs megtisztítva, akkor a ragasztó a gyenge, szennyezett határrétegi felületekhez fog tapadni, amely ezesetben könnyen elválí a ragasztott felületektől. Ezek a szennyeződések a felületekre kerülhetnek a ragasztás előtt elvégzett technológiákból (csiszolás, homokfúvás, méretre vágás), a szállítás során, valamint a munkadarab korrózió ellen felvitt bevonatokból [2,13].

Ezt a jelenséget igazolja Rudawska és társai kutatása is, melyben X5CrNi181 rozsdamentes acél felületét alkohollal tisztították meg, ezzel zsírtalanítva és olajtól, egyéb szennyeződéstől mentesítve azt. Ezt követően kétkomponensű epoxival készítettek átlapolat kötések. Csupán a tisztítás hatására kétszeresére növekedett a nyírószilárdság [13,14].

A ragasztóanyagnak folyékony halmazállapottal kell rendelkeznie, vagy könnyen formázhatónak kell lennie. Ezáltal egyszerűen felvihető a felületekre úgy, hogy érintkezik, felveszi a felületek geometriáját, mikro-, illetve makro mérettartományokban is. Ha nem képes a ragasztó megfelelően nedvesíteni a felületet, kis levegő buborékok szorulhatnak be a felület érdességi profiljába, mely a kötési szilárdság csökkenését eredményezi (4. ábra) [2,7,9,12].



4. ábra: Szemléltető ábra a ragasztásnak kedvezőtlen (felső) és a kedvező (alsó) nedvesítésről [2]

2.4. A felületi energia meghatározása

A ragasztástechnológiai fejlesztések során a különböző alapanyagok felületi adhéziójának növelése az elsődleges cél. A felületi adhézió növelése a határfelületek módosításával érhető el. Az összekötni kívánt elemek határfelületei az adott állapottól függően lehetnek szilárd-folyadék, szilárd-gáz, szilárd-szilárd anyagpárok. A határfelületi feszültség létezését támasztja alá a molnárpóloska vízen járása, valamint a szappanbuborék gömb alakja. A felületi feszültség és a nedvesítés fogalma szorosan kötődik egymáshoz és a határfelület megváltozására utal [1,2].

2.4.1. A nyugócsepp módszerrel történő peremszög mérés folyamata

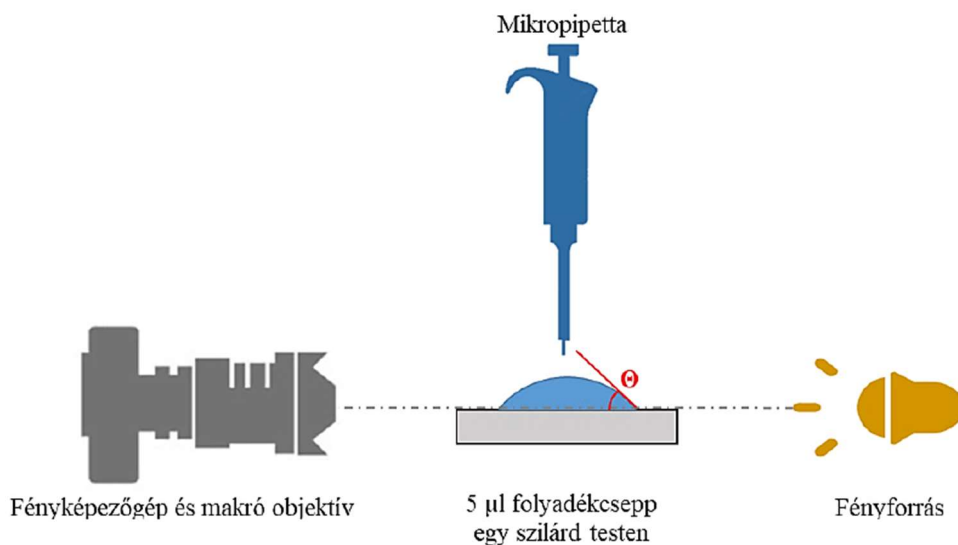
A Young által megalkotott összefüggés mai napig kapcsolatot teremt a nedvesedési peremszög és a felületi energia között, illetve alapját képezi a nedvesedési folyamatok leírásának. A nedvesítőképességet a folyadékok, szilárd felületen való szétterülésével szemléltethetjük. Mérőszáma a peremszög (θ), vagyis a két fázis érintkezésének illeszkedési szöge. A határfelületek tulajdonságait, illetve a szilárd felületek nedvesítőképességét is a legfelső, legkülső, néhány atomnyi távolságra terjedő réteg, annak is főként a folyadékfázissal közvetlenül érintkező atomjai vagy atomcsoportjai határozzák meg. Ezt nevezzük a független felületi hatások elvének. A megfelelő irányítottságú és szerkezetű rétegek kialakításával a nedvesítőképesség tudatosan befolyásolható. A felületkezelések változtató hatása egy

standardizált és univerzálisan felhasználható nedvesítésmérési módszerrel és a hozzá tartozó számítási elmélettel jellemezhető [1,2].

A nyugvó csepp módszer, a peremszög meghatározására leggyakrabban használt mérési módszer. A mérési módszer helyes elvégzésének menete a következő. A cseppele egy vonalban egy fényképezőgép és egy fényforrás van. A vizsgálandó mintát a mérőrendszer fókuszpontjában található tárgyasztalra kell helyezni. A fényképező makró objektívjének középtengelyének egybe kell esnie a vizsgálni kívánt felülettel, ezáltal a felület képen látott síkja, valamint az objektív szimmetria tengelye egy síkra esnek. A folyadékot egy fecskendő rendszer vagy automata mikropipetta segítségével szokás adagolni. Az 5. ábra a nyugvócsepp módszeres peremszög mérés környezetét szemlélteti [2,15].

A csepről készült fényképről lehet a peremszög értékét megmérni szoftver alkalmazásával. A jobb és a bal oldali kontaktpontokba alapvonalat teszünk, majd a kontaktpontokból érintőket húzunk a csepp körvonalára. A nyugvócsepp mérési módszer alapja, hogy akkor készül a csepről fénykép, amikor már dinamika szempontjából nyugalmi állapotot ért el a csepp.

A nedvesítési peremszög mérések során rendkívül fontos jellemezni a felületek határfelületi energiájának értékét is (mN/m vagy J/m^2), ami egy vizsgálati folyadékoktól független mérőszám [2,15].



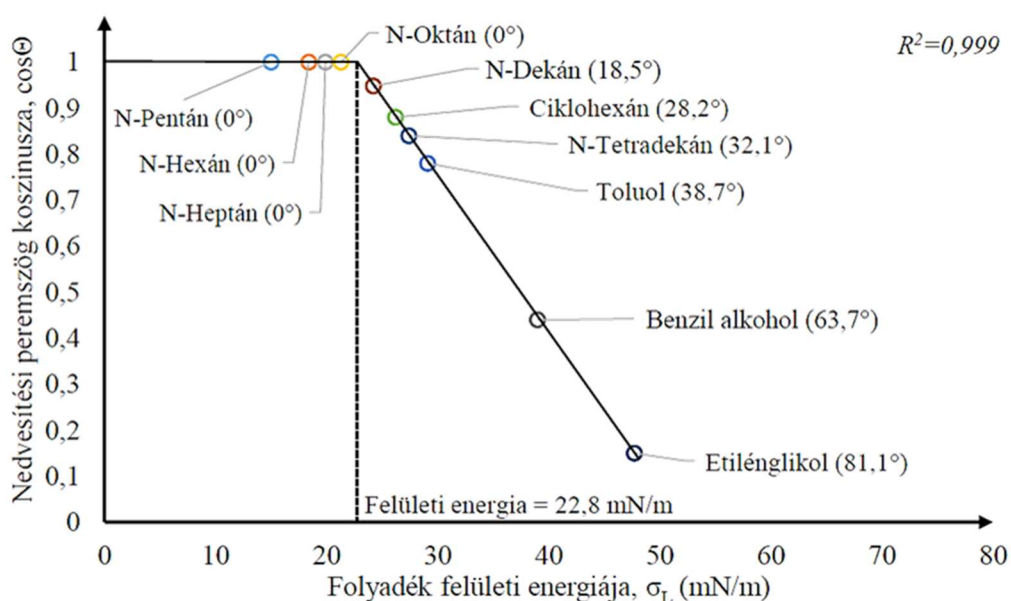
5. ábra: Nyugvócsepp módszeres peremszög mérést szemléltető ábra [2]

2.4.2. A felületi energia meghatározásának módszerei

Egy folyadék felületi energiájának mérése rendkívül egyszerű és egyértelmű, mivel a folyadék felületi energiájának értéke megegyezik az adott folyadék felületi feszültségével. A folyadékok felületi feszültségének megmérésére, meghatározására sok technika létezik. A szilárd testek felületi energiájának meghatározása nehézkes feladat, mivel a felületi energia értéke a csepp és a szilárd test határfelületének érintkezésénél kialakuló peremszög érték mérésével számolható ki. A peremszög értékét befolyásolja az alkalmazni kívánt folyadék

választása, a szög értékének megfelelő mérése, a felületi kölcsönhatásoktól, a felületi reakciótól, illetve a felület nedvesítő képességétől. A megfelelő folyadék kiválasztása után sem lehet teljes mértékben pontosan meghatározni a szilárd test felületi energiáját, mivel számos meghatározási módja létezik a felületi energiának. Ebből kifolyólag számos módszer, lehetőség és elmélet létezik a peremszög, felületi energia értéké alakítására. Mivel a valóságban egyik sem tökéletes, ezért egyiket sem nevezhetjük egyetemes módszernek. A felületi energiaszámítási elméletek, a felületek energiáját két különböző komponensre osztva, a komponenseket külön-külön, vagy ezek összegét határozza meg. Ezeket az összetevőket nevezzük a diszperzív és a poláris komponenseknek. A diszperzív összetevő, a Van der Waals és a nem helyi kölcsönhatásokra vonatkozik. A poláris komponens a dipólus-dipólus, a dipólus indukált dipólus, a hidrogénkötés és egyéb helyi kölcsönhatásokra vonatkoztatjuk. A felületi energiaszámítás elvégzése közben ajánlott a nem poláris felületek esetében nem poláris folyadékokat választani, míg a poláris felületek esetében poláris folyadékokat alkalmazni, illetve az ezekhez megfelelő módszert. Az alábbiakban a legelterjedtebb felületi energia számítási módszereket mutatom be [2,16,17].

A Zisman módszer volt az első lényegesebb felületenergia számítási módszer. A Zisman módszer a poláris és diszperzív felületi energia értékek összegét határozza meg, ezért egykomponensű módszernek tekinthető. Teljesen hidrofil állapotú folyadékot, profilból vizsgálva a folyadék optikán keresztül látható kontúrja teljes mértékben egybeolvad a vizsgálandó felülettel, ezáltal a nyugvócsepp módszerrel mért peremszög értéke 0° . Emiatt arra következtethetünk, hogy a szilárd test felületén a folyadékok felületi energiájának csökkenése a peremszög értékeinek csökkenését eredményezi. Ha különféle folyadékok felületi energiáját egy diagrammon ábrázoljuk, a peremszög értékeik függvényében, Zisman ábrát kapunk (6. ábra) [2,13,17,18].



6. ábra: Zisman diagram egy alacsony sűrűségű polietilén esetében [2]

A Zisman féle felületi energia számítási módszer a nem poláris felületek esetében alkalmazható a legjobban. Amennyiben a felület kis mértékben is, de poláris, akkor a módszer nem alkalmazható. A Zisman módszer, azért nem alkalmazható olyan felületeken, amelynek diszperzív és poláris komponense is van, mert az alkalmazott folyadékok teljes felületi feszültség értékeit veszik figyelembe. Ezáltal figyelmen kívül hagyják, hogy a folyadék poláris és diszperzív felületi komponense, hogyan hoz létre kölcsönhatásokat a különböző anyagok felületén. A Zisman-féle módszert nem szokás alkalmazni, ha a vizsgálat előtt az adott anyagot felületkezelték. Mivel a módszer által meghatározott felületi energia értékek magas szórást, pontatlanságot mutattak, annak elmélete továbbfejlesztésre került [2,17,18].

Rudawaska és kutatócsapata alumínium felhasználásával vizsgálták az Owens/Wendt felületi energia számítási módszert. Az Owens/Wendt elmélet egy két komponensű módszer, melynek lényege a szilárd test felületi energiájának meghatározása. A módszer a poláris kölcsönhatásokat veszi figyelembe, amelyek a szilárd test felülete és a folyadékok között keletkeznek. Owens/Wendt szétválasztotta a szilárd test felületi energiáját diszperzív, illetve poláris komponensekre. A módszer két alapvető matematikai egyenleten alapul. Az egyenletek meghatározzák a kölcsönhatásokat a szilárd felületek és a folyadékok között [13].

Az egyenletek Young egyenletéből (1)

$$\sigma_S = \sigma_{SL} + \sigma_L * \cos \theta \quad (1)$$

ahol, σ_S - a szilárd test teljes felületi feszültsége (mN/m), σ_{SL} - a szilárd test és a folyadék közötti határfelületi feszültség (mN/m), σ_L - a folyadék teljes felületi feszültsége (mN/m), θ a peremszög (°) nagysága a folyadék és a szilárd test kontakt pontjában.

és Good egyenletéből épülnek fel (2)

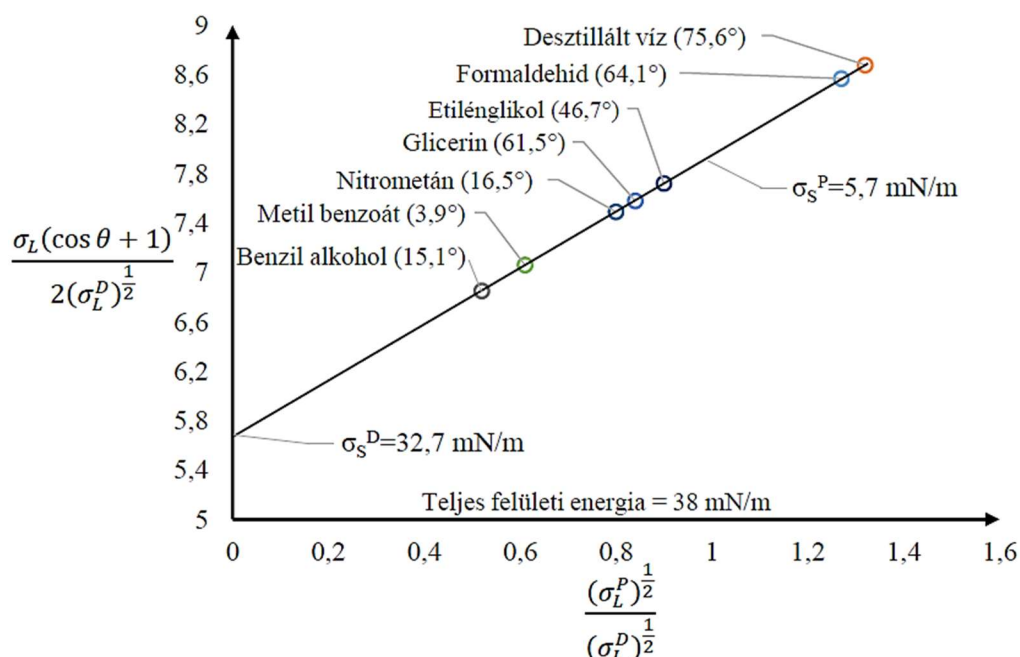
$$\sigma_{SL} = \sigma_S + \sigma_L - 2 * (\sigma_L^D * \sigma_S^D)^{1/2} - 2 * (\sigma_L^P * \sigma_S^P)^{1/2} \quad (2)$$

ahol, σ_L^D - a folyadék felületi feszültségének a diszperzív komponense (mN/m), σ_L^P - a folyadék felületi feszültségének a poláris komponense (mN/m), σ_S^D - a szilárd test felületi feszültségének a diszperzív komponense (mN/m), σ_S^P - a szilárd test felületi feszültségének a poláris komponense (mN/m).

A Young és Good egyenleteket kombinálva, Owens/Wendt alkalmassá tette az alábbi egyenletet arra, hogy meghatározhassuk a vizsgált felületek diszperzív és poláris energiakomponenseinek az értékét (3).

$$\frac{\sigma_L * (\cos \theta + 1)}{2 * (\sigma_L^D)^{1/2}} = (\sigma_S^P)^{1/2} * \frac{(\sigma_L^P)^{1/2}}{(\sigma_L^D)^{1/2}} + (\sigma_S^D)^{1/2} \quad (3)$$

Több felületi feszültséggel rendelkező folyadék használatával (ismerve azok diszperzív és poláris komponenseit) a szilárd test felületén, majd peremszögeiket nyugvócsepp módszerrel lemérve az összes információ rendelkezésre áll egy diagram felvételéhez (7. ábra) [2,17].



7. ábra: Owens/Wendt diagram polimetil-metakrilát felületi feszültség meghatározásának segítésére [2]

A szilárd test felületi energiájának poláris komponense meghatározható a vonal meredekségének kiszámításával. Továbbá a függőleges tengely metszetében a diszperzív komponens helyezkedik el, melynek segítségével a vizsgált szilárdfázis teljes felületi energiája meghatározhatóvá válik. A módszer alkalmazása az alacsony felületi töltéssel- és mérsékelt polaritással rendelkező felületek esetében elterjedt. Ilyen felületi tulajdonságokkal rendelkeznek a polimerek, melyek hetero-atomokat tartalmaznak, mint például a poli (vinilklorid), poliamid, poliuretán, poliészter, polikarbonát, poliakrilát. A módszer hátránya az elvégzéséhez szükséges nagy időmennyiség, illetve a nagymennyiségű folyadék felhasználása a pontos eredmények érdekében. Továbbá Owens/Wendt a kísérletezőre hagyja a folyadékok meghatározását, ezen okok miatt, kevésbé alkalmazott módszer.

A kutatók körében legelterjedtebb felületi energia számítási elmélet a Fowkes módszer. Owens/Wendt-hez hasonlóan a Fowkes módszer is két komponensre választja szét a szilárd testek felületi energiáját. Fowkes módszere matematikai szempontból teljes mértékben megegyezik Owens/Wendt módszerével, ám filozófiája mégis eltérő. Fowkes módszere kettő alapvető egyenletre vezethető vissza, melyek a szilárd felület és a folyadék között fellépő kölcsönhatásokat írják le.

Az említett kettő egyenlet a következő:

Young egyenlete,

Dupre képlete a tapadási energiáról (4)

$$I_{SL} = \sigma_S + \sigma_L - \sigma_{SL} \quad (4)$$

ahol: I_{SL} - a folyadék és a szilárd felület közötti egységnyi területre eső adhézión energia (J/m^2).

Fowkes elmélete a folyadékok és a szilárd felület közötti adhéziós energia szétbonthatóságán (diszperzív és poláris komponensek) alapul (5).

$$I_{SL} = 2 * [(\sigma_L^D)^{1/2} * (\sigma_S^D)^{1/2} + (\sigma_L^P)^{1/2} * (\sigma_S^P)^{1/2}] \quad (5)$$

Ezen egyenletek kombinációja adja a Fowkes módszer elsődleges egyenletét (6)

$$(\sigma_L^D)^{1/2} * (\sigma_S^D)^{1/2} + (\sigma_L^P)^{1/2} * (\sigma_S^P)^{1/2} = \frac{\sigma_L * (\cos\theta + 1)}{2} \quad (6)$$

A matematikai egyenlőséget a két módszer között az bizonyítja, hogy ha az egyenlet mindkét oldalát elosztjuk $(\sigma_L^D)^{1/2}$ -nel, akkor az Owens/Wendt elsődleges módszerét kapjuk.

A Fowkes módszer a két folyadék peremszögértékeit veszi figyelembe. Az egyik folyadéknak csak poláris komponense lehet, a másik folyadéknak, pedig diszperzív és poláris komponenssel is kell rendelkeznie. Ha a nyugvócsepp módszeres peremszögmérések során olyan folyadékot alkalmazunk, amelynek csak poláris összetevője van, akkor az egyenlet leegyszerűsödik a következő képletre (7) [13,18,19].

$$\sigma_S^D = \frac{\sigma_L * (\cos\theta + 1)^2}{4} \quad (7)$$

A Fowkes módszert általában a tapadási és bevonási problémák megoldásához használják, mivel az egyenlet teljes mértékben alkalmas a tapadási energia kiszámítására, a ragasztó és a felület vagy a bevonat és a felület között [2,15,17–19].

2.5. Nagyszilárdságú ragasztók

A ragasztott kötések alkalmazása a hétköznapi (pl. játékok, egyszerű tárgyak) ragasztásától, egészen a magas szintű, speciális felhasználásig terjed. A szerkezeti, vagy nagyszilárdságú ragasztók, a ragasztóanyagok egyedi csoportját alkotják, mivel ezeknek különleges tulajdonságokkal (pl.: kis zsugorodás és deformációs hajlam, szilárdság tartása rendszeres terhelés mellett, hosszú élettartam és kiváló nedvesítési tulajdonságok) kell rendelkezniük, hogy megfeleljenek a tervezett funkciójuknak, elegendő szilárdságot nyújtsanak. A szerkezeti/nagyszilárdságú ragasztóknak képesnek kell lenniük a terhelések átvitelére, a szilárdsági tulajdonságok megtartása mellett. A nagyszilárdságú ragasztók csoportjába soroljuk az epoxi, uretán, akril, szilikon stb. típusokat. Mivel a kutatásom során az epoxi szerkezeti ragasztókat vizsgáltam, így a továbbiakban ezt a ragasztótípust ismertetem [20–22].

Az epoxigyantát hozzávetőlegesen az 1890-es évek végén fedezték fel. Az első epoxi ragasztót 1936-ban Dr. Pierre Castan fejlesztette ki, fogászati alkalmazásokra. Azonban a kereskedelmi forgalmazásuk, mind Európában, mind az Egyesült Államokban csak az 1940-es évek végén kezdődött [20].

Az epoxigyanták általában fenolokban, alkoholokban, aminokban lévő aktív hidrogén és epiklórhidrin reakciójából szintetizálódnak, szabályozott reakciók útján. Az epoxigyanták

másik lehetséges előállítási módszere az olefin peroxiddal történő oxidálás, mint a cikloalifás epoxigyanták esetében. A legelterjedtebb epoxigyanták a glicidil-éter gyanták, mint például a Bisphenol A, Bisphenol F és a novolac típusú, glicidil-amin-epoxigyanta, glicidil-észter-epoxigyanta és a cikloalifás epoxigyanta. A biszfenol A típusú gyantát a biszfenol A és az epiklórhidrin reakciójával állítják elő lúgos környezetben, hozzávetőlegesen 70-80 °C-on. Ez a típusú gyanta volt az első kereskedelmi forgalomba hozott epoxi, mely még ma is a legszélesebb körben alkalmazott (a ma használt epoxigyanták, több mint 75%-át teszi ki) [20,21]

Megkülönböztetünk egykomponensű (1K), illetve kétkomponensű (2K) epoxi ragasztókat. Egykomponensű epoxi ragasztókról akkor beszélünk, ha az alap ragasztóanyaghoz nem szükséges további adalékanyagot adagolni, ugyanis a levegő oxigéntartalmának, víztartalmának köszönhetően, vagy további hőbevitel segítségével indulnak el a kémiai reakciók, térhálósodási folyamatok. Ellenben a kétkomponensű epoxi ragasztók esetében, az A komponenshez további B komponensű adalékanyag szükséges a kémiai reakciók, térhálósodási folyamatok elindításához [20,22,23].

Az epoxi ragasztók legnagyobb felhasználóinak körét tekintve, elmondhatjuk, hogy elsősorban az általános iparban, építőiparban, elektronikai iparban és a gépjárműiparban alkalmazzák. Ezekkel a ragasztókkal a megfelelő felületelőkészítést követően különböző anyagtipusok, mint például a fémek, üveg, beton, kerámiák, fa és műanyagok esetében is létrehozható a kötés [20,23].

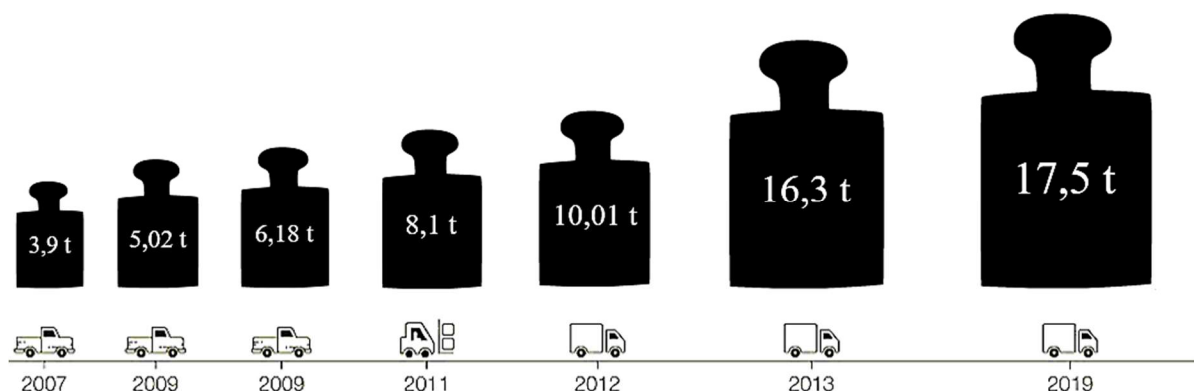
Az epoxi ragasztók a nagyszilárdságú-, szerkezeti ragasztástechnológia körében rendkívül elterjedt, az utóbbi évtizedekben számos kutatási területen vizsgált, nagymértékű fejlődésen átesett kötőanyagok [23].

2.6. A nagyszilárdságú-, szerkezeti ragasztók innovációjának feltérképezése

A nagyszilárdságú ragasztók a jármű- és egyéb iparágak nagymértékű fejlődésének és a ragasztás, mint kötéstechnológia széleskörű elterjedésének köszönhetően hatalmas fejlődésen estek át az elmúlt száz kettő évtizedben. Ezt a fejlődést szemlélteti a 8. ábra is, melyen jól látható, hogy a ragasztógyártóknak az elmúlt tizenkettő év alatt, hétszer is sikerült megdönteni a legerősebb ragasztott kötés világrekordját.

A 2007-es évben az iparban kevés helyen, szerkezetben alkalmaztak ragasztást, így a ragasztott kötések szilárdságának értéke is merőben alulmúlta a későbbi változatokét, ekkor a nagyszilárdságú ragasztók maximális terhelhetősége 3,9 tonna (9,6 MPa) volt. A 2009-es évben indult meg az a fejlődés, amely még napjainkban is tart. Ebben az évben kétszer is megdőlt a publikált legmagasabb szilárdság értéke, így az év végére a ragasztott kötésék

maximális teherbírása már 6,18 tonna (15,2 MPa) volt. A 2010-es években nagymértékű fejlődés ment végbe az iparban, ennek köszönhetően ugrásszerűen növekedett a szerkezeti ragasztók iránti kereslet, mely a nagyszilárdságú ragasztástechnológia további fejlődését követelte meg. A 2012-es évre közel 4 tonnával növekedett a ragasztott kötések maximális terhelhetősége a 2009-es évi eredményhez képest. Ekkorra már 10,01 tonna (24,7 MPa) volt a legmagasabb elért terhelhetőség, szilárdság. Egy évvel később, 2013-ban, a 2011-es évben elért 8,1 tonnának több, mint kétszeresét érték el, mely 16,3 tonna (40,2 MPa) értéket jelent. Ekkor ezt az eredményt évekig nem tudta megdönteni egyik forgalmazó sem. Azonban 2019-ben egy német, ragasztóanyagokat gyártó és forgalmazó cég beállította az új világrekordot, melyet napjainkig sem tudott senki hivatalosan megdönteni. 2019. július 12.-én a DELO nevű cég a levegőbe emelt egy 3 tengelyes teherautót. A teherautó 13 tonnás saját súlyát, betonelemek segítségével 17,5 tonnára növelték. A ragasztott kötés elviselte a 43,95 MPa-os terhelést, így mindössze tizenkét év leforgása alatt a világcúcsot több mint, négyszeresére javították [24–26].



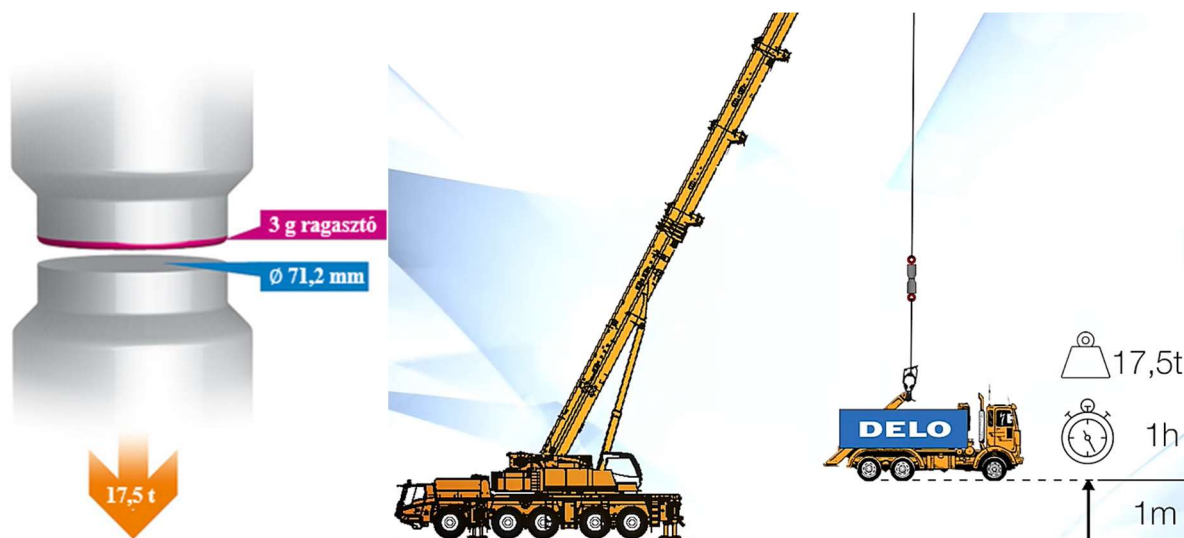
8. ábra: A nagyszilárdságú ragasztók fejlődésének szemléltetése

2.7. A legerősebb ragasztott kötés jelenlegi világrekordjának ismertetése

Ahogy az előző fejezetben is ismertettem, a világ legerősebb ragasztójának (The World's Strongest Adhesive) címe hét alkalommal is gazdát cserélt az elmúlt 17 év alatt. A jelenlegi Guinness-világrekorder a németországi ragasztóforgalmazók kisipari gyártója, a DELO cég. A csúcsot 2019-ben állították fel, mellyel egy korábbi 2013-as rekordot sikerült megdönteniük [24,25].

A szabályokat tekintve, a ragasztott kötésnek a megemelni kívánt súlyt, 1 méter magasságban, 1 órán át kell megtartania. A ragasztott kötés két részből áll, az acélrudakból és magából a ragasztóanyagból. Az acélrudak aktív felületei 71,2 mm átmérővel rendelkeznek, melyeket a ragasztott kötés elkészítése előtt CNC megmunkálással, illetve alkoholos felülettisztítással előkészítettek. Az alkalmazott ragasztóanyag a DELO MONOPOX magas hőmérsékletnek ellenálló egykomponensű epoxigyanta, mely a DELO MONOPOX HT2860-

as kereskedelemben is kapható típus módosított változata. A ragasztott kötést mindössze 3 gramm ragasztóanyag kiadagolásával, a felületek összeillesztésével és hőkezelés segítségével hozták létre. Az így kapott ragasztott terület nagysága $3981,5 \text{ mm}^2$ (9. ábra)[24- 26].



9. ábra: A jelenlegi legerősebb ragasztott kötésnek és kísérleti környezetének szemléltetése [24]

A ragasztott kötéssel elkészített próbatestet beillesztették a darus emelőszerkezetbe, majd megemelték a 17,5 tonnás, 3 tengelyes teherautót. A kötés kibírta a 43,95 MPa-os terhelést, mely a világrekord címének elnyerését jelentette a DELO cégnek [24].

3. A KUTATÁSOM CÉLKITŰZÉSEI

Az adott fejezetben az irodalomkutatásom során szerzett tapasztalatokat és az abból felállított kutatási projekttervem ismertetem. A kutatásom során többek között tanulmányoztam az acélra, mint alapanyagra vonatkozó legfőbb tulajdonságokat. Továbbá ismertettem a ragasztástechnológiát befolyásoló tényezőket és a ragasztott kötés mechanizmusait, illetve a nyugvócsepp módszeres peremszög mérés által meghatározható felületi energia tulajdonságait, alapjait, lényegességét. Végül áttekintettem a nagyszilárdságú ragasztástechnológia alapjait, főbb mozgatórugóit, emellett feltérképeztem a szerkezeti ragasztók ugrásszerű fejlődésének állomásait, valamint tanulmányoztam a jelenlegi legerősebb ragasztott kötés rekordjának részleteit, elveit.

Az irodalomkutatásom végeztével kijelenteném, hogy tudományos hiányt fedeztem fel az acél felületek ragasztástechnológiájának és azok húzószilárdsági vizsgálatainak terén. A nemzetközi publikációkban található kutatások között alig lehet találni az acél és annak nagyszilárdságú ragasztástechnológiájára vonatkozó kísérletet. Erre az irodalomkutatásom során felfedezett tudományos hiányra hivatkozva fogalmazom meg a kutatásom célkitűzéseit.

Kutatásom és dolgozatom fő célkitűzése az acél felületek ragasztástechnológiájának vizsgálata és fejlesztése különböző felületkezelési módszerek alkalmazásával. Illetve az összefüggések megállapítása a kezelt felületek energiája, érdessége, elemösszetétele és a ragasztott kötések húzószilárdsága között.

4. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK, MÓDSZEREK

4.1. A kutatáshoz használt acél

A kutatásomban vizsgált, ragasztott kötések elkészítéséhez felhasznált acélrudak spektroszkópai vizsgálatának eredményét a következő 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A felhasznált acélrúd százalékos (%) anyagösszetétele

Fe: 96,1	C: 0,937	Si: 0,152	Mn: 2,07	P: < 0,0009	S: 0,0042	Cr: 0,161	Mo: 0,0118	Ni: 0,0405
Al: 0,0172	Co: 0,0075	Cu: 0,112	Nb: 0,0178	Ti: 0,0029	V: 0,182	W: < 0,008	Pb: 0,0029	Sn: 0,0126
B: 0,0041	Ca: 0,0006	Zr: 0,0036	Bi: < 0,005	As: 0,0066	N: 0,0607	Sb: < 0,0030		

Az acélrúd spektroszkópiájából megállapítható, hogy az általunk vizsgált acél a 90MnCrV8 (1.2842) hidegen megmunkált szerszámacél anyagösszetételével egyezik meg. Ez a típusú acél a 96,1% vastartalma mellett, további ötvözőelemeket, 0,85-0,95% szenet, 0,1- 0,4% szilíciumot, 1,8-2,2% mangánt, 0,15-0,5% krómot, 0,05-0,2% vanádiumot tartalmaz. Felhasználási területeit tekintve, előszeretettel alkalmazzák a vágó- és lyukasztószerszámok (közepes lemezvastagságokhoz), mélyhúzó szerszámok, menetvágó- és dörzsárszerszámok, mérőeszközök, fröccsszerszámok és azok kilökö-csapjainak alapanyagaként. Az anyag keménysége megközelíti a 65 HRC-t, mely a megfelelő hőkezeléssel tovább növelhető (780-800°C hőntartás, hűtés olajban, 170-190°C temperálás). Széleskörű felhasználási lehetőségeinek köszönhetően az anyag laposacél, köracél és lemez formájában is elérhető [27].

4.2. A kutatáshoz használt ragasztóanyag

A dolgozatban vizsgált ragasztott kötések elkészítéséhez a Henkel Magyarország Kft. által forgalmazott Loctite® EA9514 típusú ragasztóanyagot használtam.

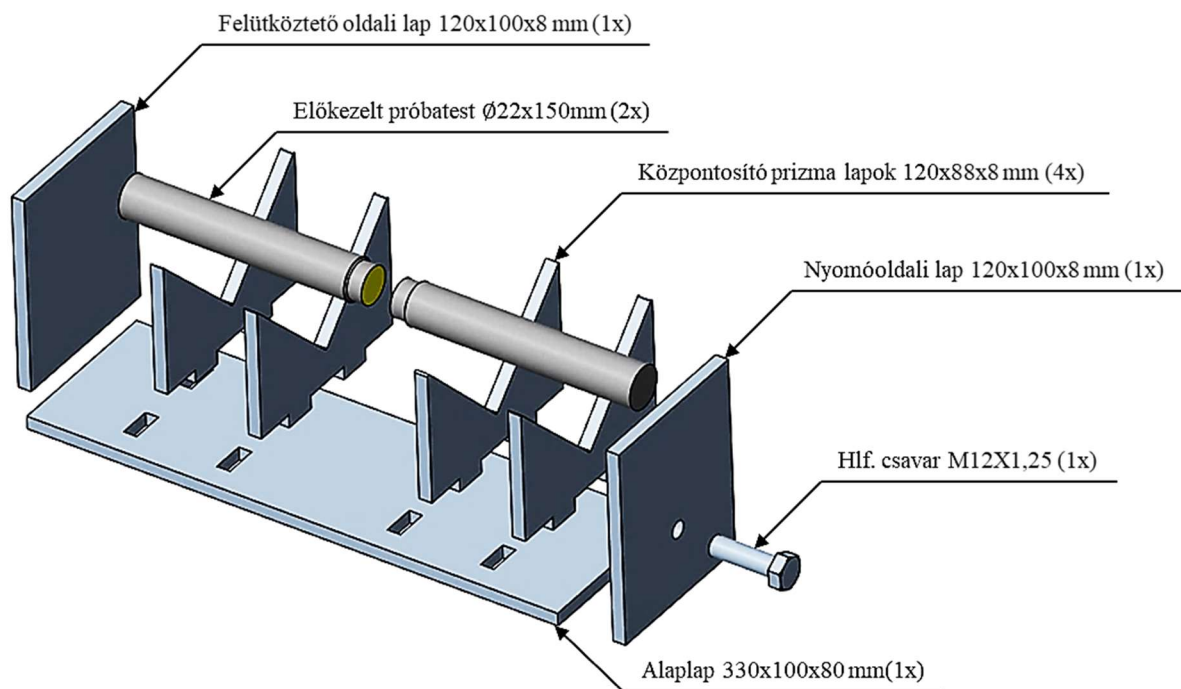
A Loctite® EA9514 egy edzett, egykomponensű, hőre keményedő epoxi ragasztó, amely kifejezetten alkalmas az ipari alkalmazásokhoz, például szűrőegységek, mágnesek, szerkezeti elemek ragasztásához, továbbá nagy réskitöltésű-, magas üzemi hőmérsékletű alkalmazásokhoz is kiválóan megfelel. A Loctite® EA9514 típusú ragasztó előnyeihez tartozik a jó tapadása különböző felületeken, az optimális hézagkitöltő képessége, a nagy lefejtési- és húzószilárdsága, növelt szívóssága, valamint a kiváló hő- és vegyszerállósága. A ragasztóanyag alkalmas a különböző típusú acél, alumínium, réz felületek ragasztására. A

ragasztó a levegő hőmérsékletének hatására térhálósodik ki. A gyártó által ajánlott kezelési hőmérséklet 120°C-175°C közötti, melyet hozzávetőlegesen 30-60 percig kell fenntartani a ragasztó megfelelő kitérhálósodásához. Az alkalmazási környezetét tekintve a szobahőmérsékletű vízzel, sós vízzel, savakkal, lúgokkal és olajokkal szembeni ellenállósága magas. A ragasztás megkezdése előtt az alapfelület legyen tiszta, száraz és zsírtól, olajtól, portól, szennyeződésektől mentes. A Loctite® EA9514 felvihető a felületre kézi, sűrített levegős, elektromos kinyomópisztollyal, továbbá szivattyúrendszerrel. A gyártó által biztosított termékadatlap szerint, a ragasztó húzószilárdsága 44 MPa, míg nyomószilárdsága elérheti akár a 66 MPa-t is, illetve szakadási nyúlása 5,8%-os. Továbbá a hővezetési tényezője 0,3 W/(m·K). Ajánlott felhasználási hőmérséklete 2-8°C, valamint az alkalmazhatósági hőmérséklete -30-200°C. Extrém hőmérsékleten a ragasztó közel 1500 órán át ellenálló (150°C), illetve az ennél magasabb hőmérsékleten (200°C), 3000 órán át folyamatos csökkenés mellett éri el a szilárdságának 50%-át [28].

4.3. A ragasztott próbatestek elkészítéséhez tervezett központosító készülék

A kutatásom során a húzószilárdsági vizsgálatokra készített próbatestek ismételhetőségének, egy síkba történő összeragasztásának, az összeszorítási erő-, meghúzási nyomaték állandósítása és az eredmények szórásának csökkentése érdekében terveztem egy központosító készüléket. A készülék koncepcionális tervezése során a hasonló kutatásokban alkalmazott befogások, készülékek tanulmányozása nyújtott segítséget. A felállított alap követelmények közé tartozott a próbatestek megfelelő központosítása, az állandó, ismételhető ragasztási hézag, meghúzási nyomaték megléte, valamint a későbbi, a köracél átmérőjének változása esetében is alkalmazható legyen a készülék, egy egyszerű fúrási-, és menetvágási folyamat elvégzését követően. További elvárások közé tartozott a készülék hőállósága, alaktartósága a hőkezelési folyamatok során. A tervezési feladat első lépéseként CAD szoftverben megterveztem, kiszerkesztettem a készülék különböző elemeit. A szerkesztést követően sávtervet készítettem, melynek köszönhetően a lézervágás során a legkedvezőbb anyagkihozatali tényezővel dolgozhattam. A vágás során a megfelelő paraméterek megadásának köszönhetően, szinte tükörfelületet kaptam a vágott kontúrok mentén, ezáltal biztosítva a készülék pontosságát, megfelelő központosítását. A felütköztető oldali lapot, illetve a nyomóoldali lapot hegesztett kötéssel erősítettem az alaplaphoz. A hegesztés során törekedtem a lapok merőlegességének biztosításáról. Ezt követően a központosító prizma lapokat az alaplapon kialakított helyükre illesztettem. Végül egy hatlapfejű (M12X1,25) csavart hajtottam bele a nyomóoldali lapon elhelyezett menetes furatba. A központosító készüléknek köszönhetően, pontos, egysíkú és megfelelő ragasztási hézaggal rendelkező

próbatesteket tudtam készíteni. Az általam tervezett központosító készüléket, annak részeit és befoglaló méreteit az alábbi 10. ábra szemlélteti.



10. ábra: A ragasztott próbatestek elkészítéséhez tervezett központosító készülék szemléltetése

4.4. Alkalmazott felületkezelési módszerek

A felületmódosító folyamatok elvégzése előtt az acélrudat, szalagfűrész segítségével a húzási próbatestekre vonatkozó, egyedi kialakításnak megfelelő méretű mintadarabokat elkészítettem. A levágott darabokról, alkoholos tisztítással eltávolítottam a vágás, illetve tárolás, előkészítés során a felületre rakódott szennyeződések.

4.4.1. Esztergált-alkohollal tisztított felület

Az esztergált felület esetében a méretre vágott, majd alkohollal megtisztított acélrudakat egy E400-as egytetemes esztergagép segítségével 750 ford./perces fordulatszám, illetve a megfelelő mennyiségű hűtő-kenő folyadék adagolása és az optimális előtolási sebesség alkalmazása mellett, az előre meghatározott méretekre forgácsoltam. Az elkészült munkadarabok felületét alkoholos tisztítás segítségével, megtisztítottam a megmunkálás során a felületre került emulziótól, zsíroktól, forgácsszemcséktől és a további szennyeződésektől. A felületkezelést követően elvégeztem a szükséges méréseket, elkészítettem a húzási próbatesteket.

4.4.2. Esztergált-, homokszórt és alkohollal tisztított felület

A homokszórás elvégzése előtt, a mintadarabokat az előző bekezdésben (4.4.1) összefoglaltak szerint előkészítettem. A tisztítást követően elvégeztem a homokszórást, mint

további felületkezelést. A kezelés során a szemcsék hozzávetőlegesen 45°-os szögben csapódtak a felületnek. A homokszórást 300 µm méretű kvarchomokkal végeztem. A kezelést követően a felületet alkohollal megtisztítottam a ráakódott por-, homok- szemcséktől, majd szárítógép segítségével megszárazítottam. A tisztítás után elvégeztem a szükséges vizsgálatokat, méréseket és elkészítettem a próbatesteket a húzószilárdsági vizsgálatokra.

4.4.3. Esztergált-, homokszórt-, alkohollal tisztított és plazmasugárral kezelt felület

Az esztergált-, homokszórt-, alkohollal tisztított és plazmasugárral felületkezelni kívánt próbatesteket a plazmasugaras kezelést megelőzően a 4.4.1, valamint a 4.4.2 bekezdésekben összefoglaltak szerint előkészítettem. A plazmasugaras felületkezelés során a fúvóka vége és a kezelni kívánt felület közötti távolság 5 mm volt. A kezelés során a fúvóka fordulatszámát 2500 ford./perc, a levegő áramlási sebességét 30 l/perc és a kezelés teljesítményét 405 W értékekre állítottam be. A plazmaforrás és vele együtt a plazmasugár előtolási sebességét is robot segítségével szabályoztam, mely 0,5 mm/másodperc volt. A kezelést követően nem alkalmaztam további tisztítási folyamatot, hanem elvégeztem a szükséges vizsgálatokat, méréseket, valamint elkészítettem a húzószilárdsági vizsgálatokra szánt próbatesteket.

4.5. Kutatás során alkalmazott felületkezelési-, vizsgálati- eszközök, szabványok

4.5.1. Olympus LEXT OLS5000 Konfokális lézer pásztázó mérőmikroszkóp

A felületkezelések hatására megváltozott felületi érdességek értékeit egy Olympus LEXT OLS5000 konfokális lézer pásztázó mérőmikroszkóppal vizsgáltam meg. A mérőberendezés lehetővé teszi a 3D-s felületalkotást, mely rendkívül hatékony módszer a mikrostruktúrák és a felületek részletes elemzésekor. A méréseket egy 405 nm hullámhosszon működő dióda lézerforrás segítségével végzi el. Mérési pontosságát tekintve $\pm(5\%+1 \text{ nm})$ vertikális irányban, mely a felület valódi érdességéhez képest, rendkívül pontos, közeli értéket eredményez. Továbbá három fajta mérési és képalkotási sebességgel rendelkezik, a gyors (10 kép/mp), a normál (2,5 kép/mp), illetve a magas felbontású (lassú) (0,5kép/mp). A mérések során a 20X-os nagyítást alkalmaztam a megfelelő minőségű képek elkészítése és a valódi értékekhez legközelebb eső eredményeket érdekében. A vizsgálatokat háromszor ismételttem, illetve azokat a felületeken megjelölt területeken végeztem el.

4.5.2. ZEISS Sigma 300 VP pásztázó elektronmikroszkóp

Az elektronmikroszkópok olyan speciális mikroszkópok, melyek elektronnyalábokat használnak a minták vizsgálatának során. Általánosságban három elektronmikroszkóp típust különböztetünk meg. Beszélhetünk a) transzmissziós (TEM), b) pásztázó (SEM), illetve c) reflexiós (REM) elektronmikroszkópokról. Kutatásom során a pásztázó elektronmikroszkópot

alkalmaztam, mind a topográfiai (BSD), mind az elemanalízis (EDS) vizsgálatokkor, így a továbbiakban, ennek a típusnak a rövid bemutatásával folytatnám [29].

A pásztázó elektronmikroszkóp, egy olyan elektronoptikai eszköz, amely a minta felszínének előre definiált területét irányított, vékony elektronnyalábbal pásztázza végig. A mintáról visszaverődő elektronokat használja a felületek topográfiájának, valamint szerkezetének vizsgálatára [29].

A pásztázó elektronmikroszkóp széleskörben alkalmazható, ugyanis alkalmas felszíni topográfiai vizsgálatokra, vastagsármérésre, elemi analízisre (EDS/X-ray diszperzív spektroszkópia), felületi kémiai analízisre (EDX), mágneses- és morfológiai vizsgálatokra, valamint 3D rekonstrukcióra is. Felhasználókörét tekintve rendkívül elterjedt az anyagtudomány és mérnöki kutatások-, elektronikai és félvezető ipar-, biológiai kutatások-, valamint a geológia és ásványtan területein. A kutatásom során, az elektronmikroszkóppal vizsgált mintákon a különböző felületkezelések hatásának értékeit a lentiekben, az eredmények kiértékelése fejezetben ismertetem, vizsgálom meg [29].

4.5.3. Nyugvócsepp módszeres peremszög mérési rendszer

Közvetlen az elvégzett felületkezelési eljárások után, a kezelt mintadarabokon nedvesítési peremszöget mértem a nyugvócsepp módszerrel. A módszernél a kiadagolt folyadékot lassú mozgással hozzáérintjük a felülethez. Ezáltal a felület nedvesítőképességéről kapunk információt és nem a felületre dinamikusan rá eső cseppelel szembeni viselkedéséről. A mérési módszer alkalmazása során a cseppelel egy vonalban egy fényképezőgép és egy fényforrás található. A mérőrendszer fókuszpontjában továbbá egy tárgyasztal helyezkedik el, amire a vizsgálandó mintát kell helyezni. A fényképezőgép makroobjektívjének középtengelye egybeesik a vizsgálandó felülettel, ezáltal a felület képen látott síkja, valamint az objektív szimmetria tengelye egybeesik. A vizsgálandó felület felett egy manuálisan állítható magasságú pipetta található, melynek tengelye merőleges a vizsgálandó felületre. Továbbá egy fényforrás alkalmazására is szükség van, ami a tárgyasztalon túl helyezkedik el és az objektív irányába világít, ezáltal a profilban vizsgált folyadékcsepp kontúrvonala meghatározható (11. ábra). Mikropipetta segítségével 5 µl-es cseppeket adagoltam a mérésekhez, így a legpontosabb a folyadékmennyiség felvétele és kiadagolása. A cseppentési vizsgálatokhoz kétféle folyadékot használtam a Fowkes módszer meghatározása alapján. Az egyik fajta folyadék desztillált víz, a másik $\geq 99\%$ tisztaságú etilén-glikol ($C_2H_6O_2$). A desztillált víz poláris és diszperzív komponense 20°C-on: 51 mN/m és 21,8 mN/m, az etilén-glikol poláris és diszperzív komponense 20°C-on: 19 mN/m és 29 mN/m.

A felvételeket egy Nikon D5300-as tükörreflexes digitális fényképezőgép segítségével készítettem. Továbbá a fényképezőgépre egy Tokina AT-X AF 100mm f/2.8 típusú makró objektív volt csatlakoztatva. A makró objektív fókusz-távolságának értékét a legkisebbre

állítottam, ilyenkor 1:1-es a leképezés, amely biztosítja a legnagyobb nagyítást. Az ISO érzékenységtartományt a legkisebbre, 100-as értékre állítottam. Az adatok, amiket változtathattam a záridő és a rekesz nyitottsága volt. A rekesz nyitottságával a mélységélességet befolyásoltam, a záridővel pedig a fény mennyiségét szabályoztam a fénykép elkészítése alatt. A legoptimálisabb fényképezési beállítást az 1/100-ad záridő és az f10-es rekesz nyitottsággal értem el.



11. ábra: Alkalmazott nyugvócsepp módszeres peremszög mérési rendszer szemléltetése

A nedvesítési peremszög mérő rendszer mérésének menete a következő. (1.) Mérendő lemez felhelyezése a mérőberendezés munkaasztalán, (2.) Pipetta hegy, pipettára való erősítése, (3.) Adott mennyiségű desztillált víz felszívása a pipetta hegybe, (4.) Pipetta, tartóba helyezése, (5.) A desztilláltvíz kinyomása a hegy végére, (6.) A munkaasztal hozzáemelése a csepphez, (7.) A munkaasztal beállítása a fényképezéshez megfelelő helyzetbe, (8.) A csepp lefényképezése 3 másodpercet követően, (9.) Pipetta hegyének kicserélése, (10.) Adott mennyiségű etilén-glikol felszívása a pipetta hegybe, (11.) Pipetta elhelyezése a tartóba, (12.) Az etilén-glikol kinyomása a hegy végére, (13.) A munkaasztal hozzáemelése a csepphez, (14.) A munkaasztal beállítása a fényképezéshez megfelelő helyzetbe, (15.) A csepp lefényképezése 3 másodpercet követően, (16.) A fényképek áthelyezése a számítógépre, (17.) A fénykép kiértékelése egyedi peremszögmérő szoftver segítségével.

Az elkészített fényképeket egy számítógépes peremszögmérő programba töltöttem be. A program segítségével megjelöltem a vizsgált felület és a folyadékcsepp jobb és baloldali kontaktpontjait. Ezáltal meghatároztam a fókuszban lévő síkot, ahol a folyadékcsepp profilból elemezhető, mérhető. Ezt követően a kontaktpontokból érintőket húztam a folyadékcsepp burkológörbéjére, majd a program automatikus szögméréssel meghatározta a bal- és jobboldali nedvesítési peremszögek értékeit. A 11. ábra a kutatás során alkalmazott nedvesítési peremszögmérő környezet szemlélteti.

A peremszögek megmérését követően az egy adott technológiai adatokkal kezelt acélrudak felületének peremszög értékeit átlagoltam. Ezáltal megkaptam egy-egy desztilláltvíz és etilén-glikol peremszög értékét az összes kísérleti paraméterhez. A kapott értékekkel kiszámoltam a határfelületi energiát. A Fowkes tételeknek megfelelően egy Excel program segítségével számoltam tovább. A Excel programba be kell írni a kapott peremszög értékeket és a program a Fowkes egyenlettel megoldja a többszörösen egyenletrendszer. Ennek köszönhetően megkapható a különböző felületkezelések hatására megváltoztatott határfelületi energia, diszperzív és poláris komponensekre lebontva.

4.5.4. Plasmatreat FG5001 plazmasugaras felületkezelő berendezés

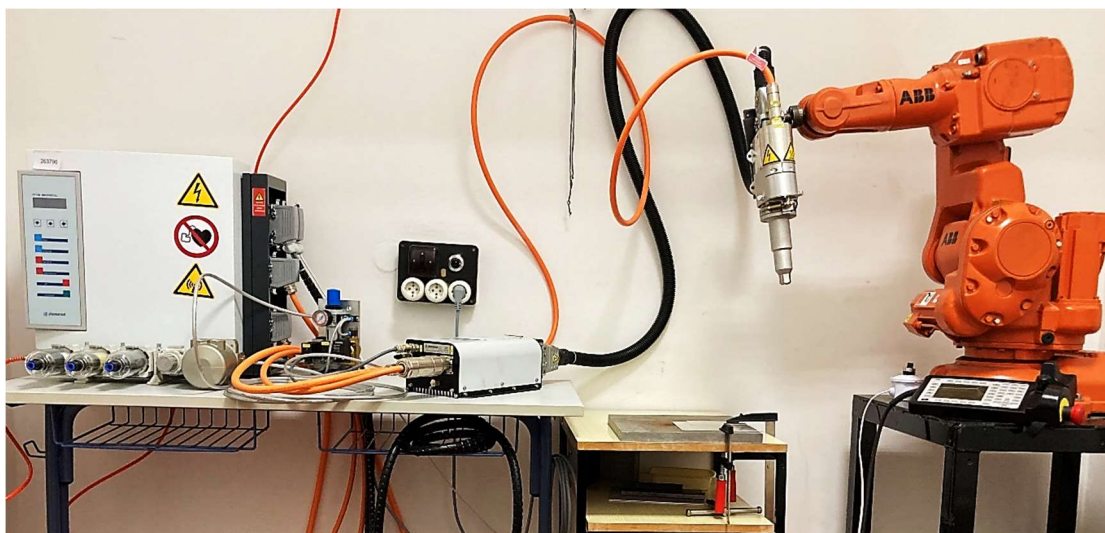
A plazmatechnológiák széleskörű alkalmazhatósága azon elven alapszik, mely lehetővé teszi az anyag felületi tulajdonságainak fokozatos megváltoztatását, anélkül, hogy az anyag tömbi vagy felületének esztétikai tulajdonságait megváltoztatná. A légköri plazmák, illetve hidegplazmák rendkívül népszerűek, mivel esetükben nincs szükség nagyméretű és drága vákuumkamrák telepítésére (pl. alacsony nyomású (vákuum) plazmák), így könnyen alkalmazhatók, importálhatók, akár ipari felhasználásokra is. A plazmarendszerek többek között képesek a kémiai és biológiai anyagok lebontására, szennyeződések eltüntetésére a felületekről, valamint az instabil atommagok eltávolítására. Továbbá a technológia alkalmas a felületek aktiválására és tisztítására, bevonatkészítésre, bevonatok módosítására, illetve passziválásra is [2].

A plazmasugárral történő felületkezelés során először a nagy energiával rendelkező részecskék felbontják a felületi szennyeződések, mely részecskéket a plazma áramlása eltávolít. Ezt követően a felületaktiválási folyamat megy végbe, amely során a felületi határrétegben lévő atomcsoportok közé, plazmaállapotú részecskék csapódnak nagy energiával. Ennek köszönhetően új kötéstípusokat alakítanak ki, majd funkcionális csoportokat hoznak létre a felületen és növelik a felületi energia értékét [2].

Az általam alkalmazott Plasmatreat FG5001 egy ipari plazmasugaras felületelőkészítő rendszer, amelyet tisztításra, aktiválásra és bevonatképzésre használnak. Maximálisan állítható teljesítménye 500 W, frekvenciája 13,56 MHz, valamint alkalmazható argon, oxigén, nitrogén stb. gázokkal, ez esetben én a sűrített levegős megoldást választottam.

Működési elve a fentiekben bemutatott rendszerrel azonos, vagyis a Plasmatreat FG5001 egy radiofrekvenciás (RF) plazma generátort használ. Az RF generátor 13,56 MHz-es frekvenciájú elektromágneses hullámokat bocsát ki egy antennán keresztül. Ezek az elektromágneses hullámok ionizálják a gázt a kamrában, létrehozva a plazmateret. A plazma olyan ionizált gázokból és szabad elektronokból áll, amelyek nagy energiával rendelkeznek. Ez a magas energia lehetővé teszi a felszíni reakciókat. Amikor a munkadarab belép a

plazmatérbe, a plazma hat az anyag felületére, a fentiekben definiált lépések szerint. A Plasmatreat FG5001 a plazma erejét és összetételét szabályozhatjuk a felszín előkészítéséhez megfelelően. Ezáltal különböző anyagok és alkalmazások esetén hatékonyan használható, például festék- vagy ragasztóanyagok jobb tapadásának biztosítására, illetve a felületek tisztítására és aktiválására a festést vagy ragasztást megelőzően. Az általam alkalmazott Plasmatreat FG5001-es plazma és annak működési környezete, a felületkezelési folyamat automatizálását segítő ABB robottal, az alábbi 12. ábra szemlélteti.



12. ábra: A plazmasugaras felületkezelés megmunkálókörnyezete

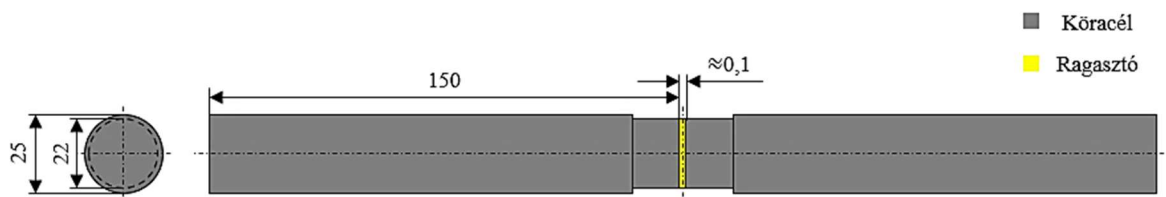
4.5.5. INSTRON 5900R 4482 univerzális mechanikai anyagvizsgáló gép

A kutatás során a ragasztott kötések elvégzett húzóvizsgálatokat az INSTRON 5900R 4482 univerzális mechanikai anyagvizsgáló gép segítségével készítettem el. A mechanikai anyagvizsgáló gép továbbá alkalmas nyomóvizsgálatok, hajlítóvizsgálatok és fásztóvizsgálatok kivitelezésére. A maximális erő kifejtése 100 kN. A maximális keresztfej sebessége 500 mm/min. Az anyagvizsgáló gép számítógép vezérelt. A vizsgálatok során a vizsgálógépen kézi szorítású befogó pofákat alkalmaztam a próbadarabok szabályos, roncsolásmentes befogása érdekében. Minden vizsgálati sorozat során legalább 7 próbatesten végeztem húzószilárdsági méréseket, a pontosabb eredmények érdekében. Minden húzóvizsgálat során egyaránt 2 mm/perc húzási sebességet alkalmaztam.

4.5.6. Húzóvizsgálatra, próbatestekre vonatkozó egyedi kialakítás

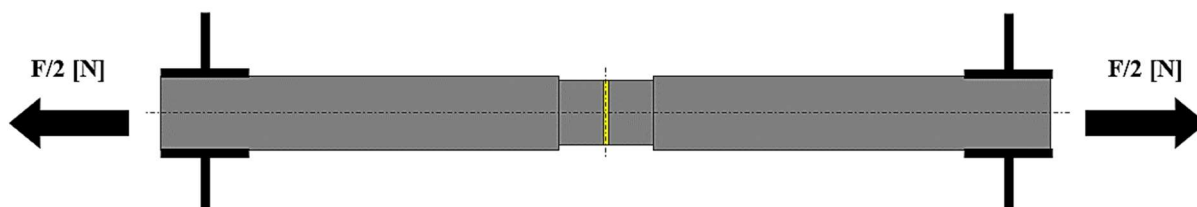
Az irodalomkutatásom során a húzószilárdsági vizsgálatok területén tapasztalt tudományos hiány, miatt a húzószilárdsági vizsgálatok próbatesteit, az előző világrekord kísérletek során alkalmazott, fontosabb értékekhez hű, ám egyedi paraméterek, méretek kidolgozásával készítettem el. Ebből kifolyólag, ahogy a 13. ábra is szemlélteti, a ragasztott terület átmérője 22 mm, ellenben a világrekord kísérletekben alkalmazott átmérővel, ahol a

ragasztott területek átmérője 71,2 mm. A próbatestek legnagyobb átmérője 25 mm, és hosszúságuk egyenként 150 mm volt (13. ábra).



13. ábra: Kutatásom során elkészített húzószilárdsági vizsgálatok egyedi felépítésű próbatesteinek szemléltetése

A vizsgálatok elvégzése során, ahogy a 14. ábra is szemlélteti, a munkadarabot a hengeres szorítópofák segítségével rögzítettem a vizsgálógép alsó szorítófejébe, majd a próbatestvédelem használata mellett (<50N erő), befogtam a munkadarabot a keresztfejbe is, ezt követően a befogott köracélnál fogva elvégeztem a ragasztott kötések húzószilárdsági vizsgálatait. A 0,1 mm ragasztási hézag megismételhetősége és a ragasztási terület megtartása érdekében központosító készüléket alkalmaztam, ahol a prizmáknak köszönhetően a ragasztani kívánt acélrudak egy síkba helyezkedtek el, valamint a készülékhez tartozó csavar, 2 Nm-es nyomatékra húzásával biztosítottam az állandó kötéhézagot. A ragasztó kitérhálósodása közben, a hőkezelés teljes ideje alatt, a próbatestek mindvégig a készülékben, a megadott nyomatékra voltak húzva. A húzószilárdsági vizsgálatok során 2 mm/perc húzási sebességet alkalmaztam a vizsgálógépen.



14. ábra Húzószilárdsági vizsgálatot szemléltető ábra

5. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA, KIÉRTÉKELÉSE

Az eredmények kiértékelése fejezetben definiálom, szemléltetem a fentiekben már bemutatott összetételű acélrudakon végrehajtott felületkezelések hatását, illetve a felületkezelések módosító értékét a különböző vizsgálati eredményekkel bizonyítva. A kutatási projektem során elért eredményeim az alábbi felsorolás szerint kívánom bemutatni.

5.1. Ragasztott kötések szilárdsági eredményeinek ismertetése

5.1.1. *A hőkezelés időtartamának és hőmérsékletének hatása a szilárdságra*

5.1.2. *Az optimális felületkezeléssel és hőkezelési technológiával elért legnagyobb szilárdságok*

5.1.3. *A ragasztott kötések állandó terhelésen tartásának vizsgálata*

5.2. Eredmények értelmezése és megvitatása a felületi mérések függvényében

5.2.1. *Felületek érdességmérésének eredményei*

5.2.2. *Nedvesítőképesség- és felületi energia mérések*

5.2.3. *Felületek elektronmikroszkópiai vizsgálata*

5.2.3.1 *A felületen elhelyezkedő C/O arányának vizsgálata*

5.2.3.2 *A felületen elhelyezkedő Fe/O arányának vizsgálata*

5.1. Ragasztott kötések szilárdsági eredményeinek ismertetése

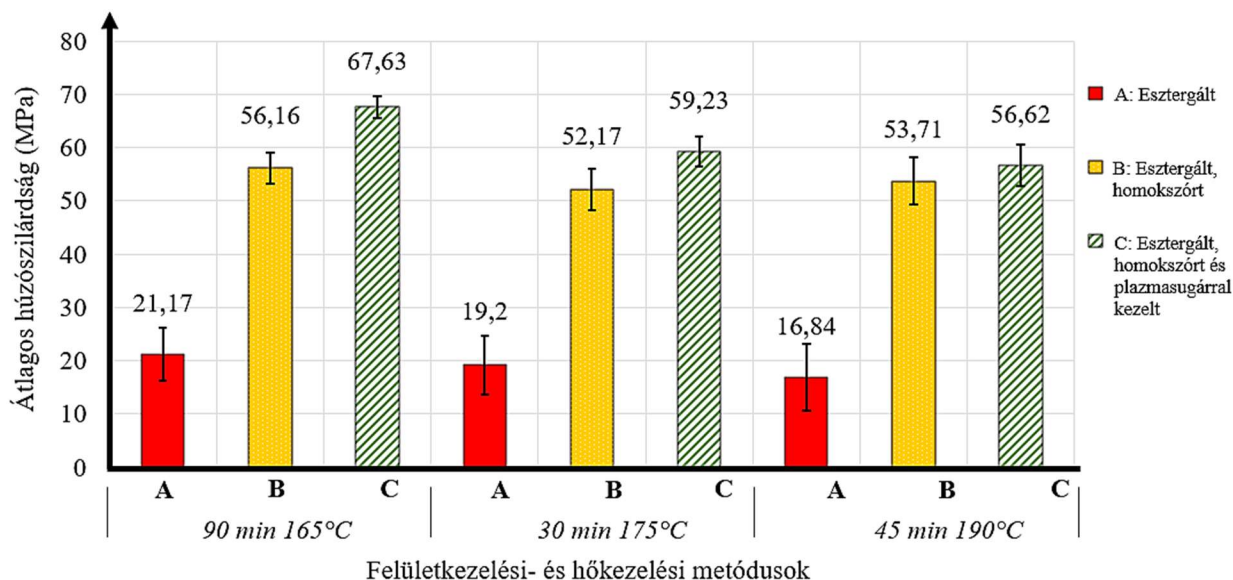
5.1.1. *A hőkezelés időtartamának és hőmérsékletének hatása a szilárdságra*

Kutatásom során a ragasztott kötések szilárdságának megváltozását a különböző technológiákkal felületkezelt próbatestek mellett, eltérő hőkezelési metódusokkal is teszteltem. Az alábbi 15. ábra diagramján a különböző felületkezelési-, hőkezelési eljárások hatását szemléltetem az elért átlagos húzószilárdsági értékek függvényében. A 3. táblázat, a 15. ábra diagramján alkalmazott jelölések jelentését szemlélteti, magyarázza.

3. táblázat: *A 15. ábra diagramján alkalmazott felületkezelések jelölésének*

magyarázata

Felületkezelési eljárások	Felületkezelések jelölése
Esztergált felület	A
Esztergált és homokszórt felület	B
Esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület	C



15. ábra: Átlagos húzószilárdságok szemléltetése a felületkezelési- és hőkezelési metódusok függvényében

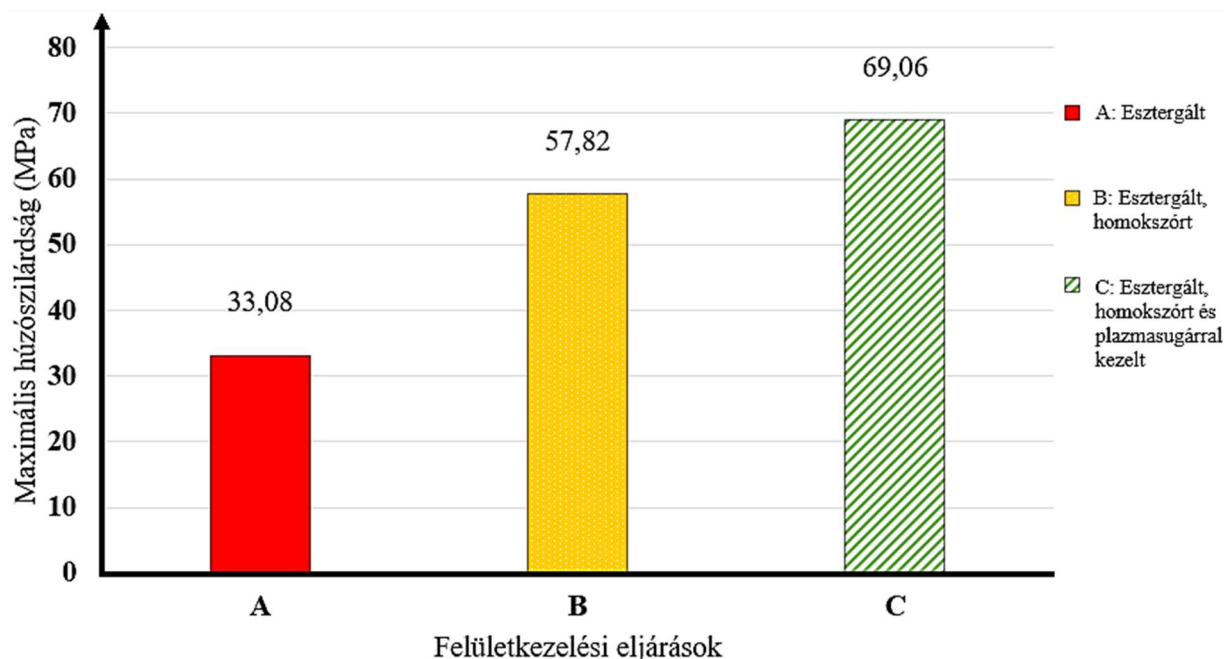
Jól észrevehető, hogy a hőkezelési hőmérséklet növelésével, csökkent a ragasztott kötések húzószilárdsága. A legkedvezőtlenebb értékeket a 45 perces és 190°C-on hőkezelt próbatestek eredményezték. A 30 perces és 175°C-os hőkezelés javulást eredményezett a szilárdsági értékekben. Illetve a 90 perces és 165°C-os hőkezelést követően értem el a legkedvezőbb átlagos húzószilárdsági értékeket. Továbbá az is észrevehető, hogy a C típusú, vagyis az esztergált-, homokszórt-, és plazmasugárral kezelt felületek nyújtották a legmagasabb húzószilárdságot, ellenben az esztergált felületekből készített próbatestek a legalacsonyabb szilárdsággal rendelkeztek.

Mivel a legmagasabb húzószilárdsági értékeket a 90 perces és 165°C-os hőkezelést követően kaptam, így a továbbiakban ezzel típussal próbáltam elérni a maximális húzószilárdsági értékeket.

5.1.2. Az optimális felületkezeléssel és hőkezelési technológiával elért legnagyobb szilárdságok

Ahogy az előző diagramon is látható, a legmagasabb átlagos húzószilárdsági eredményeket a 90 perces és 165°C-os hőkezelést követően kaptam. Az alábbi diagram (16. ábra) és táblázat (4. táblázat) az ezzel a hőkezelési típussal kezelt próbatestek, legmagasabb elért húzószilárdsági eredményeit szemléltetik a különböző felületkezelések függvényében.

Az esztergált felületből készített, ragasztott próbatest 33,08 MPa maximális terhelést eredményezett. Az esztergált és homokszórt felület esetében, 57,82 MPa maximális terhelhetőséget kaptam. Míg az esztergált-, homokszórt-, és plazmasugárral kezelt felülettel 69,06 MPa maximális húzószilárdságot értem el. Kutatásunk legkiemelkedőbb eredményét, ennek a ragasztott kötésnek a húzószilárdsága jelentette.



16. ábra: Az optimális felületkezelési és hőkezelési technológiával elért szilárdságok maximumának szemléltetése

4. táblázat: Elért húzószilárdságok maximumát összegző táblázata

Felületkezelési eljárások	Felületkezelések jelölése	Húzószilárdság elért maximuma (MPa)
Esztergált felület	A	33,08
Esztergált és homokszórt felület	B	57,82
Esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület	C	69,06

5.1.3. A ragasztott kötések állandó terhelésen tartásának vizsgálata

A 5. táblázat szemlélteti a ragasztott kötések állandó terhelésen tartásának vizsgálati eredményeit. A vizsgálat célja, az volt, hogy meghatározzam a bizonyos felületkezelési technológiával kezelt felületekből készített próbatestek mennyi ideig képesek elviselni az előre meghatározott, állandó terheléseket, feszültségeket. A vizsgálatot az esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt (C) felületekből elkészített ragasztott próbatestek esetében végeztük el, mivel minden esetben ezek eredményezték a legnagyobb húzószilárdságot. Jól látható, hogy a terhelés nagyságának csökkentésével, lényegesen nagyobb tartási időt tudtam elérni. A kutatásom későbbi részeiben további terhelés fenntartásos vizsgálatok elvégzését tervezem.

5. táblázat: A ragasztott kötések állandó terhelésen tartásának vizsgálati eredményei

Felületkezelési eljárás	Felületkezelés jelölése	Állandó terhelés (MPa)	Terhelés fenntartásának időtartama [perc]
Esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület	C	49	38
		47	65

5.2. Eredmények értelmezése és megvitatása a felületi mérések függvényében

5.2.1. Felületek érdességmérésének eredményei

A különböző technológiákkal felületkezelt minták felületi érdességét, egy Olympus LEXT OLS5000 konfokális lézeres pásztázó mérőmikroszkóp segítségével határoztam meg.

Az átlagos felületi érdességet tekintve az esztergált (A) típusú felület adta a legnagyobb, 3 µm-os átlagos felületi érdességi értéket. Az esztergált és homokszórt (B) felület esetében az átlagos felületi érdesség értéke lecsökkent 2,2 µm-ra a homokszórásnak köszönhetően. Továbbá az esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület (C) 0,1 µm-os átlagos érdesség csökkenést mutatott a B jelölésű felülethez képest (6. táblázat).

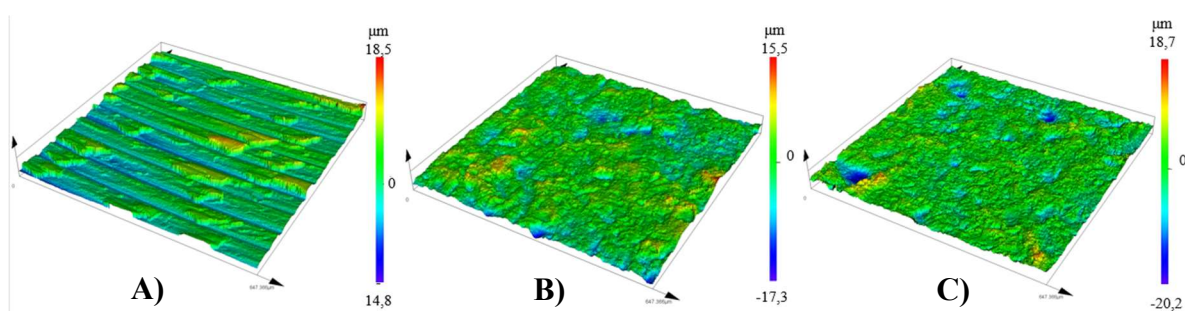
A kismértékű csökkenésre két különböző magyarázat is van. Először is, feltehetőleg a plazmasugaras kezelés során a plazmasugár eltávolította a homokszórásból a felületen elhelyezkedő szemcséket, részecskéket, melyek az alkoholos tisztítást követően is a felületen maradtak. A második feltevés pedig, hogy a különböző eljárással kezelt felületek érdességét, külön-külön mintákon mértük meg, ebből kifolyólag eltérés tapasztalható az esztergálási- és homokszórási műveletek között. Arra, hogy a két feltevés közül melyik áll fenn esetemben, az elektronmikroszkópos felvételek adhatnak választ, melyek eredményét a későbbiekben ismertetem.

6. táblázat: Felületkezelt mintadarabok érdesség mérésének értékei

Felületkezelési eljárások	Felületkezelések jelölése	R _a (µm)	R _z (µm)
Esztergált felület	A	3	15,7
Esztergált- és homokszórt felület	B	2,2	13
Esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület	C	2,1	14,8

A felületi érdességek megváltozásának hatását vizsgálva a húzószilárdsági eredményekre kijelenthetem, hogy igenis szoros kapcsolatban állnak. A kontroll (esztergált) felületről készített próbatestek esetében 21,17 MPa-os szilárdságot, illetve 3 µm-os felületi érdességet

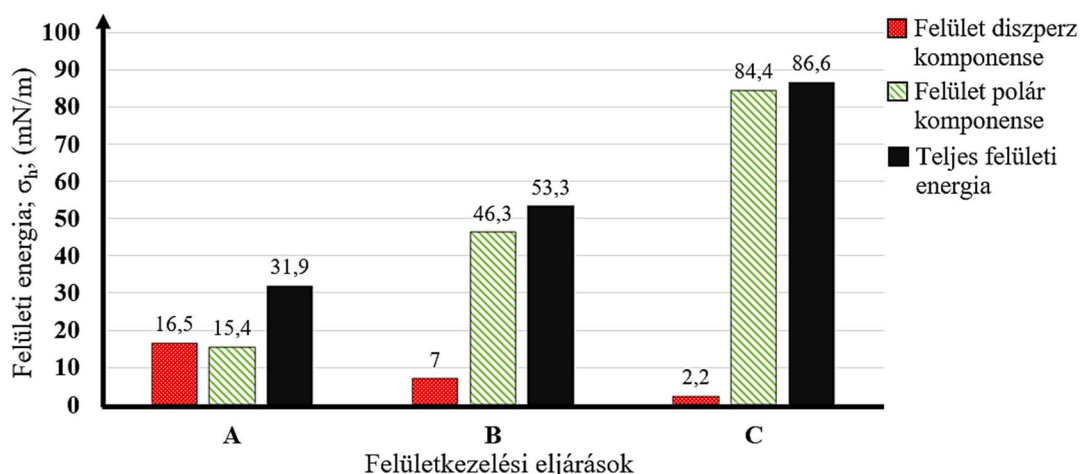
tapasztaltam. A homokszórás csökkentette a felület érdességét, illetve 53,17 MPa-ra növelte a ragasztott kötés átlagos húzószilárdságát. A megnövekedett szilárdság feltehetőleg annak is köszönhető, hogy a homokszórás homogenizálta a felületet, finomabb szerkezeti mikrostruktúrát hozott létre, valamint növelte a relatív felület nagyságát, melyek a 17. ábra felvételein is láthatók. Ennek eredményeképp a ragasztó jobban bele tudott tapadni a felület mikrostruktúrájába. A plazmasugaras felületkezelés szinte semmit nem változtatott a felület érdességen a B jelölésű felülethez képest, ellenben tovább növelte a ragasztott kötés szilárdságát (67,63 MPa). A húzószilárdsági értékek fejlődését okozhatja még a felületek nedvesítőképességének-, valamint szén/oxigén (C/O) arányának megváltozása a felületkezelések hatására. Ezek hatását a szilárdságra a továbbiakban vizsgálom.



17. ábra: Olympus LEXT OLS5000 konfokális lézeres pásztázó mérőmikroszkóppal készített felvételek szemléltetése

5.2.2. Nedvesítőképesség- és felületi energia mérések

A felületi érdességek meghatározását követően, megmértem a kezelt felületek nedvesítőképességét, felületi energiáinak nagyságát. Az esztergált, vagyis a kontroll felület esetében, desztilláltvízzel 73,1°-os, míg etilénlikollal 51,3°-os peremszög értékeket mértem, mely 31,9 mN/m felületi energiát jelent. Az esztergált és homokszórt felületen a peremszögek nagysága desztilláltvízzel 47,6°, illetve etilénlikollal 33,9° volt. Ez a teljes felületi energia 53,3 mN/m-es értékét eredményezte (18. ábra).



18. ábra: A felületkezelte mintadarabok felületi energiájának szemléltetése

Ez is azt bizonyítja, hogy a homokszórás a felületet homogenizálta, valamint növelte a relatív felület nagyságát, ennek köszönhetően a cseppek jobban el tudtak terülni a felületen, mely a peremszög értékek csökkenését jelentette a kontroll felületéhez képest. Feltehetőleg a homogénebb, a ragasztásnak optimálisabb felületi érdességnek, valamint a jobb nedvesítőképesség együttes hatásának eredményeként tudtam nagymértékben megnövelni a kötés húzószilárdságát. Az esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felületen (C) rendkívül jó értéknek számító 7,4°-os (desztilláltvíz), valamint 0°-os (etilénglikol) peremszög értékeket kaptam. A felületi energia 86,6 mN/m-es értéke megközelíti a tökéletes hidrofíli felületet (7. táblázat).

7. táblázat: A felületkezelt mintadarabok nedvesítőképességének értékei

Felületkezelési eljárások	Felületkezelések jelölése	Peremszög értéke		Felület diszperz komponense (mN/m)	Felület polár komponense (mN/m)	Teljes felületi energia (mN/m)
		Desztillált víz esetében (°)	Etilénglikol esetében (°)			
Esztergált felület	A	73,1	51,3	16,5	15,4	31,9
Esztergált- és homokszórt felület	B	47,6	33,9	7	46,3	53,3
Esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület	C	7,4	0	2,2	84,4	86,6

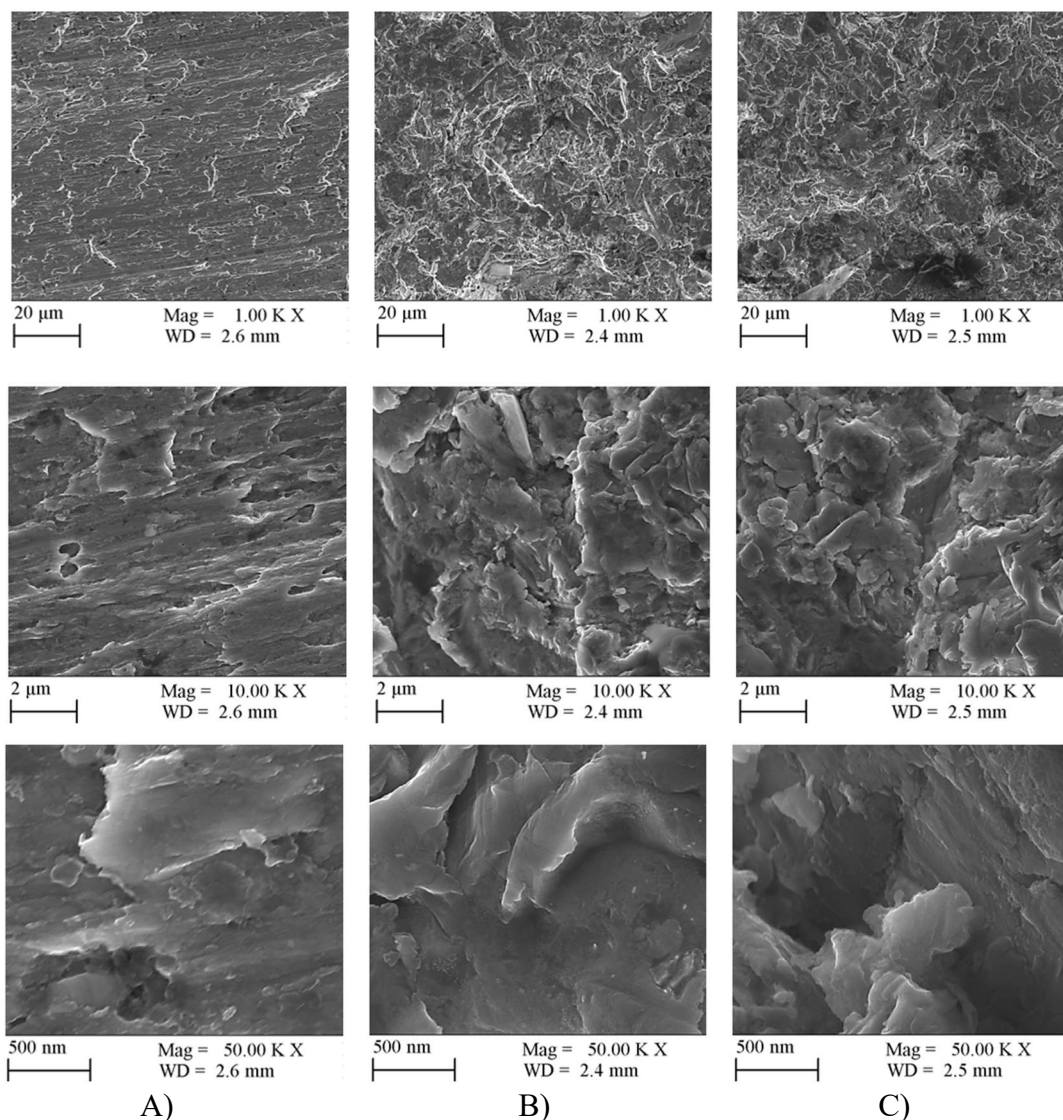
Véleményem szerint ennek a kiváltó oka, hogy a homokszórással előállított homogén, mikrostruktúra környezet, még egy kikísérletezett paraméterű plazmasugaras felületaktiválást is kapott. Mivel a plazmasugaras kezelés által szinte nem történt semmilyen felületi érdesség változás, így a 14,46 MPa-os szilárdságbeli növekedést csak a plazmasugaras kezelés felületaktiváló hatása eredményezte. Azt, hogy a plazmasugaras kezelés során milyen változás ment végbe a felületen elhelyezkedő C/O, illetve az Fe/O arányában, azt a folytatásban vizsgálom.

5.2.3. Felületek elektronmikroszkópiai vizsgálata

Az elektronmikroszkóp szekunder elektronjaival alkotott felületi képek az alábbiakban láthatók (19. ábra).

Az esztergált felület esetében jól látható a forgácsolás során kialakuló, körkörös szerkezetű felületi struktúra, de további a kapott eredményeket befolyásoló tényezőt egyik nagyításban sem fedeztem fel. Az esztergált és homokszórt felületről készített felvételeken a homokszórás által létrejött homogén felület látható, melyen nem ismerhető fel az esztergálás során keletkezett körkörös szerkezetű struktúra. Ellenben fontos megemlítenem, hogy véleményem szerint, az 50.00 K X-es nagyítású képen a homokszórás során a felületre került nano méretű

szilícium-dioxid szennyeződések fedezhetők fel, melyek a tisztítást követően is a felületen maradtak. A makro (10.00 K X-es) felvételeken nem észleltem, de a mikro (50.00 K X-es) képen már felfedezhetők az említett valószínűsíthető szennyeződések.



19. ábra: A felületkezelte mintadarabokról készített elektronmikroszkópos felvételek szemléltetése (ahol az A oszlop az esztergált-, B oszlop az esztergált-és homokszórt-, C oszlop az esztergált-, homokszórt-és plazmasugárral kezelt felületeket tartalmazzák)

Az esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület esetében a plazmasugaras kezelés hatására látszólag nem történt változás a felületi struktúrában. Ugyanakkor észrevehető módon, kevesebb a felületen elhelyezkedő nanoszerkezetű szennyeződés, mely az elemanalízis során is bebizonyosodott (8. táblázat). A csökkenést feltehetőleg a plazmasugaras kezelés tisztító hatása eredményezte.

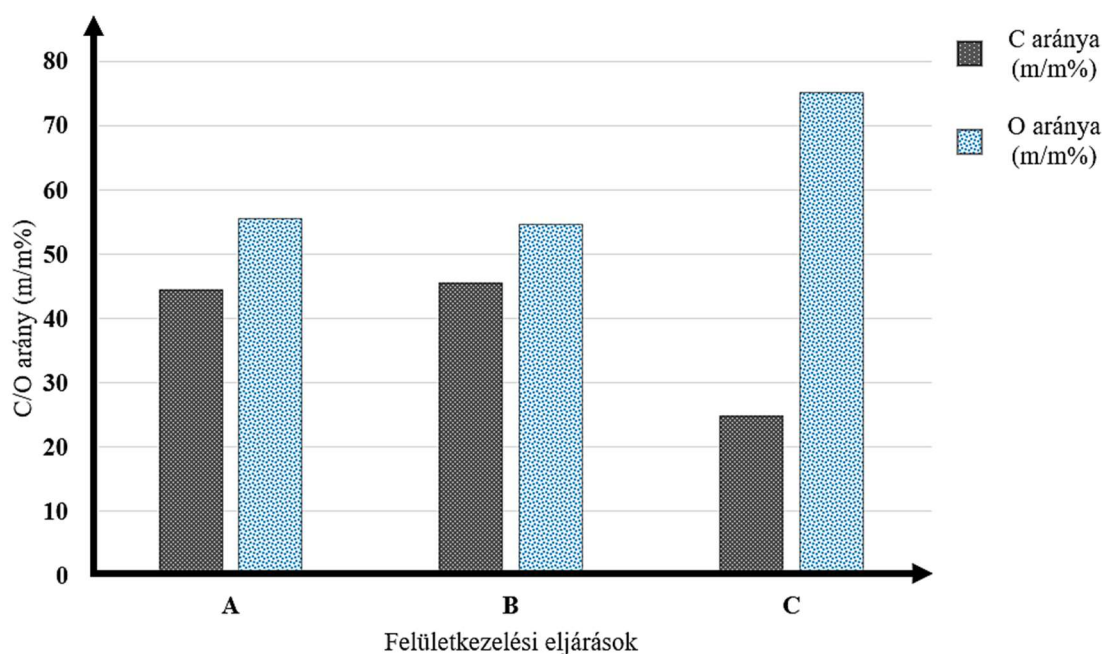
8. táblázat: A felületkezelt darabok Fe/Si arányának értékei

Felületkezelési eljárások	Felületkezelések jelölése	Fe/Si aránya (m/m%) Fe	Fe/Si aránya (m/m%) Si
Esztergált- és homokszórt felület	B	92,4	7,6
Esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület	C	93,1	6,9

Véleményem szerint a felületen elhelyezkedő szilícium-dioxid szemcsék miatt volt tapasztalható a 0,1 μm -os felületi érdesség különbség a B és a C felületek között. Továbbá lehetséges, hogy a szemcse szennyeződések is befolyásoló tényezővel bírtak a ragasztott kötések húzószilárdsági értékeire.

5.2.3.1 A felületen elhelyezkedő C/O arányának elektronmikroszkópos vizsgálata

Az esztergált felületen 44,55% szén és 55,45% oxigén arányt állapítottam meg. A kontroll felülethez képest a homokszórt esetében 0,9%-os eltérés figyelhető meg. Mivel a homokszórás hatására nem változott meg a felület kémiai elemösszetétele, így a rendkívül kismértékű százalékos eltérés a mérés szórása lehet. Ellenben a plazmasugaras kezelést követően nagymértékben lecsökkent szén százalékos arányt, 24,85% és kimagasló 75,15%-os oxigénösszetételt mértem (20. ábra, 9. táblázat).



20. ábra: A felületkezelt minták C/O arányának szemléltetése

Véleményem szerint, a plazmasugaras felületkezelés hatására a felületi molekulacsoportok megváltoztak és a szén-szén, szén-hidrogén kötések (karboxil- csoportok) helyett, szén-oxigén molekulacsoportok alakultak ki. Valószínűsíthető, hogy a nagymértékű oxigénnövekménynek

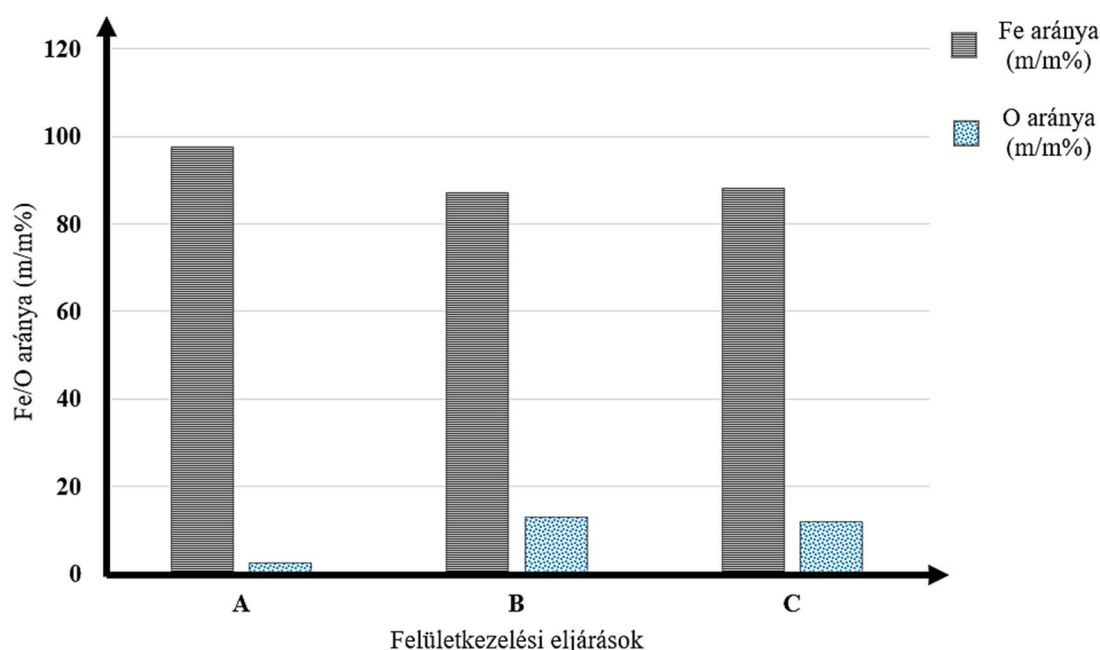
és a homogén, megnövekedett relatív felületnek, köszönhetően mértem közel hidrofíl, magas felületi energia értéket, illetve kaptam rendkívül magas húzószilárdsági értéket (69,06 MPa).

9. táblázat: A különböző felületmódosító eljárásokkal kezelt mintadarabok C/O arányának értékei

Felületkezelési eljárások	Felületkezelések jelölése	C/O aránya (m/m%) C	C/O aránya (m/m%) O
Esztergált felület	A	44,55	55,45
Esztergált- és homokszórt felület	B	45,45	54,55
Esztergált-, homokszórt és plazmasugárral kezelt felület	C	24,85	75,15

5.2.3.2 A felületen elhelyezkedő Fe/O arányának elektronmikroszkópos vizsgálata

A vas/oxigén arányának meghatározása során elsőként az esztergált (kontroll) felületen mértem, mely 97,6% vas- és 2,4% oxigén tömegszázalék arányt adott. Ehhez képest a homokszórást követően 10,45%-kal csökkent a vas-, ezáltal nőtt az oxigén aránya. Ezesetben sem változott a felület kémiai elemösszetétele, így a megváltozott arányt a relatív felület növekedése okozhatta. Feltehetőleg a homokszórás által létrejövő homogén, felületi mikrostruktúrában, aminek relatív felülete nagyobb, mint az esztergált felületé, ezáltal több oxigén/oxid tudott elhelyezkedni. A C típusú felület esetében 0,95%-os arányváltozást tapasztaltunk, mely annyira kismértékű, hogy mérési pontatlanságnak, szórásnak könyveltem el (21. ábra, 10. táblázat).



21. ábra: A különböző felületeken elhelyezkedő Fe/O arányának szemléltetése

10. táblázat: A különböző felületeken elhelyezkedő Fe/O arányának értékei

Felületkezelési eljárások	Felületkezelések jelölése	Fe/O aránya (m/m%) Fe	Fe/O aránya (m/m%) O
Esztergált felület	A	97,6	2,4
Esztergált- és homokszórt felület	B	87,15	12,85
Esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felület	C	88,1	11,9

Feltehetőleg a homokszórt, illetve a plazmasugárral kezelt felületek esetében tapasztalt vas tömegszázalékának csökkenése és az oxigén tömegszázalékának növekedése, a relatív felület növekedésével magyarázható. Az oxigén arányának-, valamint a relatív felület növekedésének köszönhetően a felület nedvesítőképessége is javult, mivel a csepp jobban el tudott terülni a felületen. Továbbá a plazmasugaras kezelés hatására aktiválódott a felület, amit a C/O arány nagymértékű változása bizonyít, illetve ennek a nagymennyiségű oxigén jelenlétének és a felület topográfiájának köszönhetően tudtuk maximalizálni a szilárdságot 69,06 MPa-ra.

6. EREDMÉNYEK ÖSSZEHAISONLÍTÁSA AZ IRODALOMMAL

Ennek a fejezetnek a célja, hogy a kutatásom során, a dolgozatban ismertetett eredményeimet összehasonlítsam az irodalomkutatásomban megismert értékekkel. Az irodalomkutatásom során tanulmányozott nemzetközi cikkek egyikében sem található meg az általam a kísérletekhez használt acél típus és ragasztóanyag. Továbbá rendkívül kevés kutatócsapat, publikáció számol be a ragasztott kötések húzószilárdsági vizsgálatairól. Ebből kifolyólag, kutatási eredményeim egyedinek számítanak, más kutatási eredményekkel nem összevethetők.

Kutatásomban, dolgozatomban nemcsak az elért szilárdsági eredményeket ismeretem, hanem lehetőség szerint az összefüggéseket is vizsgálom, magyarázom. Rendkívül fontos, hogy az elért eredmények közötti összefüggéseket megfejtjük, megismerjük, annak érdekében, hogy a ragasztástechnológia, abból is a nagyszilárdságú alkalmazás, még nagyobb magaslatoakat érhesen el.

Optimista és bizakodó vagyok, ha az elért eredményeimet, a hivatalosan is jelenlegi legerősebb ragasztott kötés értékével hasonlítom össze. A legerősebb ragasztó jelenlegi rekordja 43,9 MPa, melyet sikerült kutatásomban 57%-kal megnövelnem, vagyis elérni a 69,06 MPa-os húzószilárdságot.

Ugyanakkor messzemenő következtetéseket nem szabad ezek alapján levonni, ugyanis a 69,06 MPa-os eredményt húzószilárdsági vizsgálat során értem el, nem pedig az adott terhelés folyamatos fenntartása közben. Továbbá az elismert mérések során 71,2 mm-nek kell lennie a ragasztott felületek átmérőjének, kutatásom során, pedig 22 mm-es átmérőjű próbatesteket alkalmaztam. Az átmérő növelésével feltehetőleg, habár kis mértékben is, de csökkenni fog a kötés szilárdsága.

A kutatómunkám folytatásának első lépése lesz, a ragasztott felületek átmérőjének megnövelése a szabálynak, szabványnak megfelelő méretre. Majd a szabályos méretű próbatestekből elkészített próbatesteket állandó terheléses vizsgálatnak vetem alá.

Az összefoglaltak alapján kijelenthetem, hogy kutatási eredményeim egyedinek számítanak, más kutatási eredményekkel nem vethetők össze.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás keretein belül az acél felületén alkalmazott különböző felületkezelési technológiák hatását vizsgáltam a felület nedvesítőképességére, felületi érdességére, valamint a felület elemösszetételére. Ezen kívül értékeltam a felületkezelések módosító hatásait az elektronmikroszkópos felvételek segítségével, valamint a módosított felületekből készített ragasztott kötések húzószilárdságát.

A kutatás eredményeként kiemelhetők a peremszög, ezzel együtt a felületi energia értékeinek jelentős javulása, valamint a húzószilárdság 109%-os növekedése a kontroll felületekéhez képest, illetve az 57%-os javulás a jelenlegi legerősebb ragasztó húzószilárdsági értékéhez képest. A peremszög és felületi energia vizsgálatában az esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felületek eredményezték a legjelentősebb fejlődést, az 5° alatti peremszög és a közel maximálisnak számító 84,4 mN/m polár komponensű felületi energia értékekkel.

A felületi érdesség mérése során a legnagyobb érdességet az esztergált felületek eredményezték, ahol az $R_a=3\text{ }\mu\text{m}$, $R_z=15,7\text{ }\mu\text{m}$ és a legkisebb érdességi értékeket az esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felületek nyújtották, ahol $R_a=2,1\text{ }\mu\text{m}$, $R_z=14,8\text{ }\mu\text{m}$ értékeket sikerült elérni.

Az elektronmikroszkópos felvételeknek köszönhetően vizsgálhattam az esztergálás, homokszórás, illetve a plazmasugaras kezelés során, a felületen végbemenő változásokat és azok hatását a többi vizsgálati eredményre. Valamint a felületről készített felvételek és az elemanalízis együttes tanulmányozásával, egyértelmű igazolást kaptunk a plazmasugaras kezelés felülettisztító hatásáról is.

A húzószilárdsági vizsgálatok során a legmagasabb értéket, szintén az esztergált-, homokszórt- és plazmasugárral kezelt felületekből készült próbatestek eredményezték, 69,06 MPa húzószilárdsággal.

A jövőbeni terveim közé tartozik a jelenlegi kutatás továbbfejlesztése, a szabályoknak megfelelő méretekkel rendelkező próbatestek és azok további vizsgálataik megtervezése. További céljaim közé tartozik az acél nagyszilárdságú ragasztástechnológiájának tökéletesítése az ipar számára. A ragasztott kötések húzószilárdsági vizsgálatáról szóló kutatások és publikációk népszerűségének növelése.

8. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Elsősorban és mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani a Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Karán az Innovatív Járművek és Anyagok Tanszékének vezetőinek, munkatársainak, hogy biztosították a kutatás elvégzéséhez szükséges helyiségek, eszközök, anyagok, vizsgálati- és felületkezelési gépek, illetve a kimagasló mértékű szakértelem meglétét.

Továbbá kiemelten hálás köszönetet mondok konzulensemnek, egyben témavezetőmnek Dr. Berczeli Miklósnak, hogy szakértelmével és tanácsaival nagymértékben hozzájárult a kutatásom, illetve dolgozatom sikeres végkimeneteléhez. Ő volt az, aki a kutatás során minden nehéz, tanácstalan pillanatban támogató személyiségével és hozzáértő szakértelmével segítette utamat a helyes, fontos döntések meghozatalában.

Köszönöm az Innovatív Járművek és Anyagok tanszékén dolgozó Kovács Péter és Tajti Ferenc tanszéki mérnökök kitartó munkáját, mellyel segítséget nyújtottak a felületkezelések és a ragasztott próbatestek elkészítésében, illetve hozzájárultak kutatómunkám sikerességéhez, dolgozatom megírásához.

Köszönet illeti még:

A Henkel Magyarország Kft.-t, akik folyamatos utánpótlással biztosították a vizsgálataimhoz és méréseimhez szükséges ragasztóanyagot.

Végül, de korántsem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani családomnak, páromnak és barátaimnak, akik nélkül nem tartanék ott, ahol most tartok és nem lettem volna képes sem ezt a dolgozatot, sem más tudományos munkát elkészíteni.

Köszönöm édesanyámnak, édesapámnak és a családom többi tagjának, hogy mindig hatalmas szeretettel, türelemmel, biztatással bántak velem, mely rendkívül nagy támogatást jelentett számomra a tanulmányaim elvégzéséhez, valamint céljaim eléréséhez.

Kiemelt köszöntetet érdemel a párom Kis Katica, aki állandó odafigyelésével, biztatásával, megértésével és végtelen szeretetével támogat a tudományos kutatásaim elvégzése és a dolgozataim megírása során.

9. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Különböző kötéstechnológiák alkalmazásának feszültségeloszlása [7].....	6
2. ábra: Adhéziós és kohéziós erők a ragasztott kötésekben [2]	7
3. ábra: Ragasztott kötések tönkremenetelésének szemléltetése a) adhéziós, b) kohéziós és c) vegyes típusok esetében [2].....	8
4. ábra: Szemléltető ábra a ragasztásnak kedvezőtlen (felső) és a kedvező (alsó) nedvesítésről [2]	9
5. ábra: Nyugvócsepp módszeres peremszög mérést szemléltető ábra [2]	10
6. ábra: Zisman diagram egy alacsony sűrűségű polietilén esetében [2]	11
7. ábra: Owens/Wendt diagram polimetil-metakrilát felületi feszültség meghatározásának segítésére [2].....	13
8. ábra: A nagyszilárdságú ragasztók fejlődésének szemléltetése.....	16
9. ábra: A jelenlegi legerősebb ragasztott kötésnek és kísérleti környezetének szemléltetése [24].....	17
10. ábra: A ragasztott próbatestek elkészítéséhez tervezett központosító készülék szemléltetése.....	21
11. ábra: Alkalmazott nyugvócsepp módszeres peremszög mérési rendszer szemléltetése ...	24
12. ábra: A plazmasugaras felületkezelés megmunkálókörnyezete	26
13. ábra: Kutatásom során elkészített húzószilárdsági vizsgálatok egyedi felépítésű próbatesteinek szemléltetése	27
14. ábra Húzószilárdsági vizsgálatot szemléltető ábra.....	27
15. ábra: Átlagos húzószilárdságok szemléltetése a felületkezelési- és hőkezelési metódusok függvényében	29
16. ábra: Az optimális felületkezelési és hőkezelési technológiával elért szilárdságok maximumának szemléltetése	30
17. ábra: Olympus LEXT OLS5000 konfokális lézeres pásztázó mérőmikroszkóppal készített felvételek szemléltetése	32
18. ábra: A felületkezelt mintadarabok felületi energiájának szemléltetése	32
19. ábra: A felületkezelt mintadarabokról készített elektronmikroszkópos felvételek szemléltetése (ahol az A oszlop az esztergált-, B oszlop az esztergált-és homokszórt-, C oszlop az esztergált-, homokszórt-és plazmasugárral kezelt felületeket tartalmazzák)	34
20. ábra: A felületkezelt minták C/O arányának szemléltetése.....	35
21. ábra: A különböző felületeken elhelyezkedő Fe/O arányának szemléltetése.....	36

10. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Dr. W. Zoltán: Járműipari kötéstechológiák. MeRSZ, 2019.
https://mersz.hu/dokumentum/m518jk__1/ (Megtekintés dátuma: 2023.11.01.).
- [2] B. Miklós: Járműipari kötések fejlesztése felületkezelési eljárásokkal. 2022.
<https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/16958/ertekezes.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (Megtekintés dátuma: 2023.11.01.).
- [3] Ferromark: Acél hasznossága. <https://ferromark-ker.com/accel/accel-hasznossaga/>
(Megtekintés dátuma: 2023.10.21.).
- [4] Total Materia: Acél tulajdonságok.
<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=SteelProperties&LN=HU> (Megtekintés dátuma: 2023.10.21.).
- [5] Hód-Metál Kft: Acél kisokos. <https://hodmetal.hu/accel-kisokos/> (Megtekintés dátuma: 2023.10.21.).
- [6] Inox Service Hungary Kft.: Acélról általában. <https://inoxservice.hu/hu/page/show/accelrol-altalaban> (Megtekintés dátuma: 2023.11.09.).
- [7] S. Anett: Ragasztott kötések ellenőrzése és kísérleti vizsgálata. 2018. <http://midra.unimiskolc.hu/document/31136/27215.pdf> (Megtekintés dátuma: 2023.11.09.).
- [8] Sz. Jenő: Javítástechológia (Károsodás-elmélet). Eredeti Információforrás. 2013.
<http://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/handle/123456789/3060> (Megtekintés dátuma: 2023.11.07.).
- [9] LOCTITE®: Henkel Adhesives. <https://www.henkel-adhesives.com/hu/hu/r%C3%B3lunk/m%C3%A1rka%C3%A1link/loctite.html>
(Megtekintés dátuma: 2023.11.07.).
- [10] Gépészeti szakismeretek 1.: Sulinet Tudásbázis.
<https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/gepeszeti/gepeszeti-szakismeretek-1/a-ragasztas-technologiaja/a-ragasztas-anyagai> (Megtekintés dátuma: 2023.11.07.).
- [11] I. Márquez, N. Paredes, F. Alarcia, J.I. Velasco: Adhesive Performance of Acrylic Pressure-Sensitive Adhesives from Different Preparation Processes. *Polymers*, 2021. Vol. 13, DOI: 10.3390/POLYM13162627 (Megtekintés dátuma: 2023.11.07.).
- [12] A. Zotti, S. Zuppolini, M. Zarrelli, Anna Borriello: Fracture Toughening Mechanisms in Epoxy Adhesives, *Adhesives. Applications and Properties*, 2016. DOI: 10.5772/65250 (Megtekintés dátuma: 2023.11.01.).
- [13] A. Rudawska, E. Jacniacka: Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009. DOI: 10.1016/J.IJADHADH.2008.09.008. (Megtekintés dátuma: 2023.11.02.).
- [14] A. Rudawska, A. Rudawska: Adhesive Properties of Metals and Metal Alloys. *Surface Energy*. 2015. DOI: 10.5772/60599. (Megtekintés dátuma: 2023.11.01.).
- [15] T. Ferenc, B. Miklós, W. Zoltán: Nagyszilárdságú járműipari acél nedvesedési tulajdonságainak javítása lézersugaras felületkezeléssel/ Improve wettability of high strength automotive steels by laser surface treatment. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 2019. DOI: 10.21791/IJEMS.2019.1.52. (Megtekintés dátuma: 2023.11.01.).
- [16] Krüss Scientific: Explore the world of Surface Science. <https://www.kruss-scientific.com/en-US> (Megtekintés dátuma: 2023.11.01.).
- [17] S. Siboni, C. Della Volpe, D. Maniglio, M. Brugnara: The solid surface free energy calculation: II. The limits of the Zisman and of the “equation-of-state” approaches. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004. DOI: 10.1016/J.JCIS.2003.09.050. (Megtekintés dátuma: 2023.11.01.).
- [18] R.J. Good, L.A. Girifalco: A theory for estimation of surface and interfacial energies. III. Estimation of surface energies of solids from contact angle data. *Journal of Physical Chemistry*. 1957. DOI: 10.1021/J150553A013/ASSET/J150553A013.FP.PNG_V03 (Megtekintés dátuma: 2023.11.06.).

- [19] H. Chen, J. Peng, L. Fu, X. Wang, Y. Xie: Solder wetting behavior enhancement via laser-textured surface microcosmic topography. *Applied Surface Science*, 2016. DOI: 10.1016/J.APSUSC.2016.01.167 (Megtekintés dátuma: 2023.11.04.).
- [20] K.L. Mittal, S.K. Panigrahi: *Structural adhesives : properties, characterization and applications*. Scrivener Publishing, 2023. ISBN: 9781394174720 (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [21] A. J. Kinloch: *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Chapman and Hall, 2008. ISBN: 041227440X (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [22] I. Skeist: *Handbook of Adhesives*. Chapman and Hall, 1990. ISBN: 978-1-4612-8019-4. (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [23] Henkel Adhesives: *Structural Adhesives*. <https://www.henkel-adhesives.com/hu/en/products/industrial-adhesives/structural-adhesives.html> (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [24] The World's Strongest Adhesive. <https://www.delo-adhesives.com/us/press-and-news/delo-news/details/the-worlds-strongest-adhesive> (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [25] Guinness World Records: Super-strong glue holds 17-tonne truck in the air for one hour. <https://www.guinnessworldrecords.com/news/2019/7/super-strong-glue-holds-17-tonne-truck-in-the-air-for-one-hour-584909> (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [26] Advanced Science News: New Guinness World Record for Strongest Adhesive. <https://www.advancedsciencenews.com/world-record-for-strongest-adhesive/> (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [27] BasedoSteel: Werkstoffgruppe. https://www.basedosteel.com/werkstoffe/werkstoff/12842.html?gclid=EAIaIQobChMI1Prqkv6MggMVCebnAx02cwMgEAEYASAAEgLJ8vD_BwE&ppc_keyword=&cHash=ac29ce71ef9d075990d3853f1bf5b9f5 (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [28] Henkel Adhesives: Loctite EA 9514 - 1K epoxi szerkezeti ragasztó. https://www.henkel-adhesives.com/hu/hu/term%C3%A9k/structural-adhesives/loctite_ea_95140.html (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).
- [29] H. Károly, D. Zoltán: Pásztázó elektronmikroszkópia. <http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf> (Megtekintés dátuma: 2023.10.26.).