



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

**ALUMÍNIUM LEMEZEK POLIURETÁN
ADHÉZIÓS KÖTÉSTECHNOLÓGIÁJÁNAK
FEJLESZTÉSE ÉS KÖRNYEZETI
VIZSGÁLATA**
Diplomadolgozat

Szerző:
Kovács Péter

Témavezető:
Dr. Berczeli Miklós, adjunktus

Kecskemét

2022



Brindza Attila

Neumann János Egyetem

GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék



**Neumann
János
Egyetem**

Szakdolgozati feladatlap

Név: Kovács Péter

Neptun kód: HSV0ZU

Szak: Gépészmérnöki

Specializáció: szerszám- és célgép - tervező, gyártó

Munkarend: levelező

A szakdolgozat címe

Alumínium lemezek poliuretán adhéziós kötéstechológiájának fejlesztése és környezeti vizsgálata

Kibocsájtó tanszék: Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

Kutató Csoport: Mechanikai- és lézersugaras technológiák kutatócsoport

Belső konzulens neve: Dr. Berczeli Miklós

Beosztása: Oktató

A feladat részletezése:

1. Végezzen nemzetközi irodalomkutatót poliuretán ragasztástechnológiájáról alumínium felületén!
2. Tervezzen meg és készítsen ragasztott kötéseket szilárdsági és környezeti vizsgálatokhoz!
3. Hajtsa végre a különböző körülmények között megvalósuló ragasztást!
4. Vizsgálja az alumínium lézersugaras felületkezelésének hatását a ragasztás szilárdságára!
5. Elemesse és értékelje a különböző körülmények közötti ragasztások szilárdságának állapotát!
6. Értékelje a különböző környezeti terhelések ragasztott kötésre gyakorolt hatását!

Kelt.: Kecskemét, 2022. november 4.

Dr. Berczeli Miklós s.k.
Oktató

Dr. Weltsch Zoltán s.k.
Tanszékvezető

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS	4
2.	IRODALOMKUTATÁS.....	5
2.1.	ALUMÍNIUM ALKALMAZÁSÁNAK TERÜLETEI	5
2.2.	POLIURETÁN RAGASZTÓ ALKALMAZÁSA ÉS FONTOSSÁGA.....	7
2.3.	POLIURETÁN RAGASZTÓ MŰKÖDÉSE	13
2.4.	RAGASZTOTT KÖTÉSEK KÖRNYEZETÁLLÓSÁGA.....	14
2.5.	NEDVESSÉGRE TÉRHÁLÓSODÓ PUR RAGASZTÓ	15
2.5.1.	<i>A nedvességgel keményedő ragasztók reakcióképessége.....</i>	<i>15</i>
2.5.2.	<i>Térhálósodási sebesség viszonyai</i>	<i>16</i>
2.5.3.	<i>Kezdeti szilárdság változása</i>	<i>16</i>
2.5.4.	<i>Buborék képződés.....</i>	<i>17</i>
2.6.	A PU RAGASZTOTT KÖTÉSEK ALUMÍNIUM FELÜLETEN ÉS KÖRNYEZETI HATÁSOK VIZSGÁLATAI	18
3.	CÉLKITŰZÉS.....	22
4.	FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT MÓDSZEREK, ESZKÖZÖK.....	23
4.1.	FELHASZNÁLT ANYAGOK	23
4.1.1.	<i>Ragasztáshoz szükséges anyagok.....</i>	<i>23</i>
4.1.2.	<i>Alumínium lemez.....</i>	<i>23</i>
4.2.	KÖRNYEZETI KÖRÜLMÉNYEK BEMUTATÁSA	23
4.3.	ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK	27
4.3.1.	<i>Coherent Monaco 1035-80-60 impulzus lézer</i>	<i>27</i>
4.4.	KÖTÉSEK KIALAKÍTÁSA	28
4.5.	SZILÁRDSÁGI VIZSGÁLATOK.....	29
4.6.	FELMERÜLŐ HIBÁK, ÉS KIKÜSZÖBÖLÉSÜK.....	29
5.	EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	30
5.1.	TÉRHÁLÓSODÁS KÖRNYEZETI KÖRÜLMÉNYEI	30
5.2.	A KÖTÉS KÉT HÉT TÉRHÁLÓSODÁSA UTÁN VÉGZETT KÖRNYEZETI TESZTEK.....	34
5.3.	EGYÉB TÍPUSOK VIZSGÁLATA	36
5.4.	LÉZERSUGÁRRAL VÉGZETT FELÜLETMÓDOSÍTÓ TESZTEK.....	39
5.5.	A TÖNKREMENT KÖTÉSEK MAKROVIZSGÁLATÁNAK ÉRTÉKELÉSE.....	42
5.5.1.	<i>AB típus.....</i>	<i>43</i>
5.5.2.	<i>AC típus.....</i>	<i>44</i>
5.5.3.	<i>AD típus.....</i>	<i>45</i>
5.5.4.	<i>AE típus</i>	<i>45</i>
5.5.5.	<i>AF típus</i>	<i>46</i>
5.5.6.	<i>AG típus.....</i>	<i>46</i>
5.5.7.	<i>AH típus.....</i>	<i>47</i>
5.5.8.	<i>AI típus.....</i>	<i>47</i>
5.5.9.	<i>AJ típus.....</i>	<i>48</i>
5.5.10.	<i>AK típus</i>	<i>48</i>
5.5.11.	<i>AL típus</i>	<i>49</i>
5.5.12.	<i>AM típus.....</i>	<i>50</i>
5.5.13.	<i>AN típus</i>	<i>50</i>
5.5.14.	<i>AQ típus</i>	<i>51</i>
5.5.15.	<i>AR típus.....</i>	<i>51</i>
5.5.16.	<i>AS típus</i>	<i>52</i>
5.5.17.	<i>AT típus</i>	<i>52</i>
5.5.18.	<i>AU típus.....</i>	<i>53</i>
5.5.19.	<i>AV típus.....</i>	<i>53</i>
5.5.20.	<i>AW típus.....</i>	<i>54</i>
5.5.21.	<i>AX típus.....</i>	<i>55</i>

5.5.22.	<i>AY típus</i>	55
6.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA	56
7.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	57
8.	ÁBRAJEGYZÉK	58
9.	IRODALOMJEGYZÉK	61

1. BEVEZETÉS

A ragasztási technológia rohamos fejlődése megköveteli, hogy az iparban is egyre szélesebb körben alkalmazzák. Sok esetben elvárjuk azt, hogy jobb kötést eredményezzen, mint akár a csavarozás vagy hegesztés. Kevesebb energia felhasználására legyen szükség, ne kapjanak az összekötendő elemek hőbevitelt. Így roncsolódásmentesen lehessen kialakítani akár merev akár rugalmas kötést két tetszőleges anyag között. Ezt a ragasztott kapcsolatot azonban nagymértékben meghatározza, hogyan történt a kötés kialakítása, térhálósodása. A poliuretán ragasztókat tekintve is számos alkalmazási terület sorolható, amely területeken kiváló teljesítményt nyújtanak a ragasztott kötések. Ezen az alapokon elindulva minél széleskörűbb környezeti kondíciók sorával teszteltem egykomponensű nedvességre térhálósodó poliuretán ragasztóval elkészített kötéstechnológiát. A kötések vizsgálatát kiterjesztve a térhálósodás közben érő környezeti hatásokra, a térhálósított ragasztóanyag tűréshatárait feszegetve, emellett további kötési körülmények lehetséges opcióit is megvizsgálva. A vizsgálatok sorával arra is rámutatok, mennyi fontos szempont figyelembevétele szükséges ahhoz, hogy a ragasztás minősége tartós maradjon.

A környezetállósága, vízállósága miatt kedvező lehetőséget nyújt többretű felhasználáshoz is. Az általam vizsgált típus költséghatékonysága miatt előszeretettel alkalmazzák az ipar több részén is. Egykomponensű ragasztóként egyszerűen alkalmazható.

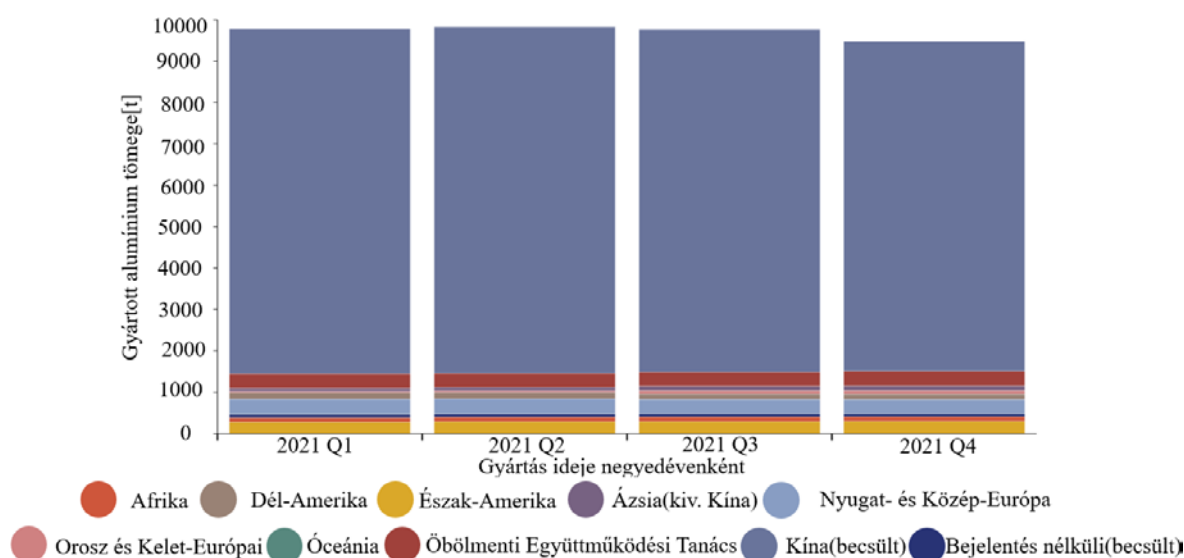
Ezekkel találkozunk a térhálódás közben és működés közben is, ezért vizsgáltam sokféle környezeti hatást a munkámban. Összevetve a létrehozott kötések szilárdságát, illetve a kötések tönkremenetelének módját.

2. IRODALOMKUTATÁS

A dolgozatomban alumínium lemezeken fogok nedvességre térhálósodó egykomponensű poliuretán ragasztóval kötéseket létrehozni. Ezért az irodalomkutatásban hazai és nemzetközi forrásokat vizsgáltam, amik alapján bemutatom az általam alkalmazott környezeti tényezőket, amivel kutattam a kötéstechológia alkalmazkodó képességeit.

2.1. Alumínium alkalmazásának területei

Az alumínium gyártásának 2021-es eloszlása látható az 1. ábrán.



1. ábra: Alumínium gyártásának eloszlása 2021-ben [1]

Összesen 67092 tonna alumíniumot gyártottak a világon 2021-ben.

Az alumínium és ötvözetek alkalmazási területeinek fejlődése, valamint a fogyasztás folyamatos növekedése számos olyan tulajdonságának tulajdonítható, amelyek döntő szempontot jelentenek a felhasználók fémválasztásában, különösen a közlekedés, az építőipar, az elektrotechnika és a csomagolás területén [2].

Ezek a kedvező tulajdonságok:

- Könnyű tömegű,
- Hővezető képesség,
- Elektromos vezetőképeség,
- Alkalmas számos felületkezeléshez,
- Korrózióálló,
- Az ötvözetek sokszínűek,
- Az extrudált és öntött féltermékek funkcionális előnyei,

- Könnyű alakíthatóság,
- Kedvezően újrahasznosítható [2].

A tapasztalatok azt mutatják, hogy egy alumíniumötvözetből készült szerkezet akár 50%-kal könnyebb is lehet, mint a lágyacélból vagy rozsdamentes acélból készült megfelelője. Ez figyelembe veszi az alumíniumötvözetekből készült hegesztett vagy csavarozott szerkezetek rugalmassági modulusát (az acél modulusának egyharmada) és fáradási határértékeit. Nem célszerű az acélszerkezetek tervezésére vonatkozó szabályokat egyszerűen átültetni az alumíniumra. Inkább az alumínium sajátos tulajdonságait kell figyelembe venni. A könnyűség nem csak az alkalmazás szempontjából jelent előnyt, hanem a gyár működését és a munkakörülményeket is befolyásolja. Az alumíniumötvözetekből készült féltermékek és alkatrészek kezelése könnyebb, ami potenciálisan csökkentheti a kezelőberendezések költségét [2].

Az ötvözetlen alumínium kiváló hővezető, a réz hővezető képességének 60%-ával, a leggyakoribb fémek közül az optimális teljesítményt nyújtja. Az alumíniumötvözetek hővezető képessége az összetételüktől és a kohászati edzettségtől függ. Már a 19. század végén ez a tulajdonság vezetett ahhoz, hogy az ónozott rézet alumíniumötvözetekkel helyettesítsék a konyhai eszközök gyártásában, mind a háztartási, mind a professzionális használatra szánt edények esetében. Amikor a hőcserével kapcsolatos probléma merül fel, mindig az alumínium használatát veszik figyelembe, természetesen azzal a feltétellel, hogy a közeg megfelelő legyen, ha folyadék-folyadék vagy folyadék-gáz cserét terveznek. Az alumínium hőcserélőknek számos alkalmazási területe van: személygépkocsik, haszongépjárművek, hűtőszekrények, légkondicionálás, tengervíz sótalanítása, napenergia, elektronikai eszközök hűtőberendezései stb. [2].

Az alumínium elektromos vezetőképessége körülbelül kétharmada a rézének, amelyet számos elektromos alkalmazásban felvált. Az alumíniumból vagy Almelec-típusú alumíniumból készült, 1927 óta Franciaországban forgalomban lévő szabadvezetékeket világszerte használják. Az alumínium rudakat és csöveket széles körben használják a nagy- és közép feszültségű kültéri hálózatok csatlakozóállomásaiban is [2].

Az alumínium és az 1XXX, 3XXX, 5XXX, 6XXX és 8XXX sorozatú ötvözetek kiválóan ellenállnak a légköri korróziónak tengeri, városi és ipari környezetben. Ez a nagyon jó korrózióállóság, valamint a könnyűség magyarázza számos alumínium-alkalmazás fejlődését, és számos jelentős előnyt kínál a felhasználóknak: A berendezések és alkatrészek élettartama nagyon hosszú, akár több évtizedes is lehet. A karbantartás minimális, még akkor

is, ha nincs extra védelem (festés, eloxálás). A megjelenés hosszabb ideig megmarad, mivel a korrózióval szembeni ellenállás nagyon jó [2].

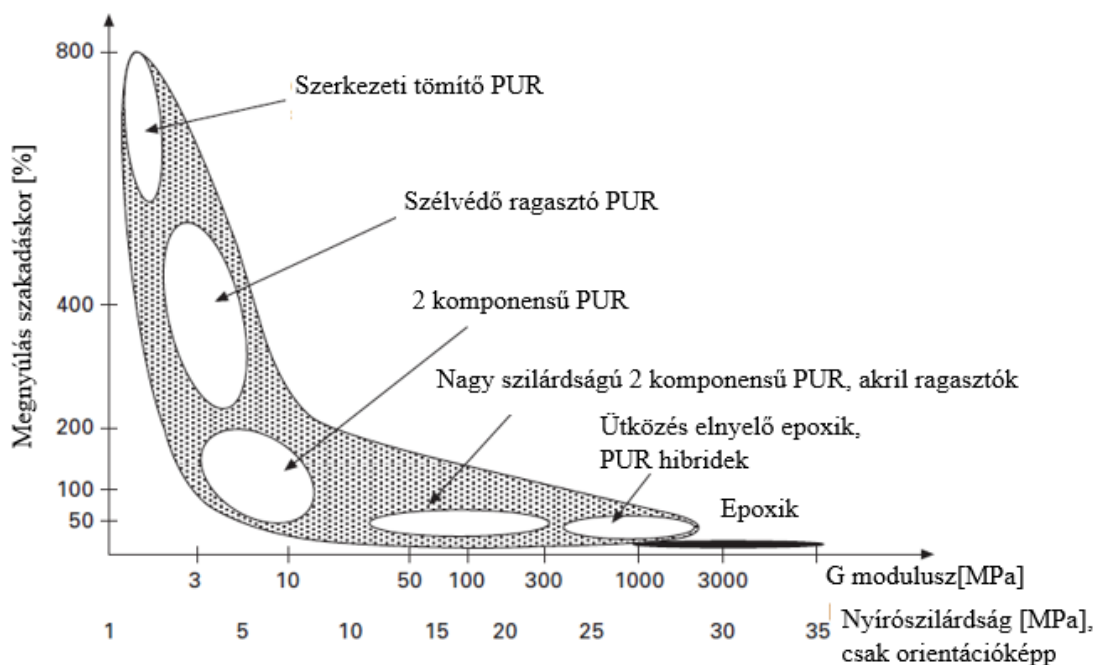
Az alumínium felületkezelések számos célt szolgálhatnak, többek között: Bizonyos ötvözetek védelme, ha azok természetes korrózióállósága elégtelennek tekinthető, ami gyakran előfordul a 2XXX és 7XXX sorozatú réztartalmú ötvözetek esetében. A felületi megjelenés megőrzése a lyukkorrózió vagy a feketedés elkerülése érdekében. Bizonyos felületi tulajdonságok, például a felületi keménység módosítása, a fém díszítése [2].

2.2. Poliuretán ragasztó alkalmazása és fontossága

A PUR-ragasztók más vegyületekkel versenyeznek a szerkezeti funkcióért, beleértve az epoxikat (EP) és az akrilokat. Vannak más szerkezeti ragasztók is, például poliimidek, szilikonok és poliszulfidok [2].

A nem térhálósított forró olvadékokat nagyon korlátozottan használják fel szerkezeti ragasztóként, annak ellenére, hogy könnyen szétszerelhetőek újrahasznosítás céljából. A magas T_g üvegesedési hőmérséklet megköveteli a speciális feldolgozást, különösen a fémek esetében, amelyek előmelegítést vagy felületi hőkezelést igényelnek. Előkezelésre van szükség a fémeken való jó tapadáshoz szükséges nedvesedés eléréséhez [2].

A **2. ábra** három leggyakrabban használt szerkezeti ragasztóanyagot mutatja. a nyírási modulusuk, nyúlásuk és nyírószilárdságuk (LSS) szempontjából. A megközelítőleg kölcsönös összefüggés van a nyírási modulus (G) a logaritmikus skálán és a nyúlás között, és ez a két mechanikai tulajdonság a kulcs a ragasztó felhasználhatóságának megértéséhez. A nyírási modulus határozza meg a ragasztott szerkezet merevségét a tervezési jellemzőkkel együtt az aljzatok kialakításával, a nyúlás pedig megmutatja, hogy a különböző anyagú aljzatok termikus nyúlással, hosszabb kötésvonallal ragaszthatók egymáshoz. A nyírószilárdság csak lineárisan nő a nyírási modulushoz képest [2].



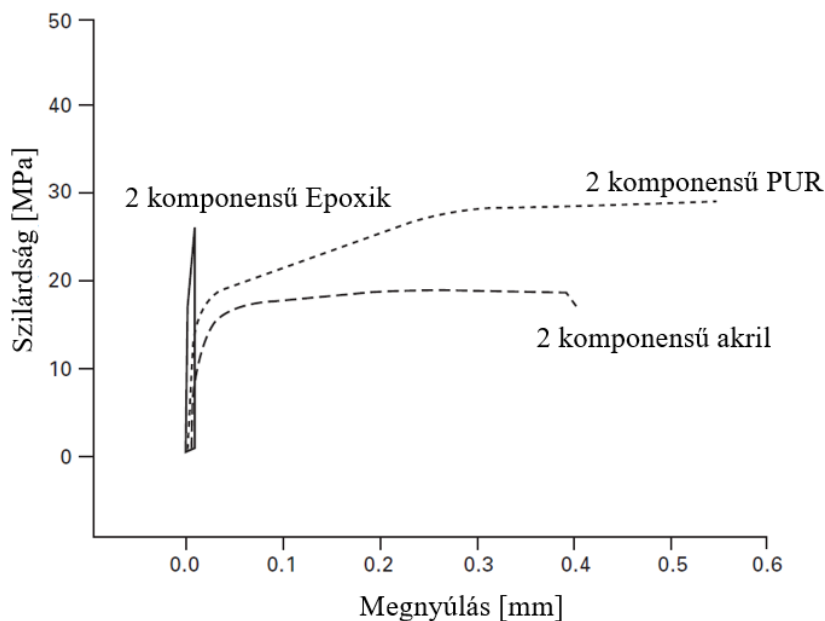
2. ábra: Strukturális ragasztók összehasonlítása [2]

A **2. ábra** a poliuretánok a teljes szürke területet lefedik, és ezért a legsokoldalúbb ragasztási technológia, ami ebben a tekintetben egyedülállóvá teszi őket. A mechanikai tulajdonságok teljes skáláján beállíthatók, a nagyon lágy és rugalmastól, mint a gumi, a nagyon merevig [14]. A ragasztóanyagot az olyan változók, mint a térhálósűrűség, a láncok hossza, a molekuláris építőelemek és a funkcionális csoportok száma befolyásolják a poliuretán mechanikai tulajdonságait. A jó szerkezeti ragasztó az a lehető legmagasabb nyírési modulus elérése megfelelő nyúlás mellett, így a ragasztó pozícióját az ábra jobb felső sarka felé tolva [2].

A ragasztók összetett rendszerek, ami azt jelenti, hogy számos paraméter lehet használható a részletes jellemzéshez. A hangsúly a következőkre helyeződik: nyírószilárdság (LSS), nyíró modulus (G), feszültség-nyúlás görbe, szakadás pillanatában a nyúlás, az üvegesedési hőmérséklet (T_g) és a hőmérséklet-függés a mechanikai tulajdonságok, a tartósság és az öregedési viselkedés hőmérséklettől függően különböző éghajlati körülmények között [13].

Számos gyakorlati alkalmazásban, ahol poliuretán-ragasztókat használnak, a szerkezeti kötés szabványos munkaterhelése nem haladja meg a maximális terhelés 3-5%-át az LSS tekintetében, mivel ez tartalmazza az összes szükséges csökkentő tényezőt, például a hőmérsékletfüggést és az öregedést [12]. Ilyen esetekben a szerkezeti ragasztók ideálisan rugalmasan működnek, és nem kúsznak. Ez leolvasható a Wöhler-diagramokból, mert a

108 ciklus után megmaradó terhelés korrelál a hosszú időn át tartó állandó statikus terheléssel végzett kísérletekkel (ezt találták az 1K hőre keményített epoxi-ragasztó esetében is az autóiipari alkalmazásokban) [2].



3. ábra: A szilárdság-megnyúlás összehasonlítása kétkomponensű strukturális ragasztók alkalmazása esetén [2]

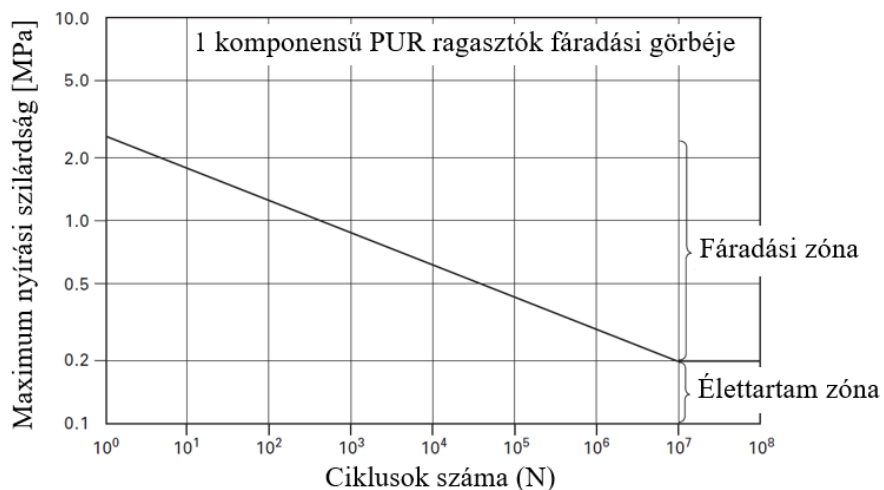
A szakadási nyúlást általában az ömlesztett anyagból vett szakítópróbatestekkel mérik. Az értékek eltérnek egymástól, mivel a ragasztott nyíró próbatesteknél a ragasztót nyíróerőkkel és nem húzóerőkkel terhelik, és a méret és a tapadási tulajdonságok is befolyásolják az eredményt. A vastag ragasztásvizsgálat ezért jobb információt ad arról, hogy milyen nyúlás (nyúlás) használható a ragasztott szerkezetekben [2].

A mérnököknek olyan termékeket kell tervezniük, amelyeknek várható élettartama van, és biztosnak kell lenniük abban, hogy a szerkezet még a legrosszabb feltételezések mellett sem fog meghibásodni. A ragasztott szerkezetek várható élettartamának értékeléséhez az acélszerkezeteknél alkalmazott eljárás használható, különböző terhelések ciklikus alkalmazása révén egy Wöhler-diagram elkészítéséhez [2].

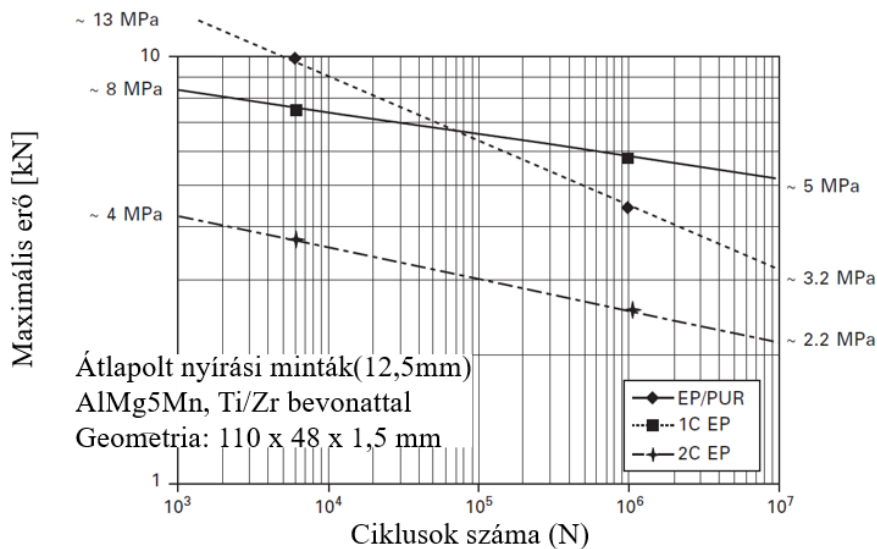
Egy ilyen diagram létrehozásához több mint tíz mintát különböző terhelési szinteken terhelnek, és a tönkremenetelig tartó ciklusok számát egy kettős logaritmikus diagramon ábrázolják. Ha nyírási mintákat használnak, mindig van egy kezdeti terhelési szint, hogy megakadályozzák a minta összenyomódását, amely hajlító erőket hozna létre, és idő előtti tönkremenetelhez vezetne. Egy ilyen diagramból meghatározható a hosszú távú tartósság,

10 vagy 20 millió ciklus után. Sok esetben a poliuretán-ragasztók esetében ez a szint egyben a ragasztókötés tartós statikus terhelésének határát is jelöli [2].

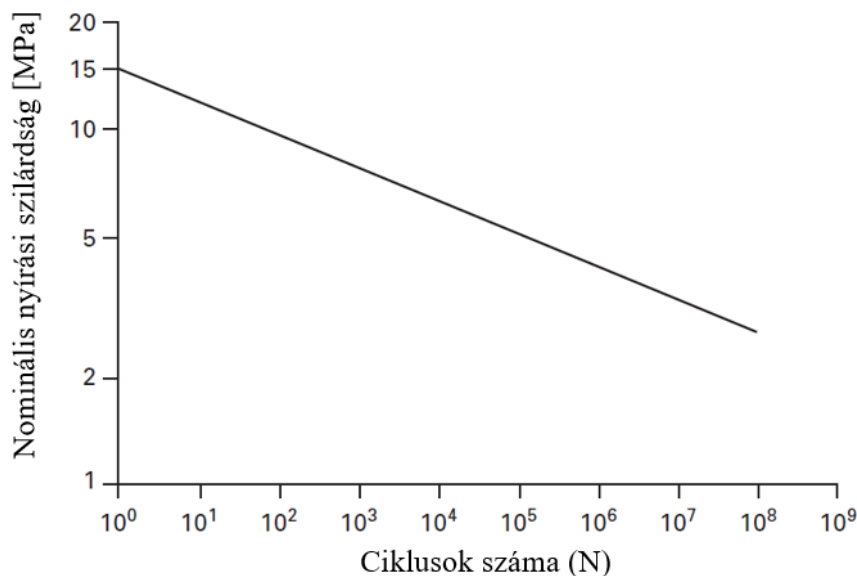
A **4. ábra-6. ábra** a különböző típusú ragasztók Wöhler-görbéit mutatják. Ez a görbe a szélvédő típusú 1K poliuretán ragasztókra jellemző. A 10 millió ciklus utáni tartóssági zóna szintén korrelál az éveken át tartó statikus terheléses vizsgálatokkal, ahol 0,20-0,25 MPa terheléseket tartottak fenn, és a minták nem kúsztak [2].



4. ábra: Wöhler görbe egykomponensű PUR ragasztó [2]



5. ábra: Több Wöhler görbe összehasonlítása különböző típusú ragasztók esetén [2]



6. ábra: Nagy szilárdságú kétkomponensű PUR ragasztó Wöhler görbéje [2]

Az **5. ábra** az autóiparban fémlamezek összekötésére használt szerkezeti ragasztók összehasonlítását mutatja. A hőre keményedő 1K epoxy a legmagasabb, 13 MPa terhelési szinttel indul, ami nem meglepő, mivel a vastag ragasztóanyag-vizsgálattal mért kezdeti nyírószilárdsági értéke eléri a 70 MPa-t. A poliuretán ragasztó kezdeti nyírószilárdsága csak 25 MPa, és 8 MPa-nál indul, de 10 millió ciklus után az eredmény lényegesen magasabb, 6 MPa maradó terhelési szintet mutat, mint az 1K epoxy ragasztóé, amely 4,2 MPa. A 2C EP ragasztó szintén magasabb, 35 MPa nyírószilárdsággal indul, de ciklikus terhelés alatt csak feleakkora teljesítményt mutat, mint az EP/PUR hibrid ragasztó. A repedésre való hajlam az EP/PUR hibrid esetében kisebb, ami a PUR szívósító hatásának köszönhető, ami magasabb terhelési szinteket eredményez. Az EP/PUR hibrid ragasztókat gépjárművek karosszériáiban használják a fémlamezek ponthegeztését ragasztással helyettesítve [2].

A nagy szilárdságú 2K PUR Wöhler-görbe (**6. ábra**) körülbelül 3 MPa feszültség szintnél ér véget, ami a kezdeti feszültség körülbelül 20%-a. Figyelembe véve a további csökkenést, amikor a T_g üvegesedési hőmérséklet felett dolgozik, a kezdeti terhelés 3-5%-ának megfelelő szintre való csökkenés az ésszerű feltételezett állandó feszültség.

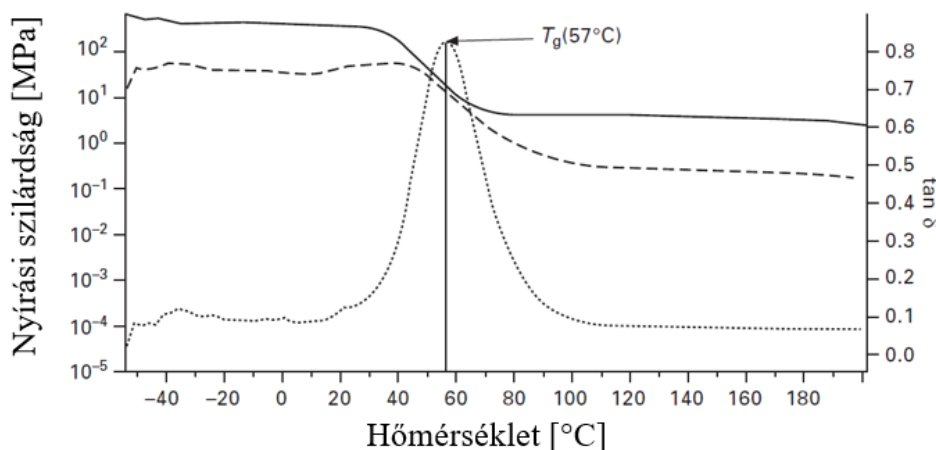
Ez a három példa azt mutatja, hogy a különböző minőségű ragasztók mechanikai szilárdságának teljes tartománya mérhető ezzel a módszerrel. Ezek a vizsgálatok azonban időigényesek, mivel a vizsgálatok frekvenciájának 10 Hz és legfeljebb 50 Hz között kell lennie, mivel a ragasztókat, különösen az alacsonyabb G értékű és nagyobb nyúlású ragasztókat a rendszerbe bevitt mechanikai energia felmelegíti. A mérnökök nem igazán

bíznak a ragasztási technológiában, mivel a ragasztott alkatrészek meghibásodásai miatt rossz tapasztalatokkal találkoztak. A legtöbb meghibásodás a ragasztott szerkezet kialakításával kapcsolatos problémákra vezethető vissza, különösen ha rideg, nagy szilárdságú ragasztókat használnak [2].

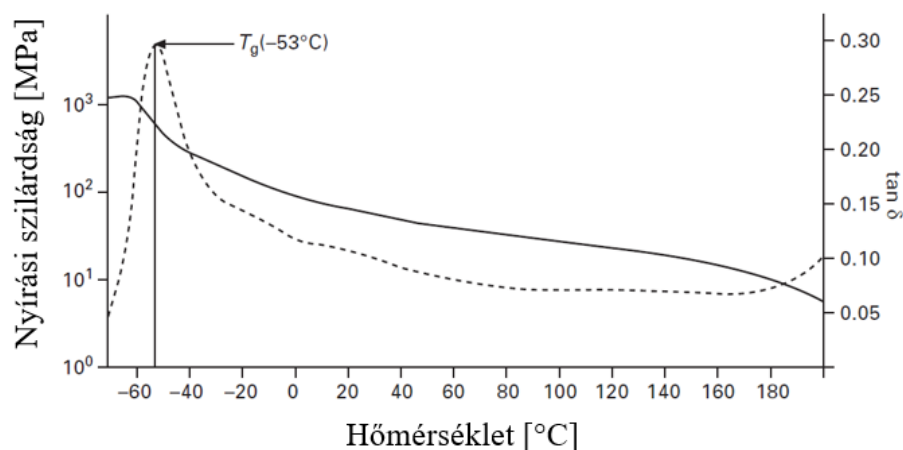
Az üvegesedési hőmérsékletet (T_g) általában dinamikus mechanikai termoanalízissel (DMTA) mérik (7. ábra). A G' tárolási modulus görbéje a mechanikai tulajdonságok hőmérsékletfüggő változását mutatja. A veszteségi modulus és a tárolási modulus hányadosa a $\tan \delta$, amelyet gyakran használnak a T_g jelzésére. A ragasztó mechanikai szilárdságának csökkenése azonban már a G' görbéről leolvasható, kb. 20 °C-kal alacsonyabb hőmérsékleten megkezdődik [2].

A T_g jelentőségét gyakran túlbecsülik. Sok PUR-ragasztó nagyon jól működik a T_g -érték felett. Természetesen a mechanikai tulajdonságok nagymértékű csökkenése az élettartam alatti hőmérsékleti tartományon belül gyakran nem elfogadható, de a maradék mechanikai szilárdság figyelembe vehető és kiszámítható. Például az 1K PUR-szélvédő ragasztók T_g értéke -50°C, és ezért mindig sikeresen működnek T_g értékük felett [2].

A 8. ábra egy 1K PUR-t mutat, amely széles hőmérséklettartományban magas modulust kínál. A 8. ábrán látható nagy szilárdságú 2K PUR DMTA-jával összehasonlítva ennek az 1K PUR-nak a G' értéke 60°C felett magasabb, és a hőmérséklet csökkenése nagyon alacsony. Ez az 1K PUR ragasztók új generációját jelenti, amelyek széles hőmérséklettartományban megőrzik mechanikai tulajdonságaikat. Egy 80°C feletti T_g értékű EP ragasztóval ragasztott LSS minta 2 MPa tartós statikus terhelés alatt (a maximális nyírószilárdság kb. 5%-a) 18 hónapon belül tönkrement [2].



7. ábra: DMTA mérés nagy szilárdságú kétkomponensű PUR esetén, G' — (storage modulus) G'' ---- (loss modulus); , $\tan \delta$ görbe [2]



8. ábra: DMTA mérés magas modulusú 1 komponensű PUR ragasztó esetén, G' — (storage modulus) G'' ---- (loss modulus); , $\tan \delta$ görbe [2]

Azonos körülmények között egy -50°C alatti T_g -vel rendelkező szélvédőragasztó $0,28\text{ MPa}$ statikus terheléssel (maximális nyírószilárdságának kb. 5%-a) tönkrement. Következésképpen nem a T_g a fontos, hanem az a terhelés, amelyet a ragasztó az élettartama alatt, használat közben képes elviselni. A ragasztó Wöhler-diagramja ezt az információt nyújtja. És több mint 30 évnyi szélvédőragasztás a közlekedésben megerősíti, hogy a ragasztók kiváló tartóssággal rendelkeznek még akkor is, ha T_g értékük felett működnek [2].

2.3. Poliuretán ragasztó működése

A kísérleteinkhez poliuretán ragasztót alkalmaztam a számos kedvező tulajdonsága miatt. Ezek közé tartozik az univerzalitása, többféle anyaghoz alkalmazható. Elterjedt ragasztási technológia, ezért foglalkozni kell a ragasztástechnológia fejlesztésével.

Fontos megérteni, hogyan kell kombinálni a poliuretán építőelemeit a kívánt tulajdonságok elérése érdekében. A poliuretánok a formulázási lehetőségek széles skáláját kínálják. A poliuretánok kémiáját tekintve a legfontosabb meghatározó tényezőket, amelyek befolyásolják a kikeményített polimer tulajdonságait, sematikusán vázolom, mivel a megfelelő polimer kialakítás kulcsfontosságú a kívánt tulajdonságok eléréséhez [2].

Bizonyos alkalmazásoknál fontos szerepet játszik a kikeményedés okozta térfogatcsugorodás. Ha egy vastag ragasztóréteg a kikeményedés során a távolságtartók vagy egyéb tervezési korlátok miatt nem tud mozogni, a zsugorodás jelentős feszültséget hoz létre, ami csökkenti a ragasztott kötés teherbíró képességét. A prepolimereken alapuló

PUR-ok zsugorodása és hőfejlődése a kikeményedés során kisebb, így további előnyöket kínálnak [2].

A ragasztók építőelemei is eltérő reakciókészséget mutatnak, és a reakciósebesség beállításához katalizátorokra van szükség. Mivel azonban a katalizátorok befolyásolják a visszareakciót is, amely 150 °C feletti hőmérsékleten is bekövetkezhet, a magas hőmérsékletnek ellenálló ragasztók formulázásakor a lehető legkevesebb katalizátort ajánlott használni. A túl gyors reakciók a nedvesedéssel is problémákat okoznak, mivel a folyékony ragasztónak először teljesen meg kell nedvesítenie a felületet a tapadás eléréséhez, mielőtt megszilárdulna, és ha a megszilárdulás gyorsabb, mint a nedvesedés, a tapadás jelentősen csökken [2].

2.4. Ragasztott kötések környezetállósága

A tartósságot nemcsak a ciklikus terhelés, hanem a környezeti tényezők [17], például a hőmérséklet [24], az UV-sugárzás [25], a vegyi anyagok [26], az oxigén és az oldószerek is befolyásolják. Általában a nedvességnek van a legnagyobb hatása [19][21]. Bediffundál a polimer mátrixba és lágyítóként hat, illetve hosszú távon befolyásolja a tapadást az aljzatokon [2].

A poliétert gerincpolimerként tartalmazó poliuretánok általában magas diffúziós sebességgel rendelkeznek a nedvességgőz számára. Ez tapadási problémákhoz vezethet fémeken, mivel a tapadás a felületen lévő fémoxidon történik. [Ezt az oxidréteget a nedvesség behatolása megtámadja, ami hosszú távon tönkreteszi az oxidréteget, ha nem védi megfelelően a megfelelő felületkezelés [2].

Maga a PUR-ragasztó nagy része meglehetősen érzéketlen a nedvesség behatolására. A nedvességgel keményedő ragasztóknál a nedvességgel való telítődés nem vezet a G érték csökkenéséhez. Ez ellentétben áll az EP rendszerekkel, amelyeknél a kataplazma körülmények között (+70°C, 100% páratartalom) végzett tesztek után a szobahőmérsékleten mért G érték akár 40%-kal is csökkenhet.[27] A magas kezdeti nyírési értékek miatt ez nem válik nyilvánvalóvá a nyírési vizsgálatok során, mivel az eredményeket az aljzat folyáshatára határozza meg. Számos olyan vizsgálati ciklus létezik, amely a hőmérsékletváltozást, a páratartalmat és a sót kombinálja [28-30], és amelyet kifejezetten az autóipar számára terveztek. Minden autóipari gyártónak megvannak a saját vizsgálati ciklusai, de mindegyik kombinálja ezeket az elemeket, és hasonló eredményekre jut [18]. A ciklusokat azonban általában úgy tervezték, hogy nagyon rövid idő alatt érjenek el eredményeket, ami néha

olyan hatásokat eredményez, amelyek a valóságban nem figyelhetők meg (különösen, ha a 70°C feletti hőmérsékletet 100%-os páratartalommal kombinálják) [2].



9. ábra: Ragasztók környezeti körülményeinek vizsgálata [11]

Műanyag hordozók, például szálerősítésű kompozitok vagy hőre lágyuló műanyag alkatrészek ragasztásakor a nedvesség diffúziója kevésbé fontos, de a kisebb molekulák, például lágyítók, stabilizátorok vagy katalizátorok vándorlása fontossá válik, és befolyásolhatja a ragasztó szilárdságát vagy a tapadás minőségét [15]. A ragasztók és szubsztrátumok nagy változatossága miatt az adott anyagkombináció kompatibilitását és tapadását minden egyes esetben külön-külön kell vizsgálni. Minden jelenleg használt szubsztrát esetében rendelkezésre állnak olyan speciális felületkezelések, amelyek a kívánt tapadást a kívánt élettartam alatt biztosítják [2].

2.5. Nedvességre térhálósodó PUR ragasztó

2.5.1. A nedvességgel keményedő ragasztók reakcióképessége

A szerkezeti ragasztás korábbi meghatározása alapján az 1C PUR-ok adják a legtöbb ragasztót a szerkezeti ragasztási alkalmazásokhoz. Az 1C PUR-ok formulázása részletes kémiai igényel. Ezek nedvességgel keményedő ragasztók, ami azt jelenti, hogy a vízzel, mint második komponenssel reagálnak. Az 1C nedvességgel keményedő PUR-ok könnyen alkalmazhatók és olyan sokféle alkalmazásban használhatók [16], hogy a folyamatos

fejlesztések tovább javították ezeket a ragasztókat, csökkentve a bennük rejlő hátrányokat [2].

2.5.2. Térhálósodási sebesség viszonyai

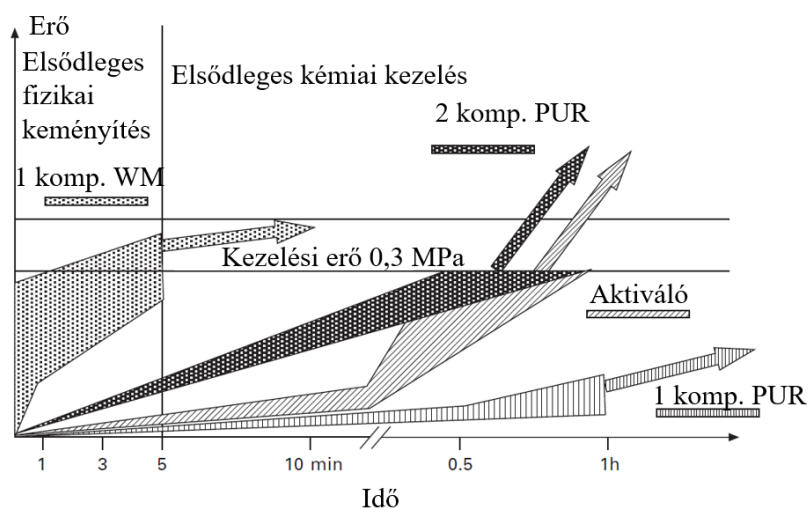
A nedvességgel keményedő ragasztó térhálósodási reakciójának felgyorsításához vizet kell hozzáadni. Ez nem könnyű, mert egy víztaszító, nagy viszkozitású anyagba még nagyon kis mennyiségű vizet is nehéz belekeverni. De egy speciálisan összeállított víztartalmú paszta (booster) hozzáadásával egy rövid statikus keverőn keresztül megvalósítható. Ebben az esetben nincs szükség homogén keverésre (ami a 2C PUR esetében szükséges). A keményedés sebessége gyorsabb, mint a 2C rendszerben, mivel a víz reakcióképessége nagyobb, mint a szabványos 2C rendszerekben az OH-funkciós csoportoké. A környezeti nedvességen keresztül, bár lassan, de emlékeztető paszta nélkül is megtörténik a keményedés. Az erősítő rendszerek akkor használhatók, ha vastag kötésvonalakra van szükség olyan anyagoknál, amelyekben nincs vagy lassú a vízgőz diffúziója. Az ilyen alkalmazásoknál kihívást jelent a buborékképződésre való hajlam, amelyet a nagy mennyiségű vízzel történő gyors kikeményedés okoz [2].

A katalizátor mennyisége csak a tapadásmentes felület eléréséhez szükséges nyúzási időt befolyásolja. A keményedés a nedvességnek a ragasztóba történő diffúziója révén történik, és ezt a folyamatot csak a vízdifúzió sebessége szabályozza, amely szintén függ a hőmérséklettől és a páratartalomtól, valamint a polimer gerinc hidofil/hidrofób tulajdonságaitól [20]. Az olyan környezeti feltételek, mint a hőmérséklet és a páratartalom jelentősen befolyásolják a kikeményedés sebességét [2].

2.5.3. Kezdeti szilárdság változása

A lassú kikeményedés hosszabb rögzítési időt igényel a szükséges kezdeti szilárdság eléréséhez. Az autóiipari szélvédők felszereléséhez szükséges kezelési szilárdság gyorsabb elérésének egyik módja a ragasztók felmelegítése. Ilyenkor a lehűlés után azonnal nyújtanak némi kezdeti szilárdságot, így az autó használatba vételéig eltelt idő (biztonságos elhajtási idő) 24 óra helyett 1 órára csökken. Ez egyszerűen hangzik, de a gyakorlatban meglehetősen trükkös, mivel ha a ragasztó túl gyorsan hűl le, akkor a ragasztás feloldódhat, mivel a kohézió felépülése sokkal gyorsabb, mint a tapadásé, és ez feszültségrepedéseket okozhat. A kívánt melegolvadási tulajdonságok gondos kiegyensúlyozására van szükség. A fényszórófedél pajzsokat nem kristályos, gumyszerű, szivárgásmentes melegolvadék-ragasztóval ragasztják a dobozhoz közvetlenül az összeszerelés után. A felhordás után a butilgumiszalag konzisztenciájával rendelkezik. Végso mechanikai teljesítményét vízzel való reakció révén

nyeri el, mint más nedvességgel keményedő ragasztók. Az egykomponensű reaktív melegolvadó PUR-okat úgy fejlesztették ki, hogy a szilárdság kialakulásához szükséges időt néhány percre csökkentsék. Az ilyen rendszereket laminálási alkalmazásokhoz használják gépjárművek belső részeinél, bútorokban, szendvicspanelekben és más olyan alkalmazásokban, ahol a gyors gyártási sebességet 100°C feletti hőmérsékletállósággal kell kombinálni [2].



10. ábra: Különböző poliuretán technológiák szilárdságának felépülése a térhálósodás idejének függvényében [2]

A kezelési szilárdság nagyon gyors, azaz 5 percnél rövidebb idő alatt történő eléréséhez a ragasztó fizikai kikeményítésére van szükség, mivel a gyors kémiai kikeményedés a szükséges reakciósebesség miatt nem kezelhető valós gyártási körülmények között. A melegen olvadó rendszerek (a melegen olvadás 40 és 80 °C között alacsonyabb, viszkozus fázisba történő átmenetet jelent) végső szilárdságra történő kikeményedése általában lassabb, mint más nedvességgel kikeményedő rendszereké. A szabványos kétkomponensű PUR a keverés után azonnal elkezdi keményedni és viszkozitása növekszik, míg a booster egy látens időszakig megtartja viszkozitását, majd még a kétkomponensű PUR-nál is gyorsabban keményedik. Ezekhez a gyors rendszerekhez képest a standard egykomponensű PUR nagyon lassan keményedik [2].

2.5.4. Buborék képződés

A nedvességtartalmú kikeményítő rendszerek hátránya, hogy a kikeményedés során CO₂ szabadul fel. Ez korlátozza a szabad izocianátcsoportok számát a prepolimerben, mivel ha túl sok a reaktív csoport, akkor a CO₂-felszabadulás túl magas szintre emelkedik ahhoz, hogy a töltőanyagok elnyeljék vagy a ragasztó belsejéből elég gyorsan elpárologjon. Ez nem csak

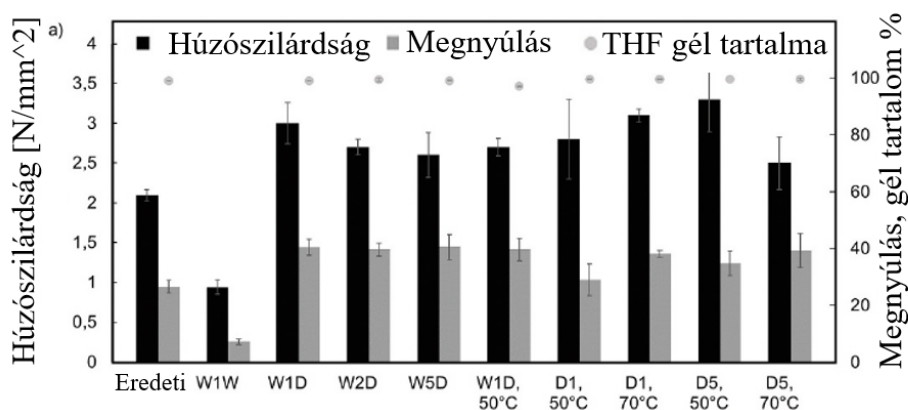
kozmetikai kérdés, hanem a szilárdság csökkenéséhez is vezet, és határt szab a magasabb modulusú nedvességgel keményedő ragasztóanyag megfogalmazásakor [2].

E hátrány leküzdésére aldimin alapú látens keményítők használhatók. Ezek a látens keményítők hidrolizálódnak aminná és a megfelelő aldehiddé, amely elpárolog és általában erős szagú. Sajnos a szag gyakran elfogadhatatlan a vásárlók számára. Egy újonnan kifejlesztett aldimin látens keményítő, amely egy nagyobb molekulatömegű, szagtalan aldehidet bocsát ki, az egykomponensű nedvességgel keményedő ragasztó szilárdságát több mint 20 MPa G értékre növeli. Ez a találmány megkönnyíti az erősítő rendszerek használatát is, mivel jelentősen magasabb szilárdsági szinten csökkenti a buborékképződési hajlamot [2].

A látens keményítő technológia lehetővé teszi az egykomponensű rendszerek alkalmazását olyan szilárdsági szinteken, amelyeket korábban a kétkomponensű PUR-ok számára tartottak fenn. Ezenkívül, amint az **8. ábra** látható, ezeknek a ragasztóknak a T_g értéke -50°C alatt van, de a szilárdság nagyon alacsony hőmérsékletfüggést mutat, és 100°C -on lényegesen magasabb G értéket biztosít, mint a szabványos kétkomponensű PUR (összehasonlítva a **7. ábra**) [2].

2.6. A PU ragasztott kötések alumínium felületen és környezeti hatások vizsgálatai

Soilikki Kotanen és társai acél poliuretán ragasztásakor vízzel érintkezésekor vizsgálták a stabilitását, degradációját. A létrehozott kötések nyírési szilárdságát, szakítószilárdságát és megnyúlását is vizsgálták [3].

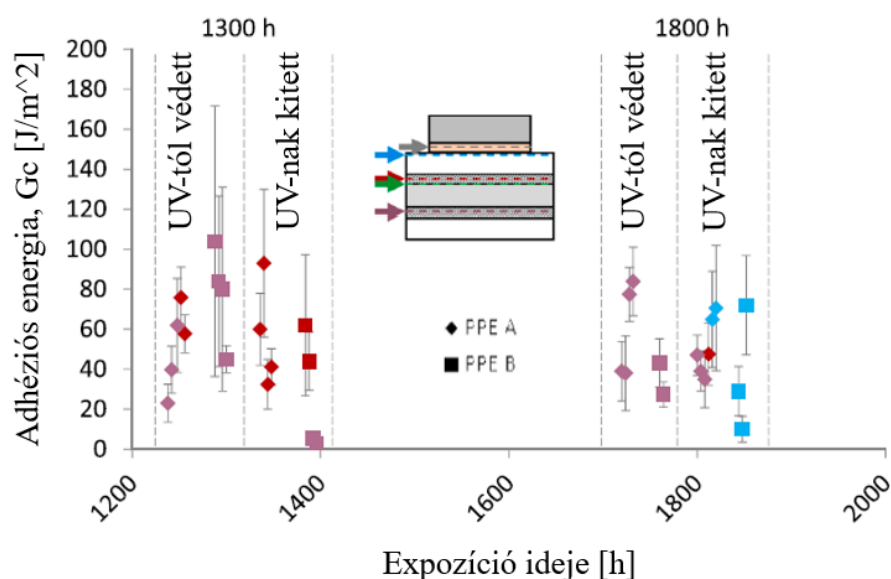


11. ábra: A vízbemerítések hatására a poliuretánragasztó szilárdsági és megnyúlási változása [3]

Az **11. ábra** jól mutatja a tesztelési típusokat. A W1W minta vízbemártva és vizesen tesztelve biztosította a legkevesebb szilárdságot kohéziós tönkremenetel mellett, míg W1D típus már szárítva kedvezőbb szilárdságot eredményezett szintén kohéziós tönkremenetellel.

A W1D 50°C és az ezt követő emelt hőmérsékleten kezelt minták a kezeletlenhez képest és a vízbemerítettekhez képest is fejlődést mutat, ráadásul már részben adhéziós tönkremenetel mellett [3].

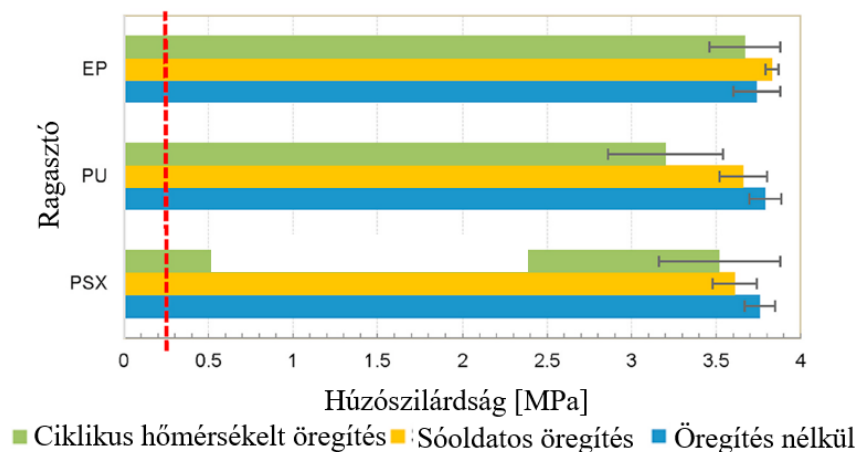
Scott E. Julien és társai poliuretánnal ragasztott kötések környezeti degradációját vizsgálták kontrollált hőmérséklet, páratartalom, és ultraviola sugárzás hatására. A minták esetén 85°C, 50% relatív páratartalom, és 170W / m² és 290-400 nm közötti UV sugárzás volt a vizsgáló környezet [4].



12. ábra: Az adhéziós energia változása a környezeti hatás idejének függvényében [4]

A **12. ábra** eredményei mutatják a különböző elrendezésben alkalmazott ragasztók adhéziós energiájának változását. A környezeti hatás ellenére a ragasztást mindegyik esetben kohéziós, vagy leginkább kohéziós tönkremenetel jellemezte [4].

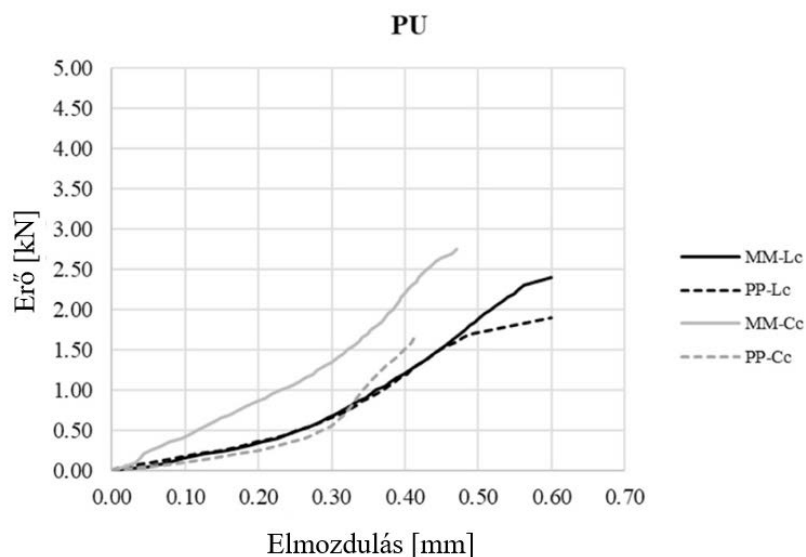
A.W. Momber és társai ragasztások mechanikai tulajdonságainak változásait vizsgálták elősegített öregítés hatására. A környezeti hatásoknak hőmérséklet emelést és sóoldatot alkalmaztak [5].



13. ábra: A szakítószilárdsági eredmények öregített és öregítés nélküli mintákon. A piros szaggatott vonal a szükséges minimum 0.25 MPa terhelést jelöli. (EP =epoxi; PU = poliuretán; PSX = polisziloxán) [5]

A 13. ábra eredményein jól látható, hogy poliuretán ragasztó esetében a sóoldatos öregítés hatására a szakító szilárdsága keveset csökkent. A hőmérséklet ingadozásának kitett minták szilárdsága nagyobb mértékben 3,75 MPa-ról. 3,25 MPa-ra csökkent [5].

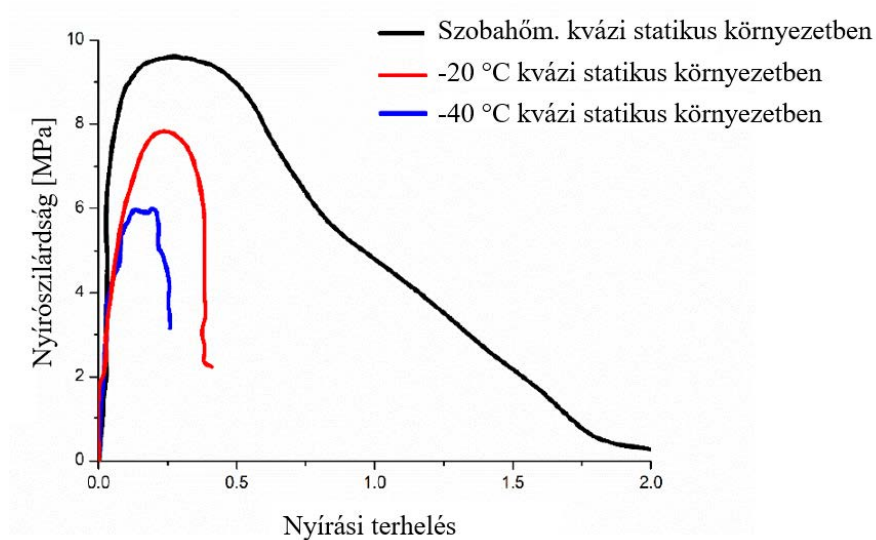
Francesco Marchione és társa hőmérséklet változtatás hatására vizsgálta kötések mechanikai tulajdonságainak változását [6].



14. ábra: A PU ragasztott kötések erő-elmozdulás ábrázolása MM: mahagóni-mahagóni, PP: fenyő-fenyő, Lc: labor kondíció, Cc: öregített kondíció [6]

A 14. ábra látható 25-50°C közötti öregítés hatására az MM- mintáknál nagyobb erő, és kisebb elmozdulás látható. Ehhez igazodik a másik típus LL ragasztásánál is az öregítést követően erő csökkenést és elmozdulás csökkenést tapasztaltak [6].

Zhemin Jia és társai poliuretán ragasztó nyíraskor fellépő tulajdonságait vizsgálták alacsony hőmérsékleti környezetben [7].



15. ábra: A nyírási szilárdság eredményeinek változása [7]

Az **15. ábra** eredményei mutatják, hogy alacsonyabb hőmérsékleti körülmények esetén csökkent a poliuretán ragasztó nyírási szilárdsága. -20°C környezetében 7,82 MPa-ra csökkent. További hőmérséklet csökkenés hatására -40°C esetén is tovább esett 5,9 MPa-ra a szilárdsága [7].

3. CÉLKITŰZÉS

Az irodalomkutatás alapján az alumíniumok ragasztásának tervezésekor figyelembe kell venni a technológia kialakítását, hogy a környezeti körülményekhez leginkább passzoljon a szerkezet, amely meghatároz környezeti tényezőket is, amik érik a kötéstechológia felületét. Példaként említve a csapadék, tisztítószeres mennyisége, amely érheti a ragasztó felületét. A poliuretánragasztóanyagok közül, a nedvességre térhálósodó poliuretán ragasztástechológiát ismertetem. A környezeti hatásokkal szemben tesztelni kell az ellenállóképességüket, a kívánt kedvező tulajdonságok biztosítása érdekében.

Poliuretán ragasztóhoz használt környezeti vizsgálatok módja, módszerei alapján megvizsgálom a kívánt körülményeket. Az a célom a dolgozatban, hogy a ragasztástechológiát érő hatásokat feltérképezem és igazolom szilárdsági vizsgálatok elvégzésével, tönkremeneteli módok és a kötések makro vizsgálatát elvégzem.

Ezt az alábbi feladatok végrehajtásával teszem meg:

- Megtervezem és elkészítem a ragasztott kötések szilárdsági és környezeti vizsgálatokhoz.
- Végrehajtottam a különböző körülmények között megvalósuló ragasztást.
- Megvizsgáltam az alumínium lézersugaras felületkezelésének hatását a ragasztás szilárdságára.
- Elemeztem és értékeltem a különböző körülmények közötti ragasztások szilárdságának állapotát.

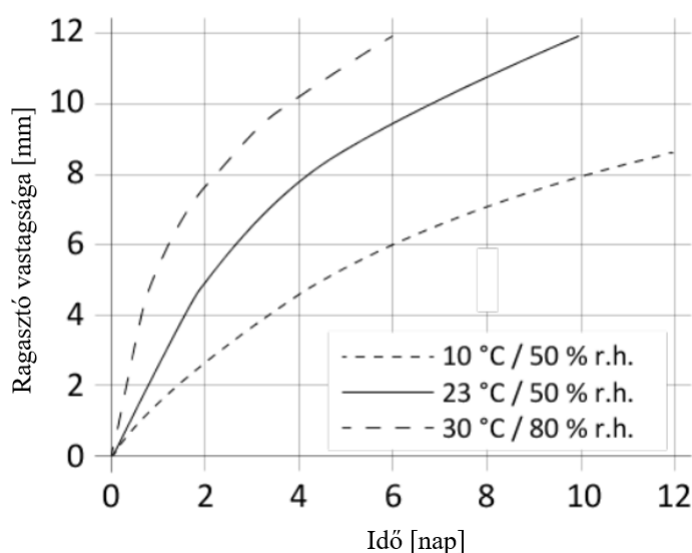
4. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT MÓDSZEREK, ESZKÖZÖK

4.1. Felhasznált anyagok

4.1.1. Ragasztáshoz szükséges anyagok

A ragasztásokhoz SikaFlex 252 egykomponensű poliuretán ragasztót használtam [8].

Ez a típus egy rugalmasra térhálósodó járműipari konstrukciós ragasztóanyag.



16. ábra: A Sikaflex®-252 térhálósodási sebessége [8]

A 16. ábra alapján elmondható, hogy jelentős különbség van a 30°C-on és 10°C-on történő térhálósodás ideje között. Ezt az időt fokozza nagyobb ragasztások szükségessége is. A ragasztáshoz Sika Primer 207 anyaggal vontam be a lemezek felületét, és 3 mm vastagságú távtartó ragasztószalaggal biztosítottam a kiadagolt ragasztó magasságát.

4.1.2. Alumínium lemez

Ragasztandó felületekként Al99,5 alumínium lemezeket, és Al6060 alumínium L profilokat használtam.

4.2. Környezeti körülmények bemutatása

Dolgozatom során 23 különböző térhálósodási, környezeti és ragasztási körülményt vizsgáltam. Ezek beazonosítása érdekében az ABC betűivel különböztettem meg őket, logikai sorrendben.

- AA: Kontroll

Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a kontroll mintákat 14 napon keresztül.

Térhálósodás közben a következő mintákat tettem ki különböző környezeti hatásoknak július közepétől, augusztus közepéig végeztem ezeket a tesztek:

- AB: Hűtőbe térhálósított

A hűtőben térhálósított minták 5°C alatti hőmérsékleten, körülbelül 3°C -on, 65-70% körüli páratartalom környezetében térhálósodtak

- AC: Környezetben térhálósított, a szabad ég alatt 2022 júliusában és augusztusában Kecskeméten. Itt két héten keresztül érte a mintákat a hőmérsékletváltozás, páratartalom ingadozása, szél, UV sugárzás.
- AD: Környezetben térhálósított a szabad ég alatt, tálcán vízzel körbevéeve, üveggel letakarva 2022 júliusában és augusztusában Kecskeméten. Szintén két héten keresztül érte a mintákat a hőmérsékletváltozás, páratartalom ingadozása, szél, UV sugárzás.
- AE: ZKI Zrt. dinnye termesztési üvegházában térhálósodott, napi öntözés mellett.
- AF: Személygépjármű csomagtartójában rögzítve utaztak ~ 4000 km-t.

A már két hétig térhálósított ragasztott kötések is vizsgáltam a felsorolt környezetekben:

- AG: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően hőmérsékletingadozás alá vettem kemencében 90°C -ra hevítve, majd -35°C -ra hűtve 25 teljes ciklussal a mintákat.
- AH: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően hőmérsékletingadozás alá vettem kemencében 90°C -ra hevítve, majd -35°C -ra hűtve 50 teljes ciklussal a mintákat.
- AI: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően hőmérsékletingadozás alá vettem kemencében 90°C -ra hevítve, majd -35°C -ra hűtve 100 teljes ciklussal őket.
- AJ: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően 1 hétig savas folyadékba merítve $\text{pH}=5$.

- AK: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően 1 hétig savas folyadékba merítve $\text{pH}=9$.
- AL: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően 1 hétig gyűjtött esővízbe merítve $\text{pH}=6$.
- AM: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően 1 hétig csapvízbe merítve $\text{pH}=7$.
- AN: Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat. Ezt követően szabványos polimer UV teszt gépben, UV besugárzási teszt alá vetettem $0,8 \text{ W} / \text{m}^2$ 454 óráig a mintákat.

Végeztem ezt követően jóval eltérőbb körülmények között ragasztásokat, amelyek a következők:

- AQ: Végig összeszorítás alatt voltak a próbatestek, közelítve a 0 mm hézagot. Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat.
- AR: 6 mm vastag ragasztás, 2 db 3 mm-es távtartó segítségével. Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat.
- AS: 1 mm vastag ragasztás, 1 db 1 mm-es távtartó alkalmazásával Labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat.
- AT: Közvetlen a ragasztás előtt további nedvesség felületre juttatása érdekében vizet permeteztem kézi szóróval a felületre, majd erre nyomtam rá a ragasztót. Majd labor körülmények között $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50% páratartalom környezetében térhálósítottam a mintákat.
- AU: Távtartó ragasztása, amellyel lemértem a távtartó ragasztószalag torzítási mértékét, amellyel befolyásolhatta volna a mérési eredményeket. Ezt kerültem el a ragasztószalagok precíz átvágásával.
- AV: Lézersugaras felületkezeléssel négyezthálós LIPSS (Laser-induced periodic surface structure) lézersugár indukálta ismétlődő felületi struktúra kialakítása, 277 fs, 750 kHz, 0,06 mm vonaltávolság, 50% teljesítmény áthúzva 30% teljesítménnyel készített vonalakkal.
- AW: Lézersugaras felületkezeléssel 50% teljesítmény alkalmazásával LIPSS (Laser-induced periodic surface structure) lézersugár indukálta ismétlődő

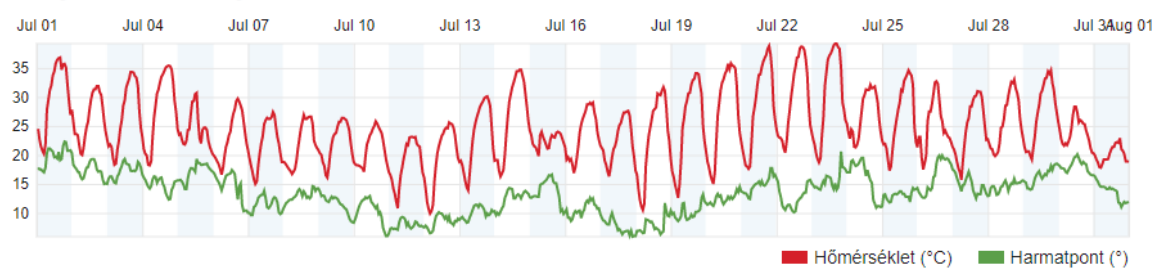
felületi struktúra kialakítása, 277 fs, 750 kHz, 6,6 m / s sebesség, 0,03 mm vonaltávolság.

- AX: Lézersugaras felületkezeléssel 100% teljesítmény alkalmazásával LIPSS (Laser-induced periodic surface structure) lézersugár indukálta ismétlődő felületi struktúra kialakítása, 277 fs, 750 kHz, 6,6 m / s sebesség 0,03 mm vonaltávolság.
- AY: Lézersugaras felületkezeléssel 100% teljesítmény alkalmazásával felület módosítása, 277 fs, 750 kHz, 1 m / s sebesség 0,03 mm vonaltávolság.

Térhálósodás környezeti körülményei:

A 18. és 19. ábrán egy kecskeméti meteorológiai állomás adatai láthatóak, mely itt volt az egyetemhez közel. Itt összefoglalva láthatóak júliusban és augusztusban érzékelhető hőmérséklet, páratartalom, harmatpont, szélsébség, nyomás és csapadék mennyiségi értékek.

2022. július 1. – 2022. július 31

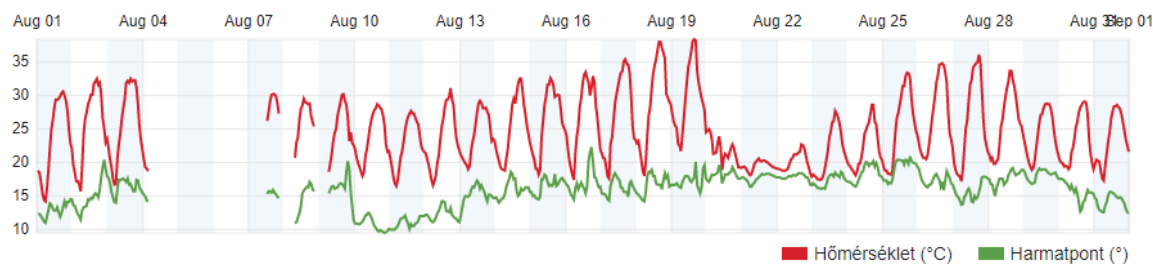


2022. július 1. – 2022. július 31

	Magas	Alacsony	Átlagos		Magas	Alacsony	Átlagos
Hőfok	39,2 ° C	9,2 ° C	24,0 ° C	Szélsébség	0,0 km/h	0,0 km/h	0,0 km/h
Harmatpont	22,3 ° C	4,1 ° C	12,7 ° C	Szélőkés	5,3 km/h	--	0,0 km/h
páratartalom	89 %	19 %	52 %	Szélirány	--	--	WSW
Csapadék	2,78 mm	--	--	Nyomás	1015,92 hPa	1001,02 hPa	--

17. ábra: Az időjárási körülmények 2022 júliusában Kecskeméten [9]

2022. augusztus 1. – 2022. augusztus 31



2022. augusztus 1. – 2022. augusztus 31

	Magas	Alacsony	Átlagos		Magas	Alacsony	Átlagos
Hőfok	38,3 °C	2,1 °C	22,4 °C	Szélesség	0,0 km/h	0,0 km/h	0,0 km/h
Harmatpont	22,2 °C	0,8 °C	14,2 °C	Szélirány	19,0 km/h	--	0,0 km/h
páratartalom	93 %	35 %	57 %	Szélirány	--	--	ESE
Csapadék	43,93 mm	--	--	Nyomás	1012,87 hPa	989,84 hPa	--

18. ábra: Az időjárási körülmények 2022 augusztusában Kecskeméten [9]

4.3. Alkalmazott eszközök

Egyéb ragasztott típusok esetén vizsgáltam az impulzus lézerrel kezelt felület hatását alumínium felületén poliuretán ragasztástechnológiára, amelyet a következő berendezéssel vizsgáltam.

4.3.1. Coherent Monaco 1035-80-60 impulzus lézer

A berendezés átlagos teljesítménye 60 W, impulzusonként az energia értéke 750 kHz-es ismétlési frekvencia esetén 80 μ J. Alézer impulzusának ismétlési frekvenciája egy impulzustól 50 MHz-ig állítható. Ez a berendezés mikromegmunkálásra, felületkezelésre kiválóan alkalmazható (19. ábra).



19. ábra: Coherent Monaco 1035-80-60 impulzus lézer

4.4. Kötések kialakítása

A kötések kialakításához a kontroll ragasztás technológiáját alkalmaztam, melynek folyamatát ismertetem.

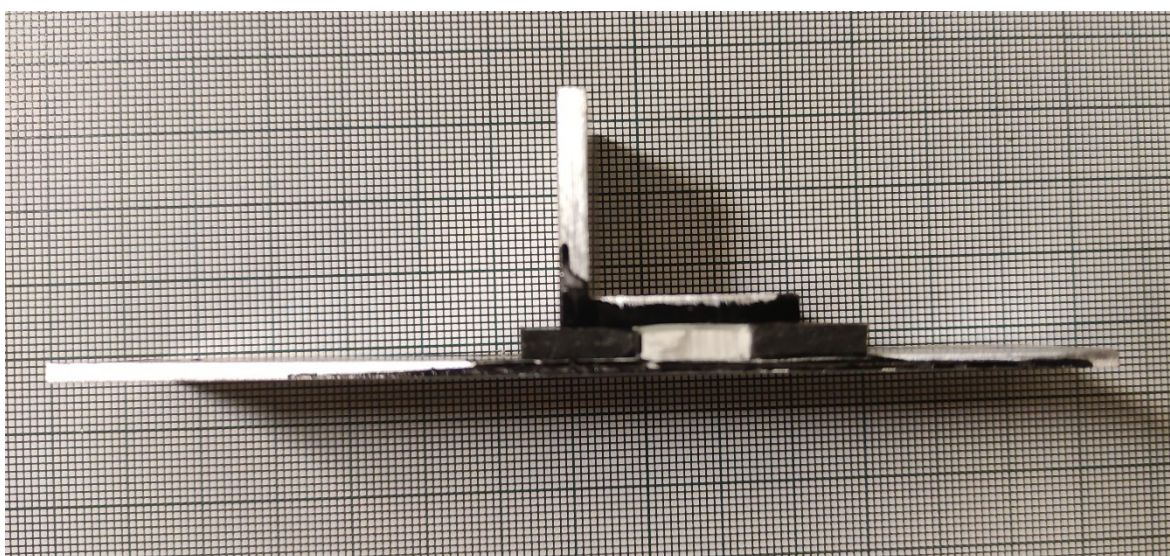
Lépései:

1. A lemezek felületének csiszolófátyolos érdesítése
2. Felület portalanítása, alkoholos tisztítása
3. Primer felvitele a felületre, száradási idejéig várakozás
4. Távtartó ragasztószalagok felragasztása egymástól 12,5 mm-re
5. A ragasztó kiadagolása
6. Ellendarab felhelyezése

A 20. ábra és 21. ábra mutatja be a vizsgálatokhoz elkészült kötéseket. 112,5 mm hosszú 25 mm széles és 2 mm vastagságú alumínium lemezeket ragasztottam 3 mm vastagon amit egy 3 mm vastag 12,5 mm széles távtartó szalag biztosított. Alumínium L profilként egy 25 mm x 25 mm alapterületű 3 mm vastag lemezt használtam.



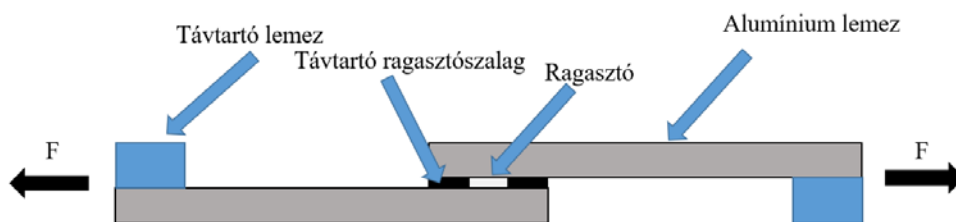
20. ábra: A nyírószilárdság méréséhez kialakított kötéselrendezés



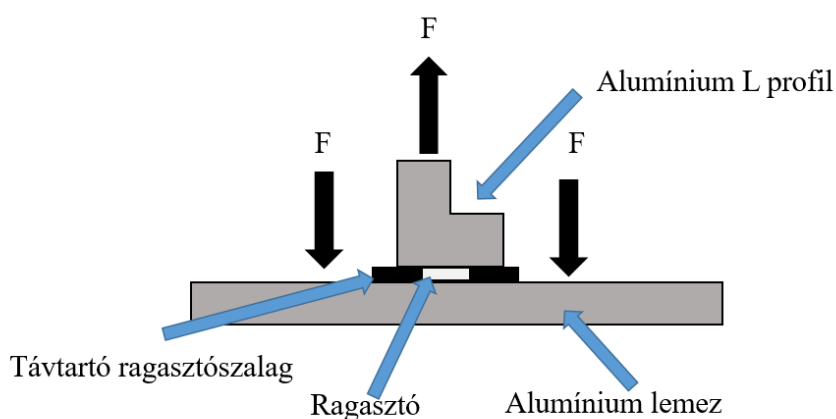
21. ábra: A húzószilárdság méréséhez kialakított kötéselrendezés

4.5. Szilárdsági vizsgálatok

20 mm / perc szakítási sebességet alkalmazva, ISO 4587-2003 szabvány figyelembevételével alakítottam ki a kötési elrendezéseket. A következő ábrákon a szilárdsági vizsgálatok mérését szemléltetem (22. és 23. ábra).



22. ábra: Nyírószilárdsági vizsgálat elrendezése



23. ábra: Húzószilárdsági vizsgálat elrendezése

4.6. Felmerülő hibák, és kiküszöbölésük

A minták előkészítésénél hibát jelentett, hiába tisztítottam meg a lemezt, azt követően még primerrel vontam be a lemezek felületét, a száradási idő közben por szállhatott a lemezekre. Ezért, hogy ezt elkerüljem, a teremben minimalizáltam a levegő mozgását, zárt ablakok mellett ragasztottam

A térhálósodási teszteknel, AB típusnál a hűtőajtó nyitogatása jelent problémát, így ezt minimalizáltam a teszt idejére. A környezeti teszteknel az időjárás változása volt az, ami véletlenszerű volt a tesztek idejére, így ezt mérések segítségével tudtam megvizsgálni, de befolyásolni nem.

A vizsgálatok elvégzésekor a kötés területének szánt 3 mm magas 12 mm x 25 mm széles területen túl a lemezen kívülre eső ragasztót térhálósodás után eltávolítottam a lemez széléről, ezáltal ez az anyagmennyiség már nem játszott szerepet a mérések értékeiben.

5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A dolgozatom legfontosabb eredményeit bemutatom az alábbi logikai felépítés szerint:

A térhálósodás körülményei, a térhálósodott ragasztás környezeti terhelései, egyéb típusok környezeti terhelése, részekre felosztva. Ezeken a részeken belül, húzószilárdság, nyírószilárdság, és közben létrejövő nyúlás értékeket tüntetek fel. Ezt követően pedig tönkremeneteli képeket mutatok a típusokra lebontva, jelenségeket magyarázva.

Az eredmények zavartalan kiértékeléséhez szükséges volt a távtartó befolyásoló hatásainak vizsgálata. Az 1. táblázatban látható eredmények igazolják, hogy zavarta volna a távtartó jelenléte a mérési eredményeimet. Ezért szükség volt a távtartó átvágására minden szilárdsági vizsgálat előtt precíz átvágására, így a befolyása megszűnt, minimalizálódott a mérések tekintetében.

1. táblázat: A távtartó tesztelése

Húzási vizsgálatok	AU
Átlag erő [N]	133
Átlag elmozdulás [mm]	10,26
Húzószilárdság [MPa]	0,426
Nyírási vizsgálatok	
Átlag erő [N]	137
Átlag elmozdulás [mm]	14,915
Nyírószilárdság [MPa]	0,438

5.1. Térhálósodás környezeti körülményei

Ebben az alfejezetben azokat a mintákat vizsgálom, amik különböző környezeti körülmények között lettek térhálósítva. Ez összesen 6 típust jelent melyeket a 2. táblázat foglal össze.

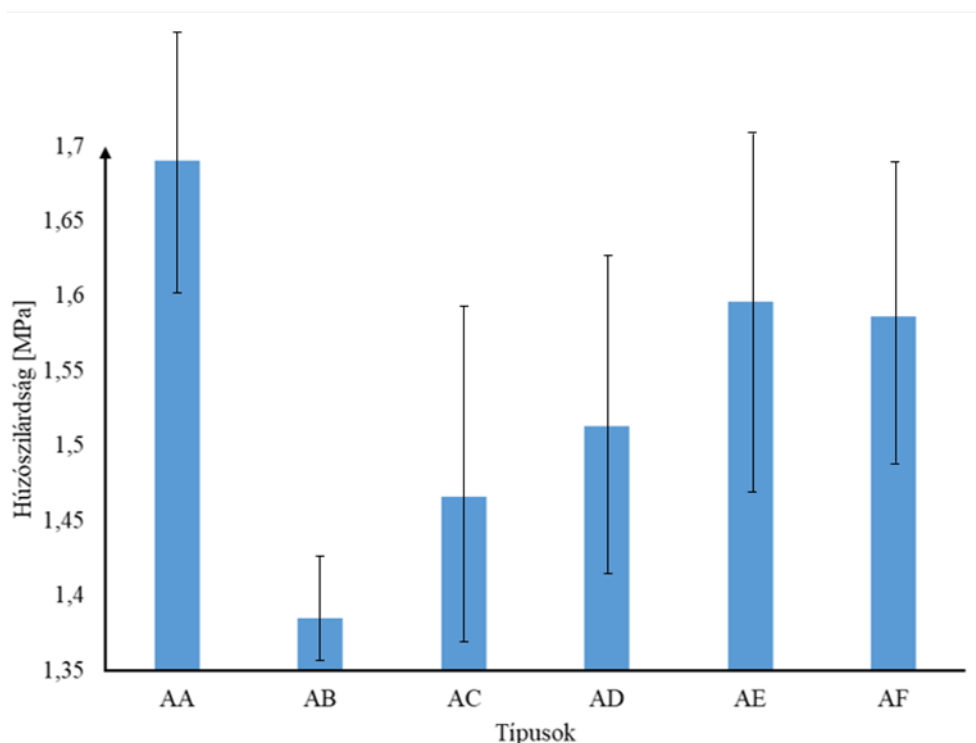
2. táblázat: Térhálósodás környezeti körülmények típusai

AA	Labor, kontroll
AB	Hűtőben térhálósodott
AC	Környezetben térhálósodik, tetőn tálcán
AD	Környezetben térhálósodik, tetőn tálcán, vízzel töltve
AE	Üvegházban térhálósodik
AF	Szállítás közben térhálósodik

AB típustól, AF típusig eltérő körülmények között térhálósodtak a minták. A következő táblázatokban bemutatom a térhálósodó környezeti tesztek eredményeit.

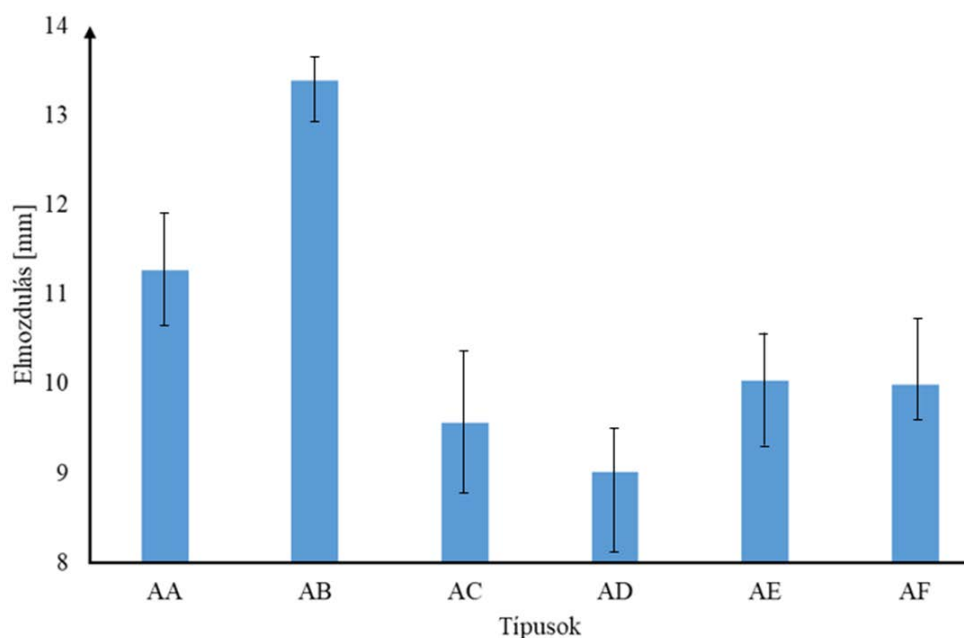
3. táblázat: AB-től AF-ig húzás vizsgálata

	AA	AB	AC	AD	AE	AF
Átlag erő [N]	465,6	432,7	458,1	472,9	498,7	495,7
Átlag elmozdulás [mm]	11,27	13,39	9,56	9,01	10,03	9,99
Húzószilárdság [MPa]	1,69	1,385	1,466	1,513	1,596	1,586



24. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták húzószilárdsága

A 24. ábra mutatja, hogy az AA típus 22°C-on és 50%-on megfelelő eredményt nyújtott szilárdság területén, megfeleltek a laborkörülmények a kötés megfelelő térhálósodásának. Míg AB típus a hűtőben 3 °C körüli hőmérsékleten kevésbé térhálósodott, tovább kellett volna bent hagyni, ezáltal kisebb szilárdságot eredményezett. AC és AD típus a szabadban térhálósított minták, nagyobb és ingadozó páratartalom érte a mintákat, szinte azonos csökkenést látható. AE és AF esetében a nagyobb páratartalom miatt nagyobb nedvességet kapott, lehetett az oka a szilárdság csökkenésének. Feltételezem, hogy a nagy páratartalom miatt, hirtelen kialakult, térhálósodott rétegen nehezebben jutott át, a levegő nedvességtartalma, ez is egy lehetséges ok.



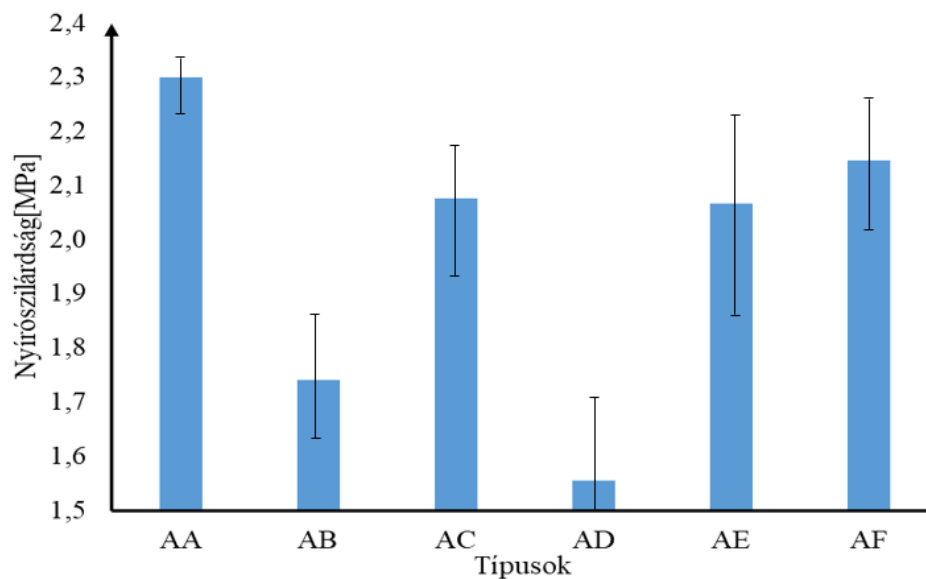
25. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták húzásának elmozdulása

A 25. ábra adatain látható, ahogyan az AB típus, jóval nagyobb nyúlással rendelkezett, nem sikerült még elnyernie a végső értékét a térhálósodás hiányos végbemenetele miatt. Az AC és AD típusok szinte azonos csökkenést mutatnak nyúlás terén is a nagy páratartalom következtében. AE és AF típusok esetében a nagyobb hőmérséklet és páratartalom együttese okozhatta itt is a nyúlás csökkenését.

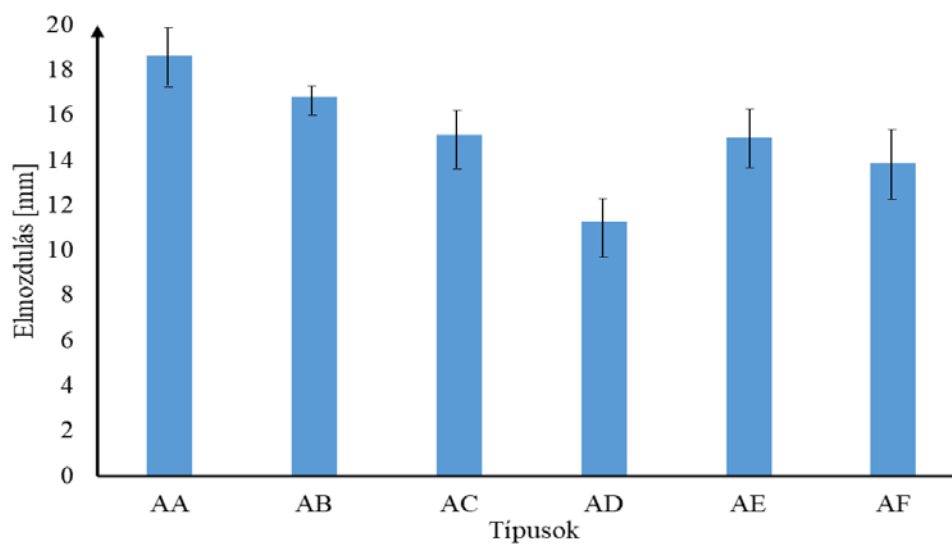
4. táblázat: AB-től AF -ig nyírás vizsgálata

	AA	AB	AC	AD	AE	AF
Átlag erő [N]	611,5	544	649	486	646	671
Átlag elmozdulás [mm]	18,63	16,802	15,11	11,272	14,99	13,878
Nyírószilárdság [MPa]	2,3	1,741	2,077	1,555	2,067	2,147

A ragasztott kötések húzási terhelést viselik el könnyebben, így ezt elemzem, a nyírási eredményeket összevetésképp ábrázoltam.



26. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták nyírószilárdsága



27. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták nyírásának elmozdulása

5.2. A kötés két hét térhálósodása után végzett környezeti tesztek

A környezeti tesztek során 8 különböző környezeti terhelési módot vizsgáltam, ezeket az 5. táblázat foglalja össze.

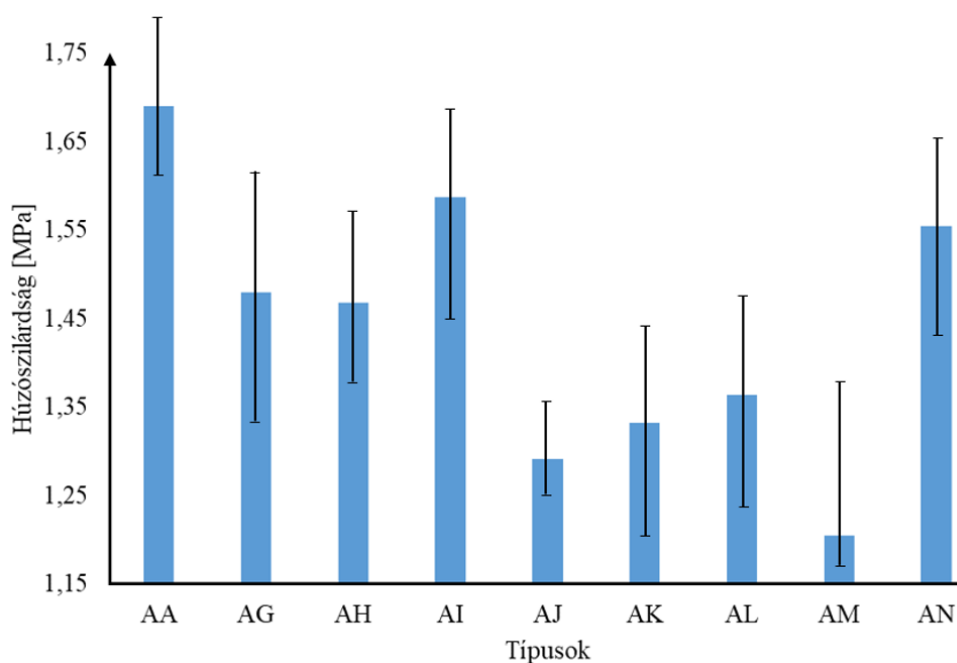
5. táblázat A kötés két hét térhálósodása után végzett környezeti tesztek típusai

AG	Hőciklus, kemence 90°C 30 percig, majd -35°C 30 percig 25 ismétlés
AH	Hőciklus, kemence 90°C 30 percig, majd -35°C 30 percig 50 ismétlés
AI	Hőciklus, kemence 90°C 30 percig, majd -35°C 30 percig 100 ismétlés
AJ	1 hétig folyadék alatt, savas, sósav pH=5
AK	1 hétig folyadék alatt, lúgos, pH=9
AL	1 hétig folyadék alatt, gyűjtött esővíz pH=6
AM	1 hétig folyadék alatt, csapvíz pH=7
AN	UV teszt

Az AG-től AT típusig a minták laborkörülmények között állandóan $22\pm1^\circ\text{C}$ -on $50\pm10\%$ -os páratartalom környezetében térhálósodott. A következő táblázatokban bemutatom a környezeti tesztek eredményeit.

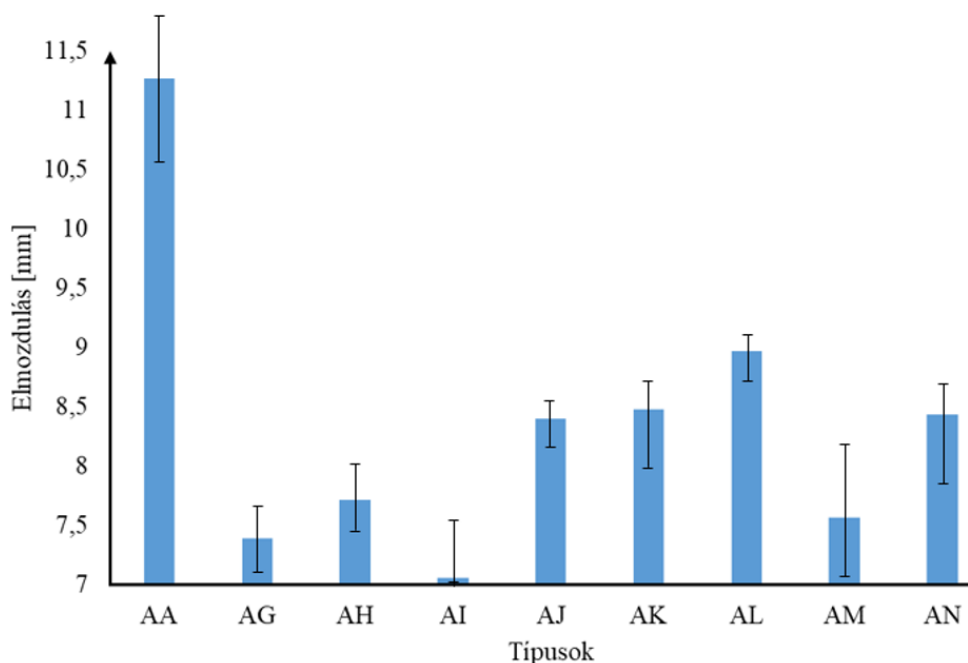
6. táblázat AG-től AN-ig húzás vizsgálata

	AA	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN
Átlag erő [N]	465,6	462,3	458,6	495,9	403,7	416,3	426,3	376,3	485,7
Átlag elmozdulás [mm]	11,27	7,39	7,72	7,06	8,4	8,48	8,97	7,57	8,44
Húzószilárdság [MPa]	1,69	1,479	1,468	1,587	1,292	1,332	1,364	1,204	1,554



28. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták húzószilárdsága

28. ábrán látható, hogy már az AG típusnál az első hőkezelés is nagymértékben csökkentette a szilárdságot, ez jelent meg az AH típusnál is, az AI sok hőkezelése pedig elkezdte újra ridegíteni a kötést. Az AJ, AK, AL, AM, típusok is degradálják, de a típusok között nincs szignifikáns különbség. Az AN típus esetén annyival csökkent a szilárdság, amennyit a felület degradációja befolyásol egy ilyen kötéselrendezésnél.

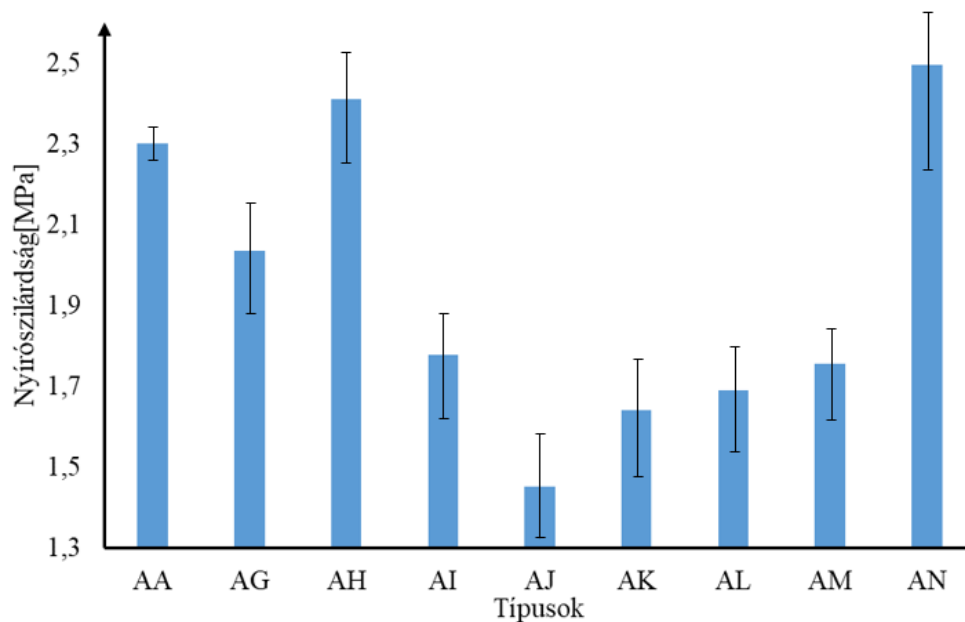


29. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták húzásának elmozdulása

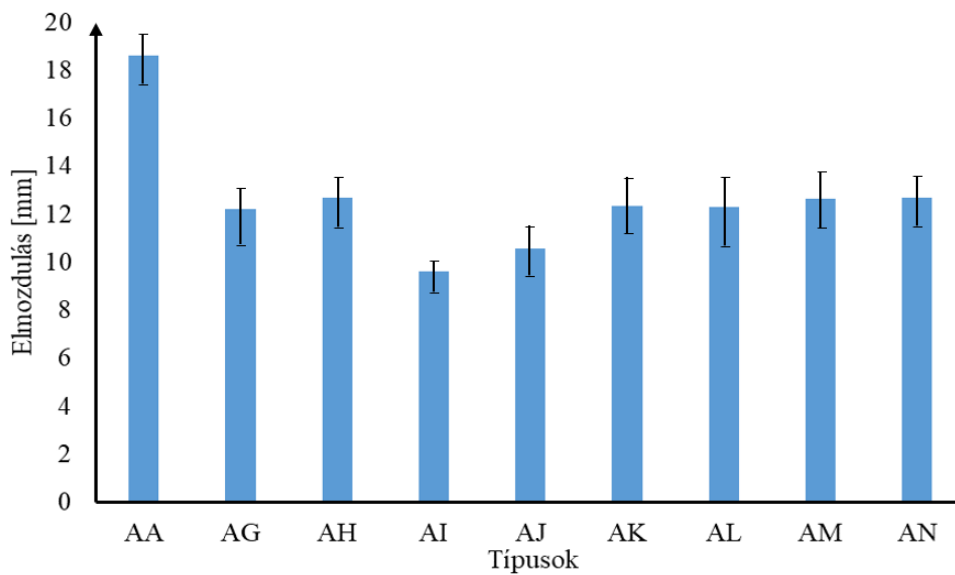
A **29. ábra** adatain a nyúlás változása megmutatja az AG, AH, és AI típusoknál a hőkezelés számának növelésével, egyre csökkenő nyúlás értékeket kaptam. A folyadékokba helyezve szintén csökkent a nyúlás, AJ, AK, AL, és AM esetében is, ezek a minták közül AM a csapvízbe helyezett jobban degradálta a kötést, mint az enyhén savas és enyhén lúgos típusok esetében. AN esetében az UV hatására a nyúlás is elég nagy degradációt szenvedett, ennek oka lehet az oldalsó részeinek ridegedése.

7. táblázat: AG-től AN-ig húzás vizsgálata

	AA	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN
Átlag erő [N]	611,5	636	753	556	454	513	528	549	780
Átlag elmozdulás [mm]	18,63	12,211	12,694	9,613	10,579	12,36	12,294	12,664	12,689
Nyírószilárdság [MPa]	2,3	2,035	2,410	1,779	1,453	1,642	1,690	1,757	2,496



30. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták nyírószilárdsága



31. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták nyírásának elmozdulása

5.3. Egyéb típusok vizsgálata

Egyéb ragasztási tényezők vizsgálatát is végrehajtottam ahol 5 különböző módon történt ragasztást vizsgáltam. Ezeket a 8. táblázat foglalja össze, ami ismét tartalmazza a tisztán csak távtartó vizsgálatát.

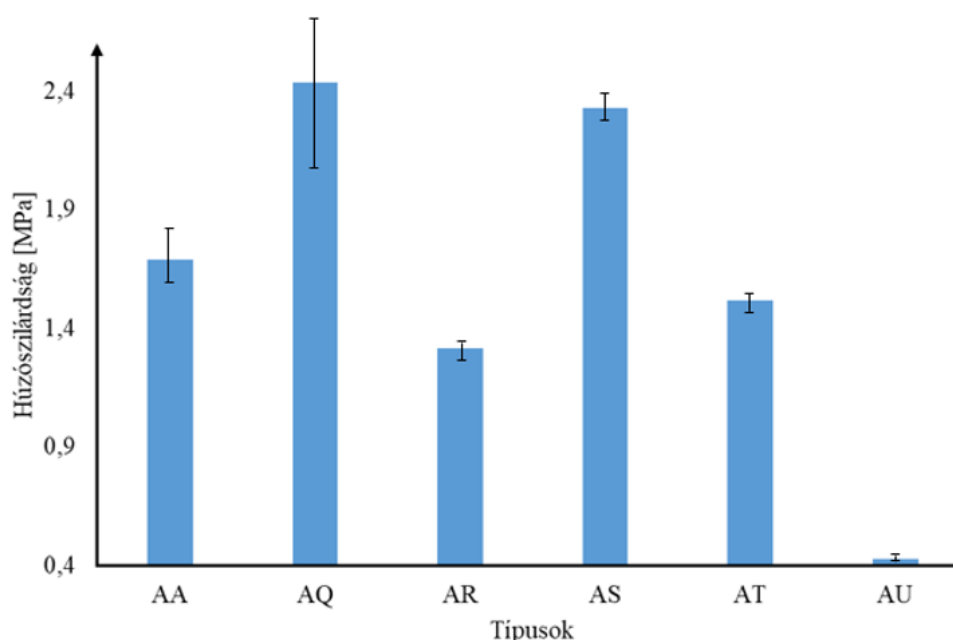
8. táblázat: Egyéb típusok vizsgálatának típusai

AQ	0 mm vastag ragasztás
AR	6 mm vastag ragasztás
AS	1 mm vastag ragasztás
AT	Nedvesített felület ragasztása
AU	távtartó csak

A következő táblázatokban és ábrákon bemutatom az egyéb környezeti tesztek eredményeit.

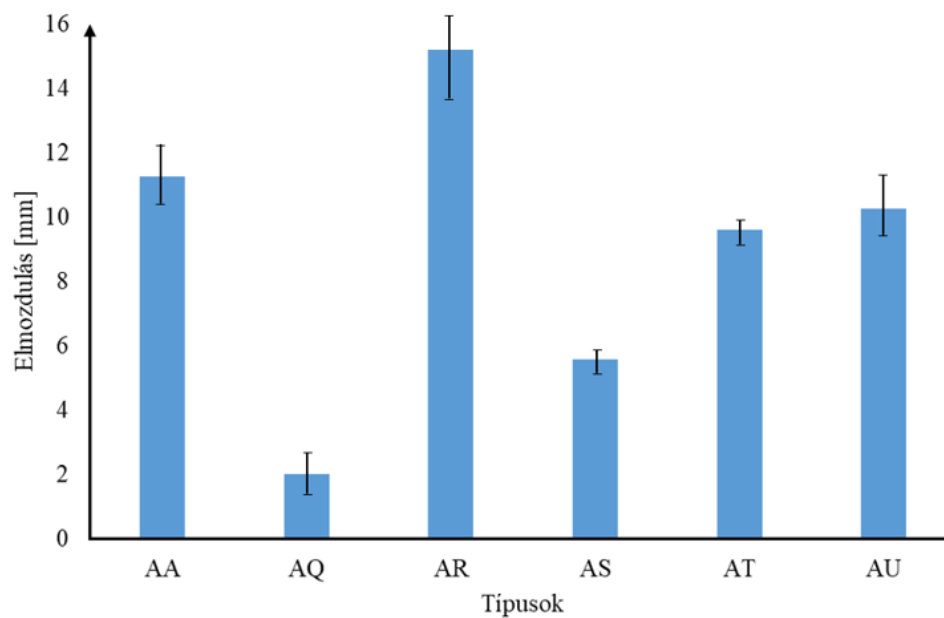
9. táblázat: AQ-tól AU-ig húzás vizsgálata

	AA	AQ	AR	AS	AT	AU
Átlag erő [N]	465,6	761,1	410,4	728	474,3	133
Átlag elmozdulás [mm]	11,27	2,02	15,22	5,58	9,62	10,26
Húzószilárdság [MPa]	1,69	2,436	1,313	2,330	1,518	0,426



32. ábra: Egyéb típusú minták húzószilárdsága

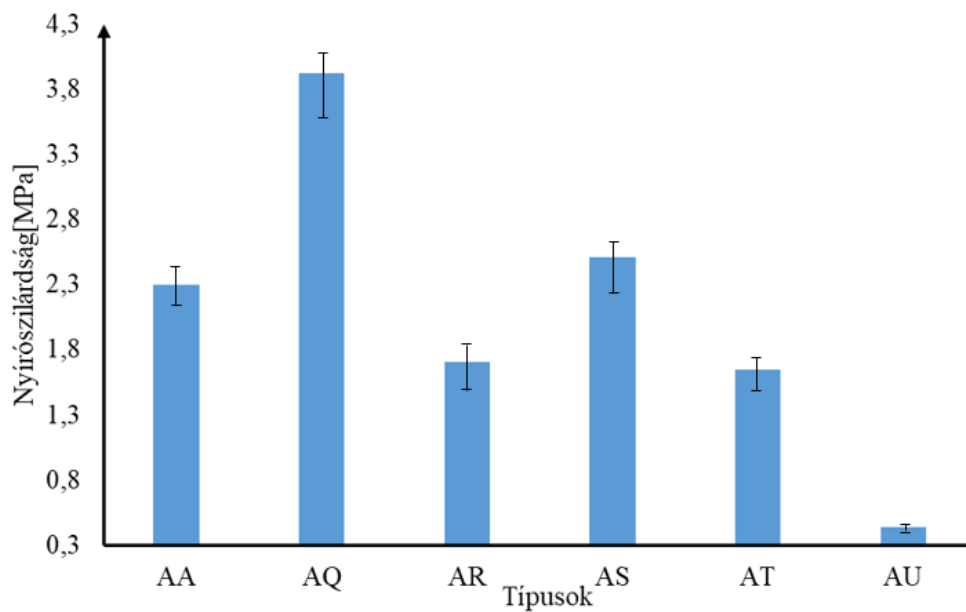
A 32. ábra és 33. ábra adatait összevetve AQ 0 mm vastagságú ragasztásnál nagyobb lett szilárdság értéke, de elveszti a rugalmasságot, ez volt jellemző az AS 1 mm-es ragasztás esetén is. AR típus esetében nagyon elveszti a szilárdságot, mert nagy keresztmetszetnek kell térhálósodnia, és nagyon deformálódik a ragasztó. AT típus esetében egyik érték vizsgálata esetén sincs szignifikáns különbség. A nedvességet, amit a felületre juttattam, ha fel is használta, túl soknak bizonyulhatott a nedvesség a szilárdság minimális csökkenéséből következően.



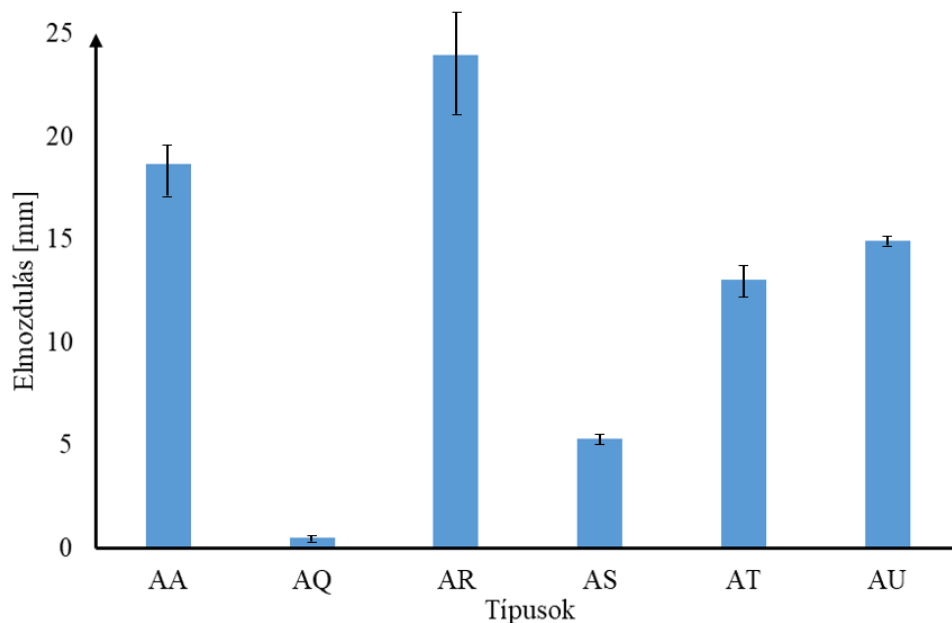
33. ábra: Egyéb típusú minták húzásának elmozdulása

10. táblázat: AQ-tól AU-ig nyírás vizsgálata

	AA	AQ	AR	AS	AT	AU
Átlag erő [N]	611,5	1226	533	784	515	137
Átlag elmozdulás [mm]	18,63	0,524	23,931	5,318	13,056	14,915
Nyírószilárdság [MPa]	2,3	3,923	1,706	2,509	1,648	0,438



34. ábra: Egyéb típusú minták nyírószilárdsága



35. ábra: Egyéb típusú minták nyírásának elmozdulása

A 34. és 35. ábrán látható adatok alapján elmondható, hogy AQ típusnál a nyírószilárdság is nagyobb értékű volt, azonban jóval kisebb nyúlással rendelkezett. AR típus esetében a 6mm vastag ragasztás hatására itt is kisebb szilárdság, azonban nagyobb nyúlás lépett fel. AS esetére 1 mm ragasztás miatt szilárdság emelkedés látható a nyúlás csökkenése mellett. AT típus esetében valamivel kisebb nyírószilárdság, és kisebb nyúlás látható. AU eredményeit is feltüntettem, hogy látható legyen egyedül a távtartó ragasztószalag befolyásoló értékei, ami miatt a távtartó ragasztószalagot átvágtam.

5.4. Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek

A ragasztási technológia kiváltása miatt kísérleteket végeztem. Ehhez alumínium lemezek felületét módosítottam már tanszéken meghatározott paraméterekkel, melyek LIPSS (Laser-induced periodic surface structure) lézersugár indukálta ismétlődő felületi struktúrát alakítanak ki a felületen. Ezeket a vizsgálatokat a **11. táblázat** foglalja össze.

11. táblázat: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek típusai

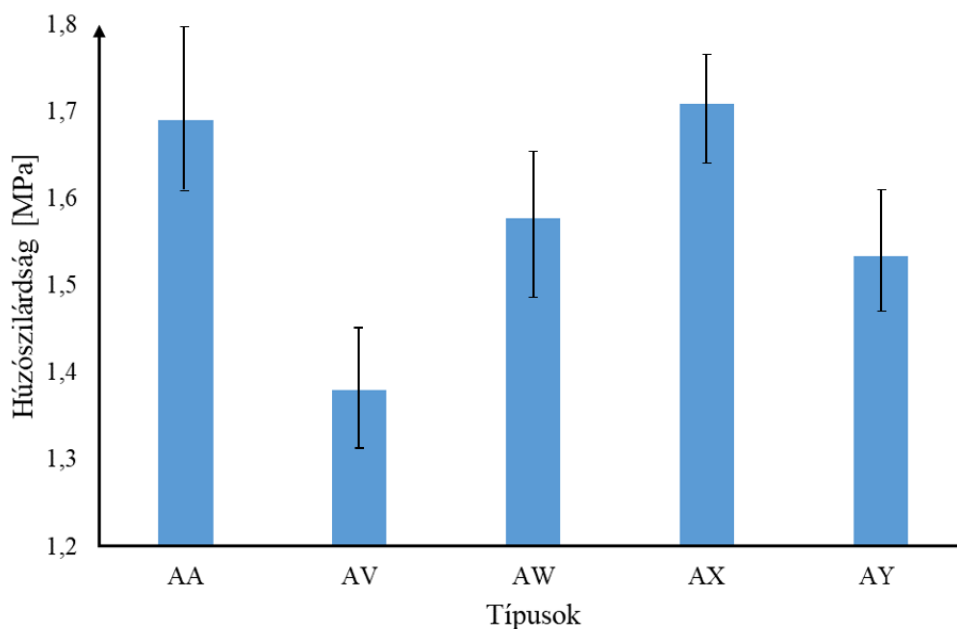
Négyzethálós felületkezelés (50% P, 60 mikron vonaltávolság; 30% teljesítmény 60 mikron távolság; 750 kHz, 277fs, v=6,6 m/s
Teljes felület kezelése (50% P, 30 mikron vonaltávolság; 750 kHz, 277fs, v=6,6 m/s
Teljes felület kezelése (100% P, 30 mikron vonaltávolság; 750 kHz, 277fs, v=6,6 m/s
Teljes felület kezelése (100% P, 30 mikron vonaltávolság; 3 750 kHz, 277fs, v=1 m/s

A következő táblázatokban és ábrákon bemutatom a lézersugárral végzett felületmódosító tesztek eredményeit. A 12. táblázat, a 36. ábra és 37. ábra a lézersugaras felületmódosított felületek húzószilárdsági eredményeit mutatják be

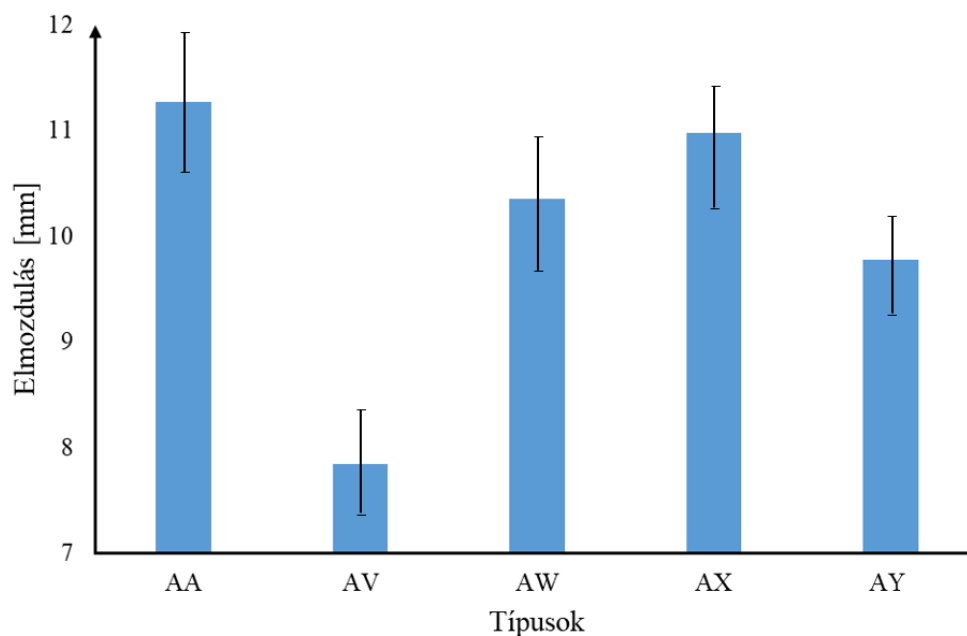
12. táblázat: AV-től AY-ig a húzási vizsgálatok eredménye

	AA	AV	AW	AX	AY
Átlag erő [N]	465,6	431,1	493	533,9	479,3
Átlag elmozdulás [mm]	11,27	7,84	10,35	10,98	9,78
Húzószilárdság [MPa]	1,69	1,380	1,578	1,708	1,534

A húzószilárdsági tesztek eredményeit összevetve az látható, hogy AV négyzethálós felületen kialakított LIPSS (Laser-induced periodic surface structure) lézersugár indukálta ismétlődő felületi struktúra jelenlétében elérte a szilárdság és a nyúlás értékek körülbelül 80%-át a kontroll mintához képest. Míg AW, AX, és AY típusok esetében ahol a teljes felületet módosítottam, még jobban közelít a technológia szilárdság béli és nyúlás béli értékei a kontrollhoz viszonyítva.



36. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek húzószilárdsága



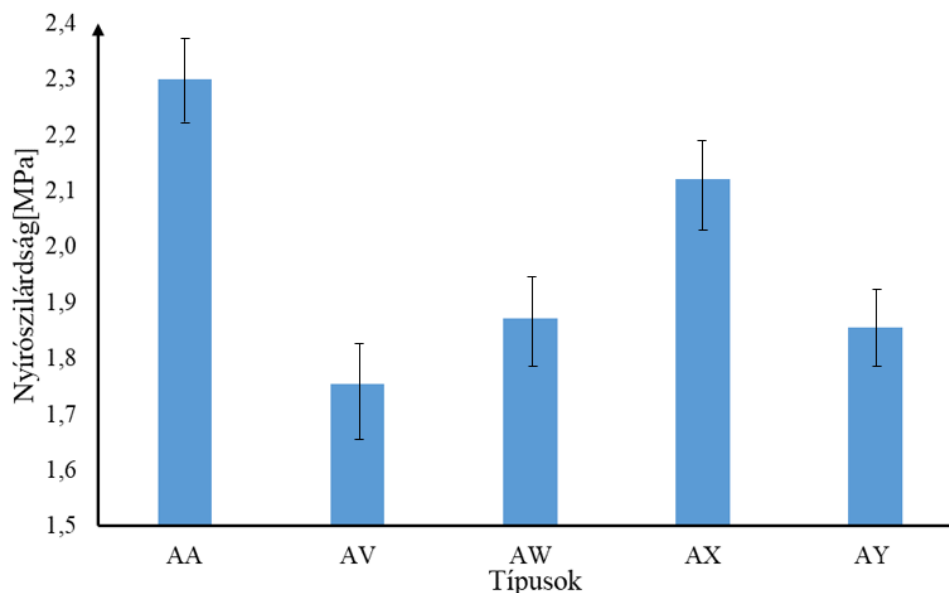
37. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek húzásának elmozdulása

A 13. táblázat, 38. ábra és 39. ábra a lézersugaras felületmódosított felületek nyírószilárdsági eredményeit mutatják be

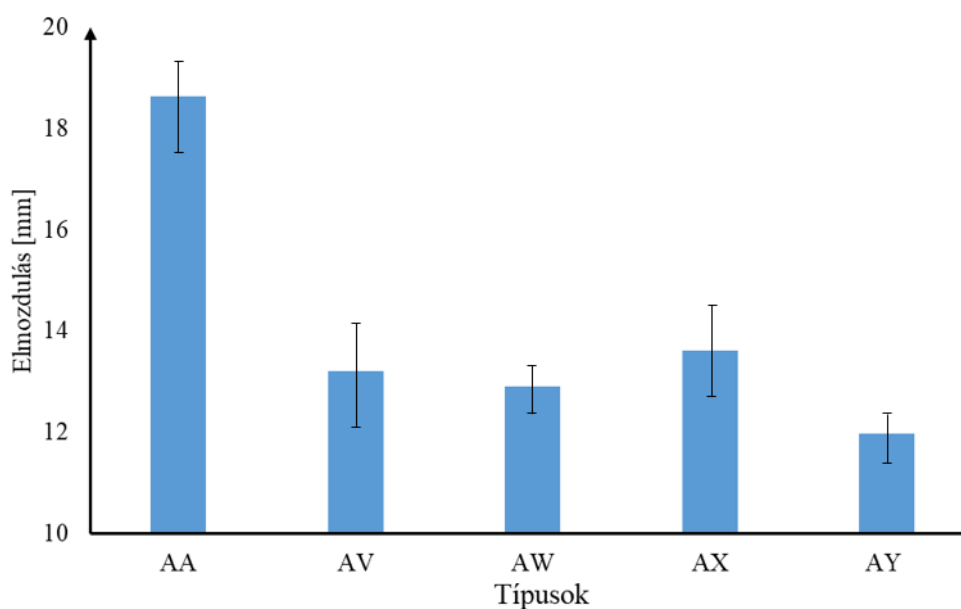
13. táblázat: AV-től AY-ig a nyírási vizsgálatok eredménye

	AA	AV	AW	AX	AY
Átlag erő [N]	611,5	548	585	663	580
Átlag elmozdulás [mm]	18,63	13,204	12,911	13,606	11,98
Nyírószilárdság [MPa]	2,3	1,754	1,872	2,122	1,856

A 38. ábra és 39. ábra adatait tekintve a lézersugaras felületkezelte típusok közül az AX típus 0,2 MPa szilárdsággal marad el a kontroll mintához képest, a többi típus még ennél is nagyobb mértékben. A nyúlásértékeiket tekintve jóval kisebb nyúlást eredményezett az AV, AW, AX és AY típusok ragasztása.



38. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek nyírószilárdsága

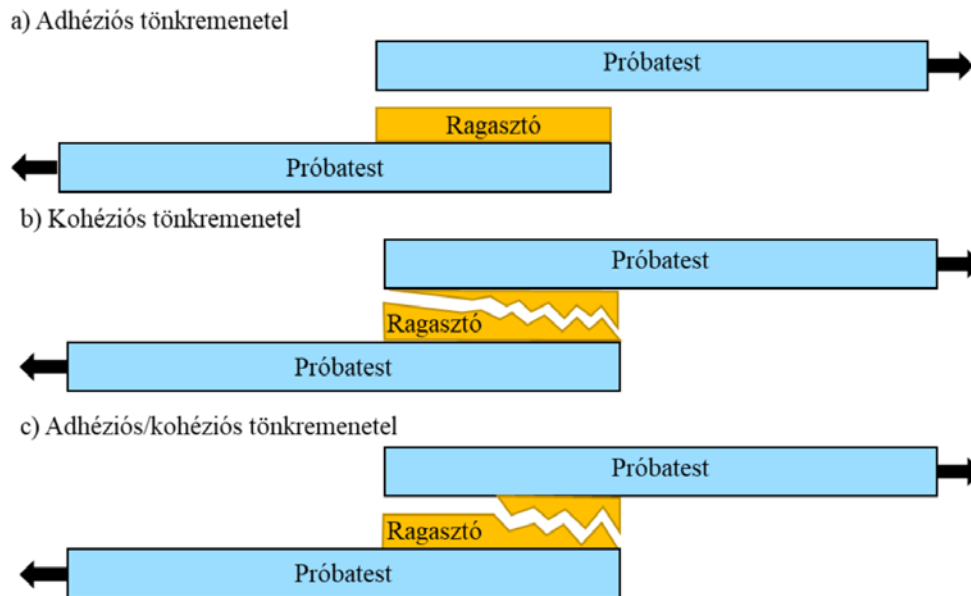


39. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek nyírásának elmozdulása

5.5. A tönkrement kötések makrovizsgálatának értékelése

A kötés környezeti vizsgálatai között sorolom az AB típustól AF típusig a térhálósodás vizsgálata különböző körülmények között. Az AG típustól az AN típusig a már két hétig térhálósodott mintákat vizsgáltam. Majd AQ típustól, AU típusig egyéb verziókat vizsgáltam.

A kötés tönkre mehet adhéziósan, kohéziósan, vagy a kettő kombinációjával (**40. ábra**) [22].



40. ábra: Példák a ragasztott kötések tönkremenetelére: a) adhézios, b) kohéziós, c) vegyes, adhézios és kohéziós[22]

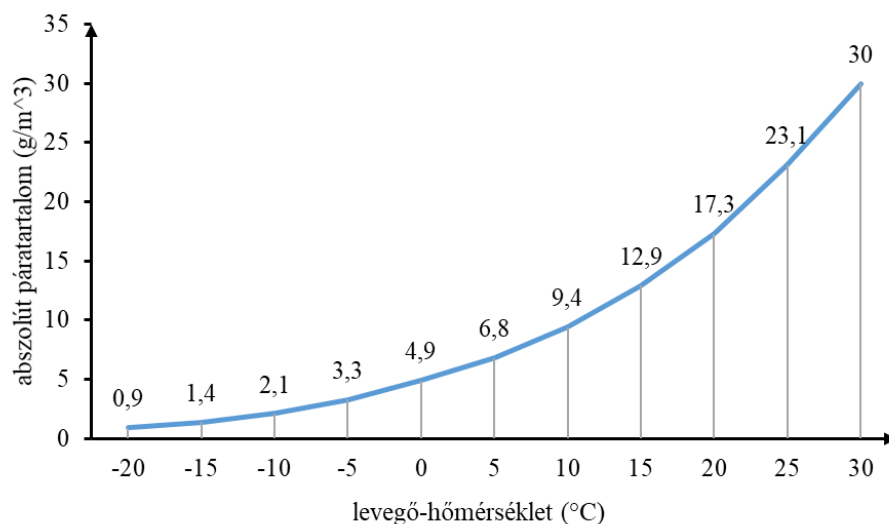
5.5.1. AB típus

Ezt a típust hűtőbe helyeztem ahol 0°C és 5°C környezetében, ezen a hőmérsékleten kis abszolút páratartalom mellett tároltam. A szilárdsági vizsgálatok alapján átlagosan 1,385 MPa húzószilárdság, ehhez tartozott 13,4 mm nyúlás, illetve 1,741 MPa nyírószilárdság, amelyhez tartozva 16,8 mm nyúlás jellemezte a mintákat. A 14. nap, amíg a hűtőben térhálósodott, nem bizonyult elegendőnek, a piros körrel jelölt részen el tudtam távolítani egy törléssel a ragasztót a vizsgálatot követően.



41. ábra: AB típusra jellemző tönkremenetel

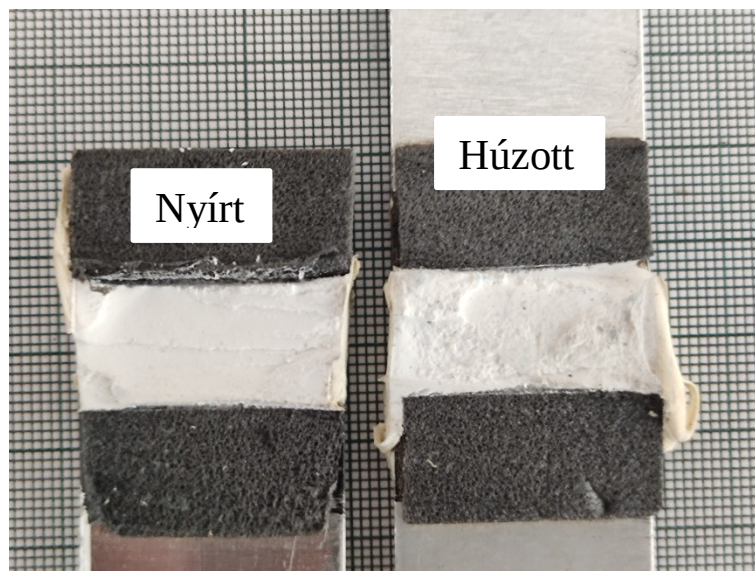
Ennek magyarázata látható a következő ábrán. A 42. ábra mutatja, hogy a hűtőben fellépő 5°C vagy annál alacsonyabb hőmérsékleten 5 g / m³ a levegő páratartalma. Ezért a relatív páratartalma magas.



42. ábra: Az abszolút páratartalom értéke a levegő hőmérsékletének függvényében [10]

5.5.2. AC típus

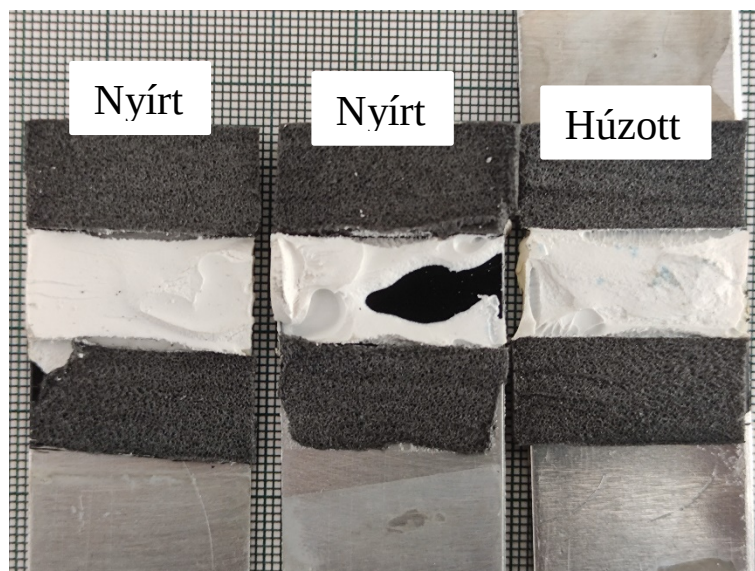
Az AC típus esetében környezeti körülményeknek a **18. ábra** mutatja be a szabadban létrejött minimális, maximális és átlagolt értékeket hőmérséklet, páratartalom és csapadékmennyiség esetében, ami jellemző volt. A 33. ábrán látható, hogy kohéziós tönkremenetel volt jellemző az AC típusú mintákra. A ragasztott kötés széle elszíneződött, ennek oka lehetett a levegő portartalma, amely piszkossá tette a mintát, vagy az ez idő alatt létrejött UV-sugárzás okozhatott.



43. ábra: AC típusra jellemző tönkremenetel

5.5.3. AD típus

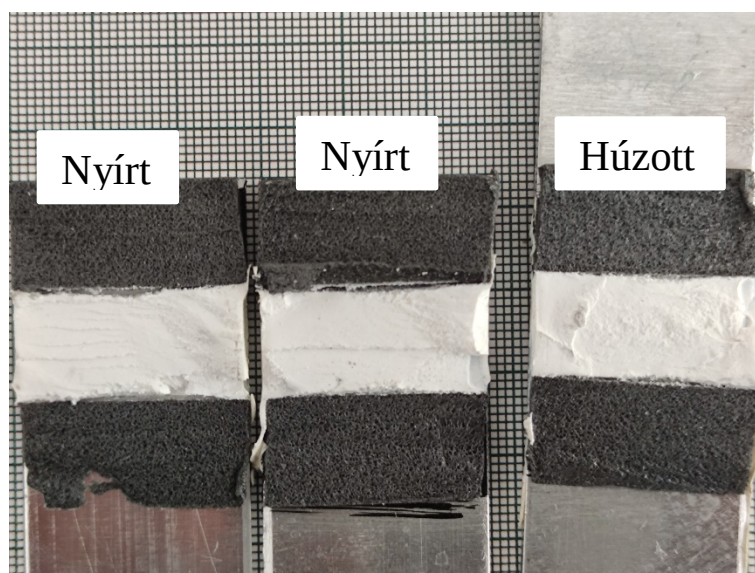
Ezt a típust a tálcán letakarva vízzel öntöttem körbe, és letakartam így igyekeztem növelni a mintákat érő páratartalmat a térhálósodás közben. Ennek hatására részben kohéziós, részben vegyes tönkremenetel jellemezte a mintákat (**44. ábra**).



44. ábra: AD típusra jellemző tönkremenetel

5.5.4. AE típus

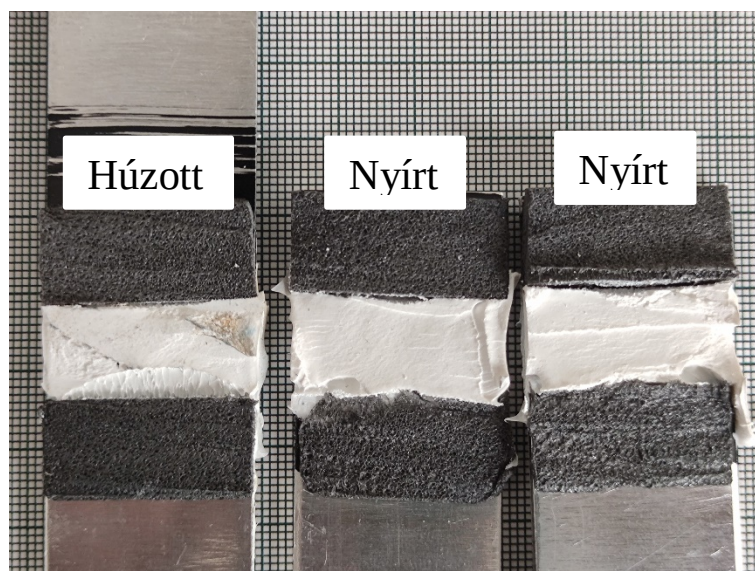
Ennél a típusnál az üvegházban fellépő hőmérséklet nagyobb szerepet játszhatott, mint a jelen lévő páratartalom ugyanis minden minta kohéziós tönkremenetelt szenvedett. (**45. ábra**)



45. ábra: AE típusra jellemző tönkremenetel

5.5.5. AF típus

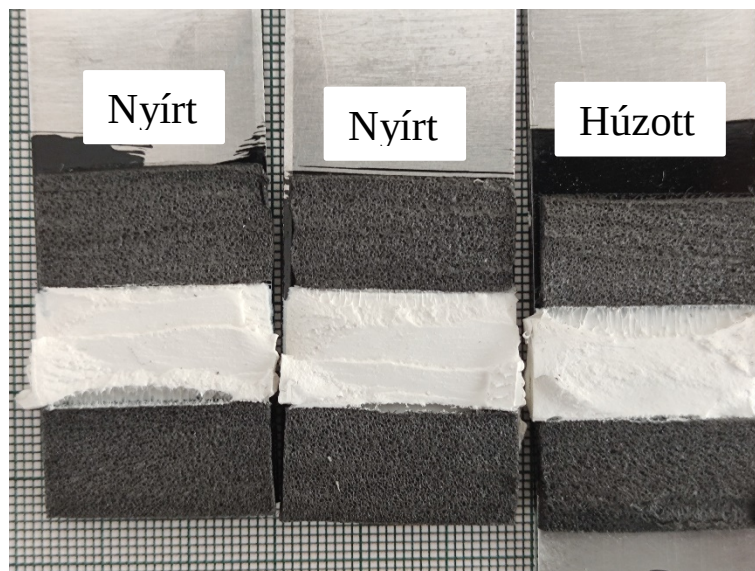
Lezárt dobozban térhálósodás hatására is kohéziós tönkremenetel látható a szilárdsági vizsgálat eredményeképp.



46. ábra: AF típusra jellemző tönkremenetel

5.5.6. AG típus

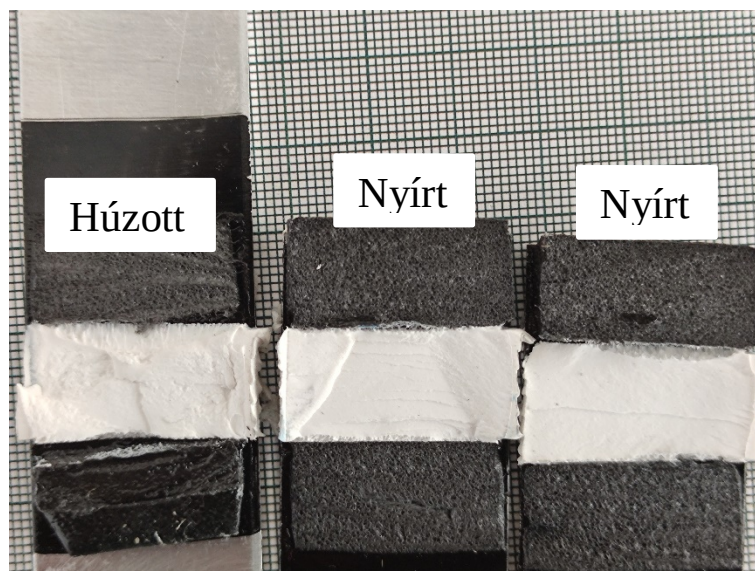
Az AG típus a hőmérséklet -35°C és 90°C közötti ingadozására a **47. ábra** mutatja tönkremenetel módját. A ragasztás tönkremenetele kohéziós volt, azonban jól látható, hogy a ragasztószalag mellett lévő részeken levegőbuborék keletkezhetett, vagy a ragasztó húzódtott összebb, ennyi terhelés hatására.



47. ábra: AG típus tönkremenetele

5.5.7. AH típus

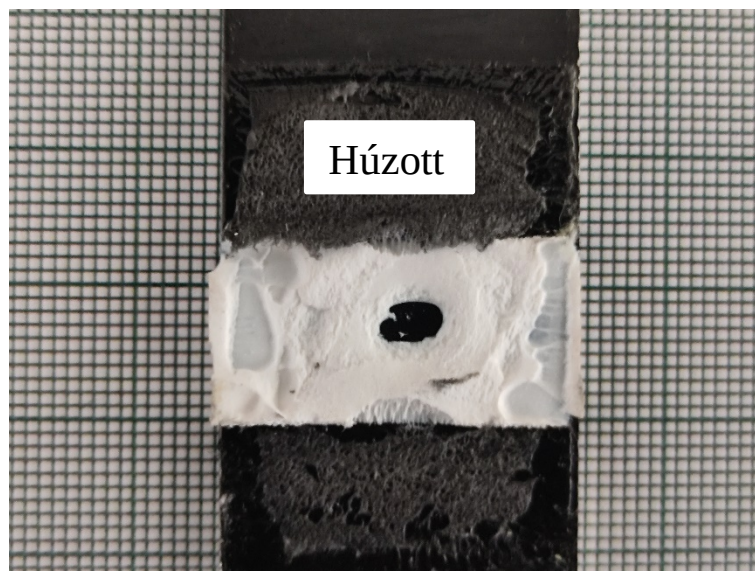
Az AH típus, az AG típussal megegyező módon azonban 50-es ismétlésre is látható a ragasztóanyag szélén lévő összehúzódás megjelenése.



48. ábra: AH típus jellemző tönkremenetele

5.5.8. AI típus

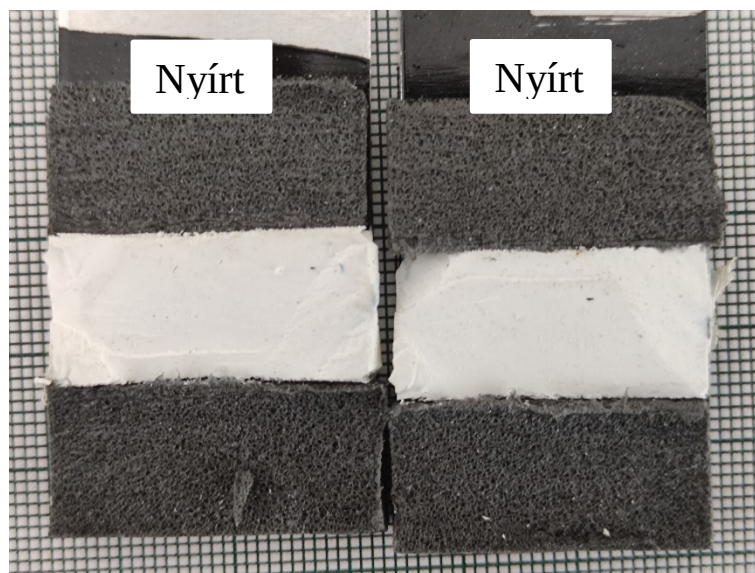
Az AI típus esetében 100-szoros hőmérséklet ingadozás hatására szintén jelen voltak a ragasztószalag melletti elhúzódnások, és a ragasztóanyagban buborékok megjelenése volt jellemző.



49. ábra: AI típusra jellemző tönkremenetel

5.5.9. AJ típus

Az AJ típus esetén a tönkremenetel képei alapján a két hét térhálósodás elegendőnek bizonyult ahhoz, hogy a ragasztóanyag megfelelően kialakítsa a kötés szerkezetét, azonban a szilárdsági vizsgálatok szerint kevesebb szilárdsága és rugalmassága maradt a ragasztónak az enyhén savas folyadékban tartva.

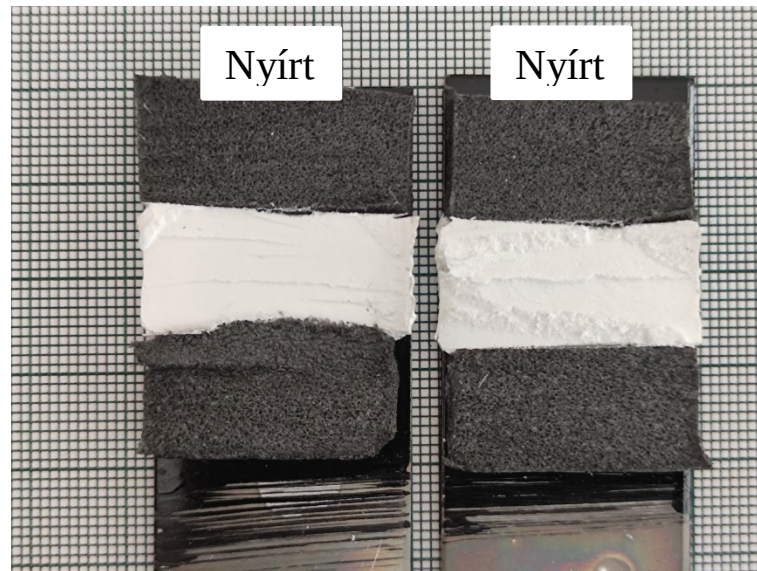


50. ábra: AJ típusra jellemző tönkremenetel

5.5.10. AK típus

Az AK típus esetében enyhén lúgos folyadékban tartva a mintákat is csak a lemez színeződött el. A mintákra jellemző tönkremenetelen nem volt nyoma a makrovizsgálatok

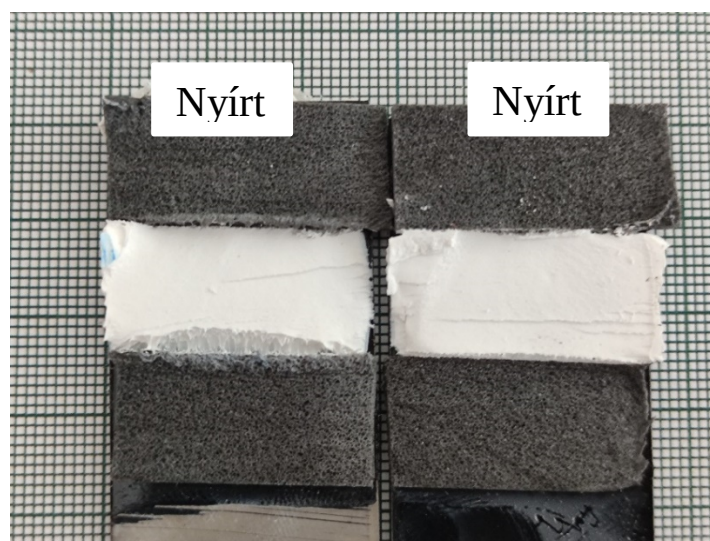
hatására bármilyen elváltozásnak. Ennek ellenére ebben az esetben is szilárdság és rugalmassági vizsgálatok közben kevésbé teljesített.



51. ábra: AK típusra jellemző tönkremenetel

5.5.11.AL típus

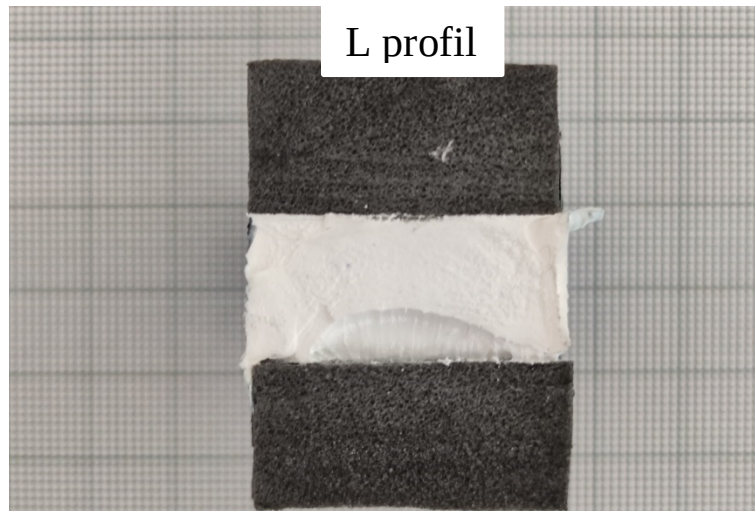
Az AL típus esővízben volt tartva, amelynek hatására a ragasztandó lemezek szintén elszíneződtek, a ragasztott minták fele teljesen kitöltötte a felületet, a többi pedig buborékos volt a ragasztószalag mentén. Ez lehetett az oka ennél a típusnál a szilárdsági és rugalmassági eredmények különbségének.



52. ábra: AL típusra jellemző tönkremenetel

5.5.12. AM típus

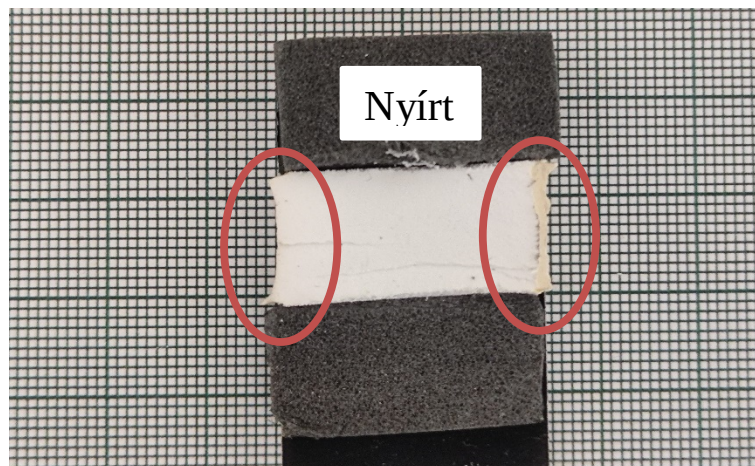
Az AM típusnál a csapvízben tartott mintáknál egy L profil elemen látható tönkremenetelt mutatok be. A tönkremenetel itt is kohéziós, és szintén az L profil oldalán is látható volt ez az oldalsó ragasztóanyag hiány. A húzott minták esetében ez nagy területeket vett el a ragasztó tapadási felületéből, ezért adódtak



53. ábra: AM típusra jellemző tönkremenetel

5.5.13. AN típus

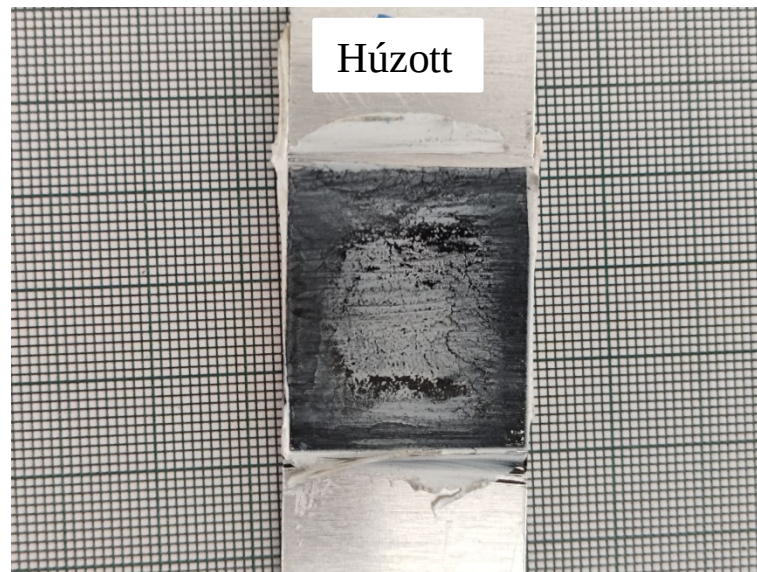
Az AN típus UV teszt során 454 órát töltött 50°C-on 0,8 W / m² sugárzásnak kitéve, ez Magyarországon 0,65 év sugárzási mennyiségének felel meg. A ragasztott minták szélén, a pirossal bekarikázva látható, ahogy a ragasztóanyag elszíneződött. A tönkremenetel kohéziósok voltak, azonban itt is észrevehető különbség volt. Húzószilárdsága nagyobb, mint az eredeti mintáé, nyírószilárdsága alacsonyabb. A nyúlási értékek mindkét szilárdsági vizsgálat esetén alacsonyabbak az eredeti AA típushoz képest.



54. ábra: AN típusra jellemző tönkremenetel

5.5.14.AQ típus

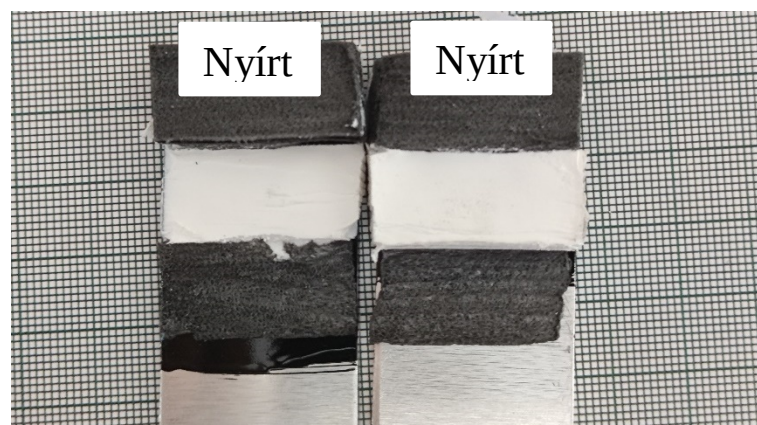
AQ típus esetén mivel 0 mm-es vastagságú ragasztásra törekedtem, így nagy szilárdsági eredményeket tudtam elérni. A vizsgálat vegyesen adhéziós és kohéziós tönkremenetelt eredményezett. A nyúlása pedig elenyésző mértékű volt.



55. ábra: AQ típusra jellemző tönkremenetel

5.5.15.AR típus

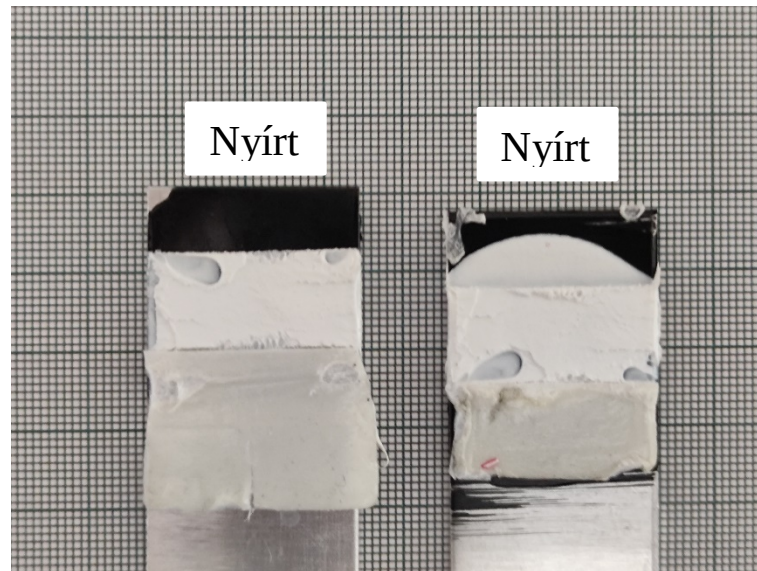
Az AR típusnál kettő darab 3 mm-es távtartó ragasztószalag egymásra helyezésével értem el 6 mm vastag ragasztást. A szilárdsági vizsgálatok során a mintákon kohéziós tönkremenetel történt. Húzás és nyírás esetén is kisebb szilárdsággal, és nagyobb nyúlással rendelkeztek a minták.



56. ábra: AR típusra jellemző tönkremenetel

5.5.16.AS típus

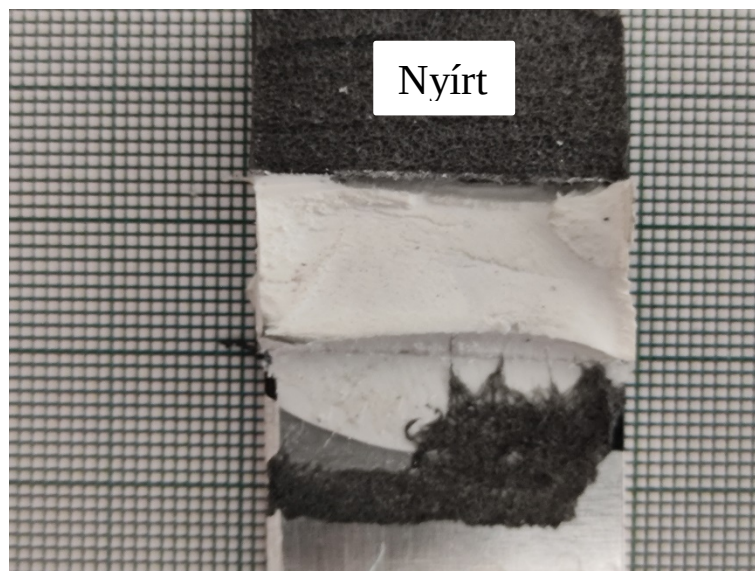
Az AS típus ragasztásához 1 mm-es távtartó szalagot alkalmaztam. A kötésekre jellemző tönkremenetel kohéziós volt, azonban buborékok jelentek meg a ragasztásban, ennek oka lehetett, a két ragasztandó felület közelsége miatt nem tudtak a benne képződő gázok megfelelőképp távozni. A ragasztások szilárdsága során nagyobb értékeket értem el nyírás és húzás esetén is, míg a nyúlás tekintetében kevesebb nyúlásra volt képes az 1 mm vastag ragasztás.



57. ábra: AS típusra jellemző tönkremenetel

5.5.17.AT típus

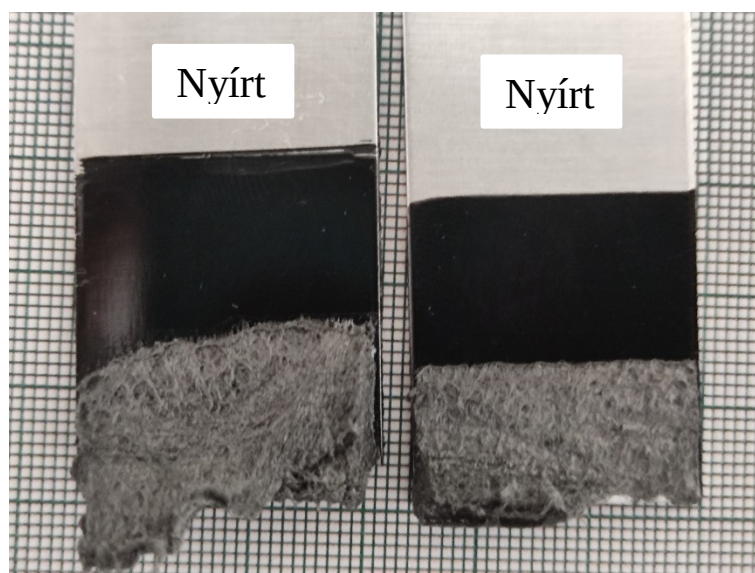
Az AT típus esetén közvetlenül a ragasztás előtt vizet juttattam a ragasztandó felületre. Vagyis a megszáradt primer felületére spricceltem ezáltal nem volt káros rozsdásodást elősegítő hatása a víz adagolásának a keletkező ragasztott kötéseknel. A szilárdsági vizsgálatok során kohéziós tönkremenetel jött létre, itt is tapasztalható volt a ragasztószalagtól a ragasztóanyag elválása. Ez a típus is az AA mintától alacsonyabb szilárdsági és nyúlási értékeket produkált a tesztek során.



58. ábra: AT típusra jellemző tönkremenetel

5.5.18.AU típus

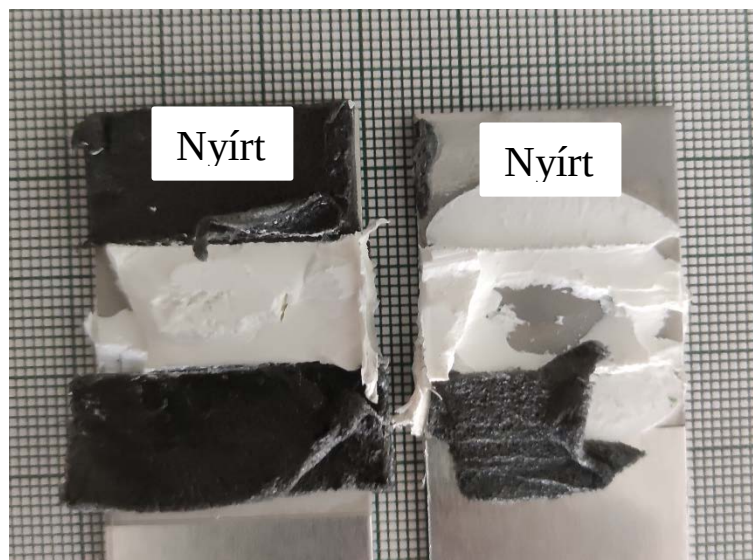
Az AU típus esetén csak a távtartó esetén vizsgáltam a szilárdsági és nyúlási értékeket, így megtudva, hogy mekkora szerepet játszik a távtartó terhelések elviselése közben.



59. ábra: AU típusra jellemző tönkremenetel

5.5.19.AV típus

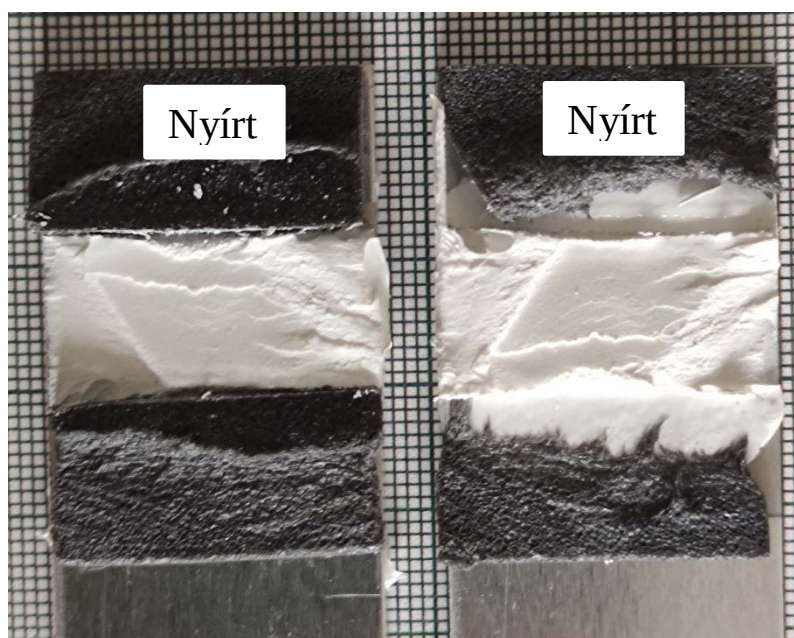
Az AV típus négyzethálós minta mentén felület kezelve vegyes tönkremenetel jellemezte a ragasztott mintákat. Ez látható az **60. ábra** is.



60. ábra: AV típusra jellemző tönkremenetel

5.5.20. AW típus

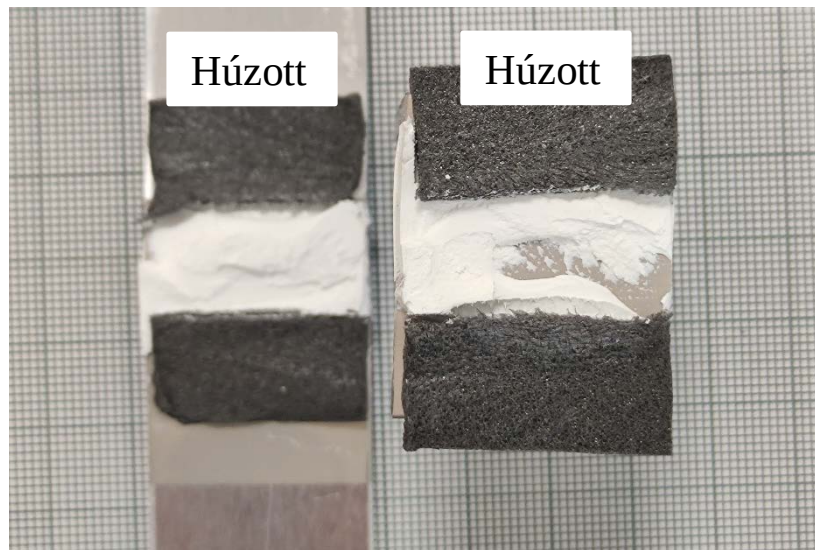
Az AW típusú mintáknál a teljes ragasztott felületen módosítást végeztem a lézersugarakkal, az adott paraméterekkel, amivel LIPSS (Laser-induced periodic surface structure) lézersugár indukálta ismétlődő felületi struktúrát alakítottam ki. Így az **61. ábra** mutatja, hogy kohéziós tönkremenetel jellemezte a ragasztott mintákat.



61. ábra: AW típusra jellemző tönkremenetel

5.5.21. AX típus

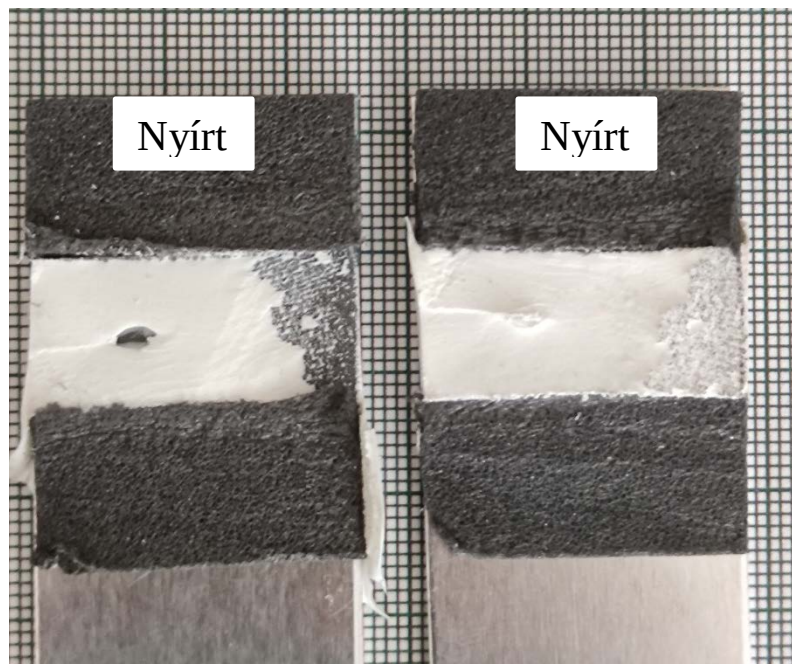
Az AX típusnál 100% teljesítményt alkalmaztam azonos $v=6,6 \text{ m/s}$ mozgatósi sebességgel. A nagyobb átlagteljesítmény hatására a mintákat vegyes tönkremenetel jellemezte.(62. ábra).



62. ábra: AX típusra jellemző tönkremenetel

5.5.22. AY típus

Az AY típusnál lelassítottam a lézersugár mozgási sebességét, az AX típushoz képest, így jól látható (63. ábra), hogy vegyes tönkremenetel volt megfigyelhető az elszakított kötéseken.



63. ábra: AY típusra jellemző tönkremenetel

6. KUTATÁSI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A kutatás során 322 ragasztott kötést készítettem el. Ezeket két hónapon keresztül tesztelve figyeltem meg rajtuk a környezeti körülmények hatásait. A mintákat légkondicionált laboratóriumi helységben ragasztottam és tároltam. A környezeti körülményeket minél széleskörűbb módszereket alkalmazva vizsgáltam.

A legnagyobb eredményemnek tartom azt, hogy sikerült 22 különböző kísérletben feltérképeznem, hogy hogyan viselkedik a poliuretánragasztó a különböző ragasztási körülmények között. Egy további ragasztott típusként vizsgáltam a ragasztáshoz használt távtartó ragasztószalag lehetséges mérési eredménytorzító hatását. A térhálósodás tekintetében a legjobb a labor körülmények közötti AA típus felelt meg leginkább. A nyúlás tekintetében ahol a 6 mm-es ragasztást alkalmaztam, ott értem el elegendő fejlődést nyúlásban. A környezeti terhelésnél jobban a ragasztót a páratartalom és a hőmérséklet . A hőkezelések is degradálták AG, AH, AI típusok, a folyadékok is ezt a tendenciát követték, amelyek közül az AM csapvízbe helyezett minták szolgáltak a legkisebb minőség megőrzéssel. Az UV hatására tesztelt minták 454 óra alatt tesztelve, a kötés szélén lévő degradáció hatására mutattak csekélyebb szilárdsági értékeket. A tönkremeneteli módok vizsgálatával igazoltam az irodalomkutatás során ismertetett tényezőt, a buborékképződést, aminek kialakulását el kell kerülni. A lézersugárral felületkezelt típusok közül a teljes felületen kezelt minták jobb eredményt mutattak. Az 30 W és 60 W átlagteljesítménnyel kezelt típusok közül pedig a 60 W eredményezte a nagyobb szilárdsági értékeket.

A jövőben szeretném ezeket az okokat részletezve, egy külön tényezőre összpontosítva is vizsgálni. Felmerültek további vizsgálati körülmények, amelyek során a kötéseket szeretném fárasztás alá vetni.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm szépen Palásti Ferencnek, és Hansághy Pálnak a környezeti tesztek végrehajtásához nyújtott segítségüket. Köszönöm a segítségét Tajti Ferencnek, a kötések és tesztek létrehozásához, lebonyolításához.

Köszönöm Dr. Berczeli Miklósnak, aki végig támogatott a kutatásban, és a vizsgálati folyamatok létrehozásában.

Továbbá köszönöm a családomnak, akik mindig támogattak a tanulmányaimban.

Szeretném megköszönni számomra a legfontosabb személynek, a szerelmemnek, Pécsi Eszternek, akinek a támogatása rendkívül sokat segített diplomamunkám létrehozásában.

8. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Alumínium gyártásának eloszlása 2021-ben [1]	5
2. ábra: Strukturális ragasztók összehasonlítása [2]	8
3. ábra: A szilárdság-megnyúlás összehasonlítása kétkomponensű strukturális ragasztók alkalmazása esetén [2]	9
4. ábra: Wöhler görbe egykomponensű PUR ragasztó [2]	10
5. ábra: Több Wöhler görbe összehasonlítása különböző típusú ragasztók esetén [2].....	10
6. ábra: Nagy szilárdságú kétkomponensű PUR ragasztó Wöhler görbéje [2]	11
7. ábra: DMTA mérés nagy szilárdságú kétkomponensű PUR esetén, G' ____ (storage modulus) G'' ---- (loss modulus); , $\tan \delta$ görbe [2].....	12
8. ábra: DMTA mérés magas modulusú 1 komponensű PUR ragasztó esetén, G' ____ (storage modulus) G'' ---- (loss modulus); , $\tan \delta$ görbe [2]	13
9. ábra: Ragasztók környezeti körülményeinek vizsgálata [11].....	15
10. ábra: Különböző poliuretán technológiák szilárdságának felépülése a térhálósodás idejének függvényében [2]	17
11. ábra: A vízbemerítések hatására a poliuretánragasztó szilárdsági és megnyúlási változása [3].....	18
12. ábra: Az adhéziós energia változása a környezeti hatás idejének függvényében [4]	19
13. ábra: A szakítószilárdsági eredmények öregített és öregítés nélküli mintákon. A piros szaggatott vonal a szükséges minimum 0.25 MPa terhelést jelöli. (EP =epoxi; PU = poliuretán; PSX = polisziloxán) [5].....	20
14. ábra: A PU ragasztott kötések erő-elmozdulás ábrázolása MM: mahagóni-mahagóni, PP: fenyő-fenyő, Lc: labor kondíció, Cc: öregített kondíció [6]	20
15. ábra: A nyírási szilárdság eredményeinek változása [7]	21
16. ábra: A Sikaflex®-252 térhálósodási sebessége [8]	23
17. ábra: Az időjárési körülmények 2022 júliusában Kecskeméten [9].....	26
18. ábra: Az időjárési körülmények 2022 augusztusában Kecskeméten [9]	27
19. ábra: Coherent Monaco 1035-80-60 impulzus lézer	27
20. ábra: A nyírószilárdság méréséhez kialakított kötéselrendezés	28
21. ábra: A húzószilárdság méréséhez kialakított kötéselrendezés	28
22. ábra: Nyírószilárdsági vizsgálat elrendezése	29
23. ábra: Húzószilárdsági vizsgálat elrendezése	29
24. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták húzószilárdsága	31
25. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták húzásának elmozdulása.....	32
26. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták nyírószilárdsága	33
27. ábra: A térhálósodás közben terhelt minták nyírásának elmozdulása	33
28. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták húzószilárdsága.....	34
29. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták húzásának elmozdulása.....	35
30. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták nyírószilárdsága	36
31. ábra: A két hét térhálósodás után terhelt minták nyírásának elmozdulása.....	36
32. ábra: Egyéb típusú minták húzószilárdsága	37
33. ábra: Egyéb típusú minták húzásának elmozdulása	38
34. ábra: Egyéb típusú minták nyírószilárdsága.....	38
35. ábra: Egyéb típusú minták nyírásának elmozdulása.....	39
36. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek húzószilárdsága.....	40
37. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek húzásának elmozdulása.....	41
38. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek nyírószilárdsága	42
39. ábra: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek nyírásának elmozdulása	42

40. ábra: Példák a ragasztott kötések tönkremenetelére: a) adhézíós, b) kohéziós, c) vegyes, adhézíós és kohéziós[22]	43
41. ábra: AB típusra jellemző tönkremenetel	43
42. ábra: Az abszolút páratartalom értéke a levegő hőmérsékletének függvényében [10] .	44
43. ábra: AC típusra jellemző tönkremenetel	45
44. ábra: AD típusra jellemző tönkremenetel	45
45. ábra: AE típusra jellemző tönkremenetel	46
46. ábra: AF típusra jellemző tönkremenetel	46
47. ábra: AG típus tönkremenetele	47
48. ábra: AH típus jellemző tönkremenetele	47
49. ábra: AI típusra jellemző tönkremenetel	48
50. ábra: AJ típusra jellemző tönkremenetel	48
51. ábra: AK típusra jellemző tönkremenetel	49
52. ábra: AL típusra jellemző tönkremenetel	49
53. ábra: AM típusra jellemző tönkremenetel	50
54. ábra: AN típusra jellemző tönkremenetel	50
55. ábra: AQ típusra jellemző tönkremenetel	51
56. ábra: AR típusra jellemző tönkremenetel	51
57. ábra: AS típusra jellemző tönkremenetel	52
58. ábra: AT típusra jellemző tönkremenetel	53
59. ábra: AU típusra jellemző tönkremenetel	53
60. ábra: AV típusra jellemző tönkremenetel	54
61. ábra: AW típusra jellemző tönkremenetel	54
62. ábra: AX típusra jellemző tönkremenetel	55
63. ábra: AY típusra jellemző tönkremenetel	55

9. TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: A távtartó tesztelése	30
2. táblázat: Térhálósodás környezeti körülmények típusai.....	30
3. táblázat: AB-től AF-ig húzás vizsgálata.....	31
4. táblázat: AB-től AF -ig nyírás vizsgálata	32
5. táblázat A kötés két hét térhálósodása után végzett környezeti tesztek típusai.....	34
6. táblázat AG-től AN-ig húzás vizsgálata	34
7. táblázat: AG-től AN-ig húzás vizsgálata	35
8. táblázat: Egyéb típusok vizsgálatának típusai	37
9. táblázat: AQ-től AU-ig húzás vizsgálata.....	37
10. táblázat: AQ-től AU-ig nyírás vizsgálata.....	38
11. táblázat: Lézersugárral végzett felületmódosító tesztek típusai	39
12. táblázat: AV-től AY-ig a húzási vizsgálatok eredménye	40
13. táblázat: AV-től AY-ig a nyírási vizsgálatok eredménye.....	41

10. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Elektronikus forrás:
<https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>, (n.d.).
Megtekintés dátuma: 2022.10.01.
- [2] B. Burchardt, Advances in polyurethane structural adhesives, *Advances in Structural Adhesive Bonding*. (2010) 35–65. <https://doi.org/10.1533/9781845698058.1.35>.
- [3] S. Kotanen, M. Poikelispää, A. Efimov, T. Harjunalanen, C. Mills, T. Laaksonen, E. Sarlin, Hydrolytic stability of polyurethane/polyhydroxyurethane hybrid adhesives, *Int J Adhes Adhes*. 110 (2021) 102950.
<https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.102950>.
- [4] S.E. Julien, J.H. Kim, Y. Lyu, D.C. Miller, X. Gu, K. tak Wan, Cohesive and adhesive degradation in PET-based photovoltaic backsheets subjected to ultraviolet accelerated weathering, *Solar Energy*. 224 (2021) 637–649.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.04.065>.
- [5] A.W. Momber, L. Fröck, T. Marquardt, Effects of accelerated ageing on the mechanical properties of adhesive joints between stainless steel and polymeric top coat materials for marine applications, *Int J Adhes Adhes*. 103 (2020) 102699.
<https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2020.102699>.
- [6] F. Marchione, P. Munafò, Effect of thermal aging on the mechanical performance of timber-timber single-lap adhesive joints, *Int J Adhes Adhes*. 108 (2021) 102883.
<https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.102883>.
- [7] Z. Jia, G. Yuan, X. Feng, Y. Zou, J. Yu, Shear properties of polyurethane ductile adhesive at low temperatures under high strain rate conditions, *Compos B Eng*. 156 (2019) 292–302. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.08.060>.
- [8] Elektronikus forrás:
https://industry.sika.com/content/dam/dms/hucon/8/sikaflex_-252.pdf Megtekintés dátuma: 2022.10.12.
- [9] Elektronikus forrás:
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IKECSK3>, (n.d.). Megtekintés dátuma: 2022.10.20.
- [10] Elektronikus forrás:
<https://hu.trotec.com/termek-es-szolgaltatasok/gepek-homecomfort/paratlanitas/gyakorlati-ismeretek-a-paratlanitokrol/alapismeretek-a-paratartalomrol/> Megtekintés dátuma: 2022.10.28.
- [11] Elektronikus forrás:
<https://www.adhesivesmag.com/articles/99287-testing-adhesives-for-weathering> Megtekintés dátuma: 2022.11.03.
- [12] Kothe, C., Wünsch, J., & Weller, B. (2022). Discoloration of transparent adhesives for building applications due to aging under solar exposure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 116, 103137.
<https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2022.103137>
- [13] Fevery, S., Latré, S. K., Vandepitte, D., Debruyne, S., & Hallez, H. (2021). Combination and interaction of ageing parameters on single lap shear adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 111, 102978.
<https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.102978>
- [14] Burchardt, B. R., & Merz, P. W. (2006). Elastic Bonding and Sealing in Industry. *Handbook of Adhesives and Sealants*, 2, 355–xlii. [https://doi.org/10.1016/S1874-5695\(06\)80017-5](https://doi.org/10.1016/S1874-5695(06)80017-5)

- [15] Giese-Hinz, J., Kothe, C., Louter, C., & Weller, B. (2022). Mechanical and chemical analysis of structural silicone adhesives with the influence of artificial aging. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 117, 103019. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.103019>
- [16] Bhagavathi, L. R., Deshpande, A. P., Ram, G. D. J., & Panigrahi, S. K. (2021). Effect of cellulosic fillers addition on curing and adhesion strength of moisture-curing one-component polyurethane adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 108, 102871. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.102871>
- [17] Clerc, G., Brülisauer, M., Affolter, S., Volkmer, T., Pichelin, F., & Niemz, P. (2017). Characterization of the ageing process of one-component polyurethane moisture curing wood adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72, 130–138. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2016.09.008>
- [18] Boutar, Y., Naïmi, S., Mezlini, S., Carbas, R. J. C., da Silva, L. F. M., & ben Sik Ali, M. (2018). Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 143–152. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2018.02.012>
- [19] Huang, S., Yan, L., Bachtar, E. V., & Kasal, B. (2022). Durability of epoxy and polyurethane bonded timber-hybrid FRP joints under hygrothermal and weathering conditions. *Journal of Building Engineering*, 58, 104989. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104989>
- [20] Tenorio-Alfonso, A., Sánchez, M. C., & Franco, J. M. (2021). Impact of moisture curing conditions on the chemical structure and rheological and ultimate adhesion properties of polyurethane adhesives based on castor oil and cellulose acetate. *Progress in Organic Coatings*, 161, 106547. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2021.106547>
- [21] Bhagavathi, L. R., Deshpande, A. P., Janaki Ram, G. D., & Panigrahi, S. K. (2021). Hygrothermal aging, fatigue and dynamic mechanical behavior of cellulosic particles reinforced one-component moisture curable polyurethane adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 105, 102771. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2020.102771>
- [22] Berczeli Miklós (2022). Járműipari kötések fejlesztése felületkezelési eljárásokkal. Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar*, Budapest.
- [23] Mayer, P., Dmitruk, A., & Kaczmar, J. W. (2021). Adhesion of functional layers based on epoxy and polyurethane resins for aluminum substrate. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 109, 102899. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.102899>
- [24] Xu, X., Yuan, Y., Jin, S., Han, Z., Liang, C., & Zhu, H. (2022). Study on polyurethane elastomer modification for improving low-temperature resistance of high-capacity polyurethane elastomeric bearing for bridges. *Construction and Building Materials*, 347, 128625. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128625>
- [25] Majidi, R., Keramatinia, M., Ramezanzadeh, B., & Ramezanzadeh, M. (2023). Weathering resistance (UV-shielding) improvement of a polyurethane automotive clear-coating applying metal-organic framework (MOF) modified GO nano-flakes (GO-ZIF-7). *Polymer Degradation and Stability*, 207, 110211. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2022.110211>

- [26] Chaudhuri, H., & Karak, N. (2020). Water dispersed bio-derived transparent polyurethane: Synthesis, properties including chemical resistance, UV-aging, and biodegradability. *Progress in Organic Coatings*, 146, 105730. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2020.105730>
- [27] Dong, F., Maganty, S., Meschter, S. J., & Cho, J. (2018). Effects of curing conditions on structural evolution and mechanical properties of UV-curable polyurethane acrylate coatings. *Progress in Organic Coatings*, 114, 58–67. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2017.09.018>
- [28] Momber, A. W., Fröck, L., & Marquardt, T. (2021). Effects of adhesive type on the mechanical properties of adhesive joints between polyurethane top coats and polyurethane-based adhesives after accelerated atmospheric ageing. *Marine Structures*, 79, 103022. <https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2021.103022>
- [29] Cai, G., Wang, H., Jiang, D., & Dong, Z. (2018). Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part I: Corrosion resistance and morphology. *Progress in Organic Coatings*, 123, 337–349. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2018.07.025>
- [30] Sousa, J. M., Correia, J. R., & Cabral-Fonseca, S. (2018). Some permanent effects of hygrothermal and outdoor ageing on a structural polyurethane adhesive used in civil engineering applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 406–419. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2018.04.010>