

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

# **Járműipari kötések fejlesztése felületkezelési eljárásokkal**

*című Ph.D. értekezés tézislevele*

Szerző:

**Berczeli Miklós**

okleveles járműmérnök

Témavezető:

**Dr. Weltsch Zoltán**

egyetemi docens

Budapest

2022

## 1. BEVEZETÉS

A járműiparban is megjelenik a járművek környezetbarát kialakítása, a fogyasztás és így a szennyezőanyag-kibocsátás redukálása [1–3]. Ennek elérése érdekében az egyik legkézzelfoghatóbb eredmény a járművek könnyűépítésével érhető el. Amennyiben csökkentünk a járművek önsúlyán azzal jelentősen csökken a meghajtáshoz szükséges energiaigény, tüzelőanyag fogyasztás és ezek által a károsanyag-kibocsátás is [1,3]. A megvalósításnak egyik megfelelő módja lehet, ha a lehetséges alkalmazási területeken növeltszilárdságú acélokat és modern polimer anyagokat alkalmazunk [4–7]. Azonban a különböző tulajdonságokkal rendelkező elemek közötti kötéskialakítás még problémákat okoz és kihívások elé állítja a járműgyártókat [8–12].

Véleményem szerint egy olyan kötéstechnológia módszerre célszerű koncentrálni a fejlesztések során, mely egyszerre alkalmazható minden anyagfajtán anélkül, hogy növelné a tömeget. Egy ilyen időszerű és gazdaságos módja a különböző anyagok nem oldható kötésének a ragasztás [13–18]. A ragasztott kötések szilárdságát döntően két erőtípus adja: 1) a ragasztó és az alapanyagok összetartása, kohéziója, illetve 2) a ragasztandó anyag és a ragasztó határfelületén fellépő erőhatások együttese, az adhézió. Jól ragasztott kötésben az adhéziós erők legalább olyan nagyok, mint a kohéziós erők [19]. Ezeket azonban befolyásolja napjaink ragasztástechnológiájának kihívása, a ragasztandó felületek nedvesítési jellemzői. A szilárdsága visszavezethető arra, hogy milyen kapcsolatot létesít a kötőanyag az összekötendő alapanyagok felületén [20–22]. Minél nagyobb a felületi energiája a vizsgált anyagunknak, annál nagyobb lesz a felületen alkalmazott adhéziós technológia szilárdsága. A modern járműiparban használt alapanyagok az esetek többségében rossz nedvesítési jellemzőkkel rendelkeznek. Ezek alapállapotban történő kötése szilárdsági korlátokhoz és akadályokhoz vezetne. Megfelelő előkészítési, felületkezelési eljárást alkalmazva ellenben számunkra kedvező módon tudjuk befolyásolni a nedvesítési értékeket [23–25].

A nagy energiasűrűségű sugaras felületkezelések mint például a plazma- és lézersugaras megfelelő megoldást jelenthetnek a felületek kötés szempontjából történő optimalizálására. Ezek jelentik napjaink legkorszerűbb felületkezelési módszereit a járműipari számára, de eddig kevesen foglalkoztak velük. Dolgozatomban ezért a nagy energiasűrűségű felületkezelési eljárások felhasználásával szeretném különböző anyag típusokon a járműipari ragasztástechnológia nyírószilárdságának megtöbbszörözését.

## 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A járműiparban az alapanyagfelhasználási tendenciák a modern növeltszilárdságú acélok és nagy ütésállóságú polimerek irányába tolódnak, azonban az alapanyagok fejlesztése mellett párhuzamosan az anyagok kötési minőségén is kell fejleszteni. Egyik ilyen feltörekvő kötési módszer a ragasztás. A ragasztástechnológia fejlesztése érdekében a felületi adhézió növelése a cél a különböző alapanyagokon, amit a határfelületek módosításával lehet elérni. A felületi feszültséghez szorosan kapcsolódik a nedvesítés fogalma, amely a határfelület változására utal. A legelterjedtebb és széleskörben alkalmazott felületi energia számítási elmélet a Fowkes módszere [26–29]. A nedvesítési peremszögméréssel majd Fowkes felületi energia számításával már meghatározható egy anyag nedvesítési tulajdonsága. Azonban elvárás, hogy ezt változtatni is lehessen. Erre nyújthatnak megoldást a különböző felületkezelési módszereket. Két olyan, tendenciájában feltörekvő technológia van, aminek ilyenfajta nedvesítésjavító felületmódosító alkalmazása nem terjedt még el, de nagy lehetőség van benne, kiemelkednek a hagyományos mechanikai-kémiai felületkezelésekből, ilyen a plazma- és lézersugaras felületkezelés.

Vesel és társai PMMA poli (metil-metakrilát) polimeren alkalmaztak oxigén plazmakezelést és így érték el, hogy a nedvesítési peremszög a kezeletlen  $83^\circ$ -ról  $42^\circ$ -ra csökkent [30]. Hsu és csapata szintén PMMA-n hajtott végre légköri nyomású plazmasugaras felületkezelést és javították a felület nedvesítését  $30^\circ$ -ra, majd az így tisztított és javított felületet használták fel további mérésekhez. Az eredményekből arra következtettek, hogy a felületaktiválás hatásidőtartama exponenciális ütemben csökken az idő múlásával [31].

Hasonló kutatásban Kehrer és társai PP polimer felületén hajtottak végre tiszta oxigén és nitrogén plazma felületaktiválást, azonban PP-n a felület határozottan megégett, erős esztétikai elváltozás történt a tesztelt paraméter ablakban, azonban a ragasztott kötés nyírószilárdsága 31 MPa-ról csak 39 MPa-ra nőtt [32].

Fémeken való plazmasugaras felülettisztítást alkalmazott Rodríguez-Villanueva és csapata hagyományos acélon. A kísérlet során szándékosan vittek fel a felületre adott térfogatnyi olajat és plazmasugárral tesztelték annak tisztítását és így a ragasztásra gyakorolt hatását. A tesztelt technológiai adatok között volt a plazmasugaras kezelés kontaktideje állandó távolság mellett. A plazmagép egy nitrogén gázt felhasználó plazmarendszer volt. Ezzel a felülettisztítással és kezeléssel a szilikon alapú ragasztóanyag kötéseinek nyírószilárdsága 1,9 MPa-ról 2,3 MPa-ra nőtt. Észrevehető, hogy a polimerekhez képest a fémek plazmasugaras felületkezelése kevésbé hatékony [33].

Innovatív alkalmazási területe az ultrarövid lézersugarasimpulzusos felületkezeléseknek azok nedvesítésjavító alkalmazása. Giorano és társai ps-os impulzusok segítségével tanulmányozták a titán és a lágyacélok nedvesíthetőségi jellemzőit, a ps-os lézerek közül több különbözőt teszteltek, ahol csak részben értek el nedvesítés javítást [34]. Zhao és társai impulzusos Nd:YAG lézert alkalmaztak a réz nedvesítési tulajdonságainak javítására. Eredményeikben a réz felületi energiája 55 mN/m-re javult a lézersugaras kezelés által, 1500 W és 2000 W átlagteljesítményen. Legjobb esetben a nedvesítési peremszög 42°-ról 31°-ra csökkent a 2000 W-os lézerral kezelt felületen [35]. Réz felületén Hlinka József kísérletezett Nd:YAG lézerral, ahol nedvesítésváltoztató hatást ért el lágyforrasztott kötések vizsgálata során [36]. Demir és társai AZ31 magnézium ötvözet vízzel szemben való nedvesíthetőségét tanulmányozta, arra a következtetésre jutottak, hogy a lézersugaras felületkezelés által, az oxidált felület méretének növelése lehetővé teszi a nedvesítési peremszög csökkenését [34].

Több szerző, mint Ngo és Chun kutatásaikban javasoltak egy módszert, mely során fémek alacsony hőmérsékletű lágyítása során hidrofób felületek keletkeztek [37]. Ezt Kietzig és társai is tapasztalták, akik azt állapították meg, hogy a hidrofób nedvesítési állapot létrejötte a szén molekulacsoportok megváltoztatásával függ össze, a CO<sub>2</sub> szobahőmérsékleten történő lassú bomlása miatt [38]. Bizi-Bandoki és társai azt állították, hogy a nedvesíthetőség javítása az új funkcionális molekulacsoportok megjelenésével magyarázható. Így a különböző hőbehatások a felületre nedvesítésjavító hatást értek el a felületi molekulacsoportok hőbehatás útján létrehozott változása által [39].

Y. Boutar cikkükben leírt eredmények alapján belátható, hogy ragasztási technológia során szoros a kapcsolat a nedvesedési peremszög, a ragasztó nyírószilárdsága és a felületi érdesség között. A nedvesedési peremszög és a nyírószilárdság között fordított arányosság van, míg az érdesség és a nyírószilárdság között parabolikus az összefüggés. Esetükben 75°-ról sikerült csökkenteni a nedvesítési peremszöget 62°-ra, mellyel a ragasztott kötés nyírószilárdságát 2,9 MPa-ról 3,5 MPa-ra növelték. A 13°-os peremszög csökkenés kismértékű szilárdságnövekedést eredményezett, azonban már ez is szignifikáns változást jelent [40].

Giovanna társaival, szállézerrel kezeltek DP500-as növelt szilárdságú és AISI 304 korrózióálló acélt. Céljuk a nedvesedés javítása volt, mellyel a ragasztás nyírószilárdságának a javulását érték el. Eredményeikben a kezeletlen 50°-os nedvesítési peremszöggel rendelkező alapanyagot sikerült csökkenteniük 10°-osra, továbbá a nedvesítés javulásával ők a felületi érdesség intenzív romlását tapasztalták [41].

### 3. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

A határfelületi jelenségek megváltoztatása hatással van a kötéstechológiák eredményességére, (várható nyírószilárdság növekedés) ugyanakkor a különböző felületkezelések hatása a határfelületi energiára nem kellő mélységben kidolgozott. Az új sugártechnológiák fejlődése új típusú megközelítéseket tesz lehetővé a felület energiák megváltoztatására, ami hatással van a felület nedvesítőképességére, ami kihatással van a kötési szilárdságra. A sugártechnológia eljárások felületi energiára vonatkozó ismeretei kevésbé vizsgáltak, és ezért a nedvesítési tulajdonságok és kötésszilárdságok tekintetében az összefüggésekre alig van utalás. A plazma- és lézersugaras eljárások a felületkezelési eljárások elterjedését jelentősen segítheti, ha szisztematikus kutatásokkal igazolni tudjuk, hogy a kezelések hatásmechanizmusai a felületi energiák megváltoztatásán keresztül jelentősen befolyásolják az adhéziós kötések szilárdsági tulajdonságait. Amelyek viszont a gyakorlati felhasználás elterjedésében alapvető fontosságúak. Az irodalomkutatás eredményeiből megállapítható, hogy a korszerű járműszerkezeteknél kiemelt fontosságú anyagokká váltak a növeltszilárdságú acélok, és a nagy ütésállóságú polisztirolok. Ezeken az anyagokon tervezem a hidegplazma- és lézersugaras eljárások vizsgálatát, hogyan változik a felületi energia, ennek mi lesz a hatása a nedvesítő képességre és következményként a ragasztott kötések nyírószilárdságára.

Ennek megfelelően a kutatás tárgya:

1. A plazma- és lézersugaras felületkezelési eljárás összehasonlítása, hatásmechanizmusuk alapján, a felületi energiák szempontjából. Azzal a céllal, hogy meghatározzuk azon technológiai adategyütteseket, amelyek lehetővé teszik az optimalizálás előkészítését.

2. Nagy ütésállóságú polisztirolon szükséges annak a meghatározása, hogy a hideg plazmasugaras technológiai adatok hogyan hatnak a nedvesítési tulajdonságokra és azok, hogyan befolyásolják a ragasztott kötések nyírószilárdságát, ami alapján optimalizálható a technológiai adatok beállítása.

3. DP600 növeltszilárdságú acélon szükséges annak a meghatározása, hogy a hidegplazma- és a lézersugaras technológiai adatok hogyan hatnak a felületi topográfiájára és a nedvesítési tulajdonságokra, ami alapján optimalizálható a technológiai adatok beállítása és, hogy azok, hogyan befolyásolják a ragasztott kötések nyírószilárdságát.

4. Megvizsgálandó, hogy a plazma- és lézersugaras felületkezeléseket követően a ragasztott kötések létrehozásáig eltelt idő (környezeti hatások) a kötéstechológia szempontjából fontos tulajdonságokra, mint például a nedvesítésre milyen időbeni kihatással van.

## **4. KÍSÉRLETI ANYAGOK, BERENDEZÉSEK ÉS ELJÁRÁSOK LEÍRÁSA**

### **Vizsgálati anyagok**

Az első vizsgálathoz alapanyagként nagy ütésállóságú polisztirolt választottam. Az alapanyag egy A-Plast Kft.-től származó nagy ütésálló PS lemez, fehér, 744 elnevezésű 1000 x 2000 x 5 mm-es egyik oldalán fényes és védőfóliás, másik oldalán matt felületű. Ez az alapanyag képviseli a járműipari polimeren végrehajtott kutatásokat.

A fémek közül vizsgálataimhoz a járművek karosszéria alapanyagként is széleskörben alkalmazott DP600-típusú, bevonat nélküli acélt használtam[42–47][42–47][42–47][42–47][42–47][42–47]. A kétfázisú acélok (Dual Phase steel) lágy, jól alakítható ferritbe ágyazott kemény martenzit szigetekből állnak, a kívánt mechanikai tulajdonságoktól függően. A kísérleteim során 1 mm vastagságú hidegen hengerelt DP600 acéllemezt alkalmaztam.

A próbatestek alapterületét 25 x 55 mm<sup>2</sup>-re határoztam meg. Ez megfelelő a felületkezelési, nedvesítési, mikroszkópi és ragasztástechnológiai vizsgálatokhoz.

### **Hidegplazmasugaras felületkezelő rendszer**

A felületkezeléshez a PlasmaTreat OpenAir® légköri nyomáson, sűrített levegővel üzemelő rendszerét használtam. A hidegplazmát egy plazmagenerátorral állítottam elő, amelynek maximális kimenő teljesítménye 1000 W volt. A generátorhoz plazmafej és egy nagy feszültségű transzformátor csatlakozott. A gépet 21 kHz-en használtam. A plazma kilépési pontja excentrikusan a fej szélén volt elhelyezve, majd az 2500 fordulat/perc-el forogva oszlatta el az energiát egységesen a szórás sugarában. Változó technológiai beállítás az alapanyag kezelendő síkja és a plazma sugárzó fej közötti távolság és az egyenes vonalú fő mozgás sebessége volt.

### **Ultrarövid impulzusos femtoszekundumos lézerrendszer**

A felületkezelésekhez femtoszekundumos impulzus üzemben működő Coherent Monaco 1035 nm hullámhosszú lézert alkalmaztam. A gép maximálisan 60 W teljesítmény kibocsátására képes 300 fs impulzusidővel és a hullámhossza 1035 nm. A frekvencia 188 kHz-t, a fókuszfolt sugármérője 80 μm, a kitöltés 60 μm volt.

### **Szobahőmérsékletű nyugvócsepp módszeres peremszög mérési módszer**

A felületkezelések után közvetlen a mintadarabokon nedvesítési peremszöget mértem szobahőmérsékleten nyugvócsepp módszerrel. Mikropipetta segítségével 5 μl-es cseppeket

használtam a méréshez. A cseppentéshez két folyadékot használtam a Fowkes módszer alkalmazása végett, desztillált vizet és  $\geq 99\%$  tisztaságú etilénlikolt.

### **Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok jellemzői**

A pásztázó elektronmikroszkópos (Scanning Electron Microscope, SEM) vizsgálatok során a felületkezelések topográfiaváltoztató képességét célozva vizsgálni. A vizsgálatokhoz alkalmazott SEM berendezések a Zeiss Sigma és Tescan MIRA rendszerek voltak.

### **Ragasztástechnológiai kísérletek bemutatása, a nyírószilárdság meghatározásának folyamata**

A HIPS kötéstechológia kísérletsorozatában a ragasztáshoz Loctite 4080 hibrid ragasztót használtam, amely egy cianoakrilát/akril hibrid szerkezeti ragasztó. A polimer elemek esetében a ragasztott terület  $25 \times 30 \text{ mm}^2$  volt.

A DP600-as acél esetében a ragasztási kísérletekhez Loctite 9466-os két komponensű, epoxi szerkezeti ragasztót használtam. Ez a típusú ragasztó kimondottan alkalmas fémek nagyszilárdságú ragasztására. A fémlemezek esetén a ragasztott terület  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  volt.

A ragasztott kötések egy INSTRON 5900R 4482 univerzális vizsgálógéppel szakítóvizsgálatot végeztem. A külpontos húzás elkerülése érdekében közdarabokat alkalmaztam a megszorítás során, hogy a húzás tengelye a ragasztott felülettel párhuzamos és egybeeső legyen. Az átlapolással ragasztott próbatestek ragasztott kötéseinek nyírószilárdságát a ragasztott felületen fellépő feszültség átlagával jellemeztem.

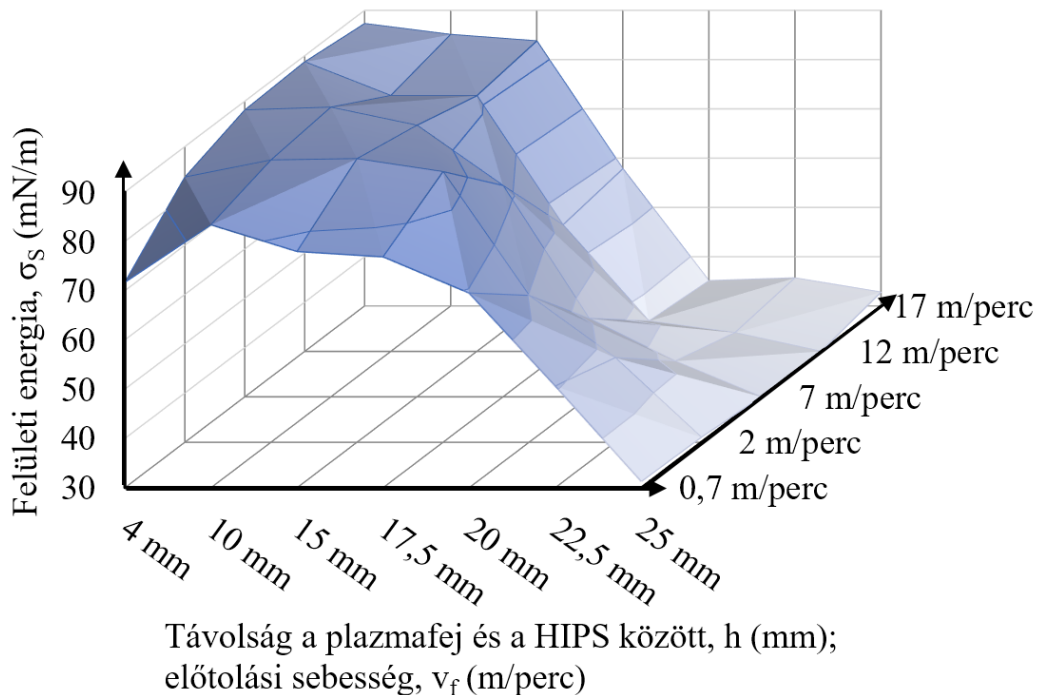
## **5. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK**

Az eredményekben bemutatom a kutatásom során HIPS polimeren és DP600-as növeltszilárdságú acélon elért felületmódosító hatásokat és azok következményét a ragasztott kötések szilárdságnövekedésére. Bemutatom a felületkezelések időfüggésének vizsgálatát, illetve a két felületkezelési módszer hatásmechanizmusának összehasonlítását.

### **HIPS polimer plazmasugaras felületkezelési kísérletsorozata**

A rossz nedvesítésű HIPS kezeletlen állapotú felületi energiája mindössze  $27,4 \text{ mN/m}$ . A hidegplazmasugaras vizsgálati adathalmazzal a célozva, hogy felmérjem a HIPS alapanyagon a plazmasugaras felületkezelés felületaktiváló hatását és optimalizáljam a kezelési konfigurációkat. Így összesen 5 pásztázási sebességet és 7 pásztázási távolságot teszteltem, amely 35 kombinációt eredményezett. A polimer próbatestek minden mérést megelőzően ugyan olyan körülmények között voltak kezelve és közvetlen a felületkezelés előtt távolítottam el a sértetlen védőfóliát, ezzel biztosítva, hogy kutatásom során egyetlen felületi viszonyt befolyásoló tényező a plazmasugaras felületkezelés legyen. Minden

kombinációban öt lemezt kezeltem. Az eredmények bemutatása során jellemzően az összesített határfelületi értékkel, tehát a poláris és diszperzív energia érték összegével célszerű jellemezni a nedvesítés változását a különböző felületkezelési adatok függvényében. Az 1. ábrán látható határfelületi energia térképpel lehet meghatározni a plazmasugaras felület kezelési konfigurációk nedvesítés változtató tendenciáját. A diagrammok tendenciáján elsősorban megfigyelhető a plazmasugaras felületkezelés felületaktiváló és így a nedvesítési peremszögre csökkenést gyakorló hatása.



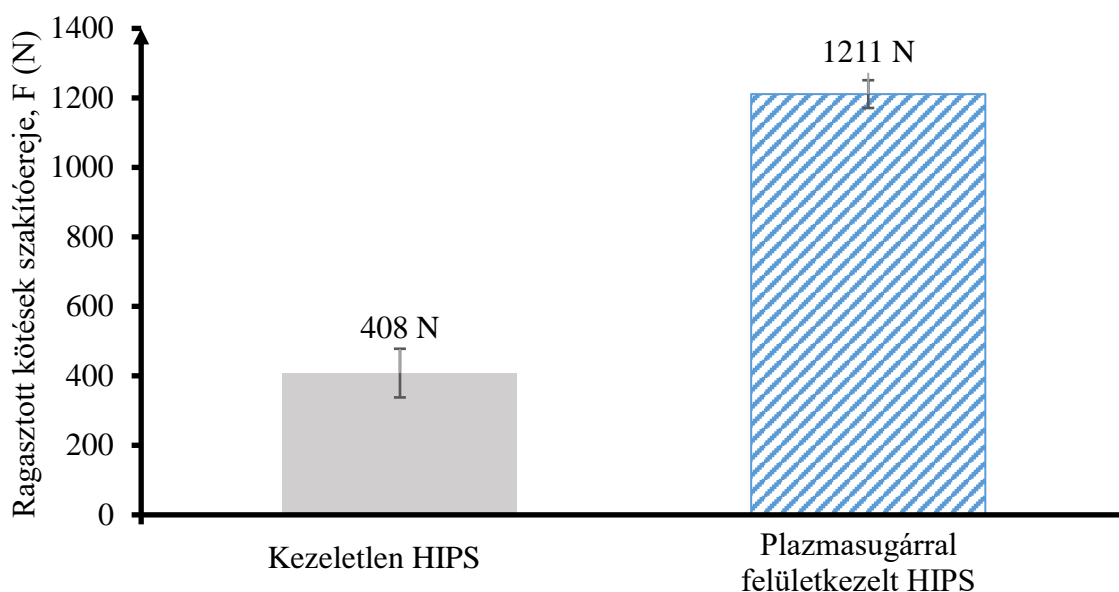
1. ábra: Határfelületi energia változásának térképe HIPS alapanyagon a plazmasugaras felületkezelési adatok függvényében

A diagram tendenciáját 3 területre lehet osztani. Elsőként a plazmasugaras felületkezelés kezdetében, amikor vagy túl gyorsan haladunk vagy túl távol vagyunk a HIPS felületétől már elkezdődik a felületi energia értékek fokozatos növekedése. Minél nagyobb mértékű a plazmasugaras felületkezelés energiája a felületen annál jobban érvényesül a felületaktiváló hatása. A felületi energia értékek ilyenfajta növekedésének oka a plazma többlet energiája által megvalósított határfelületi molekulacsoportok megváltoztatása. A második szakaszban elérhető a teljes hidrofil állapot a felületen, ilyen a 7 m/perc pásztázási sebességgel és 10 mm távolságból végrehajtott felületi kezelés. Ezekben az esetekben annyi energiát közöltem a HIPS felületével, hogy megvalósult a határfelületi molekulacsoportok funkcionálizálása és ez abban nyilvánul meg, hogy a kiindulási állapotokhoz képest teljes hidrofilitást sikerült elérnem a felületen. A harmadik szakaszban a hidrofil állapotot a lassú és közeli kezelés



roncsolni kezdi annak túlzott mértékű hőbevitelének okán, így romlanak a nedvesedési tulajdonságok. A nedvesítési és felületi energia javulásának meghatározható egy optimuma, ez a 7 m/perc-es plazmafejlőtolási sebesség és 10 mm felület-plazmafejlőtolási távolság. Ebben az állapotban volt minden peremszögérték  $0^\circ$ , tehát a felület hidrofíll míg a felületi energia értékek  $88,7 \pm 5$  mN/m-re nőttek.

A HIPS ragasztástechnikai kísérletsorozatában kezeletlen, csupán a védőfólia eltávolítását követően, illetve optimális beállításokkal felületkezelt HIPS próbatest párok átlapoltt kötésének ragasztását végeztem el majd azok nyírószilárdságát vizsgáltam. Az eredmények a 2. ábrán láthatóak, az elért eredmények átlagát és szórását tüntettem fel.



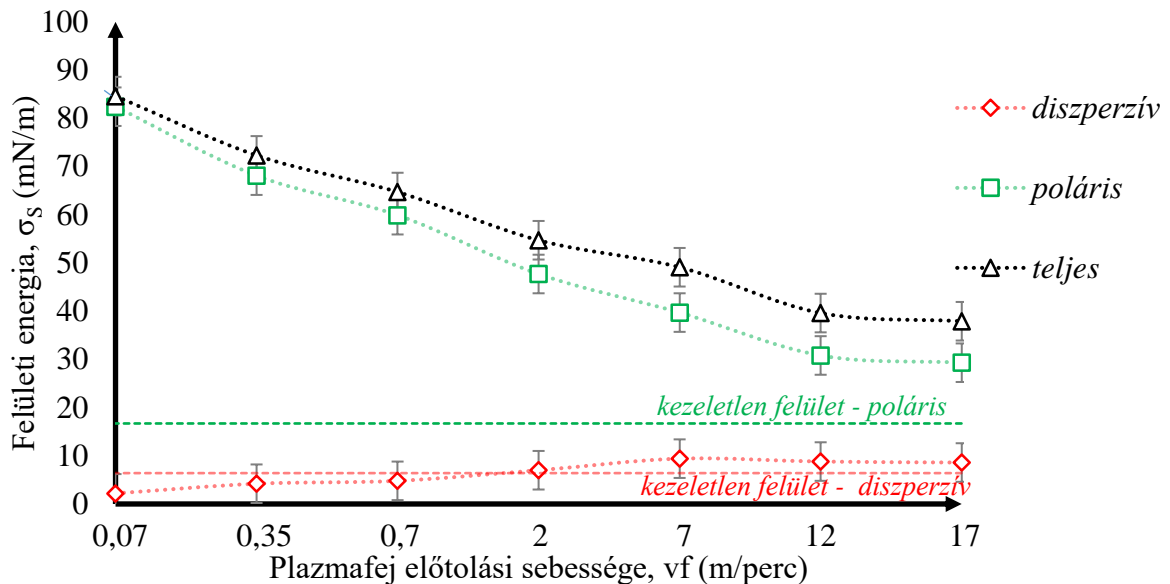
2. ábra: Kezeletlen és optimális technológiai adatokkal, plazmasugárral felületkezelt HIPS próbatestek átlapoltt szakításának eredménye

A kezeletlen minták átlagosan  $408 \pm 74$  N szakítóerőt bírtak ki, míg a plazmasugárral felületkezelt mintákon elért hidrofíll felületi állapot ragasztása során ez a szakítóerő átlagosan  $1211 \pm 28$  N-ra növekedett. A kezeletlen minták esetén  $0,54 \pm 0,09$  MPa, míg az optimális technológiával felületkezelt HIPS esetén  $1,61 \pm 0,04$  MPa.

### DP600 növeltszilárdságú acél plazmasugaras felületkezeltési kísérletsorozata

A kísérlettervemben a plazmasugaras pásztázófej és az acéllemez közötti távolságot állandó 4 mm-re választottam. A berendezés teljesítményét 100%-on alkalmaztam és így a változó beállítás a plazmasugár haladási sebessége volt. Itt 17, 12, 7, 2, 0,7 majd 0,35 és 0,07 m/perc sebességeket alkalmaztam. A kezeletlen alapanyag felületi energiáról meghatároztam, hogy a DP600-as acél zsirtalanított, tisztított felülete rossz nedvesítési jellemzőkkel és alacsony felületi energiával rendelkezik, 26 mN/m-rel. Az eredmények

tendenciájából megállapítható, hogy a kiindulási felületi energiához képest már a 17 m/perces felületkezelés is eredményt ért el, az így elért teljes felületi energia értéke 38 mN/m volt (3. ábra).

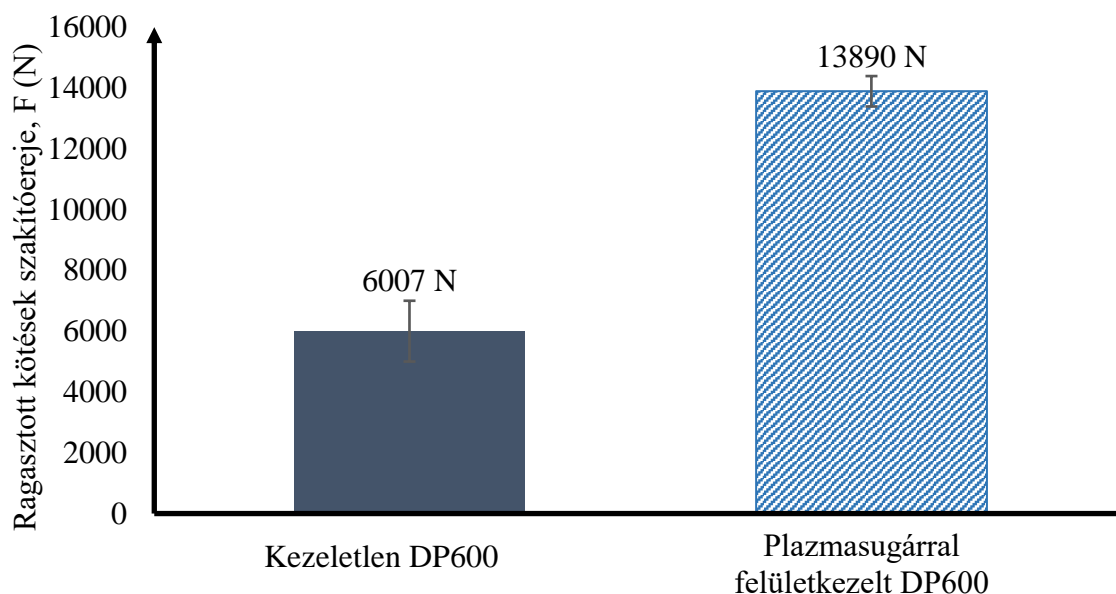


3. ábra: Plazmasugárral felületkezelt DP600-as acéllemez felületi energiáinak változása különböző előtolási sebesség alkalmazása esetén

A DP600-as acél felületének nedvesítőképesség javítása céljából a sebességen lassítottam, melyből arra a következtetésre jutottam, hogy egészen 0,7 m/perc-es előtolási sebességig, nem történik meg a peremszög  $0^\circ$ -ra csökkenése, a kezeletlen értékekhez képest 59%-al csökkentek a peremszög értékek. Ennek oka lehet, hogy az első szakaszon, ahol a sebesség nagyobb, mint 2 m/perc ott a plazmasugár az acélfelületen a tisztítást valósítja meg, a szennyeződések eltávolítását, azonban ahhoz nem elegendő a plazmasugár energiája, hogy aktiválja a felületen lévő molekulacsoportokat, ami DP600-as acél esetén teljesen eltérő a HIPS-nél lezajló folyamatokhoz képest. Azonban 0,7 m/perc-es sebesség alkalmazásával a felületet többlet plazmaenergia besugárzás éri, ami javítja a felületi energia értékeket. A folyamatot egészen 0,07 m/perc-ig (70 mm/perc) lassítottam, mely egy olyan mérnökileg már legalacsonyabban alkalmazható sebesség, ami még a gyártási folyamatba illeszthető. Ebben az esetben a folyamat drasztikusan lelassult, illetve a többlet plazma energia 4 mm-es közelsége és sebessége okán az acél próbatest is melegedett. A nedvesítésmérési folyamat során nem értem el hidrofil állapotot a plazmasugárral kezelt DP600-as acéllemez esetében. A legnagyobb felületi energia érték  $84 \pm 5$  mN/m.

A felületkezelt DP600-as acéllemez leglassabb, 0,07 m/perces előtolási sebesség és 4 mm távolságú plazmasugaras felületkezeléssel kerültek végrehajtásra a ragasztási

kísérletek 2 komponensű epoxi alkalmazásával. A 4. ábrán látható eredményekből megállapítható, hogy a plazmasugaras felületkezelés nagymértékben növelte az acél ragasztott kötéseinek nyírószilárdságát.

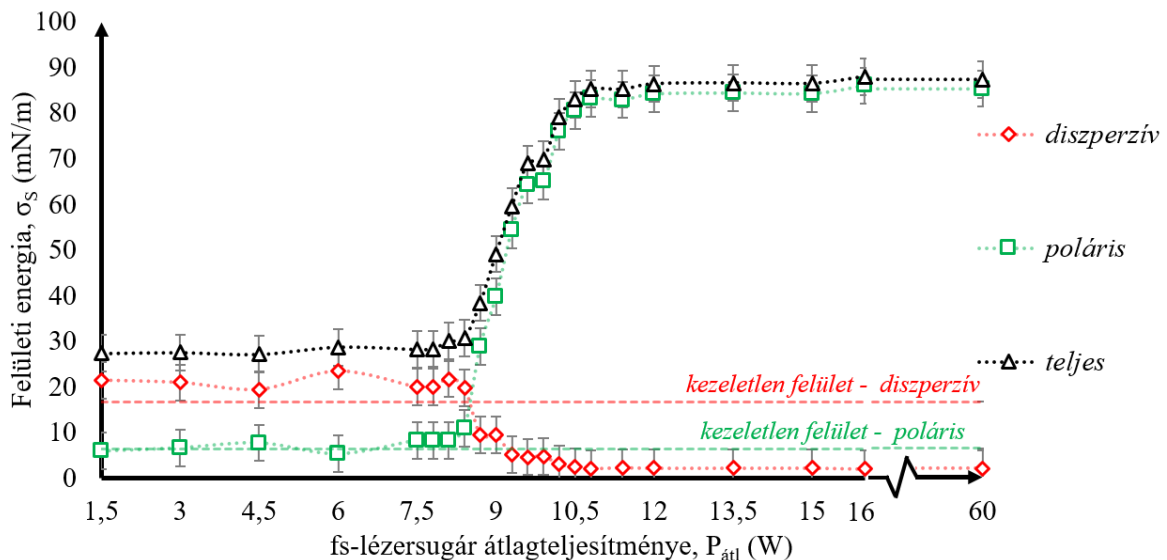


4. ábra: Kezeletlen és plazmasugárral felületkezelt DP600-as acélpárok ragasztási nyírószilárdságának eredményei

A kezeletlen DP600-as acél átlapolt kötéseinek ragasztása  $6007 \pm 734$  N-nál, míg a 0,07 m/perc-es előtolási sebesség és 4 mm távolságú plazmasugaras felületkezeléssel előkészített próbatetek  $13890 \pm 400$  N-t viseltek el. A nyírószilárdság a kezeletlen próbatetek esetén  $9,6 \pm 1,2$  MPa, míg a plazmasugárral felületkezeltetek esetén  $22,2 \pm 0,6$  MPa növekedést mutat.

#### Ultrarövid impulzusos lézerrel végrehajtott felületkezelés DP600-as acélon

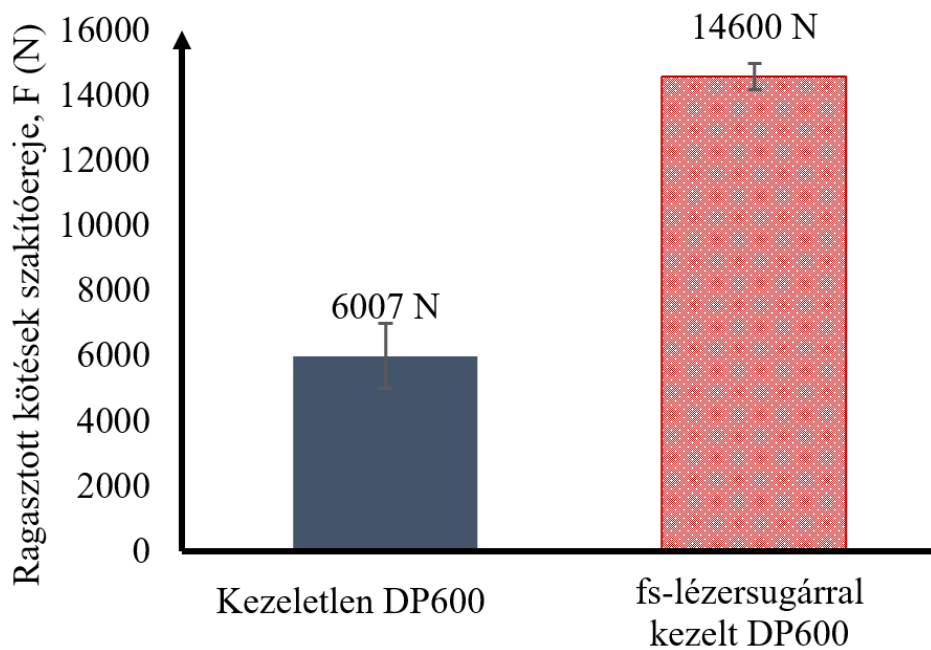
Minden próbatestet különböző technológiai adatokkal kezeltem, majd a kezelést követően, megvizsgáltam a nedvesedési tulajdonságait peremszögméréssel vízzel és etilén-glikol alkalmazásával is. Az előzetes tapasztalatok alapján az 300 m/perc pásztázási sebességet választottam. A lézersugár átmérője a pásztázott felületen 80  $\mu\text{m}$  volt. A lézersugárforrást 188 kHz-en alkalmaztam, 300 femtoszekundumos impulzusszélességgel és 60  $\mu\text{m}$  léptetéssel a kezelt felület megfelelő kitöltése érdekében. A változó technológiai adat az impulzusüzemű lézersugár átlagteljesítménye volt, melyet nagy felbontásban vizsgáltam 0-tól a maximális 60 W-ig. Az így módosított felületeken végrehajtottam a nedvesítési vizsgálatokat majd a mért peremszögekkel Fowkes egyenletrendszer alapján kiszámoltam az egyes kezelésekre hatással elért határfelületi energiaváltozást, melyet a (5. ábra) mutat be. A kezeletlen felületen mért értékeket vízszintes vonallal jelöltem.



5. ábra: A határfelületi energia változása DP600-as acélon a femtoszekundumos lézersugaras felületkezelés hatására

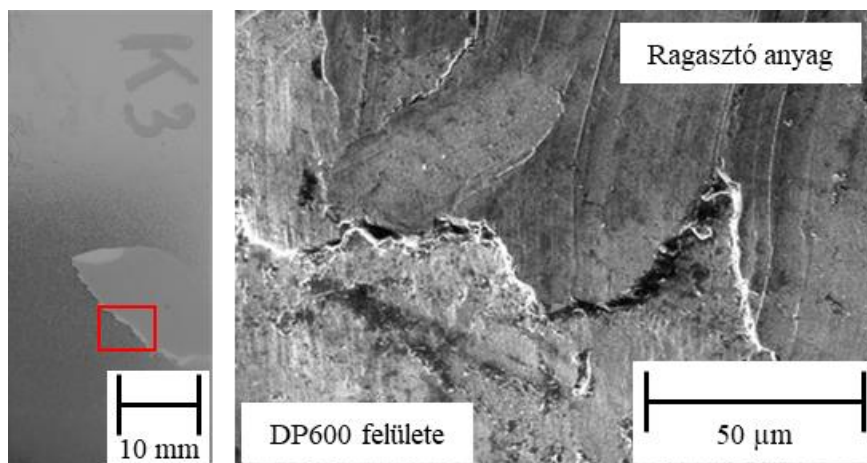
Az 5. ábrán látható, hogy az fs-lézersugár átlagteljesítmény növekedésének függvényében nő a határfelületi energia értéke is. A kezeletlen 26 mN/m-es határfelületi energiához képest a 10 W-os átlagteljesítmény felett kezelt lemez energiája 85 mN/m-re nőtt. Az 51 W-os átlagteljesítményhez tartozó kezelt felületen értem el a legjobb nedvesítést és ezt határoztam meg optimális felületkezelési adatnak. Az eredmények alapján elmondható, hogy sikerült javítani a nedvesedési tulajdonságokat femtoszekundumos lézersugárral.

Ragasztási kísérletet hajtottam végre a kezeletlen és femtoszekundumos lézersugárral kezelt DP600-as acéllemezeken. Kezeletlen és az 51 W-tal kezelt lemezen végeztem ragasztást. A kezeletlen a rossz nedvesítésű, az 51 W-os átlagteljesítménnyel kezelt acéllemez a hidrofil, legjobb területést mutató felületű. Mind a két féle lemezből öt párt ragasztottam össze és vizsgáltam meg szakítóvizsgálattal. A szakítóvizsgálat eredményeiből, a 6. ábrán látható, hogy a kezelés hatására a ragasztás nyírószilárdsága több mint a duplájára nőtt.



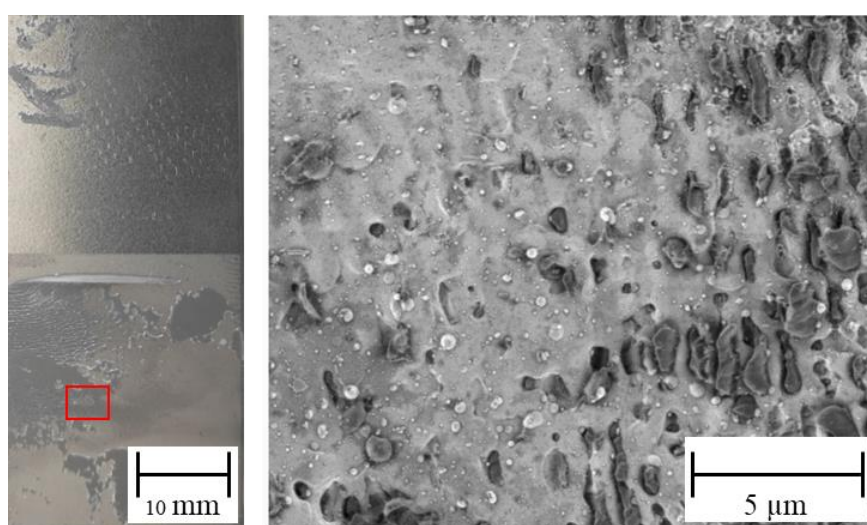
6. ábra: Femtoszekundumos lézerrel felületaktivált DP600-as acélpárok ragasztási nyírószilárdságának eredményei

A szakítóvizsgálat eredményeiből látható, hogy a kezelés hatására a ragasztás nyírószilárdsága több mint a duplájára nőtt. Kezeletlen esetében átlagban  $6007 \pm 734$  N-nál szakadtak el a  $25 \times 25$  mm<sup>2</sup>-es átlapot kötések, míg az 51 W-tal kezelt esetben pedig  $14600 \pm 288$  N-t bírtak ki. A nyírószilárdság a ragasztott kötésen így  $9,6 \pm 1,2$  MPa kezeletlen és  $23,4 \pm 0,6$  MPa felületkezelt esetén, ez a nyírószilárdság 240%-ra való növekedését jelenti. A határfelületi energiák nyugócsepp módszerrel való megvizsgálásán túl véleményem szerint a felületen kialakult LSFL is szerepet tölt be a nagyobb szakítóerő kialakítása során. Annak érdekében, hogy vizsgáljam a felület szerepét a ragasztott kötések adhéziójának kialakítása során, a már elszakított próbatestek felületén maradt ragasztóanyagot vizsgáltam elektronmikroszkóppal. Összehasonlítási alapot képezve egy kezeletlen DP600-as acél szakítás utáni felülete látható a 7. ábrán. A felületen a ragasztóanyag sötét színnel látható, illetve a kezeletlen már korábban megismert acélfelület törtfehérrel.



7. ábra: Kezeletlen DP600-as acél ragasztás utáni szakadási képe, baloldali próbatesten jelölve a SEM felvétel helye

Ebben az esetben a felületi adhézió lényegesen alacsonyabb volt, így a ragasztó helyenként véletlenszerűen leszakadt a DP600-as acél felületéről. Sem az acél felületén nem látható alaksajátosság a ragasztóval való adhézió létrejötte során, sem az alsó tartományban a ragasztóanyag tetején nem vehető észre. Egy LSFL-es felületen végrehajtott ragasztás szakítás utáni képe látható a 8. ábrán.



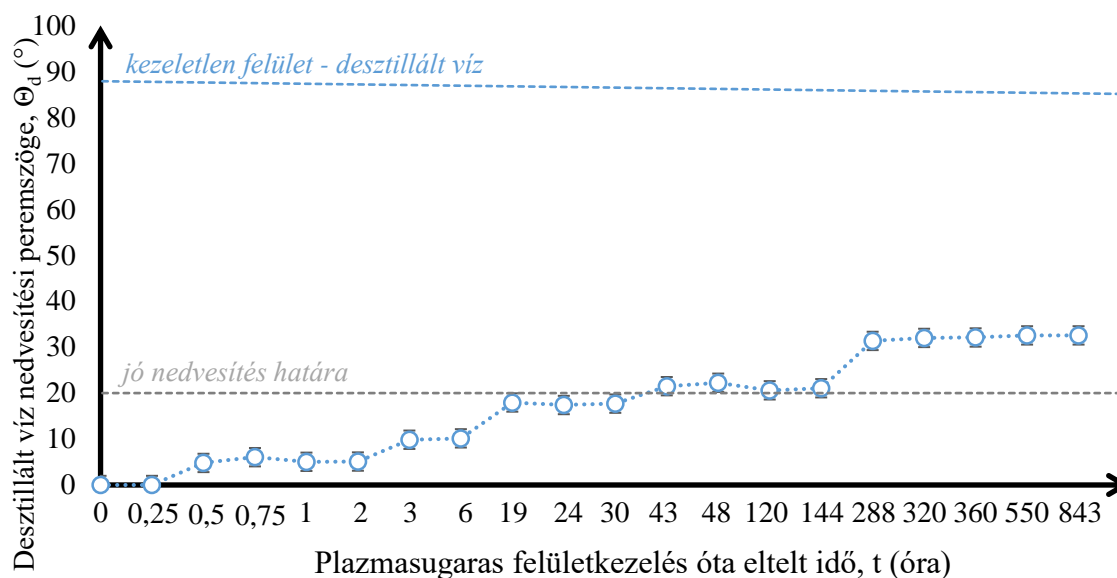
8. ábra: LIPSS-el rendelkező DP600-as acél ragasztási utáni szakadási képe, bal oldali mintán jelölve a SEM felvétel pozíciója

Látható, hogy a hidrofil nedvesítésű felület és LIPSS-el módosított DP600-as acél felületén a 2 komponensű epoxi nagymértékben befolyt és adhéziós kapcsolatot hozott létre a struktúra alaksajátosságával. A szakítás során a levált ragasztó maradékból látható, hogy beterítette a ragasztóanyag a struktúrát. A SEM felvételen a szürke sima felületű foltok a maradék ragasztóanyagok, hosszanti, a LIPSS alakjával párhuzamos elrendeződésük okán

kijelenthető, hogy képes az epoxi ragasztóanyag befolyjni a mikrostruktúrába és azzal adhéziót kialakítani. Ez az erős adhéziójú és nagyfelületű ragasztás együttesen növelhetette meg az átlapolt minták ragasztott kötésének nyírószilárdságát.

### Felületkezelések időfüggésének vizsgálata

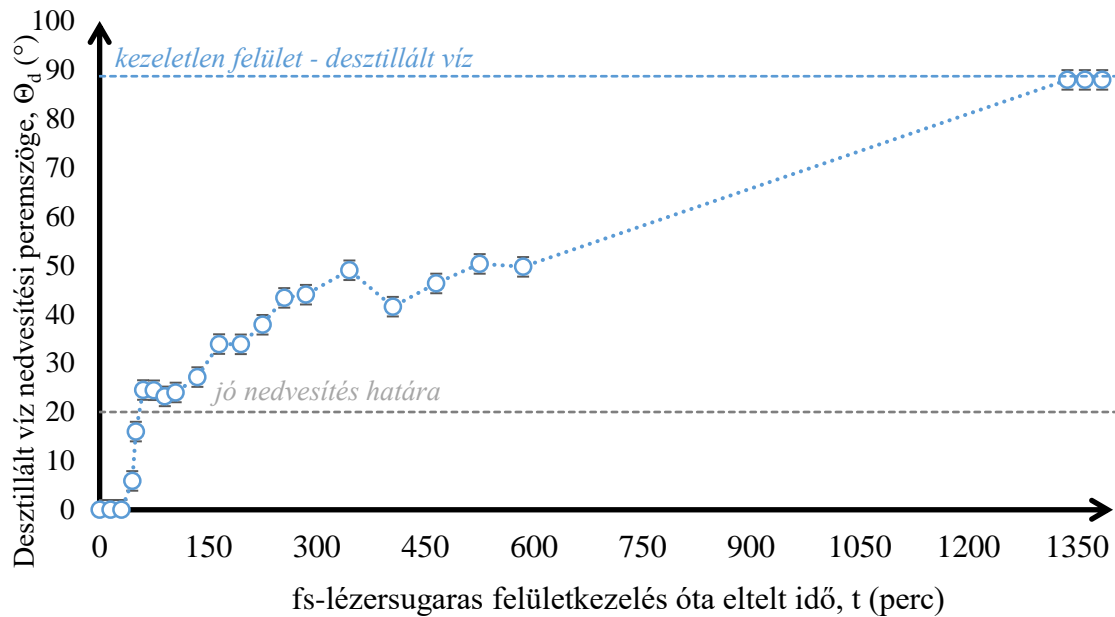
Figyelembe kell venni a ragasztástechnológiához való illesztéskor, hogy a plazmasugárral kezelt felület idővel elveszti jó nedvesítő állapotát, ezért méréseket hajtottam végre a kezelés hatásidőtartamának vizsgálatára. A vizsgálathoz desztillált vizet cseppentettem korábban kezelt mintadarabokra, melyek az optimalizált kezeléssel készültek. A mintadarabok a kezelés után egy sötét, teljesen zárt helységben voltak tárolva  $25\pm 2^\circ\text{C}$ -on, 50-55% közötti páratartalommal. Egy diagramon (9. ábra) ábrázolom a mért peremszög értékeit a kezeléstől eltelt idő függvényében.



9. ábra: Plazmasugárral felületkezelt HIPS hidrofil állapotból való kiindulásának hatásidőtartama, desztillált vízzel mérve, logaritmikus léptékben

Ahogy egyre több idő telt el a kezeléstől úgy kezdett a víz peremszöge növekedni. Ez azért lehetett, mert a felületen lévő szabad gyökök elkezdtek reakcióba lépni a környező levegővel, atomok ültek be az üres helyekbe, más szóhasználattal a felület elkezdett szennyeződni [48]. A jó nedvesítési peremszögtartománynak számító  $20^\circ$ , vagy ez alatti tartományt a HIPS polimer 43 óra elteltével lépte át, így ez jelentheti a határt a felületkezelési technológia gyakorlati alkalmazása során, amíg végrehajtható a ragasztás.

Vizsgálatot hajtottam végre, hogy megtudjam, mennyi ideig tart a jó nedvesítési hatása az optimális 51 W-os átlagteljesítménnyel kezelt lemez esetén, így adott időközönként, vízzel cseppentettem és mértem a peremszöget, melynek eredménye a 10. ábrán látható.



10. ábra: Nedvesítési peremszög változása a hidrofil állapotú DP600-as acélon az idő múlásának függvényében

A 10. ábráról leolvasható, hogy 30 percig még teljesen szétterül a víz a felületen és körülbelül 45 perc alatt éri el a 20°-os peremszög értéket. Azonban fokozatosan az idő múlásával megszűnik a jó nedvesítési állapot. Ez ismét két dolog miatt lehet, az egyik a levegőben lévő por és részecskék felületre való lerakódása, a másik pedig az aktivált felület reakcióban lép a levegővel és így fokozatosan elveszti funkcionalizáltságát.

## 6. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A dolgozat új tudományos eredményei, a vizsgálatba vont anyagok és eszközök területére, a dolgozatban bemutatott adattartományban.

### 1. Tézis:

A hidegplazmasugaras és femtoszekundumos lézersugaras technológia hatásmechanizmusának vizsgálata alapján megállapítottam, hogy ugyanolyan plazmasugaras felületkezelési adatok esetén (4 mm felület-plazmafej távolság és 7 m/perc előtolási sebesség) a DP600-as anyagon  $40 \pm 5$  mN/m, míg HIPS-en  $88,1 \pm 5$  mN/m felületi energia értéket lehetett elérni. A kikísérletezett plazmasugaras technológiák HIPS és DP600 kiválasztott anyagoknál is, míg a femtoszekundumos lézersugaras technológia csak a DP600-as anyagon javítja szignifikánsan a felületi energiák változásán keresztül a ragasztott kötések nyírószilárdságát. A HIPS anyagnál nem volt elérhető az 1035 nm hullámhossztartományú és 300 fs impulzus idejű lézersugárral nedvesítést javító felületkezelés [S2,S4,S6,S9-S12].



## **2. Tézis:**

Nagy ütésállóságú polisztirolon hidegplazmasugaras felületkezelési technológiával meghatároztam a legnagyobb felületi energiával rendelkező technológiai adattartományt. A meghatározott optimalizált adatok a plazmaszóró fej 7 m/perc-es előtolási sebessége és a felület-plazmafej 10 mm távolsága, a maximális 1000 W teljesítményen. Ezzel a beállítással  $88,7\pm 5$  mN/m-re növeltem a felületi energia értékét. A kikísérletezett plazmasugaras felületkezeléssel HIPS polimer esetében a kezeletlen mintához képest a ragasztott kötések maximális nyírószilárdsága átlapolt kötések esetén átlagosan  $0,54\pm 0,09$  MPa-ról  $1,61\pm 0,04$  MPa-ra nőttek [S2,S6,S9-S11,S19].

## **3. Tézis:**

DP600 növeltszilárdságú acélon hidegplazmasugaras felületkezelési technológiával felmértem a felületi energiák változását 0,07, 0,35, 0,7, 2, 7, 12 és 17 m/perc-es plazmafej előtolási sebesség és 4 mm felület-plazmafej távolság és 1000 W teljesítmény esetén. 0,07 m/perc előtolási sebesség alkalmazásával  $84\pm 5$  mN/m felületi energia értéket értem el. A DP600-as acél ragasztott átlapolt kötésinek maximális nyírószilárdságát átlagosan a kezeletlen  $9,6\pm 1,2$  MPa-ról  $22,2\pm 0,6$  MPa-ra növeltem a felületkezelés által [S6,S10,S11].

## **4. Tézis:**

Femtosekundumos impulzuslézer alkalmazásával kimutattam a technológiai adatok nedvesítés változtató hatását DP600-as növeltszilárdságú acélon. Meghatároztam az optimális technológiai adatokat, amelyekkel 1035 nm-es hullámhosszú, 80  $\mu$ m átmérőjű, 300 m/perc pásztázási sebességű, 60  $\mu$ m kitöltésű, 188 kHz ismétlésű, 300 fs impulzus idejű és 51 W-os átlagteljesítményű lézersugár alkalmazásával esztétikai romlás nélküli érhető el a hidrofilitás. Az optimalizált lézersugaras felületkezeléssel elért hidrofil felületi állapotú DP600-as acél ragasztott átlapolt kötésének maximális nyírószilárdságát átlagosan a kezeletlen  $9,6\pm 1,2$  MPa-ról  $23,4\pm 0,6$  MPa-ra növeltem. Kimutattam, hogy kezeletlen felületek esetén a szakadás adhézios hibaként történik, míg kezelt felületek esetén döntő mértékben kohéziós a szakadás [S4-S7,S10,S12].

## **5. Tézis:**

Megállapítottam, hogy mind a HIPS polimer, mind a DP600-as acél az idő múlásával elveszíti a hidrofil állapotát. A kezelt felületek levegőn, normál fényviszonyok között, szobahőmérsékleten való tárolás során, hidrofil nedvesítési állapotról kiindulva a desztillált vízzel vizsgált  $20^\circ$  nedvesítési peremszöget a HIPS polimer 43 óra alatt haladta meg, míg a DP600-as acél 45 perc elmúlásával lépte át [S2,S6,S9,S13].

## 7. A DOKTORI KUTATÁSHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

- S1. M. Berczeli, G. Marsi, Analysis of the effect of different laser beam technology parameters when cutting stainless steel sheets with ytterbium fiber laser machine, *GRADUS*. 8 (2021) 11–323. <https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.015>.
- S2. M. Berczeli, Z. Weltsch, Enhanced Wetting and Adhesive Properties by Atmospheric Pressure Plasma Surface Treatment Methods and Investigation Processes on the Influencing Parameters on HIPS Polymer, *Polymers (Basel)*. 13 (2021) 901. <https://doi.org/10.3390/polym13060901>. IF=4,329 , FI=3
- S3. M. Berczeli, Wettability Changing of FINEMET Substrates Using High-Energy Femtosecond Laser Impulses, *ACTA Phys. Pol. A*. 137 (2020) 864-867 PG–4. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.137.864>. IF=0,545, FI=1
- S4. F. Tajti, M. Berczeli, Development of high power femtosecond laser microstructures on automotive stainless steel, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 903 (2020) 12025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012025>.
- S5. M. Berczeli, F. Tajti, Optimization of material removal parameters by femtosecond laser pulses, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 903 (2020) 12026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012026>.
- S6. G. Juhász, M. Ladislav, M. Berczeli, Novel investigation methods on the effects of laser- and plasma surface treatment for wetting properties of polymers. A literature review TS - A literature review, *PERNER'S CONTACTS*. 2 (2019) 123-130 PG–8.
- S7. M. Berczeli, Effects of CO<sub>2</sub> laser equipment technology parameters on different materials during cutting and engraving processes, *PERNER'S CONTACTS*. 2 (2019) 7–41.
- S8. H. Iryna, K. Silvia, M. Štefan, M. Berczeli, Maintaining mechanical properties of strontium-modified aluminum alloy, *PERNER'S CONTACTS*. 2 (2019) 116-122 PG–7.
- S9. G. Juhász, M. Berczeli, Z. Weltsch, Surface activation of high impact polystyrene substrate using dynamic atmospheric pressure plasma, *Int. J. Eng. Manag. Sci. / MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK*. 4 (2019) 8–80. <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.11>.
- S10. M. Berczeli, Z. Weltsch, Plazma- és lézersugárral felületkezelte anyagok topográfiai elemzésének lehetőségei, *GRADUS*. 6 (2019) 10–175. FI=1
- S11. G. Juhász, M. Berczeli, G. Barna, Z. Weltsch, Határfelületek ragasztási tulajdonságainak változása léköri nyomású plazma felületkezelés hatására, *GRADUS*. 6 (2019) 167-174 PG–8. FI=1

- S12. F. Tajti, M. Berczeli, Z. Weltsch, Improvement of high strength automotive steels wettability properties using CO<sub>2</sub> laser surface treatment, *Int. J. Eng. Manag. Sci. / MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK*. 4 (2019) 422-427 PG–6. <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.52>.
- S13. F. Tajti, M. Berczeli, Z. Weltsch, Nagyszilárdságú járműipari acél nedvesedési tulajdonságainak javítása lézersugaras felületkezeléssel, *GRADUS 6* . (2019) 142-147.
- S14. A. Tímári, M. Berczeli, J. Líska, Z. Weltsch, Bending and tensile test of glued aluminium foams, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 448 (2018) 12067. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012067>.
- S15. T. Markovits, M. Berczeli, EXAMINATION OF METAL SIDE HEATING OF LAMP JOINT BY CO<sub>2</sub> LASER BEAM, *Mater. Inz. Eng.* 24 (2018) 82–87.
- S16. M. Berczeli, Z. Weltsch, Experimental Studies of Different Strength Steels MIG Brazed Joints, *Period. Polytech. Transp. Eng.* 46 (2018) 63–68. <https://doi.org/10.3311/PPtr.11565>. FI=8
- S17. M. Berczeli, R. Kürtösi, A. Tímári, J. Líska, Optimize the joining technology of CFRP and aluminium sheets using hybrid and high strength adhesive, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 448 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012066>.
- S18. M. Berczeli, Z. Weltsch, Adhesive joining of aluminium-GFRP composites, *Adv. Manuf. Repair Technol. Veh. Ind.* (2018) 67–78.
- S19. G. Juhász, M. Berczeli, Z. Weltsch, Surface activation of high impact polystyrene substrate using dynamic atmospheric pressure plasma, *Proc. 6th Int. Sci. Conf. Adv. Mech. Eng. (ISCAME 2018)*. (2018) 81–82.
- S20. F. Tajti, M. Berczeli, Z. Weltsch, Improvement of high strength automotive steels wettability properties using CO<sub>2</sub> laser surface treatment, *Proc. 6th Int. Sci. Conf. Adv. Mech. Eng. (ISCAME 2018)*. (2018) 181–182.
- S21. M. Berczeli, Z. Weltsch, Improvement of adhesive joining of hybrid aluminum – GFRP using surface modifications, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 448 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012050>. FI=1
- S22. M. Berczeli, G. Buza, Relationship between the keyhole laser welding and the plasma, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 448 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012051>.
- S23. J. Hlinka, M. Berczeli, G. Buza, Z. Weltsch, Wetting properties of Nd: YAG laser treated copper by SAC solders, *Solder. Surf. Mt. Technol.* 29 (2017) 69–74. <https://doi.org/10.1108/SSMT-01-2016-0003>. IF=1,431, FI=7

- S24. M. Berczeli, Z. Weltsch, Development trend of adhesive joining of aluminium foams, GRADUS. 4 (2017) 373–379.
- S25. M. Berczeli, Járműipari alumínium, alumínium-kompozit elemek kötéstechológiájának vizsgálata, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, kari TDK dolgozat (2017).
- S26. T. Markovits, M. Berczeli, Examination of metal side heating in case of sheet to sheet LAMP joints, in: 34th Int. Colloq. Adv. Manuf. Repair. Technol. Veh. Ind., 2017: pp. 99–102.
- S27. M. Berczeli, Z. Weltsch, Mechanical properties of different strength steels MIG brazed joints, in: 34th Int. Colloq. Adv. Manuf. Repair. Technol. Veh. Ind., 2017: pp. 29–32.
- S28. M. Berczeli, G. Buza, The Effect of Laser Beam Welding Parameters onto the Evolving Joints Geometry, Mater. Sci. FORUM. 885 (2017) 178–183. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.885.178>. FI=1
- S29. M. Berczeli, Z. Weltsch, DP-DC párosított acélok MIG forrasztása, GRADUS. 3 (2016) 173–178.
- S30. M. Berczeli, Növelt és alapszilárdságú acélpárok MIG keményforrasztása, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, kari TDK dolgozat (2016).
- S31. M. Berczeli, J. Hlinka, E.R. Fábrián, Z. Weltsch, Investigation of Laser Treated Copper Surface Layer, in: 33rd Int. Colloq., 2016: pp. 17–20.
- S32. M. Berczeli, Fém-polimer hibrid kötés létrehozása a fém oldal lézersugaras hevítésével, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, kari TDK dolgozat (2016).
- S33. M. Berczeli, Lézersugaras hegesztési paraméterek hatása a kialakuló varratgeometriára, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, kari TDK dolgozat (2015).
- S34. Z. Weltsch, J. Hlinka, C. Ágnes, Z. Fogarassy, L. Antal, M. Berczeli, T. Attila, G. Tichy, Wetting features of Ag-Sn liquids and the phase structure in solidified state, in: Proc. TEAM 2014, 2014: pp. 372–377.
- S35. M. Berczeli, Lágyszerűsített kötések javítása megelőző lézeres felületkezeléssel, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, kari TDK dolgozat (2014).

## 8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A. Peppas, K. Kollias, D.A. Dragatogiannis, C.A. Charitidis, Sustainability analysis of aluminium hot forming and quenching technology for lightweight vehicles manufacturing, *Int. J. Thermofluids*. 10 (2021) 100082.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2021.100082>.
- [2] X. Meng, J. Xu, W. Liang, Z. Xu, K.C. Li, A lightweight anonymous cross-regional mutual authentication scheme using blockchain technology for internet of vehicles, *Comput. Electr. Eng.* 95 (2021) 107431.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPELECENG.2021.107431>.
- [3] D. He, V.K. Soo, H.C. Kim, M. Doolan, Life Cycle Primary Energy Demand and Greenhouse Gas Emission benefits of vehicle lightweighting with recycled carbon fibre, *Procedia CIRP*. 98 (2021) 43–48.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2021.01.003>.
- [4] E. Sahraei, K. Digges, D. Marzougui, K. Roddis, High strength steels, stiffness of vehicle front-end structure, and risk of injury to rear seat occupants, *Accid. Anal. Prev.* 66 (2014) 43–54. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2014.01.004>.
- [5] S. Baek, J. Song, H. Lee, S. Park, K.-H. Song, S. Lee, S.-J. Lee, C. Chen, D. Kim, Robust bonding and microstructure behavior of aluminum/high-strength steel lap joints using resistance element welding process for lightweight vehicles: Experimental and numerical investigation, *Mater. Sci. Eng. A.* (2021) 142378.  
<https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2021.142378>.
- [6] Y. Chang, Z.H. Meng, L. Ying, X.D. Li, N. Ma, P. Hu, Influence of Hot Press Forming Techniques on Properties of Vehicle High Strength Steels, *J. Iron Steel Res. Int.* 18 (2011) 59–63. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60066-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60066-6).
- [7] N. WANG, Y. LI, L. xiu DU, D. WU, X. hua LIU, Fatigue Property of Low Cost and High Strength Wheel Steel for Commercial Vehicle, *J. Iron Steel Res. Int.* 16 (2009) 44–77. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60059-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60059-5).
- [8] A.M. Sadoun, F.A. El-Wadoud, A. Fathy, A.M. Kabeel, A.A. Megahed, Effect of through-the-thickness position of aluminum wire mesh on the mechanical properties of GFRP/Al hybrid composites, *J. Mater. Res. Technol.* 15 (2021) 500–510.  
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.08.026>.

- [9] F. Lambiase, M. Durante, A. Di Ilio, Fast joining of aluminum sheets with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) by mechanical clinching, *J. Mater. Process. Technol.* 236 (2016) 241–251.  
<https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2016.04.030>.
- [10] M. Hakamada, T. Furuta, Y. Chino, Y. Chen, H. Kusuda, M. Mabuchi, Life cycle inventory study on magnesium alloy substitution in vehicles, *Energy*. 32 (2007) 1352–1360. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2006.10.020>.
- [11] D. Kumar, R.K. Phanden, L. Thakur, A review on environment friendly and lightweight Magnesium-Based metal matrix composites and alloys, *Mater. Today Proc.* 38 (2021) 359–364. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.07.424>.
- [12] A. Hassani, S.R. Safavi, V. Hosseini, A comparison of light-duty vehicles' high emitters fractions obtained from an emission remote sensing campaign and emission inspection program for policy recommendation, *Environ. Pollut.* 286 (2021) 117396. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.117396>.
- [13] J.H. Back, J.U. Hwang, Y.H. Lee, D. Baek, J.W. Park, H.J. Kim, J.H. Kim, H.K. Song, M.J. Yoo, Morphological study and mechanical property of epoxy-foam adhesives based on epoxy composites for automotive applications, *Int. J. Adhes. Adhes.* 87 (2018) 124–129. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2018.09.010>.
- [14] R. Ciardiello, Mechanical characterization and separation tests of a thermoplastic reinforced adhesive used for automotive applications, *Procedia Struct. Integr.* 24 (2019) 155–166. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2020.02.014>.
- [15] M. Alfano, C. Morano, F. Moroni, F. Musiari, G. Danilo Spennacchio, D. Di Lonardo, Fracture toughness of structural adhesives for the automotive industry, *Procedia Struct. Integr.* 8 (2018) 561–565.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2017.12.055>.
- [16] M.D. Banea, M. Rosioara, R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva, Multi-material adhesive joints for automotive industry, *Compos. Part B Eng.* 151 (2018) 71–77.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.06.009>.
- [17] S.I. Ao, International Association of Engineers., World Congress on Engineering : WCE 2012 : 4-6 July, 2012, Imperial College London, London, U.K., (2012) 2065.
- [18] S. Maláková, A. Guzanová, P. Frankovský, V. Neumann, E. Janoško, GLUED JOINTS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY, *Acta Mechatronica*. 4 (2019) 23–28. <https://doi.org/10.22306/AM.V4I4.53>.

- [19] C. Cui, W. Liu, Recent advances in wet adhesives: Adhesion mechanism, design principle and applications, *Prog. Polym. Sci.* 116 (2021) 101388. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2021.101388>.
- [20] A. Rudawska, E. Jacniacka, Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen-Wendt method, *Int. J. Adhes. Adhes.* 29 (2009) 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.09.008>.
- [21] A. Rudawska, Adhesive Properties of Metals and Metal Alloys, *Surf. Energy.* (2015). <https://doi.org/10.5772/60599>.
- [22] S. Tang, O.J. Kwon, N. Lu, H.S. Choi, Surface characteristics of AISI 304L stainless steel after an atmospheric pressure plasma treatment, *Surf. Coatings Technol.* 195 (2005) 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.071>.
- [23] E. Arzt, H. Quan, R.M. McMeeking, R. Hensel, Functional surface microstructures inspired by nature – From adhesion and wetting principles to sustainable new devices, *Prog. Mater. Sci.* 120 (2021) 100823. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2021.100823>.
- [24] L.K. Koopal, Wetting of Solid Surfaces: Fundamentals and Charge effects, *Adv. Colloid Interface Sci.* 179–182 (2012) 29–42. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2012.06.009>.
- [25] J.H. Lee, J. Park, M.H. Myung, M.J. Baek, H.S. Kim, D.W. Lee, Stretchable and recoverable acrylate-based pressure sensitive adhesives with high adhesion performance, optical clarity, and metal corrosion resistance, *Chem. Eng. J.* 406 (2021) 126800. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126800>.
- [26] D.Y. Kwok, D. Li, A.W. Neumann, Fowkes' surface tension component approach revisited, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 89 (1994) 181–191. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(94\)80117-7](https://doi.org/10.1016/0927-7757(94)80117-7).
- [27] E. Matykina, I. Garcia, J.J. De Damborenea, M.A. Arenas, Comparative determination of TiO<sub>2</sub> surface free energies for adhesive bonding application, *Int. J. Adhes. Adhes.* 31 (2011) 832–839. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.08.003>.
- [28] S. Natsui, K. Tonya, H. Nogami, T. Kikuchi, R.O. Suzuki, SPH simulations of binary droplet deformation considering the Fowkes theory, *Chem. Eng. Sci.* 229 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.CES.2020.116035>.

- [29] F.M. Fowkes, DETERMINATION OF INTERFACIAL TENSIONS, CONTACT ANGLES, AND DISPERSION FORCES IN SURFACES BY ASSUMING ADDITIVITY OF INTERMOLECULAR INTERACTIONS IN SURFACES, *J. Phys. Chem.* 66 (2002) 382. <https://doi.org/10.1021/J100808A524>.
- [30] A. Vesel, M. Mozetic, Surface modification and ageing of PMMA polymer by oxygen plasma treatment, *Vacuum*. 86 (2012) 634–637. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.07.005>.
- [31] J.C. Hsu, P.W. Wang, Y.H. Lin, H.L. Chen, Y.Y. Chen, Y. Der Yao, J.C. Yu, Anti-reflective effect of transparent polymer by plasma treatment with end-hall ion source and optical coating, *Opt. Rev.* 2010 176. 17 (2010) 553–556. <https://doi.org/10.1007/S10043-010-0099-Z>.
- [32] M. Kehrer, A. Rottensteiner, W. Hartl, J. Duchoslav, S. Thomas, D. Stifter, Cold atmospheric pressure plasma treatment for adhesion improvement on polypropylene surfaces, *Surf. Coatings Technol.* 403 (2020) 126389. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126389>.
- [33] C. Rodríguez-Villanueva, N. Encinas, J. Abenojar, M.A. Martínez, Assessment of atmospheric plasma treatment cleaning effect on steel surfaces, *Surf. Coatings Technol.* 236 (2013) 450–456. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.036>.
- [34] G. Menci, A.G. Demir, D.G. Waugh, J. Lawrence, B. Previtali, Laser surface texturing of  $\beta$ -Ti alloy for orthopaedics: Effect of different wavelengths and pulse durations, *Appl. Surf. Sci.* 489 (2019) 175–186. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2019.05.111>.
- [35] Z. Zhao, C. Wang, M. Li, L. Wang, L. Kong, The effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation on surface energy of copper, *Appl. Surf. Sci.* 252 (2006) 4257–4263. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2005.07.005>.
- [36] J. Hlinka, *Járműiparban alkalmazott lágyforraszok nedvesítő képességének vizsgálata*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2019. <https://repositorium.omikk.bme.hu/handle/10890/13110> (accessed December 18, 2021).
- [37] C.V. Ngo, D.M. Chun, Effect of Heat Treatment Temperature on the Wettability Transition from Hydrophilic to Superhydrophobic on Laser-Ablated Metallic Surfaces, *Adv. Eng. Mater.* 20 (2018) 1701086. <https://doi.org/10.1002/ADEM.201701086>.



- [38] A.-M. Kietzig, J. Lehr, L. Matus, F. Liang, Laser-induced patterns on metals and polymers for biomimetic surface engineering, *Laser Appl. Microelectron. Optoelectron. Manuf.* XIX. 8967 (2014) 896705.  
<https://doi.org/10.1117/12.2042894>.
- [39] P. Bizi-Bandoki, S. Valette, E. Audouard, S. Benayoun, Time dependency of the hydrophilicity and hydrophobicity of metallic alloys subjected to femtosecond laser irradiations, *Appl. Surf. Sci.* 273 (2013) 399–407.  
<https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2013.02.054>.
- [40] Y. Boutar, S. Naïmi, S. Mezlini, M.B.S. Ali, Effect of surface treatment on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints for automotive applications, *Int. J. Adhes. Adhes. C* (2016) 38–43. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2015.12.023>.
- [41] G. Rotella, M. Alfano, T. Schiefer, I. Jansen, Enhancement of static strength and long term durability of steel/epoxy joints through a fiber laser surface pre-treatment, *Int. J. Adhes. Adhes.* 63 (2015) 87–95.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.08.009>.
- [42] O. Tunçel, H. Aydın, Ş. Çetin, MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SIMILAR AND DISSIMILAR LASER WELDS OF DP600 AND DP1000 STEEL SHEETS USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY, *Turkish J. Eng.* (2020). <https://doi.org/10.31127/TUJE.649975>.
- [43] C.O.L. Almeida, L.H.L. Lima, M. Dos Santos Pereira, Springback comparison between DP600 and DP800 steel grades, *Mater. Res. Express.* 7 (2020).  
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/AB664E>.
- [44] H. Ghadbeigi, C. Pinna, S. Celotto, J.R. Yates, Local plastic strain evolution in a high strength dual-phase steel, *Mater. Sci. Eng. A.* 527 (2010) 5026–5032.  
<https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2010.04.052>.
- [45] G. Avramovic-Cingara, Y. Ososkov, M.K. Jain, D.S. Wilkinson, Effect of martensite distribution on damage behaviour in DP600 dual phase steels, *Mater. Sci. Eng. A.* 516 (2009) 7–16. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2009.03.055>.
- [46] D. Dong, Y. Liu, L. Wang, C. Liu, Dynamic Tensile Characteristics of DP600 Steel Sheets for Automotive Applications, *Adv. Mater. Res.* 509 (2012) 40–45.  
<https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.509.40>.
- [47] L. Mei, G. Chen, X. Jin, Y. Zhang, Q. Wu, Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets, *Opt. Lasers Eng.* 47 (2009) 1117–1124.  
<https://doi.org/10.1016/J.OPTLASENG.2009.06.016>.

- [48] N. Vandecasteele, F. Reniers, Plasma-modified polymer surfaces: Characterization using XPS, *J. Electron Spectros. Relat. Phenomena*. 178–179 (2010) 394–408.  
<https://doi.org/10.1016/j.elspec.2009.12.003>.