

HEGESZTÉSI KÍSÉRLETEK

GINOP-2.2.1-15-201 6-00015

**„A MAGYAR SUZUKI ZRT-BŐL, BESZÁLLÍTÓIBÓL ÉS KUTATÓ
HELYEKBŐL ÁLLÓ INNOVATÍV HÁLÓZAT KIALAKÍTÁSA ÉS
MŰKÖDTETÉSE VERSENYKÉPES, BIZTONSÁGOS ÉS
KÖRNYEZETBARÁT TESZTELT SZEMÉLYGÉPKOCSI PROTOTÍPUS ÉS
GAZDASÁGOS TÖMEGGYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁJÁNAK
KIFEJLESZTÉSÉRE”**

LÉZER ALPROJEKT

**AZ EDUTUS EGYETEM ÁLTAL VÉGZETT HEGESZTÉSI KÍSÉRLETEK
ÖSSZEFOGLALÁSA**

JEGYZŐKÖNYV SORSZÁMA: SUZ-LEZ-25

BAY ZOLTÁN ALKALMAZOTT KUTATÁSI KÖZHASZNÚ NONPROFIT KFT.

MISKOLC, ESZTERGOM, 2020.

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Regionális
Fejlesztési Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Tartalomjegyzék

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | A jegyzőkönyv célja | 3 |
| 2. | Az elvégzett hegesztési kísérletek | 4 |
| 2.1 | Bevezetés | 4 |
| 2.2 | Vakvarratos hegesztések [1] | 5 |
| 2.3 | Hegesztés hézagolás nélkül, átlapolt kötéses elrendezésben [2] | 6 |
| 2.4 | Hegesztés hézagoló lemezek segítségével [3, 4] | 8 |
| 2.5 | Mechanikai vizsgálatok | 8 |
| 2.6 | Hegesztés 3D alkatrészen [5] | 9 |
| 2.7 | Hegesztés dudorok segítségével [6] | 10 |
| 2.8 | Paraméter-ablak a kísérleti hegesztésekhez | 11 |
| 2.8.1 | Hegesztési paraméterek a kísérleti hegesztésekhez | 13 |
| 2.9 | A 2. fejezethez kapcsolódó Edutus kutatási jelentések | 14 |

1. A jegyzőkönyv célja

A jegyzőkönyv célja az alprojekt keretében a Konzorciumvezető irányításával, az Edutus Egyetem által, a Bay Zoltán Nonprofit Kft. megbízásából, közreműködésével és szakmai támogatásával végzett kísérleti hegesztések eredményeinek összefoglalása.

Ezt a tanulmányt a jelenlegi ismereteink, adataink és tapasztalataink szerint állítottuk össze javaslatként. Amennyiben a körülmények, a lehetőségek, a technikai felszereltség időközben megváltoznak, akkor a javaslatok kivitelezésében célszerű változtatásokat lehet végezni.

A kutatási feladat megoldását koordináló résztvevők:

Rozsnyai István, mérnök, Hegesztő Üzemi Technológia és Mérnökség Vezető,

Dr. Borbás Lajos egyetemi tanár,

Dr. Rác Pál osztályvezető helyettes, alprojekt vezető

2. Az elvégzett hegesztési kísérletek

2.1 Bevezetés

A legnagyobb hátránya az ellenállás ponthegesztésnek, hogy rugalmatlan technológia, az autóipari piacra jellemző gyors változásokhoz nem képes elég gyorsan alkalmazkodni. Valamint az ellenállás hegesztés lassú folyamat, és költséges is, mivel munkadarab elektródákkal történő felhevítése nagy energia befektetést igényel.

A lézersugaras hegesztés (különösen a távhegesztés) esetében pedig nagy a megmunkálási sebesség, kiválóan automatizálható, jól kombinálható más technológiákkal, és nagy gyártási rugalmasság jellemző rá. Precíz, nem igényel utómunkát, és a hegesztési paramétereket pontosan kézben lehet tartani, valamint zöldebb technológia. A beruházási költség a lézeres távhegesztés esetében nagyobb, de a gyártás gazdaságosabb lehet vele amennyiben bonyolult geometriájú, jól illeszthető alkatrészeket megfelelően nagy szériában gyártunk.

A lézersugaras ponthegesztés bevezetése esetében a legnagyobb technológiai kihívás a cink-gőz okozta probléma kiküszöbölése.

A lézersugaras technológia segítségével megvalósítható a mélyvarratos hegesztés, aminek során az olvadátkócsában egy mély, úgynevezett fémgőz-plazma csatorna alakul ki. Az így létrehozott varrat előnye, hogy rendkívül nagy varratmélység mellett is viszonylag kis hőhatás éri az anyagot. Hátránya, hogy a plazmacsatorna instabil.

Az acélokat, a korrózióállóság érdekében általában cink réteggel vonják be. Lézersugaras hegesztésnél a probléma az, hogy a cink olvadáspontja és forráspontja is jóval alacsonyabb, mint a vasé, illetve az acéloké. ($Top_{Zn} = 1180 \text{ °C}$, $Top_{Fe} = 1800 \text{ °C}$) Ezért a hegesztés során cinkgőz képződik, a és a nagy cink-gőz nyomás instabillá teszi a plazmacsatornát. Valamint képes akkora gőznyomást létrehozni a varrat fölött, hogy az olvadt fém kifröccsen a plazmacsatornából, ezért a varrat porózus lesz. Ezek eredményeképp jelentősen csökken a varratszilárdság.

A legkézenfekvőbb megoldás, hogy a lemezek között rést hagyunk, így a cinkgőz el tud diffundálni a varrat közeléből. Ha a két lemez közé távtartó lemezt helyezünk be, ez megvalósítható. A munkánk során először a távtartó lemezek behelyezésének eredményét vizsgáltuk, azonban ezeknek a lemezeknek a tömeggyártásban való bevezethetősége nehezen megvalósítható. Így később, a lézerberendezésünk segítségével, távtartó funkciót ellátó dudorokat hoztunk létre a lemezen, majd utána készítettük el a varratot.

Jelen dokumentumban ennek a kísérletnek az állomásait mutatjuk be.

2.2 Vakvarratos hegesztések [1]

A vakvarratos hegesztési kísérletek célja az volt, hogy segítse az átlapolott kötéses lézersugaras hegesztés paramétereinek a kiválasztását. A vakvarratos hegesztés során nem alakítunk ki kötést egy másik darabbal, így a varratok egylemezesek.

A 1. táblázatban található lézersugaras hegesztési paraméterek összes kombinációját, így összesen 100 varratot készítettünk, és vizsgáltunk meg. A 2. táblázatban találhatóak azok a paraméterek, amiket nem változtattunk, minden varrat esetében ugyanazokat az értékeket használtuk.

1. táblázat: Változó paraméterek

| Teljesítmény (W) | Sebesség (mm/perc) | Defókusz (mm) |
|------------------|--------------------|---------------|
| 1500 | 1000 | 0 |
| 2000 | 1500 | 1 |
| 3000 | 2000 | 2 |
| 4000 | 2500 | 3 |

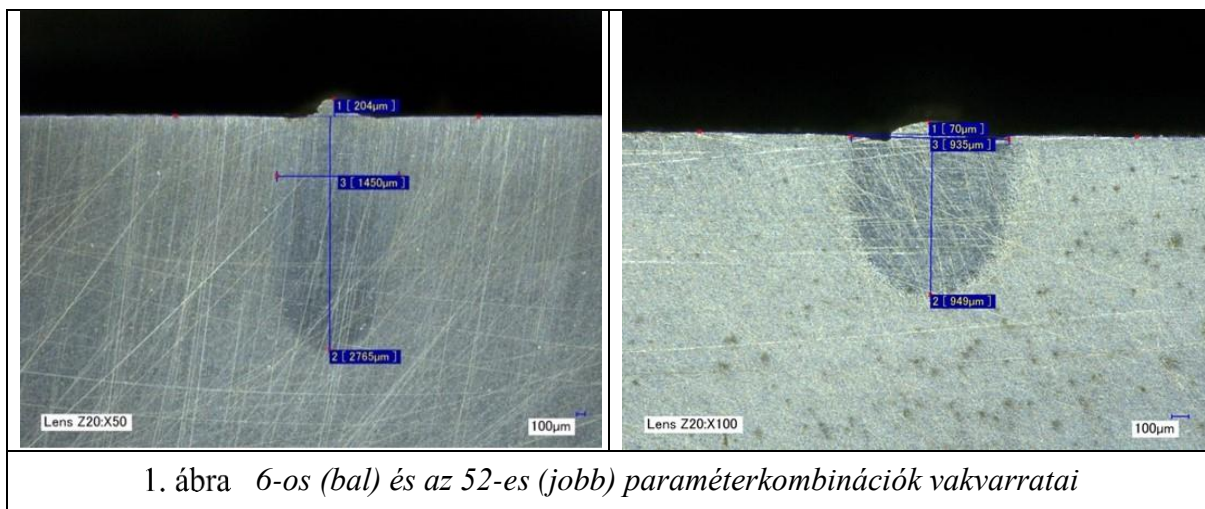
2. táblázat: Állandó paraméterek

| Beütési frekvencia (Hz) | Munkagáz | Gázmennyiség (bar) | Fúvóka távolság (mm) |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| 5010 | Nitrogén | 5 | 1 |
| Gáz előáramlás (s) | Gáz utóáramlás (s) | Előmelegítés (°C) | Beütési csúcsteljesítmény (W) |
| 6 | 6 | - | 4000 |

A vizsgálathoz a lemezeket abrazív tárcsás vízhűtéses vágóval eldaraboltuk, majd a varratok keresztmetszeti csiszolatát is elkészítettük, standard metallográfiai módszerrel.

Fontos, hogy elég mély legyen a varrat, de mivel viszonylag vékony lemezek hegesztése a cél (körülbelül 2 mm-esek), ezért túl mély se legyen, mert különben átég a lemez. Továbbá nem előnyös még a széles, nagy koronaátmérőjű varrat, mert az nagyobb hőbevitelre utal, és a varratok mechanikailag leggyengébb pontja a hőhatásövezet.

Az 1. ábrán és a 3. táblázatban két tipikus varrat és paramétereik láthatóak: egy olyan, ami a további kísérletekhez kiválasztásra került (bal), és egy olyan, ami nem (jobb).



1. ábra 6-os (bal) és az 52-es (jobb) paraméterkombinációk vakvarratai

3. táblázat: A 6-os és az 52-es paraméterkombinációkhoz tartozó lézersugaras paraméterek

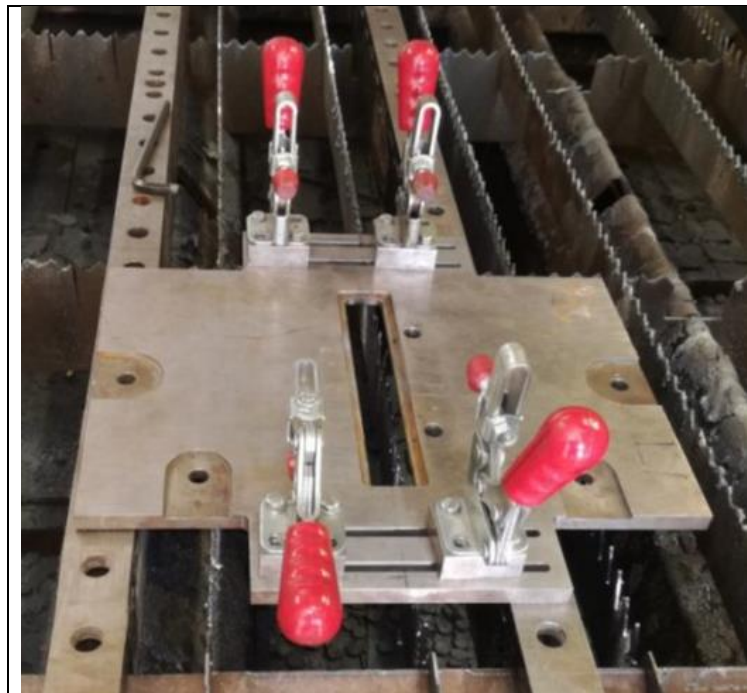
| | Paraméterek | |
|--------------------------------------|-------------|------|
| | 6 | 52 |
| Lézer teljesítmény (W) | 2000 | 1000 |
| Hegesztési sebesség (mm/perc) | 2000 | 2500 |
| Defókusz (mm) | 0 | 2 |

2.3 Hegesztés hézagolás nélkül, átlapolt kötéses elrendezésben [2]

A Konzorciumvezető rendelkezésünkre bocsátott 5 különböző anyagminőségű és vastagságú síklemezt, amit a karosszériaelemekhez használnak. A lemezek vastagsága 0,6-1,8 mm-ig változott.

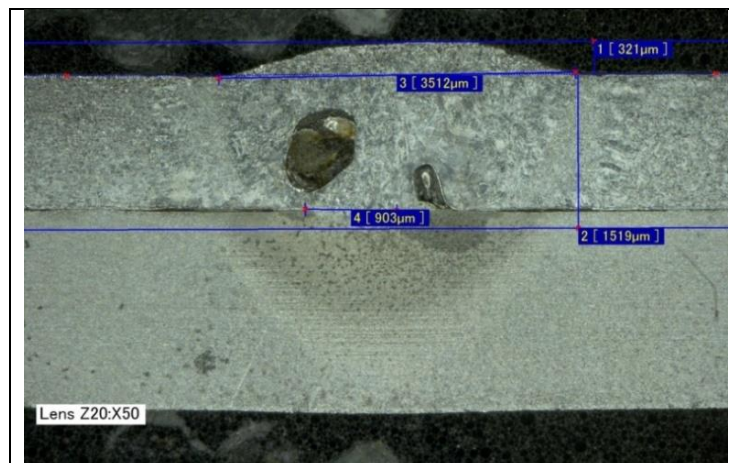
A lemezeket különböző variációkban összepárosítottuk egymással, hogy tudjuk vizsgálni az átlapolt kötéses hegesztést. A lemezek között nem alkalmaztunk hézagolást, hogy legyen összehasonlítási alapunk a hézagoló lemezes kísérletek hatékonyságára. Kétféle hegesztési pozícióban (vízszintes, avagy vályúhelyzetű, függőleges, avagy falmenti), is végeztünk további kísérleteket, hiszen a gyártás során is előfordul, hogy a varrat nem vízszintes, hanem függőleges helyzetben van. Minden lemezpárosításhoz többféle lézersugaras paramétert választottunk, a vakvarratos kísérleti eredményeinkből kiindulva.

A hegesztés során a bevitt hő miatt a lemezek vetemedhetnek, így a folyamat közben leszorítás szükséges. A lemezek leszorításához készített hegesztőkészülék a 2. ábrán látható.



2. ábra *Leszorító készülék*

A vizsgálat során számos varratban találtunk pórusokat, mert a cinkgőz nem tudott kidiffundálni (3. ábra). A falmenti és a vályúhelyzetű varratok között nem találtunk jelentős különbséget az egyes paraméterkombinációk esetén.

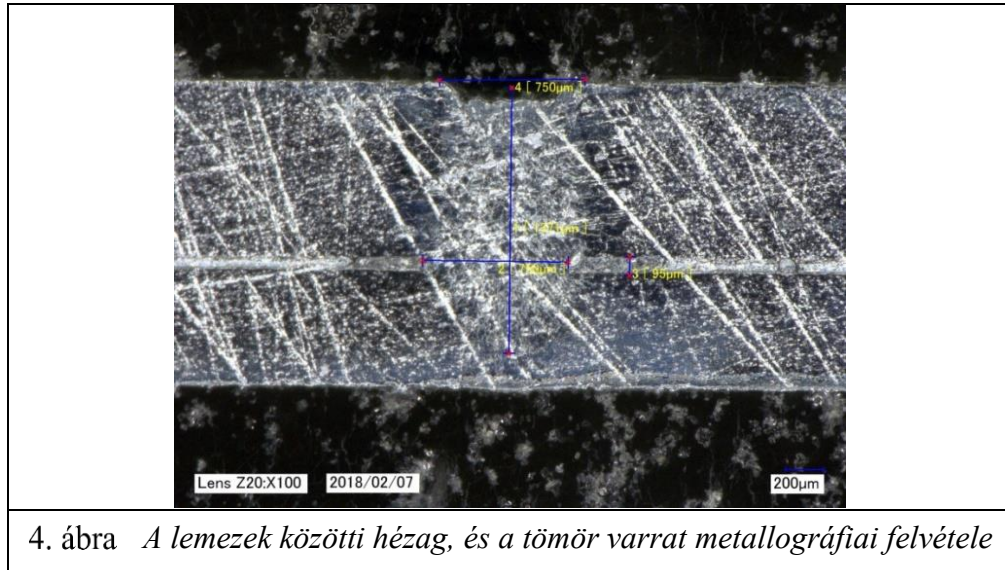


3. ábra *Példa a porózus varratra*

2.4 Hegesztés hézagoló lemezek segítségével [3, 4]

Az átlapolt kötéses kísérletekhez a hézagolást az erre a célra szolgáló 0,1 mm vastag hézagoló lemezekkel valósítottuk meg, melyek darabjait a két összehegesztendő lemez közé helyeztünk el 10-10 mm-es távolságban a varrat helyétől.

A vizsgálat során igazolódott a hézagolás hatékonysága: míg a hézag nélküli varratok 28%-a porózus volt, a hézaggal készültéknél nem találtunk porózus varratot (4. ábra).

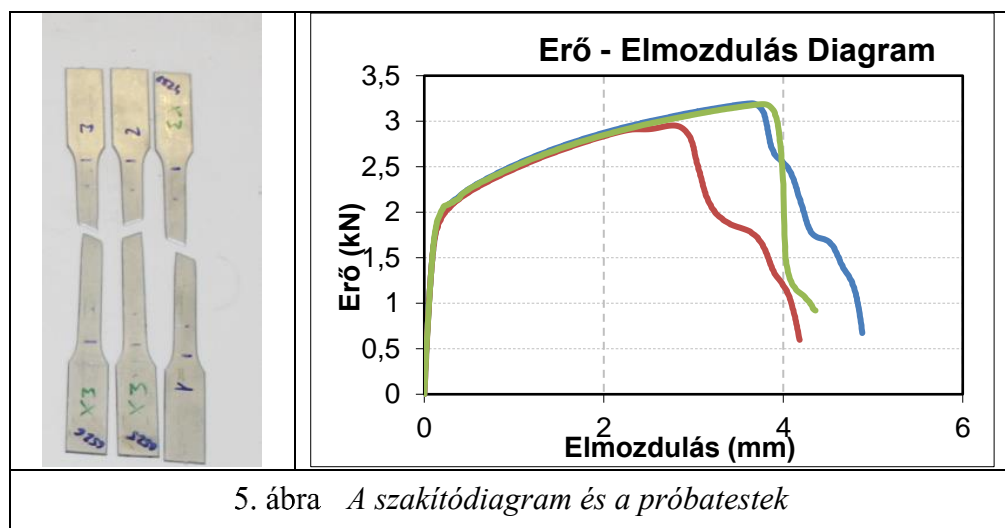


4. ábra A lemezek közötti hézag, és a tömör varrat metallográfiai felvétele

A munkafolyamat során tovább szelektáltuk a hegesztési paraméterkombinációkat. A 37. ábrán egy megfelelő varrat látható. Természetesen készültek hibás varratok is.

2.5 Mechanikai vizsgálatok

A mechanikai vizsgálat során felvettük 28 darab próbatest szakítódíagramját, a 5. ábrán az egyik lemeztípus eredményei láthatóak. A hegesztés reprodukálhatóságát megfelelőnek ítéltük.



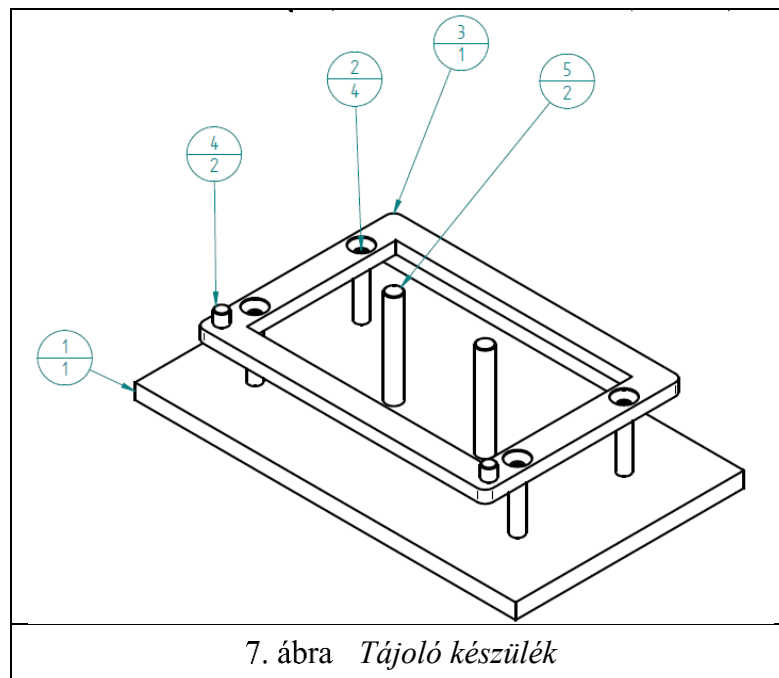
5. ábra A szakítódíagram és a próbatestek

2.6 Hegesztés 3D alkatrészen [5]

A síklemezes kísérletek után a Konzorciumvezető által rendelkezésünkre bocsátott kivágott, sajtolt majd hajlított tetőalkatrészt sikeresen hegesztettünk a hézagolólemezes módszerrel. Az alkatrészhez tájoló készüléket készítettünk, majd a ráhelyezett lemezeket leszorító fogóval szorítottuk össze a hegesztéshez (6. és 7. ábra).



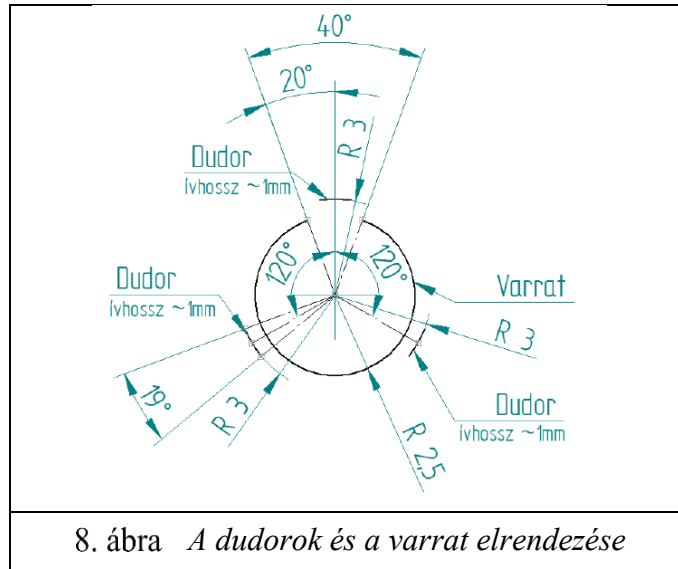
6. ábra A 3D lemezalkatrész a hegesztési varratok helyének megjelölésével



7. ábra Tájoló készülék

2.7 Hegesztés dudorok segítségével [6]

Többféle dudor-varrat elrendezés kipróbálása után a 8. ábrán láthatóra esett a választásunk. A C-varrat elegendően erős kötést biztosít amellett, hogy ki tud diffundálni belőle a cink-gőz.



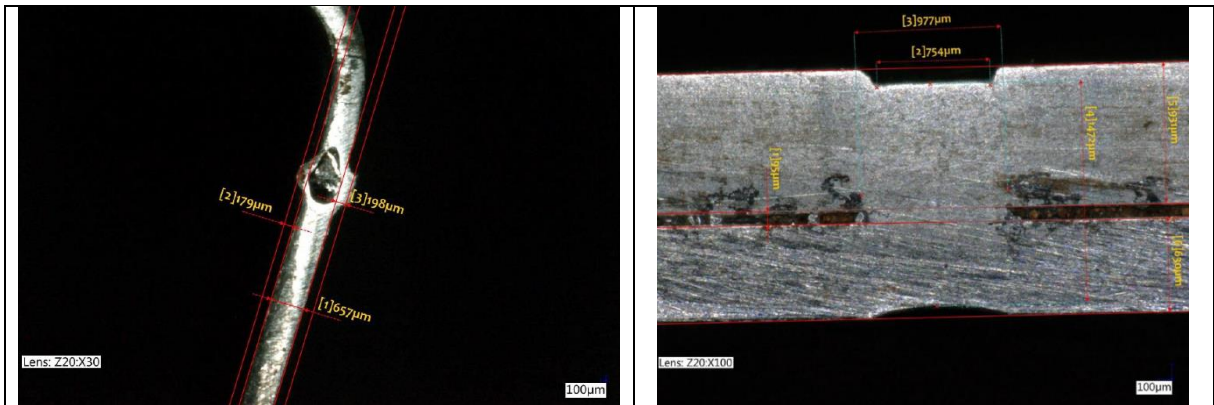
8. ábra A dudorok és a varrat elrendezése

4. táblázat: A dudorok kialakításához használt lézerparaméterek

| Paraméter száma | Lézerteljesítmény (W) | Fókusz (mm) | Előtolás (m/min) |
|-----------------|-----------------------|-------------|------------------|
| #D2-1 | 900 | 2 | 1 |
| #D2-2 | 800 | 2 | 0,5 |
| #D2-3 | 800 | 2 | 1 |
| #D2-4 | 500 | 2 | 0,5 |
| #D2-5 | 400 | 2 | 0,5 |
| #D2-6 | 250 | 2 | 0,5 |
| #D2-7 | 500 | 2 | 0,2 |

A #D2-2-es dudorképző paraméter került kiválasztásra. A dudor magasságának értéke 0,03 mm-es szóráson belül alakult, ezért reprodukálhatóságát jónak ítéltük, és magassága is megfelelő volt a 0,1 mm-es hézagolólemez helyettesítésére.

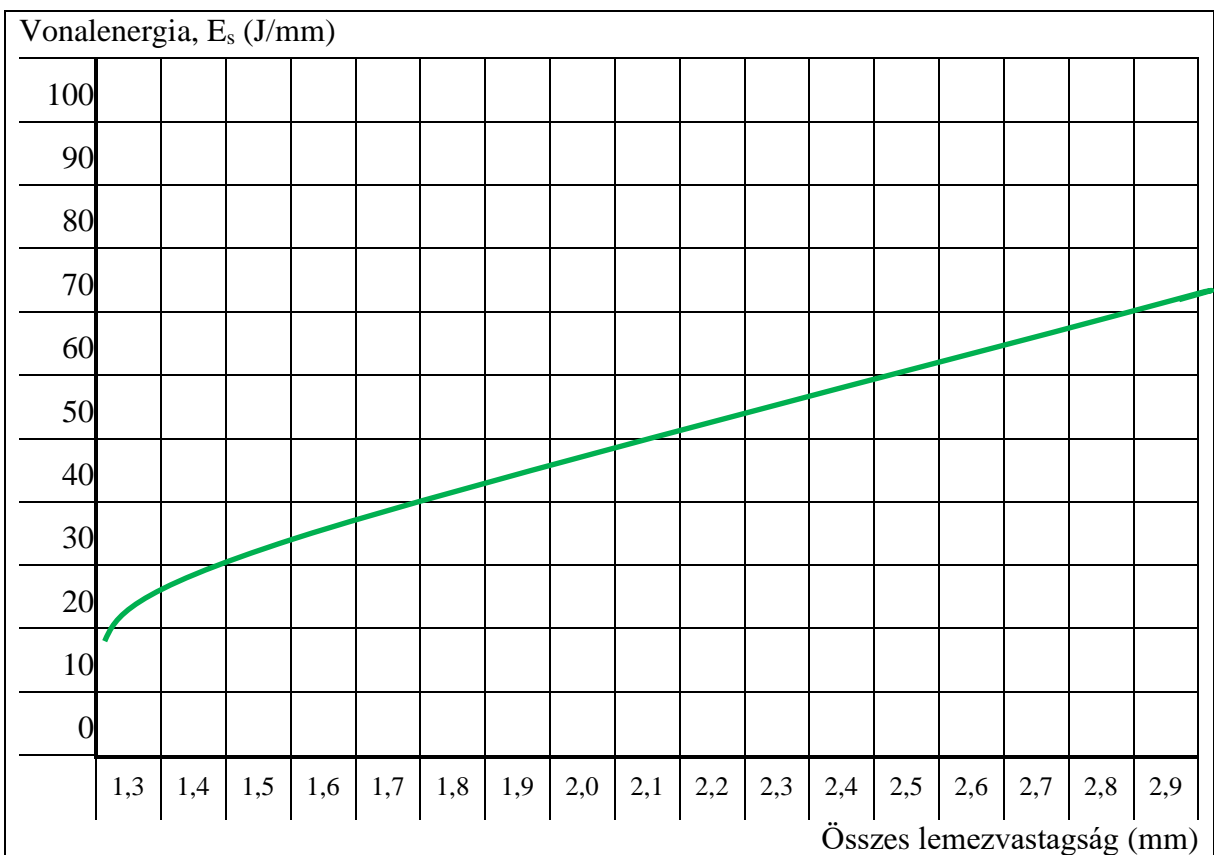
A 9. ábrán látható, hogy a dudor megfelelően ellátja a távtartó funkcióját, és a varrat minősége is megfelelő lesz.



9. ábra A #D2-2-es dudor (bal) és segítségével kialakított hézagolt varrat (jobb)

2.8 Paraméter-ablak a kísérleti hegesztésekhez

A kísérleti hegesztések megtervezéséhez előzetes vakvarratos hegesztések alapján, az alkalmazandó lemezpárosításokhoz használható hegesztési paraméterekre elkészítettük az összes lemezvastagság-vonalenergia grafikont (10. ábra), vagyis meghatároztuk a lemezpárosítások teljes áthegesztéséhez javasolt vonalenergia értékét, a hegesztendő összes lemezvastagság függvényében, $d = 0$ mm-es fókuszpozíciónál.

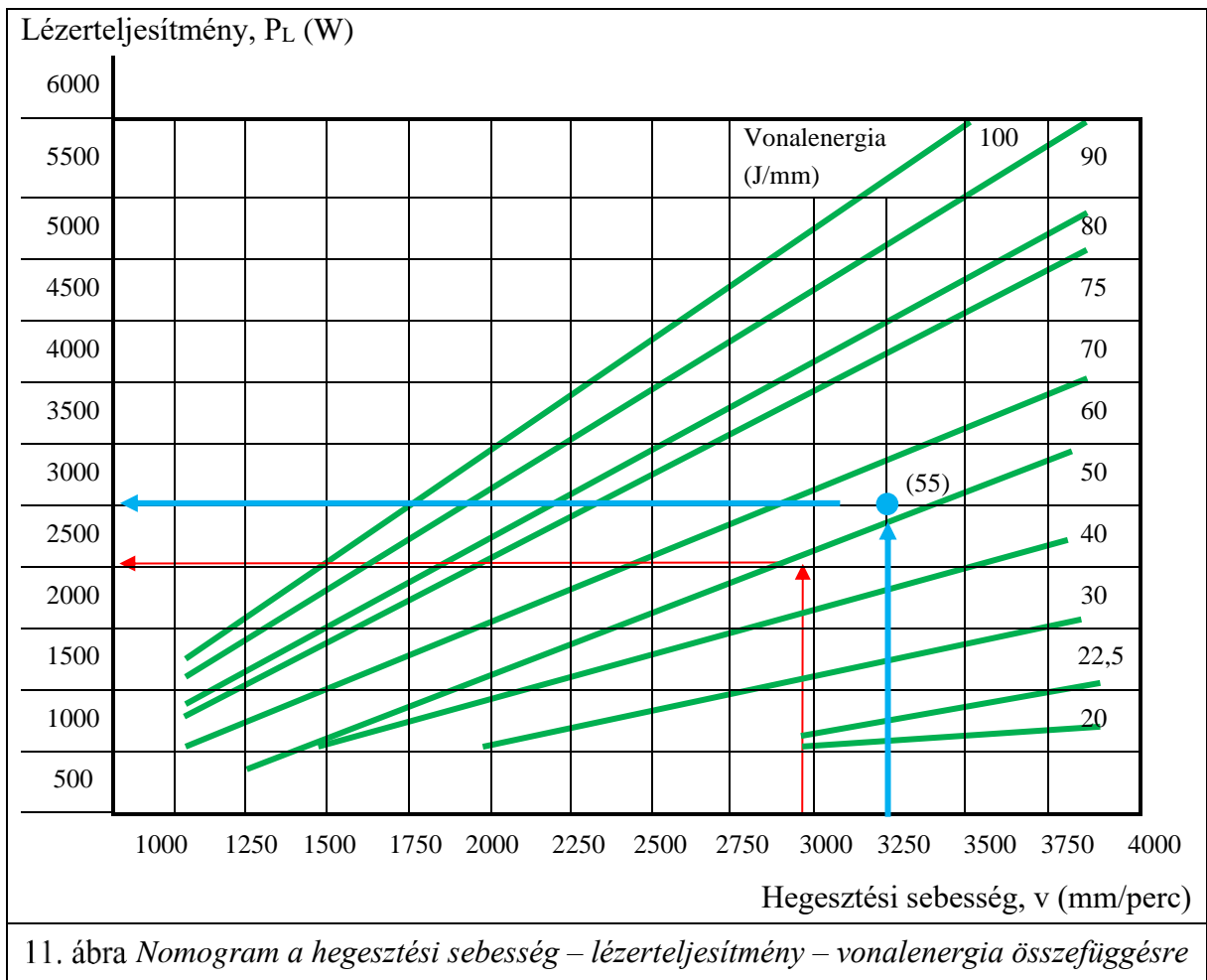


10. ábra Összes lemezvastagság – vonalenergia grafikon

Szakirodalmi adatokat és a korábbi vizsgálati eredményeinket figyelembe véve behatároltuk a paraméterek alkalmazható tartományát:

- vonalenergia maximuma: $E_s = 100 \text{ J/mm}$,
- hegesztési sebesség maximuma: $v = 4000 \text{ mm/perc}$,
- összes lemezvastagság maximuma: $t = 3,0 \text{ mm}$,
- lézerteljesítmény maximuma: $P_L = 6000 \text{ W}$,

A paraméter-ablak alapján a három lényeges paraméterre (a hegesztési sebességre, a lézerteljesítményre és a belőlük számítható vonalenergiára) elkészítettünk egy nomogramot, melynek segítségével a hátról bármely két paraméter alapján meghatározható a harmadik (11. ábra).



A nomogram elkészítéséhez az alábbi egyenletet alkalmaztuk:

$$P_L = E_s \cdot v / 60$$

ahol: P_L = számított lézerteljesítmény (W),

E_s = 43. ábrából meghatározott vonalenergia (J/mm),

v = kiválasztott hegesztési sebesség (mm/perc).

A 11. ábrán behúzott görbe jelzi az egyes összes lemezvastagságok teljes átolvadású lézersugaras hegesztéséhez várhatóan szükséges vonalenergia értékét mind vízszintes, mind függőleges hegesztési pozícióhoz, és mindkét kivitelhez.

A lemezpárosítások teljes áthegesztéséhez szükséges vonalenergia értéke alapján a 44. ábra nomogramjának megfelelő egyenese segítségével meghatározható a hegesztési sebesség – lézerteljesítmény paraméter pár.

A 11. ábra nomogramján a piros nyilak példaként jelzik egy 50 J/mm értékű vonal-energiánál az összetartozó hegesztési sebesség és lézerteljesítmény értékét (a példában egy 3000 mm/perc nagyságú hegesztési sebesség esetén 2500 W lézerteljesítményt kell alkalmazni, amennyiben 50 J/mm vonalenergiát akarunk biztosítani a hegesztéshez).

A 11. ábra nomogramján a kék nyilak példaként jelzik egy közbenső vonalenergia (itt 55 J/mm) értékéhez tartozó hegesztési sebesség és lézerteljesítmény értékét. A példában egy 3250 mm/perc nagyságú hegesztési sebesség esetén 3000 W lézerteljesítményt kell alkalmazni, ha 55 J/mm vonalenergiát akarunk biztosítani a hegesztéshez.

A 11. ábra kapcsán megjegyezzük, hogy más értékű hegesztési sebességet is választhatunk, de a nomogram alapján hozzá kell illeszteni a megfelelő lézerteljesítményt annak érdekében, hogy a vonalenergia szükséges értéke ne változzon. A hegesztési sebesség megválasztásánál azonban figyelembe kell venni a 2.2.1 és 2.2.2 fejezetekben leírtakat is.

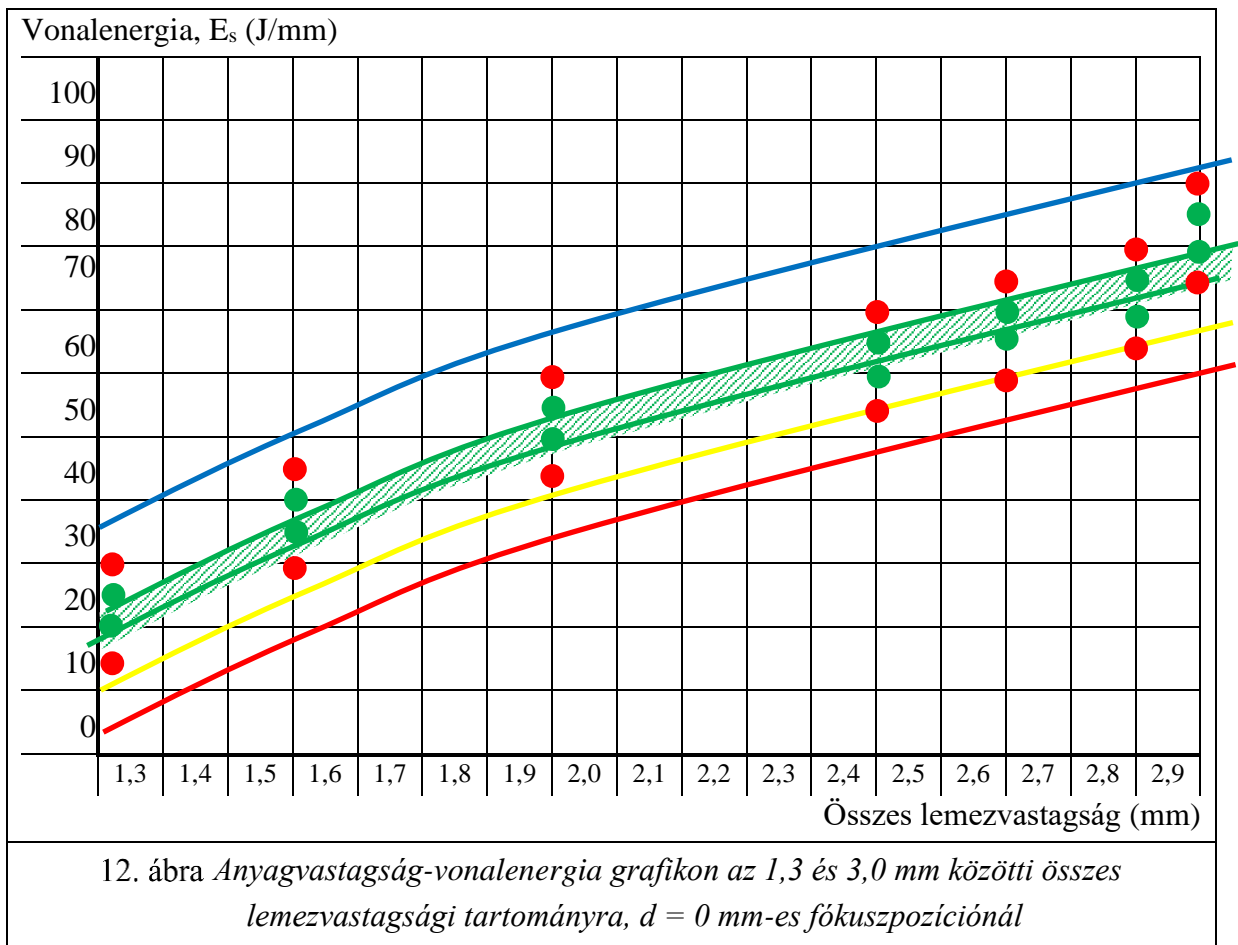
2.8.1 Hegesztési paraméterek a kísérleti hegesztésekhez

Jelenlegi tapasztalataink szerint azt feltételezzük, hogy a kísérleti hegesztések elvégzése és kiértékelése alapján az általunk (és az üzemi gyártásban is) a lézersugaras hegesztéshez alkalmazandó 1,3 és 3,0 mm közötti összes lemezvastagsági tartományra megszerkeszthetjük a 12. ábra szerinti anyagvastagság-vonalenergia grafikont.

Azt feltételezzük, hogy az elvégzendő kísérleti hegesztések beolvadási eredményeinek alapján az 1,3 és 3,0 mm közötti összes lemezvastagsági tartományra kijelölhetők azok a vonalenergia tartományok, ahol:

- **a piros színű görbe** alatti tartományban: nem készíthető kötés (nincs kötés),

- **a sárga színű görbe** jelezni fogja azt az alsó vonalenergia értéket, amivel az adott összes lemeztvastagság már nem hegeszthető át teljesen, legfeljebb az alsó lemez vastagságának 30 %-ig lehet beolvadást elérni (részleges átolvadás),
- **a zöld színű görbék** jelezni fogják azt a vonalenergia sávot, amelyben az adott összes lemeztvastagság biztonsággal áthegezhethető lesz (teljes átolvadás),
- **a kék színű görbe** jelezni fogja azt a felső vonalenergia értéket, amivel az adott összes lemeztvastagságnál a lézersugár már kedvezőtlen megjelenésű varratokat.



2.9 A 2. fejezethez kapcsolódó Edutus kutatási jelentések

- [1] Vakvarratos hegesztések; a hegesztési paraméterek tartományának meghatározására szolgáló előkísérletek, 2017
- [2] Átlapolt-kötéses-hegesztések-I, 2017
- [3] Átlapolt-kötéses-hegesztések-II, 2018
- [4] Átlapolt-kötéses-hegesztések-III, 2018

[5] 3D-s lemezalkatrészek; hegesztési kísérletek, 2019

[6] Dudorhegesztési kísérletek, 2020