



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

SIMON VIRÁG

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK MSc, 1. FÉLÉV)

A technológiai tényezők hatása a varratgeometriára kézi lézeres hegesztés esetén

Témavezetők:

Dr. Varbai Balázs

Adjunktus, BME ATT

Breznay Csaba

Doktorandusz, BME ATT

Konzulens:

Puskás Zsolt

Tulajdonos, ügyvezető, Exasol Kft.

Budapest, 2024

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2024. 11. 10.



.....

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Simon Virág* (EXB8MQ), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2024. 11. 10.



.....

hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	iv
1. Összefoglalás	1
1.1. Summary	2
2. Bevezetés	3
2.1. Célkitűzések	3
2.2. Áttekintés	3
3. Szakirodalmi áttekintés	4
3.1. Lézernyaláb jellemzői, előállítása (Lézernyalábforrások)	4
3.1.1. Gázlézerek	5
3.1.2. Szilárdtest-lézerek	6
3.1.3. Diódalézerek	6
3.2. Lézeres alkalmazások	7
3.2.1. Lézeres hegesztés	8
3.3. Lézerek biztonságtechnikai kérdései	10
3.4. Kézi lézeres hegesztés	12
3.5. Korábbi kutatások a témában	13
4. Kísérleti terv	14
5. Berendezések, anyagok és módszerek	15
6. Eredmények	20
7. Eredmények értékelése/Következtetések	34
7.1. Jövőbeli tervek	35
8. Felhasznált források	36
9. Melléklet	38

* * *

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőimnek, Dr. Varbai Baláznak és Breznay Csabának, akiknek a segítségére a dolgozatom elkészítése és a labormunka elvégzése során egyaránt számíthattam, akik mindig elérhetőek voltak, amikor segítségre volt szükségem és kérdéseimre mindig a legjobb szakmai tudásuk szerint válaszoltak.

Köszönet illeti üzemi konzulensemét, Puskás Zsoltot, hogy fogadott az Exasol Kft.-nél nyári munka formájában és lehetőséget biztosított számomra a kézi lézeres hegesztőberendezésükkel kísérletek elvégzésére, valamint, hogy koordinálta a kísérleti munkámat és felmerülő kérdéseimre mindig szívesen válaszolt. Szeretném továbbá megköszönni Rottenbacher Zsolt hegesztőnek a kísérletek elvégzése során biztosított aktív és önzetlen segítségét.

Ezen kívül köszönöm az Exasol Kft.-nek a kísérletek elvégzéséhez szükséges alapanyagot és berendezéseket, valamint az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésemre bocsátott eszközöket és a kollégáknak a segítséget.

Budapest, 2024. 11. 10.

Simon Virág
Simon Virág

1. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkám során az volt a célom, hogy megvizsgáljam az impulzusfrekvencia, a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség varratgeometriára gyakorolt hatását ausztenites rozsdamentes acél csövek modulált üzemmódú kézi lézeres hegesztése esetén. Ennek érdekében két kísérletsorozatot készítettem, melyek közül az első 7 db, a második pedig 12 db hernyóvarratból áll. Az első kísérletsorozat varratait a lézernyaláb lengetése nélkül és adott kitöltési tényező mellett, az impulzusfrekvenciát varratonként változtatva készítettem el. A második kísérletsorozat esetén az impulzusfrekvencia volt állandó, és a kitöltési tényezőt, valamint a lézernyaláb lengetési szélességet változtattam.

A csöveket a hegesztés után hossz tengelyük mentén elvágtam és elkészítettem a kiértékeléshez szükséges csiszolatokat. A csiszolatokat sztereomikroszkóp alatt vizsgáltam és a hozzátartozó program segítségével fényképeket készítettem, melyeken ezután felvettem a kiértékeléshez szükséges méreteket.

A kiértékelést először szemrevételezéssel végeztem, ezután a mért varratszélesség, varratmélység és varratterület értékek segítségével diagramokat hoztam létre, melyek ezen értékeket ábrázolják az impulzusfrekvencia, a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében, majd ezek alapján vontam le következtetéseket.

A kiértékelések alapján összességében elmondható, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül két részből álló varrat alakult ki. Az impulzusfrekvencia növelése a varratszélesség és a varratterület csökkenését eredményezte. A varratmélység az impulzusfrekvencia változtatásával nem változott, hiszen a beállított paraméterek mellett teljes átolvadású varrat keletkezett. A mikroszkópi képek azt mutatják, hogy az 50 Hz-es és az alatti impulzusfrekvencia értékek beállítása esetén hatalmas porozitások alakultak ki a varratokban, ezen varratok egyike sem fogadható el egyik átvételi szinten sem. A második kísérletsorozat eredményei alapján megállapítható, hogy a beállított paraméterek mellett csak a lézernyaláb lengetése nélküli esetben volt elérhető teljes átolvadás, azonban ezen varratok mindegyikében jelentős porozitás alakult ki, ezen varratok egyike sem fogadható el egyik átvételi szinten sem. A lézernyaláb lengetési szélesség növelése a varratszélesség növekedéséhez, valamint a varratmélység és a varratterület csökkenéséhez vezetett. A kitöltési tényező növelésével nőtt a varratszélesség, a varratmélység és a varratterület is.

Kulcsszavak: *lézeres hegesztés, impulzusfrekvencia, kitöltési tényező, lézernyaláb lengetési szélesség, modulált üzemmód, ausztenites acél, varratgeometria*

1.1. Summary

The aim of my research was to investigate the effects of the pulse frequency, the pulse duty and the wobble width on the weld geometry in modulated mode manual laser welding of austenitic stainless steel tubes. Two sets of experiments were performed, the first consisting of 7 bead-on-plate welds and the second of 12 bead-on-plate welds. The welds of the first series of experiments were prepared without wobbling the laser beam and at a given pulse duty, varying the pulse frequency from weld to weld. For the second set of experiments, the pulse frequency was kept constant and the pulse duty and the wobble width were varied.

After welding, the tubes were cut along their longitudinal axis and the grindings for evaluation were prepared. The grindings were examined under a stereomicroscope and photographs were taken using the associated software, on which the dimensions for the evaluation were then recorded.

The evaluation was first carried out by visual inspection and then, using the measured values for weld width, fusion depth and weld area, I created diagrams showing these values as a function of pulse frequency, pulse duty and wobble width, and drew conclusions.

Overall, the evaluations show that without wobbling the laser beam, two parts of the weld - a wider and shallower part as well as a narrower and deeper part - were formed. Increasing the pulse frequency resulted in a decrease in the weld width and the weld area. The weld depth did not change as the pulse frequency was varied, as a complete fused weld was formed at the set parameters. The microscopic images show that huge porosities were formed in the welds when the pulse frequency values were set at 50 Hz and below, none of these welds being acceptable at any of the quality levels. The results of the second series of experiments show that at the set parameters, only in the case without wobbling the laser beam, complete fusion was achieved, but that all these welds developed significant porosity, none of these welds being acceptable at any of the quality levels. Increasing the wobble width led to an increase in weld width and a decrease in weld depth and area. Increasing the pulse duty also increased weld width, weld depth and weld area.

Keywords: *laser welding, pulse frequency, pulse duty, wobble width, modulation mode, austenitic steel, weld geometry*

2. BEVEZETÉS

Egyetemi tanulmányaimat elkezdve találkoztam életemben először a hegesztéssel, amikor első félévben csatlakoztam a BME Hegesztési Szakosztályhoz. Szakosztályos féléveim alatt sokat tanulhattam a hegesztésről, azonban a laborfoglalkozások és az egyéb szakmai programok keretein belül főként az elterjedtebb ívhegesztési eljárásokkal foglalkoztunk. 2024 nyarán négy hetet tölthettem az Exasol Kft.-nél Rétságon nyári munka formájában, ahol a kézi lézeres hegesztőgépükkel készíthettem kísérleteket. Úgy döntöttem, hogy a TDK-dolgozatom témájául a kézi lézeres hegesztést választom. Egyre több cég forgalmaz és használ Magyarországon is ilyen berendezéseket, ám – újszerű volta miatt – jelenleg nagyon kevés tapasztalat áll rendelkezésre ezzel az eljárásváltozattal kapcsolatban. Úgy gondolom, hogy hasznos lesz kísérletsorozatokot végezni a különböző paraméterek változtatása mellett, megfigyelve, hogy azok milyen hatást gyakorolnak a varratalakra.

2.1. Célkitűzések

Kutatómunkám célja az impulzusfrekvencia, valamint a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség varratgeometriára gyakorolt hatásának vizsgálata ausztenites rozsdamentes acél csövek modulált üzemmódú kézi lézeres hegesztése esetén. Azért választottam a kézi lézeres hegesztést TDK-dolgozatom témájául, mert újszerű volta miatt jelenleg viszonylag kevés tapasztalat áll rendelkezésre ezzel az eljárásváltozattal kapcsolatban, viszont sok helyen használnak ilyen berendezéseket, emiatt úgy gondoltam, hogy igen aktuális téma, amivel kapcsolatban hasznos lenne többet megtudni.

2.2. Áttekintés

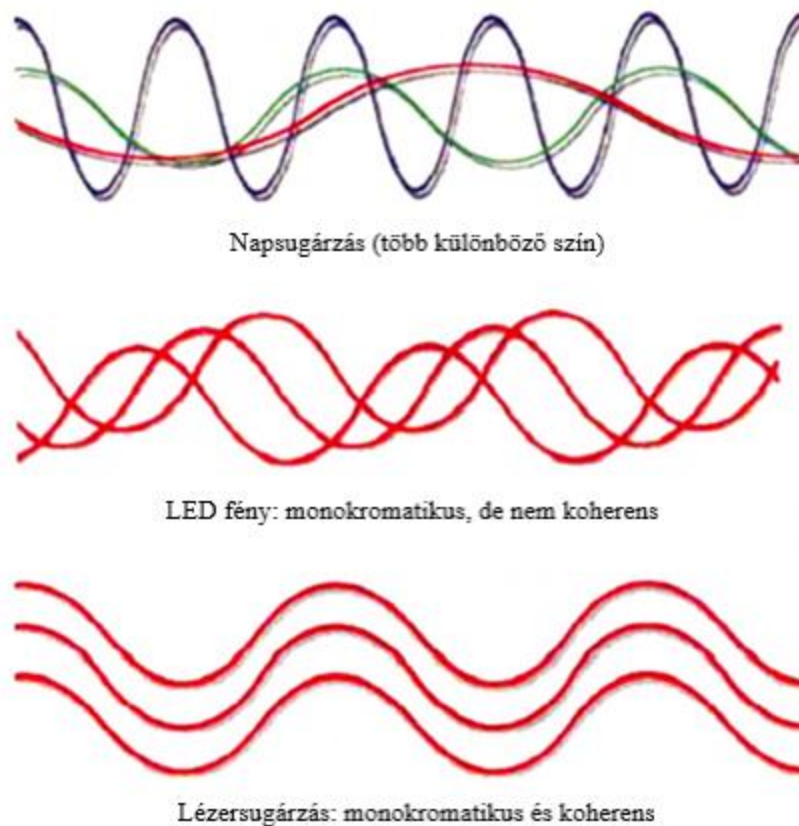
Jelen dolgozatban elsőként áttekintem a lézeres eljárások legfontosabb szakirodalmát, majd kitérek a témában született korábbi kutatásokra és azok eredményeire. Ezután ismertetem a kísérleti munkám során felhasznált berendezéseket és eszközöket, a varratok elkészítésének és kiértékelésének menetét. Ezután bemutatom a kiértékelés eredményeit és levonom a következtetéseket. Végül összefoglalom az elvégzett kísérleti munkát, majd kitekintést teszek a jövőbeli tervekre vonatkozóan.

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A következőkben áttekintem a lézeres eljárások legfontosabb szakirodalmát. Elsőként a lézersugarak jellemzőit és lehetséges előállítási módjait veszem sorra, jellemezve az iparban elterjedt lézernyalábforrásokat. Ezután áttekintem a lézeres eljárások alkalmazási területeit és alkalmazásának előnyeit, különös tekintettel a lézeres hegesztésre. Kitérek a lézeres berendezések biztonságtechnikájára is, ezután következik dolgozatom témájának, a kézi lézeres hegesztésnek a szakirodalmi áttekintése. Végül röviden áttekintem a témában született korábbi kutatásokat és azok eredményeit.

3.1. A lézernyaláb jellemzői, előállítása (lézernyalábforrások)

A lézer szó az angol LASER (=Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) betűszóból ered, melynek jelentése fényerősítés a sugárzás stimulált vagy indukált emissziójával. A lézernyaláb monokromatikus, azaz egy hullámhosszúságú fényből áll, koherens, tehát azonos hullámhelyzet és periódus jellemzi a terjedés irányára merőleges síkon áthaladó fotonokat, valamint kis divergenciájú, közel párhuzamos elektromágneses nyaláb, ahogy az 1. ábrán is látható.



1. ábra: A lézernyaláb jellemzői a napsugárzással és a LED fénnel összehasonlítva [1]

Előállítás a rezonátorban történik, a következőképpen: szükség van egy lézeraktív közegre, azaz lézermédiumra, melynek részei a hordozó anyag és egy gerjesztésre alkalmas szennyező. A lézeraktív közeggel energiát közlünk, azaz gerjesztjük, más szóval pumpáljuk, ennek hatására megnő a gerjesztett részecskék aránya. Ha a gerjesztett részecskék túlsúlyba kerülnek, már nem tud minden kibocsátott foton elnyelődni az anyagon belül, ezt a jelenséget nevezzük populációinverzióknak. A rezonátor két végén egy-egy tükör található. A zárótükör minden ráeső sugárzást visszaver, míg a másik oldali nyitótükör csak a sugárzás egy bizonyos hányadát enged át, így lehetővé téve a stimuláció folyamatos fenntartását. [2]

A lézeres megmunkáló rendszerek felépítése általánosan – akár vágó-, akár hegesztőberendezésekre, vagy egyéb lézeres megmunkáló berendezésekre vonatkozóan – a következő: a rezonátorban előállított lézersugarat a sugárvezető rendszer juttatja el a megmunkáló fejig, melynek feladata a nyaláb formálása és a munkagázok megmunkálás helyére való vezetése. Maga a megmunkáló berendezés pedig a megmunkáló fej, illetve a munkadarab mozgatásának és pozícionálásának szerepét tölti be. [1]

A lézersugárzás előállítása többféle lézernyalábforrás segítségével történhet. A gerjesztett közeg alapján megkülönböztetünk gázlézereket, szilárdtest-lézereket és diódalézereket, valamint egyéb típusú, például excimer- vagy folyadéklézereket, de jelen dolgozatban csak az első három típusra térek ki, mivel azok a leggyakrabban használt lézernyalábforrás-típusok. [3] Az irodalomkutatásban nagy segítséget nyújtott és fő forrásom volt a Buza Gábor által 2012-ben publikált Lézersugaras technológiák I. című könyv, melyet [3]-ként hivatkozom. A szakirodalom áttekintését az e könyvben leírtakat további forrásokból kiegészítve állítottam össze.

3.1.1. Gázlézerek

A gázlézerek, vagy más néven CO₂-lézerek a lézeres hegesztés- és vágás területén közkezdvelten használt lézernyalábforrások, az általuk kibocsátott lézernyalábot 10,6 µm távoli infravörös tartománybeli hullámhossz jellemzi. A kibocsátott lézernyaláb nem látható. Ezen lézernyalábforrások esetében a lézermédium egy gáz halmazállapotú elegy, mely He, N₂ és CO₂ gázok keveréke, ezen gázokat rezonátorgázoknak is nevezzük. A gerjesztés jellemzően elektromos kisülés útján történik, létrehozható folyamatos üzem vagy impulzus üzem is. A N₂ gáz szerepe, hogy a CO₂ molekulának ütközve annyi energiát adjon át, aminek révén az arra az energiaszintre kerül, ahonnan többletenergiáját leadva a folyamat szempontjából lényeges fényt sugároz ki. Miután a CO₂ többletenergiáját elektromágneses sugárzás formájában leadta, a He segít a CO₂ molekulát helyreállítani és újra energiafelvételre képessé tenni. [1] Az előállított

nyalábot hűtött réz tükrökből álló tükrrendszer vezeti a felhasználás – megmunkálás – helyére.
[4]

3.1.2. Szilárdtest-lézerek

A szilárdtest-lézerekben a lézeraktív közeg olyan szilárd befogadó anyag, melyben gerjesztésre alkalmas szennyező van szétszórva. A klasszikus villanólámpás gerjesztésű Nd:YAG szilárdtest-lézerekben a lézermédium egy kristályos YAG, azaz ittrium-alumínium-gránát rúd neodímium szennyezővel. A szilárdtest-lézerek optikai úton gerjeszthetők (villanó)lámpák vagy lézerdiódák fényével, a gerjesztés módja alapján megkülönböztetünk lámpapumpált és diódapumpált lézereket. Villanólámpás gerjesztéssel csak impulzus-, lézerdiódás gerjesztéssel impulzus- és folyamatos üzem is elérhető. A diódapumpált szilárdtest-lézerek fő előnyei a lámpapumpált változathoz képest a nagyjából kétszeres sugárminőség, négyszeres hatások és az akár nagyságrenddel kedvezőbb szervizigény, mely annak köszönhető, hogy nem kell jelentős leállási idővel számolni a kis élettartamú lámpa cseréje miatt. Magasabb beruházási költségeihez alacsonyabb üzemeltetési költségek társulnak, így összességében elmondható, hogy a diódapumpált lézerek gazdaságosabbak lámpapumpált társaiknál, ezáltal elterjedtebbek is, a korszerű szál- és diszk-lézereket így gerjesztik. A szilárdtest-lézerek által előállított, nem látható lézernyaláb hullámhossza 1064 nm, mely a közeli infravörös tartományba tartozik. A fiber lézerek, azaz szállézerek esetén a lézermédium szennyezett optikai kábel. A több, eltérő törésmutatójú anyagból készülő szál magja a legnagyobb törésmutatójú lézermédium. A pumpáló lézernyaláb az ezt körülvevő, kisebb törésmutatójú köpenyben halad. E körül található egy még kisebb törésmutatójú réteg, melynek feladata, hogy a pumpáló sugár teljesítménye se vesszen kárba. A mechanikai védelem biztosítására további burkolórétegeket találunk az optikai szál körül. Léteznek továbbá diszk-lézerek, melyeknél az összterfogathoz képest lényegesen nagyobb felületen intenzívebb hűtés valósítható meg. A diszk-lézerek esetén a pumpáló sugárzás egy áthaladás alkalmával csak részben tud elnyelődni, így azt egy erre a célra kifejlesztett tükrrendszer segítségével 16, esetleg 32 alkalommal átvezetik a korongon, melynek hatására az energiája szinte maradéktalanul elnyelődik. [3]

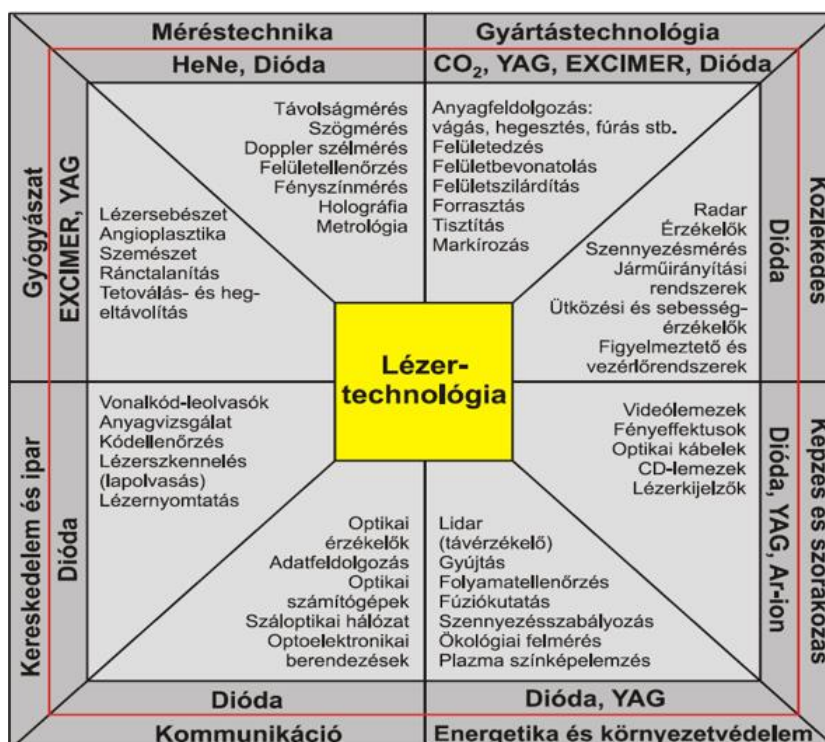
3.1.3. Diódalézerek

A diódalézerek esetén a félvezető diódán átfolyó áram közvetlenül fénné, sőt lézernyalábbá alakul. Mivel egy diódával viszonylag kis fénytelsítmény állítható elő, így anyagmegmunkálási célokra, ahol nagy teljesítménysűrűségre van szükség, tömbösítve készítik. Ilyen módon a legkorszerűbb diódapumpált lézerek esetén akár 10 kW teljesítmény is

elérhető. A diódalézerek legnagyobb problémája a maradékhő elvezetése, nagy hatásfokuk ellenére a maradékhő csaknem a keletkező fényteljesítménnyel egyenlő. Emiatt a diódalézerek esetén a hűtésre különösen nagy figyelmet kell fordítani. [3]

3.2. Lézeres alkalmazások

A lézernyalábok különböző típusait számos területen elterjedten alkalmazzák, melyeket a 2. ábra szemléltet.

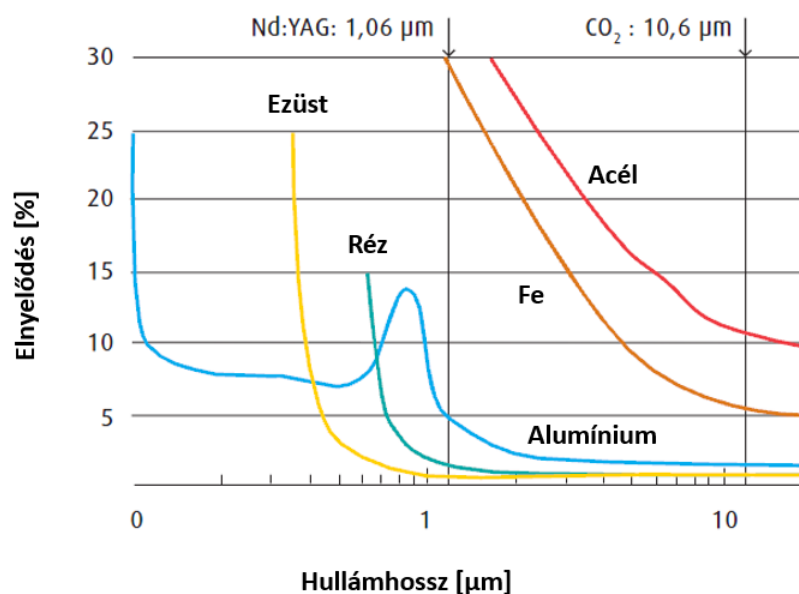


2. ábra: A lézeres technológiák alkalmazási területei [3]

Mivel kísérleteimet kézi lézeres hegesztéssel végeztem, jelen dolgozatomban a lézeres anyagmegmunkálások közül a lézeres hegesztésre fogok kitérni, mely a lézeres vágás után a második legelterjedtebben használt lézeres eljárás. A lézeres anyagmegmunkálások fizikai elve a következő: a fém felületére érkező lézernyaláb a fémes anyagba behatolva kölcsönhatásba lép az elektronokkal, miközben energiája disszipálódik, az elektronok energiája pedig megnő. A megnövekedett energiájú elektronok a rácspontokon rezgő fémionoknak ütközések útján átadják energiájukat, melynek eredményeképpen a fém felmelegszik. [2] A lézeres anyagmegmunkáló eljárásokat számos előnyüknek köszönhetően igen elterjedten használják, közülük a legfontosabbak a lézeres vágás, a lézeres hegesztés, illetve a lézeres felületmódosító technológiák, például a lézeres edzés, -felületötvöztetés, és -felülettisztítás. A lézeres anyagmegmunkáló eljárások használatának hatalmas előnye, hogy a megmunkáló szerszám (fény) teljesen kopásmentes, így jóval gazdaságosabbak, mint a hagyományos eljárások, és a

kopóalkatrészek (fúvóka, optikai elemek) költsége is sokkal kisebb. További előny, hogy a lézeres megmunkálás során a munkadarabra a mechanikai megmunkálásokhoz képest jóval kisebb erő hat, így csekély deformációval és maradó feszültségekkel lehet számolni. A lézeres megmunkálások előnye továbbá az elérhető nagy megmunkálási sebesség, mely a lézernyaláb által a fémnek átadott nagy teljesítménysűrűségből fakad. Szintén a nagy lézernyaláb-intenzitásból és a nagy megmunkálási sebességből következik, hogy csekély lesz a fajlagos hőterhelés a munkadarabon, ezáltal a deformáció is. A lézeres technológiákra általánosságban jellemző, hogy kiválóan automatizálhatóak, a technológiai paraméterek rendkívül precízen szabályozhatók és nagyon jó megmunkálási minőség érhető el a használatukkal. [3]

Az egyes alapanyagok megmunkálhatósága erősen függ a lézernyaláb alapanyagban történő elnyelődésétől. A szilárdtest-lézer, illetve gázlézer segítségével előállított lézernyaláb elnyelődési hányada a hullámhossz függvényében az egyes anyagcsoportokra a 3. ábrán látható.



3. ábra: Szilárdtest-lézer és gázlézer által előállított lézernyaláb elnyelődése az egyes anyagcsoportok esetén, melyből következik a megmunkálhatóság [1]

3.2.1. Lézeres hegesztés

A lézeres hegesztés a lézeres vágást követően a fémmegmunkálások közül a legelterjedtebb lézeres anyagmegmunkáló eljárás. A hagyományos hegesztési eljárásokkal összehasonlítva a lézeres hegesztésnek számos előnye van. Az erősen koncentrált lézernyaláb kis területre fókuszál, így a fémnek csak egy kis felületét olvasztja meg, ezáltal a hőhatásövezet kisebb lesz. A lézeres hegesztési eljárás alacsonyabb hőbevitelt igényel a hagyományos ömlesztőhegesztésekhez képest, ami minimálisra csökkenti a hő által kiváltott belső

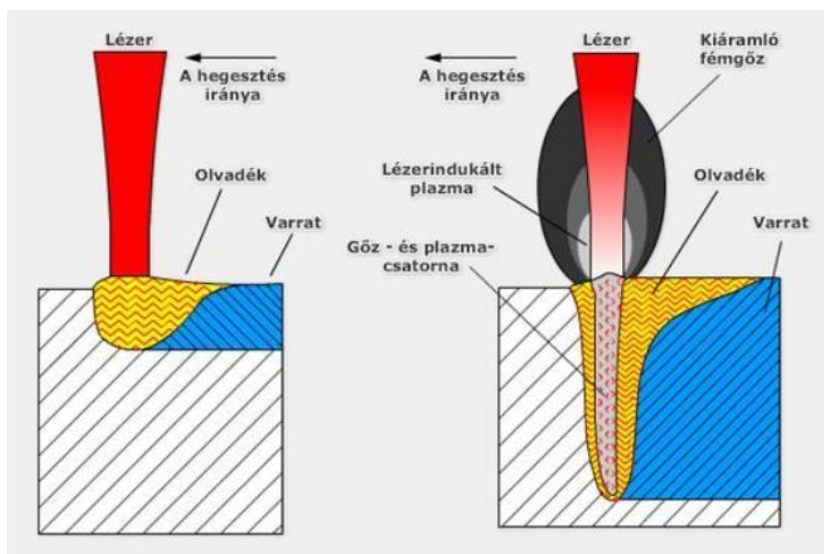
feszültséget és a munkadarab torzulását. Bár a kezdeti beruházás magas, az eljárás költséghatékonyabbnak bizonyul, mint a hagyományos hegesztés, ugyanis a lézeres hegesztés gyorsabb feldolgozási sebességet kínál, ami nagyobb termelést és gyorsabb átfutást eredményez. A nagy pontosság, a gyorsabb feldolgozási idő, a széleskörű felhasználhatóság és az állandó kiváló minőség miatt a lézeres hegesztés számos alkalmazási területtel rendelkezik, és jelentősége napjainkban egyre nő. Fő felhasználási területei az autóipar, az acélszerkezet- és hajógyártás, illetve a szerszámgyártás. [5]

Két változatát különböztetjük meg a darab felületén kialakuló teljesítménysűrűség szempontjából: a hővezetési és a mélyvarratos lézeres hegesztést. A két változat közötti határt a 10^6 W/cm^2 teljesítménysűrűség képezi, e határ alatt hővezetési, felette pedig mélyvarratos hegesztésről beszélünk.

Hővezetési hegesztés esetén a darab felszínére érkező fotonok $<1 \text{ mm}$ mélységben elnyelődnek, felhevítve ezzel a felszíni réteget. A felszíni rétegbe jutó lézernyaláb energiája csak hővezetéssel tud a mélyebb rétegekbe jutni. A hőforrásunk ebben az esetben a lézernyaláb darab felületén megjelenő foltjának megfelelő átmérőjű, nagyon vékony korong lesz, melybe a lézernyalábból folyamatosan, mindig azonos mennyiségű energia érkezik. Amennyiben adott időegység alatt a korongba jutó energia és hőmennyiség nagyobb, mint amennyit az anyag el tud vezetni, a korong és környezete folyamatosan melegszik, végül megolvad. A lézernyaláb olvadékfilm felületére jutó nagy teljesítménysűrűsége intenzív olvadékáramlást okoz, gyorsan nő az olvadék mennyisége. A hővezetési hegesztéssel kialakítható varrat fél lencse alakú. A hővezetési hegesztést jellemzően vékony lemezek, csövek tompakötéseinek kialakítására használják, hozaganyag hozzáadása nélkül.

Mélyvarratos hegesztés esetében a folyamat kezdete azonos a hővezetési lézeres hegesztés folyamatával. Kellően nagy lézernyaláb-intenzitás (a 10^6 W/cm^2 -es határ) esetén a kialakult olvadék felszínének hőmérséklete elérheti a forráspontot, az olvadék felszíne túlhevülve gőzhalmazállapotba jut. Az intenzíven képződő fémgőz az olvadék felszínén növekvő nyomást eredményez, melynek hatására az olvadék felszíne behorpad. A behorpadás következtében nő az abszorpciós felület, tehát az olvadék több energia elnyelésére képes azonos lézernyaláb teljesítmény mellett. A fémgőzképződés intenzitása nő, melynek hatására nő a gőznyomás az olvadék felszínén és még jobban behorpad az olvadék, még jobban nő az abszorpciós felület. Ezt a folyamatot a fémgőzképződés intenzitása tartja fent, kialakul egy „mélyedés”. A nagy teljesítménysűrűségnek köszönhetően a bemélyedés mélysége jellemzően lényegesen nagyobb, mint a tócsa átmérője, így alakul ki a karcsú varratalak. A bemélyedés, más szóval gőzcsonna aljára a lézernyaláb folyamatos tükröződésekkel jut. Az angol nyelvterületen a gőzcsonnára

elterjedt „keyhole”, azaz kulcslyuk szó használatának köszönhetően a mélyvarratos lézeres hegesztést kulcslyukhegesztésnek is nevezik. [3] A 4. ábrán látható a hővezetési és a mélyvarratos lézeres hegesztés elvi ábrája.

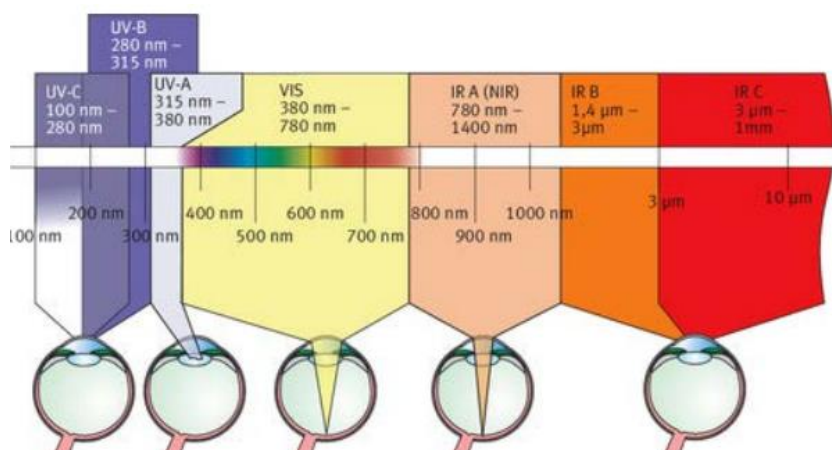


4. ábra: A hővezetési és a mélyvarratos lézeres hegesztés összehasonlítása [3]

3.3. Lézerek biztonságtechnikai kérdései

A lézernyalábforrásokat az általuk kibocsátott teljesítmény és az emberi szemre gyakorolt hatásuk alapján soroljuk osztályokba. Minden lézeres berendezésen kötelező feltüntetni annak osztályba sorolását, melyre a vonatkozó MSZ EN 60825-1:2014/A11:2021 [6] jelölésű „Lézergyártmányok biztonsága 1. rész: Készülékosztályozás és követelmények” című szabvány ad utasítást. Ezen szabvány az 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B és 4 osztályokat különbözteti meg. [7] Az 1-es osztályba sorolható lézernyalábforrások által kibocsátott sugárzás teljesen ártalmatlan, az ilyen berendezések 0,1 W-nál kisebb teljesítmény leadására képesek. Az 1, 1M, 2, 2M és 3R osztályú berendezések által előállított sugárzás az emberi szemet nem veszélyezteti, használatuk nem vet fel biztonságtechnikai kérdéseket. A 3B és 4 osztályba sorolható lézeres berendezések által kibocsátott sugárzás azonban már ártalmas az emberi szemre, a 4-es osztály esetén a szórt visszaverődés is káros a szemre, valamint bőrkárosodást is okozhat. [3] Az anyagmegmunkálási célokra használt lézeres vágó- és hegesztőberendezések kivétel nélkül a 4-es osztályba sorolhatók, így használatuk közben, különös tekintettel a szabad pisztolymozgású kézi lézeres hegesztésre, speciálisan a lézersugarak szórt visszaverődése ellen védelmet biztosító védőszemüveg használata kötelező és a teljesen fedett bőrfelületet biztosító ruházat, valamint védőkesztyű viselése erősen ajánlott. Ahogy az 5. ábra szemlélteti, a közeli infravörös tartományba eső lézersugárzás veszélye abban rejlik, hogy az emberi szem az ilyen

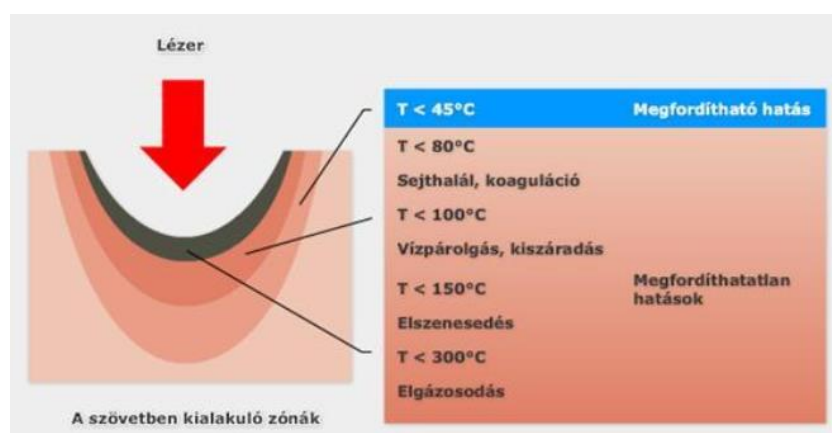
hullámhosszúságú sugárzást a retinára fókuszálja, melynek eredményeképpen megnő a sugárzás teljesítménysűrűsége.



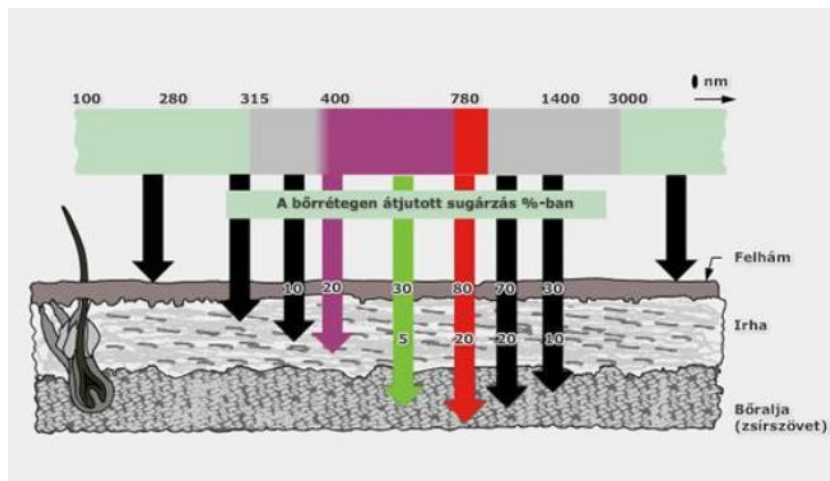
5. ábra: A különböző hullámhosszúságú fénysugárzások szemre gyakorolt hatása [3]

A retinánál található látóidegek igen könnyen károsodhatnak, amennyiben a szem direkt vagy szórt sugárzásnak van kitéve, amely ideiglenes vagy végleges vaksághoz vezethet. [3]

Fontos megjegyezni, hogy a szilárdtest-lézerekkel előállítható lézersugárzás hullámhossza ($\sim 1 \mu\text{m}$) a közeli infravörös tartományba esik, míg a CO_2 -lézerek lézersugarainak hullámhossza ($10,6 \mu\text{m}$) a távoli infravörös tartományba. A gázlézerekkel előállított lézersugárzás szintén ártalmas a szemre, csak az ilyen lézersugárzás nem a retinánál, hanem a szemlencse előtt, a szaruhártyánál vagy a csarnokvízben nyelődik el, a szaruhártya megégését és esetlegesen szintén vakságot okozva. Ahogy a 6. és 7. ábrákon is látszik, a teljesítménysűrűség növelésével, azaz a lézernyaláb fókuszálásával visszafordíthatatlan hatások következnek be az emberi bőrszövetben, ami miatt kiemelkedő fontossággal bír a megfelelő védőruházat viselése. A CO_2 -lézerek által kibocsátott lézersugárzás bőrrel érintkezve elsősorban a felületen okoz égési sérülést, míg a szilárdtest-lézerek lézersugarai bőrrel érintkezve mély égési sérüléseket okoznak, roncsolják a vörös vértesteket. [8]



6. ábra: A lézersugárzás hatása a teljesítménysűrűség növelésével az emberi bőrszövetre [3]



7. ábra: A különböző hullámhosszú fénysugárzások elnyelődése az emberi bőrszövetben [3]

A kézi lézeres hegesztő munkahely kialakításánál megfogalmazható célként, hogy a megfelelő sugárvédelmi rendszer alkalmazásával a 4-es osztályú lézeres berendezést körülvevő „burkolaton” kívül 1-es osztályba sorolható, azaz teljesen ártalmatlan sugárzás valósuljon meg. Ez elérhető a lézernyaláb véletlenszerű kijutásának megakadályozásával függöny, zárt tető és megfelelő festés, valamint a visszaverő felületek megszüntetésének segítségével. Ezen kívül fontos a biztonságos üzemelés érdekében a megfelelő elszívás, tűzjelző rendszer és biztonsági kijelzők, kapcsolók alkalmazása is. [9]

3.4. Kézi lézeres hegesztés

A dolgozatom témájaként szolgáló kézi lézeres hegesztés is rendelkezik a lézeres hegesztésről elmondható előnyökkel (kisebb hőhatásövezet, csekély torzulás, nagy feldolgozási sebesség, nagy pontosság, széleskörű felhasználhatóság, állandó kiváló minőség), melyeknek köszönhetően napjainkban egyre elterjedtebbé válik, de mégis egy viszonylag új eljárásváltozatnak számít a hegesztés területén. A kézi lézeres hegesztés számos olyan iparágban használható, mely összetett és rendhagyó hegesztési folyamatokat igényel, emellett pedig fontos a varratok esztétikája, például járműipar, konyhaiipari berendezések, védőkorlátok és rozsdamentes acél házak, burkolatok gyártása. [9] Amennyiben a geometriai kialakítás lehetővé teszi, érdemes a hozaganyag hozzáadása nélküli eljárásváltozatot választani, ugyanis ebben az esetben lehet a lézeres hegesztés kedvező tulajdonságait maximálisan kihasználni.

Napjainkig az iparban a lézeres hegesztésnek a gépesített változata volt elterjedt, kontrollált pisztolymozgásokkal és leburkolt munkatérrel annak érdekében, hogy a lézernyaláb ne juthasson ki belőle és a nagy energiájú direkt vagy szórt lézersugárzás ne tegyen kárt a kezelő személyzetben. A lézeres hegesztés kézi változata, azaz a hegesztőpisztoly kézzel való

irányítása munkavédelmi és biztonságtechnikai kérdéseket vet fel, emiatt használata kevésbé elterjedt az iparban.

3.5. Korábbi kutatások a témában

A következőkben áttekintem a témában született korábbi kutatásokat és azok eredményeit.

Francisco Cavilha Neto, Milton Pereira, Luiz Eduardo dos Santos Paes, Marcio Celso Fredel és Luiz Fernando Bossa kutatásából kiderül, hogy a kis impulzusfrekvenciák (20 Hz és 25 Hz) beállításával hegesztett varratok jelentős mennyiségű, nagy méretű gömbszerű porozitást tartalmaztak. Eredményül kapták továbbá, hogy a nagyobb impulzusfrekvencia értékek (50 Hz és 100 Hz) esetén kevesebb és kisebb méretű gázzárvány keletkezett. A szerzők ezenkívül kísérleteik alapján megállapították, hogy az impulzusfrekvencia csökkentése a varratszélesség növekedéséhez vezetett. [10] Celalettin Yuce kutatása során kimutatta, hogy a lézernyaláb lengetési szélesség növelésével nő a varratszélesség. [11]

Petr Horník, Hana Šebestová, Jan Novotný és Libor Mrňa eredményül kapta, hogy a porozitás mértéke csökken a varratmélység és a varratszélesség arányának csökkentésével. Megállapították továbbá, hogy a lézernyaláb lengetése a lengetés nélküli esethez képest a varratmélység csökkenését eredményezi, valamint, hogy a varratmélység és a varratszélesség aránya mindig kisebb a lézernyaláb lengetése nélküli esethez képest, függetlenül a hegesztett anyagminőségtől. Ezenkívül arra a következtetésre jutottak, hogy a lézernyaláb lengetési szélesség növelése jelentősen növeli a varratszélességet és csökkenti a varratmélységet. [12]

4. KÍSÉRLETI TERV

Kutatómunkám során két kísérletsorozatot készítek, melyek közül az első 7 db, a második pedig 12 db hernyóvarratból áll. Mindkét kísérletsorozat esetén állandó a haladási sebesség, a teljesítmény, valamint a felhasznált védőgáz típusa és térfogatárama. A varratokat modulált üzemmódban készítem el, tehát beállítható még az impulzusfrekvencia és a kitöltési tényező.

A haladási sebességet az előkísérleteink alapján határozom meg, ez mindkét kísérletsorozat esetén 80 cm/min. Szintén az előzetes kísérleteink alapján 500 W teljesítményt állítok be és 4.5 tisztaságú nitrogént használok védőgázként 18 l/min térfogatárammal.

Az első kísérletsorozatot a lézernyaláb lengetése nélkül készítem el. A kitöltési tényezőt 70%-ra állítom be, és az impulzusfrekvenciát változtatom. A vizsgált impulzusfrekvenciák: 10 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, valamint 400 Hz.

A második kísérletsorozat esetén azt vizsgálom, hogy különböző kitöltési tényezők mellett hogyan befolyásolja a lézernyaláb lengetési szélessége a varratalakot. A kitöltési tényezőt 70% és 100% között 10%-onként változtatom, a lézernyaláb lengetési szélességét 0 mm (ez tehát a lengetés nélküli eset) és 2 mm között állítom. Az impulzusfrekvencia a második kísérletsorozat esetén 200 Hz, a lézernyaláb lengetés frekvenciája az 1 mm-es és a 2 mm-es esetben szintén 200 Hz.

5. BERENDEZÉSEK, ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kísérleteket az amerikai IPG Photonics Corporation nevű cég által gyártott LightWELD XC típusú optikai szálas kézi lézeres hegesztőgéppel végeztem, melynek fényképe a 8. ábrán látható. A hegesztőgép maximálisan 1500 W teljesítményű monokróm, koherens és kis divergenciájú lézernyaláb előállítására képes, melynek hullámhossza 1080 nm. A gép 4-es besorolású lézerberendezésnek minősül, mely azt jelenti, hogy az általa kibocsátott teljesítmény folytonos üzemben meghaladja a 0,5 W teljesítményt. A 4-es osztályba tartozó gépek által kibocsátott lézersugárzás bőrkárosodást okozhat, valamint direkt- és szórt formában is károsítja a szemet, így a szükséges védőeszközök – speciális védőszemüveg, kesztyű és zárt ruházat – használata kötelező. [3]



8. ábra: A kísérletekhez használt lézeres hegesztőgép

A gép kezelőfelületén szabályozható a teljesítményszint. Rendelkezésre állnak a gyártó által beprogramozott, különböző anyagminőségekre és anyagvastagságokra optimalizált

paramétercsomagok, melyeket a kódjukkal lehet előhívni, ezeket is itt lehet kiválasztani. Ezen ajánlások kódjai láthatóak a 9. ábrán. Sajnos azonban a gyártó nem adja ki, hogy melyik paramétercsomag milyen paramétereket tartalmaz, így ezek kísérletek útján deríthetők ki. A gép kezelőfelülete az előre beállított paraméterek korrekciójára ad lehetőséget. Ha nem folyamatos, hanem modulált üzemmódban dolgoznánk, vagy nem a gyártó által ajánlott paramétercsomagokból választanánk, akkor egy online, számítógépről elérhető kezelőfelület áll rendelkezésre, melyen lehetőség van a teljesítmény, a lézernyaláb lengetési szélesség és frekvencia, az impulzusfrekvencia, valamint a kitöltési tényező beállítására.

Saja't

LightWELD

NEED SUPPORT?

1-508-506-2877

LightWELD@ipgphotonics.com

GettingStarted.HandHeldLaserWelder.com

WELDING							CLEANING		
METAL	SHIELDING GAS	MODE	WELD DEPTH				MODE	INTENSITY	
			0.040" (1.0mm)	0.080" (2.0mm)	0.120" (3.0mm)	0.160" (4.0mm)		Low	High
STAINLESS STEEL	NITROGEN	CW	A1	A2	A3	A4	C	P1	P2
		M	C1	C2	C3	-			
		W	A6	A7	A8	A9			
MILD STEEL	NITROGEN	CW	E1	E2	E3	E4	C	P2	P3
		M	F1	F2	F3	-			
		W	E6	E7	E8	-			
GALVANIZED STEEL	NITROGEN	CW	-	-	-	-	C	P2	P3
		M	J1	J2	J3	-			
		W	-	-	-	-			
ALUMINUM 3XXX	ARGON	CW	-	-	-	-	C	U0	U1
		M	H1	H2	H3	H4			
		W	-	-	-	-			
ALUMINUM 5XXX	ARGON	CW	-	-	-	-	C	U0	U1
		M	L1	L2	L3	L4			
		W	L6	L7	L8	L9			

TACK							
METAL	SHIELDING GAS	MODE	PROGRAM	TACK DEPTH			
				0.040" (1.0mm)	0.080" (2.0mm)	0.120" (3.0mm)	0.160" (4.0mm)
STAINLESS STEEL	NITROGEN	T	A5	300 W	550 W	800 W	1150 W
MILD STEEL	NITROGEN	T	E5	400 W	650 W	900 W	1250 W
ALUMINUM 5XXX	ARGON	T	L5	700 W	800 W	1100 W	1500 W

1) SELECT THE TACK PROGRAM 2) ADJUST POWER CONTROL TO MATCH DESIRED TACK DEPTH

CW Continuous Wave: Maximum penetration & travel speed	M Modulation: Reduced energy for slower welding with less heat input	T Tack: Small and temporary welds that hold parts together for final welding	W Wire Welding: Used when filler material is required to help bridge gaps or produce fillet weld	C Cleaning: Pre & post weld joint cleaning to improve weld quality, consistency, & appearance
--	--	--	--	---

Cleaning Presets & Wire Feeder Programs require optional hardware (LightWELD XC & Wire Feeder respectively)

DOCCHRDMP5XX0025 R3

9. ábra: A gyári paramétercsomagok kódjai az egyes anyagminőségekre és anyagvastagságokra

A varratok elkészítéséhez 4.5 tisztaságú nitrogén gázt használtam, melynek banáncímkéjéről készült fénykép a 10. ábrán látható.



10. ábra: A varratok elkészítéséhez használt nitrogén gázpalack banáncímkeje

Fontosnak tartom kiemelni, hogy a vizsgálandó hernyóvarratokat forgató berendezés segítségével forgattam az egyenletes haladási sebesség biztosítása érdekében, a kézi lézeres hegesztőpisztolyt pedig a stabilitását biztosítandó készülékbe fogtam be az emberi kéz bizonytalanságából eredő hibák kiküszöbölésének és a varratok reprodukálhatóságának növelése érdekében. A kísérleti varratokat 1,4 mm falvastagságú, 34 mm külső átmérőjű és a 11. ábra szerinti összetételű, 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél csövekre készítettem el, hozaganyag alkalmazása nélkül.

Az 1.4301 rozsdamentes acél kémiai összetétele

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Ni	Ti
≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,10	17,5 - 19,5	-	-	8,0 - 10,5	-

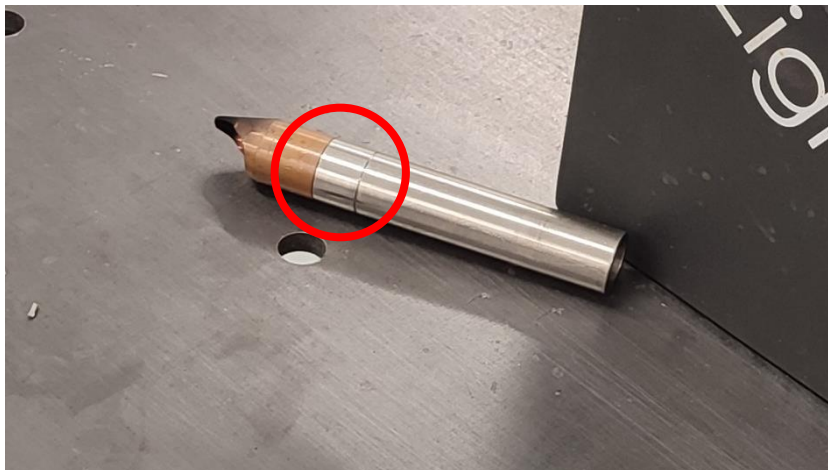
11. ábra: Az 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél kémiai összetétele [13]

A 12. ábrán látható a kísérleti elrendezés. A forgató berendezés által biztosított forgatási sebesség fokozatmentesen, tekerőgomb segítségével állítható. A befogó készülék szerepét a kézi lézeres hegesztőpisztoly gyári tartója töltötte be. A megfelelő kontakt biztosításának érdekében a testkábel a hegesztőpisztolyra csatlakoztattam.



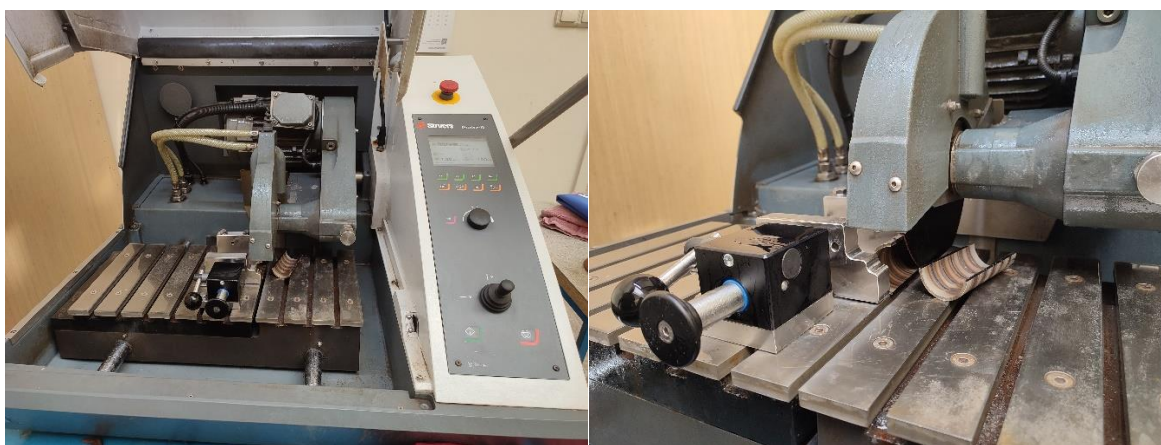
12. ábra: A forgató berendezés és a befogó készülék fényképe

Fontos kiemelni, hogy a kézi lézeres hegesztőpisztoly a készülékbe úgy van befogva, hogy a kibocsátott lézernyaláb ne merőlegesen essen a hegesztendő felületre, mert ilyen esetben a visszaverődő sugár tönkretethetné az optikát. A fókuszpont egy 10 mm-es közdarab segítségével – mely a fúvóka és a szár közé csatlakoztatható menetes kapcsolattal – pozícionálható a felületre. A közdarabról egy fotó a 13. ábrán látható.



13. ábra: A fókuszpont felületre való pozícionálását biztosító közdarab

A kiértékeléshez szükséges csiszolatokat a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék metallográfiai laboratóriumában készítettem el. Annak érdekében, hogy a vizsgált keresztmetszetek pozíciója minden hernyóvarrat esetén megegyezzen, a próbatesteket hossz tengelyük mentén ugyanott vágtam el. Azért, hogy minimális vágás közbeni hőbevitel mellett jó minőségű vágási felületet kapjunk, a vágást a 14. ábrán látható Struers Discotom-10 típusú vízzel hűthető tárcsás vágógéppel végeztem.



14. ábra: Fotók a vízzel hűthető tárcsás vágógépről

A vágás során keletkező félcsöveket lesorjáztam, megtisztítottam és az egyszerűbb csiszolás érdekében beágyaztam. Ezután következett a beágyazott minták csiszolása. Mivel jó vágási felületet értem el az abrazív vizes vágással, így elég volt P600-as csiszolópapírral kezdeni, és innen egyre finomabb szemcseméretű papírra váltva értem el a P2500-as finomságú

csiszolópapírig. A finom csiszolási karcok eltüntetése érdekében 3 μm -es gyémántszemcséket tartalmazó szuszpenzió alkalmazásával políroztam a mintákat, végül tükrös, szinte teljesen karcmentes felületet elérve. A varratgeometriát maratás segítségével tettem láthatóvá. A csiszolatok megmaratásához a következő összetételű Adler megnevezésű marószert használtam:

- 9 g réz-ammónium-klorid
- 150 ml sósav
- 45 g vas(III)-klorid 6-hidrát
- 75 ml desztillált víz

A marószert segítségével – a mintákat 4-5 másodpercig szobahőmérsékleten maratva – sikeresen előhívtam a varratok geometriáját, melyet Olympus SZX 16 típusú sztereomikroszkóp alatt vizsgáltam. A varratokról végül a Stream Essentials nevű program segítségével fényképeket készítettem, melyeken le tudtam mérni a kiértékeléshez szükséges varratszélesség, varratmélység és varratterület értékeket.

A kiértékelést először szemrevételezés útján, a varratok kinézetét értékelve végzem el, ezután a mellékletben található mikroszkópi képeket értékelem ki. Végül a mért varratszélesség, varratmélység és varratterület értékek segítségével – a vágási felület által létrehozott két varratkeresztmetszeten mért értékek átlagolásával – diagramokat hozok létre, melyek ezen értékeket ábrázolják az impulzusfrekvencia, valamint a lézernyaláb lengetési szélesség és a kitöltési tényező függvényében, majd ezek alapján vonok le következtetéseket.

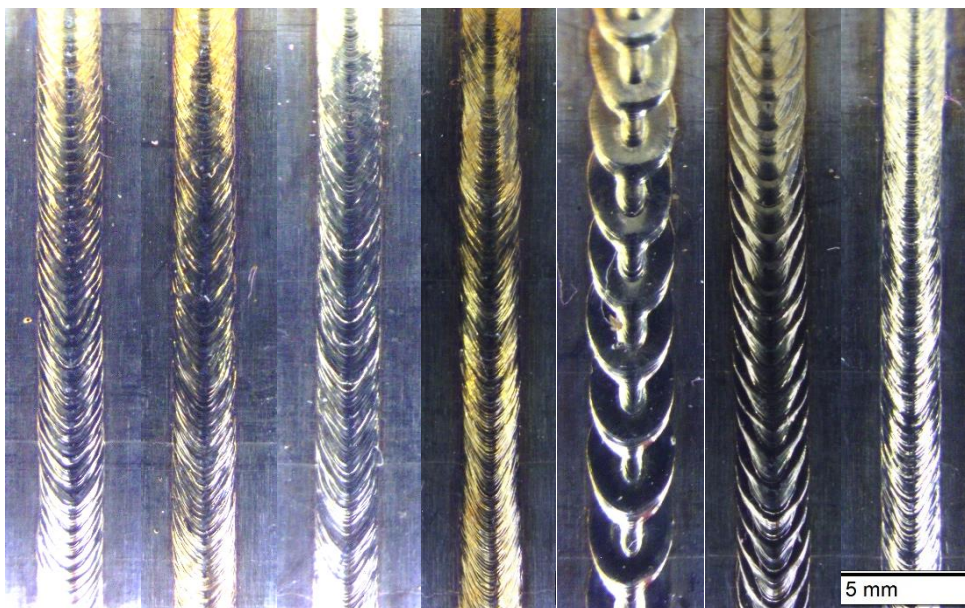
6. EREDMÉNYEK

A 15. ábrán látható az impulzusfrekvencia változtatása mellett hegesztett hernyóvarratokról készített fénykép.



15. ábra: Az impulzusfrekvencia változtatása mellett készített varratok fényképe, a beállított impulzusfrekvencia balról jobbra 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 10 Hz, 25 Hz, valamint 400 Hz

A 16. ábrán láthatóak a varratok felszínéről a sztereomikroszkóphoz tartozó Stream Essentials nevű programmal készített fényképek.

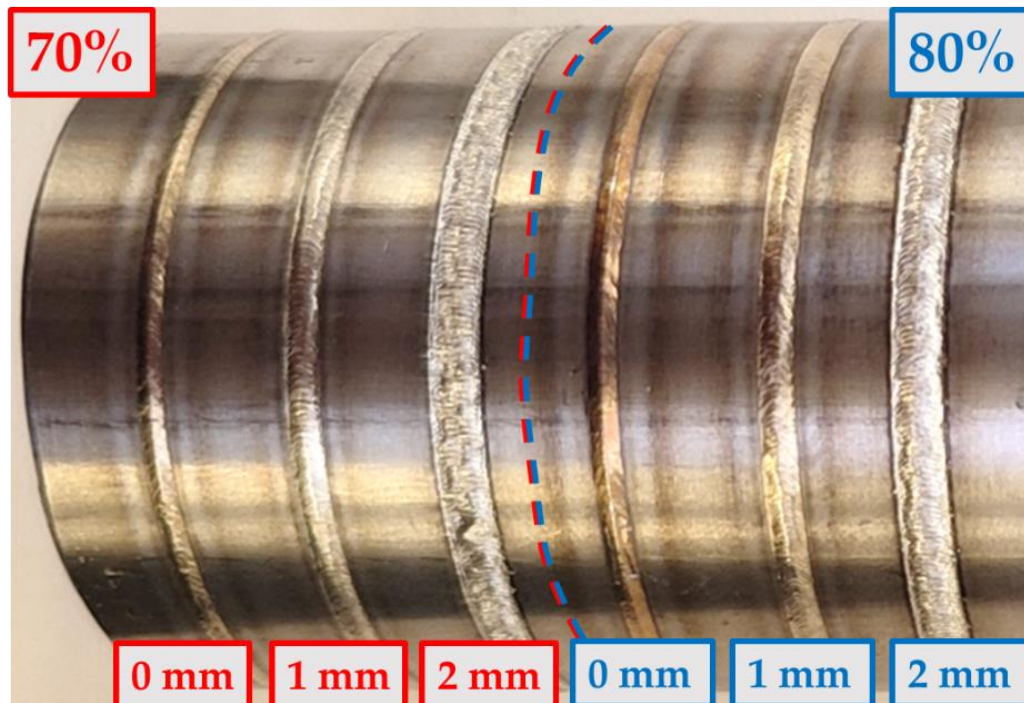


16. ábra: Az impulzusfrekvencia változtatása mellett készített varratok fényképe, a beállított impulzusfrekvencia balról jobbra 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 10 Hz, 25 Hz, valamint 400 Hz

A hernyóvarratokat szemügyre véve megfigyelhető, hogy az 50 Hz-nél nagyobb impulzusfrekvencia értékek esetén szép küllemű varratok alakultak ki. A 10 Hz-es és a 25 Hz-es esetben a pikkelyek nagyon távol találhatók egymástól, különös tekintettel a 10 Hz-es esetre, ahol az egyes pikkelyek között a varrat többi részénél jóval keskenyebb megolvasztott részek láthatóak. Megállapítható, hogy az impulzusfrekvencia növelésével a hernyóvarratok pikkelyezettsége egyre sűrűbb lesz. Csak szemrevételezéssel vizsgálva a varratokat azt

feltételezem, hogy 50 Hz-es és ennél nagyobb impulzusfrekvencia beállítása esetén alakul ki jó minőségű varrat. A mikroszkópi képeket megfigyelve azonban egyből feltűnik, hogy a 10 Hz, 25 Hz és 50 Hz impulzusfrekvenciával hegesztett varratokban hatalmas porozitások találhatók, ez a megfigyelés összeegyeztethető a [10] hivatkozású kutatás eredményeivel. Egy igen nagy méretű zárvány megfigyelhető továbbá a 150 Hz-es impulzusfrekvenciával hegesztett hernyóvarratban is. A varratok megfelelőségét a porozitások szempontjából dolgozatom során később értékelem. A varratok alakjukban szemmel láthatóan nem térnek el jelentősen, mindegyik hernyóvarrat két részből – egy szélesebb és sekélyebb, valamint egy keskenyebb és mélyebb – részből áll. A varratszélességben és a varrat területben figyelhető meg kis mértékű csökkenés az impulzusfrekvencia növelésével. Az impulzusfrekvencia varratgeometriára gyakorolt hatására a diagramok segítségével történő kiértékelés során térek ki részletesen.

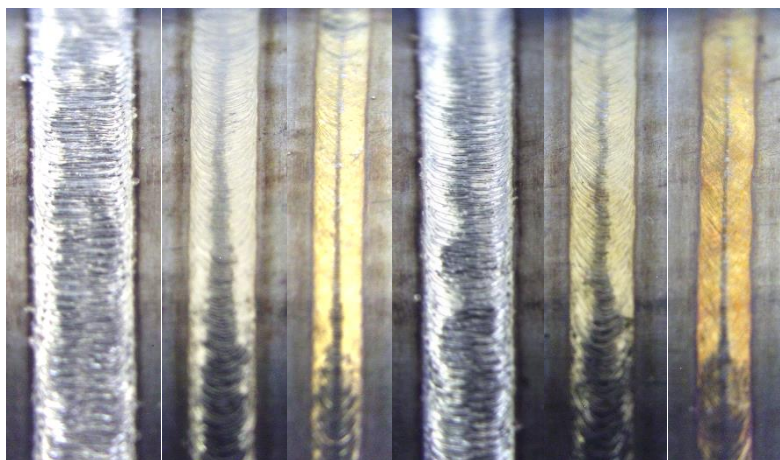
Az alábbi ábrákon láthatóak a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség változtatása mellett hegesztett hernyóvarratokról készített fényképek. A 17. ábrán balról jobbra az első három varrat esetén a kitöltési tényező 70%, a második három esetén pedig 80%. A lézernyaláb lengetési szélesség hármasával ismétlődve 0 mm, azaz a lézernyaláb lengetése nélküli eset, 1 mm, illetve 2 mm.



17. ábra: A kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség változtatása mellett készített varratok fényképe

A 18. ábrán láthatóak a 70%-os és a 80%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varratok felszínéről a sztereomikroszkóphoz tartozó programmal készített fényképek. Balról

jobbra az első három varrat esetén a kitöltési tényező 70%, a második három esetén pedig 80%. A lézernyaláb lengetési szélesség hármasával ismétlődve 2 mm, 1 mm, illetve 0 mm, azaz a lézernyaláb lengetése nélküli eset.

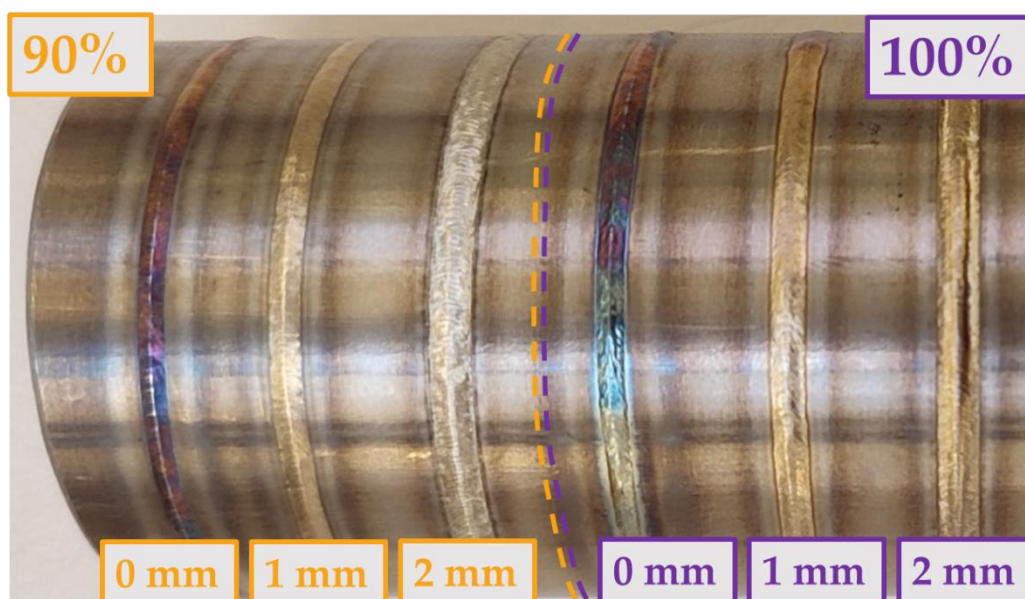


18. ábra: A kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség változtatása mellett készített varratok fényképe, 70%-os és 80%-os kitöltési tényező mellett, a bal szélső hernyóvarrat szélessége 2,3 mm

A varratokról készített fényképeket szemügyre véve megállapítható, hogy az egyes lézernyaláb lengetési szélesség értékek mellett igen különböző szélességű varratok alakultak ki. A 2 mm-es lengetéssel készített varrat felületén jól látható, hogy hogyan mozgott a lézernyaláb a hegesztés során a varrat két szélé között. Érdekes megfigyelni, hogy az egyes lengetési szélességek beállítása mellett hegesztett varratok különböző színűek lettek, a 2 mm-es lengetéssel készített varratok ezüstösek, fényes felületűek, az 1 mm-es lengetéssel történő hegesztés világossárga színű varratot hozott létre, míg a lézernyaláb lengetése nélkül hegesztett varrat sötétebb sárga színű lett. A 17. ábra alapján úgy gondolom, hogy a 2 mm-es lengetéssel hegesztett varratoknál szélbeégés keletkezett. Ezt a sejtést a mellékletben található mikroszkópi képek igazolják. Ezeket megfigyelve látható, hogy a lézernyaláb lengetése nélküli esetekben teljes átolvadású varrat keletkezett, míg az 1 mm-es lengetési szélesség beállítása esetén jóval kisebb mélységű varratot kaptam eredményül, ezek beolvadása jó közelítéssel a falvastagság felét éri el. A 2 mm-es lézernyaláb lengetés esetén a lézernyaláb széles felületen, de igen kis mélységben olvasztotta meg az alapanyagot. Látható, hogy a 2 mm-es lengetéssel hegesztett varratoknak gyakorlati jelentősége már nincs, ezeknek a beolvadása nagyon csekély. Megállapítható, a 70-80%-os kitöltési tényező mellett és a lézernyaláb lengetése nélkül hegesztett varratokban jelentős porozitás keletkezett, a mellékletben található 2.70-0.2. jelölésű képen két, a varrat méretéhez képest hatalmas méretű gázzárvány látható, míg a 2.80-0.2. jelölésű képen több kisebb, de elég jelentős méretű porozitás található. Érdekes megfigyelni, hogy az 1 mm-es lengetéssel készített varratokban is található néhány kisebb porozitás, de jóval

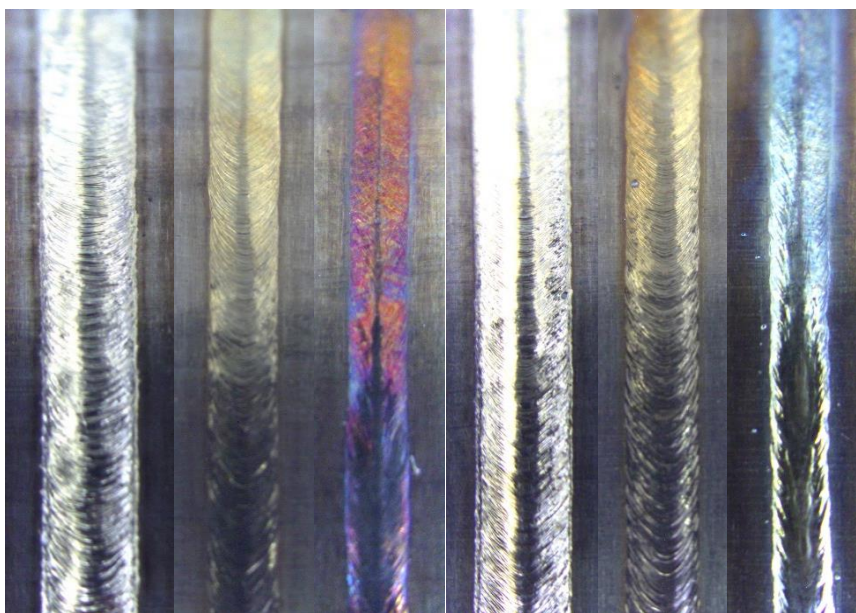
kisebb mértékben, mint a lézernyaláb lengetése nélküli esetben. A 2 mm-es lengetéssel készült varratok gyakorlatilag zárványmentesek a mikroszkópi képek alapján. Ez a megfigyelés összeegyeztethető a [12] hivatkozású kutatás eredményeivel. Ezen cikk szerzői is azt kapták eredményül, hogy a porozitás mértéke csökken a varratmélység és a varratszélesség arányának csökkentésével.

A 19. ábrán balról jobbra az első három varrat esetén a kitöltési tényező 90%, a második három esetén pedig 100%. A lézernyaláb lengetési szélesség hármasával ismétlődve 0 mm, azaz a lézernyaláb lengetése nélküli eset, 1 mm, illetve 2 mm.



19. ábra: A kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség változtatása mellett készített varratok fényképe

A 20. ábrán láthatóak a 90%-os és a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varratok felszínéről a sztereomikroszkóphoz tartozó programmal készített fényképek. Balról jobbra az első három varrat esetén a kitöltési tényező 90%, a második három esetén pedig 100%. A lézernyaláb lengetési szélesség hármasával ismétlődve 2 mm, 1 mm, illetve 0 mm, azaz a lézernyaláb lengetése nélküli eset.

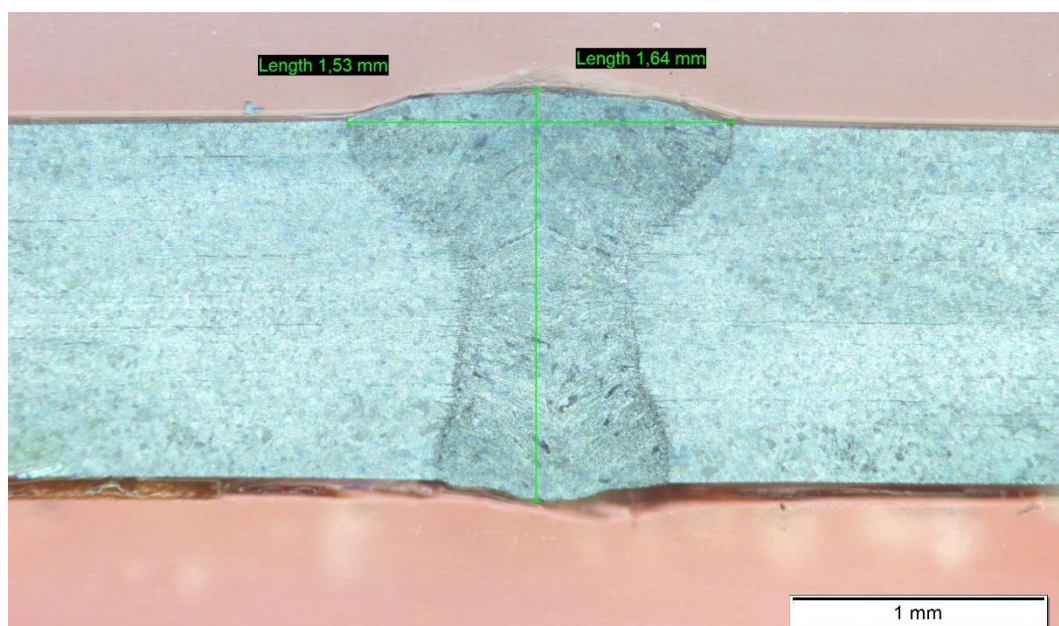


20. ábra: A kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség változtatása mellett készített varratok fényképe, 90%-os és 100%-os kitöltési tényező mellett, a bal szélső hernyóvarrat szélessége 2,3 mm

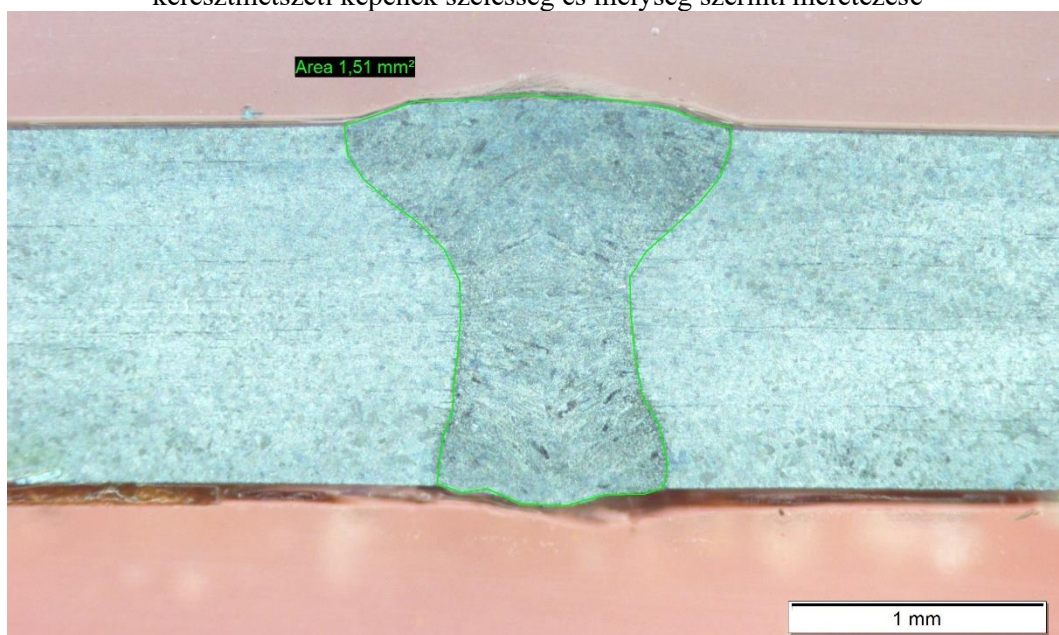
A varratok felületét szemügyre véve látszik, hogy a 90-100%-os kitöltési tényező esetén nagyobb volt a hőbevitel, mint a 70-80%-os kitöltési tényező esetén. Látható, hogy 2 mm-es lengetés és 90%-os kitöltési tényező esetén ezüstös varrat keletkezett, míg 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett már sárgásabb lett a kialakult varratfelszín. 1 mm-es lengetés esetén sárgás varratok keletkeztek, 100%-nál kicsivel sötétebb sárga, mint 90%-nál. A lézernyaláb lengetése nélküli esetekben kékes-lilás futtatási színek jelentek meg. A mellékletben található mikroszkópi képeket megfigyelve látható, hogy igen hasonló varratgeometriák keletkeztek, mint a 70-80%-os kitöltési tényező esetén, de összességében elmondható, hogy szélesebb, mélyebb és nagyobb területű varratok alakultak ki. Porozitások szempontjából is hasonló a helyzet, mint a 70-80%-os kitöltési tényező esetén, tehát a lézernyaláb lengetése nélküli esetben jelentős mértékű porozitás figyelhető meg. Ennek mértéke a 90-100%-os kitöltési tényező esetén is csökken a varratmélység és a varratszélesség arányának csökkentésével, azaz a lézernyaláb lengetésével és ennek szélességének a növelésével.

A sztereomikroszkóphoz tartozó Stream Essentials nevű program lehetőséget biztosít egyenes vonalak menti egy dimenziós méretek, valamint kézzel körberajzolt zárt geometriák területének kétdimenziós mérésére század milliméter, illetve század négyzetmilliméter pontossággal.

Ilyen módon a félbevágott csövek vágási felületén található mindkét varratkeresztmetszetet méreteztem. A varratszélesség, a varratmélység és a varrat terület méretezésének menetéről egy-egy szemléltető kép a 21. és a 22. ábrán látható, a többi méretezett mikroszkópi képet a mellékletben helyeztem el.



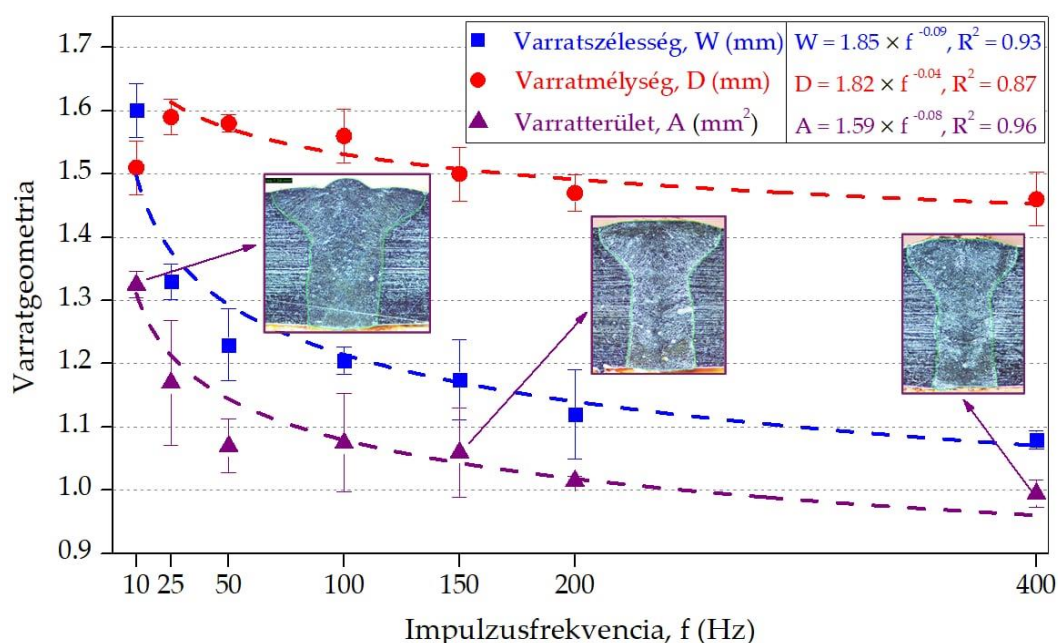
21. ábra: A lézernyaláb lengetése nélkül és 100%-os kitöltési tényező mellett készített varrat keresztmetszeti képének szélesség és mélység szerinti méretezése



22. ábra: A lézernyaláb lengetése nélkül és 100%-os kitöltési tényező mellett készített varrat keresztmetszeti képének terület szerinti méretezése

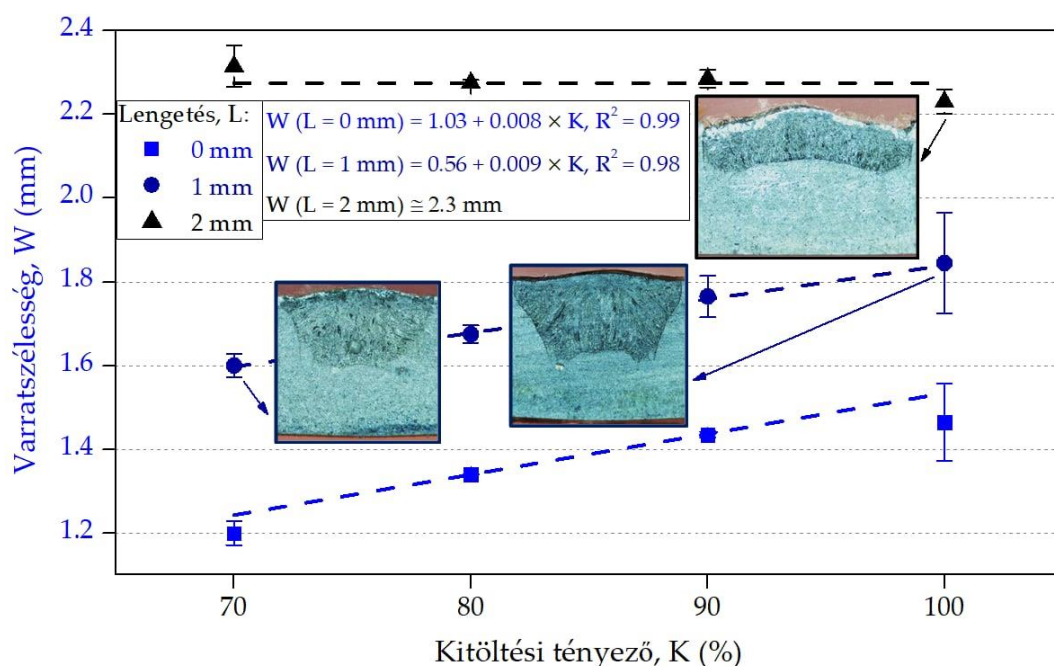
Az egyes mért mennyiségek és az impulzusfrekvencia, valamint a lézernyaláb lengetési szélesség és a kitöltési tényező közötti összefüggést diagramok segítségével szemléltetem.

A 23. ábra az első kísérletsorozat varratainak szélességét, mélységét és területét ábrázolja az impulzusfrekvencia függvényében. A diagram alapján megállapítható, hogy az impulzusfrekvencia növelésével a varratok szélessége és területe csökken, ezt szemléltetik a diagramon látható mikroszkópi képek is. Az impulzusfrekvencia növelése által okozott varratszélesség csökkenés összeegyeztethető a [10] hivatkozású kutatás eredményeivel. Megállapítható, hogy a varratmélység közel konstans értéket vesz fel annak köszönhetően, hogy a kísérletek során beállított 500 W teljesítménynél, a lézernyaláb lengetése nélküli hegesztés esetén minden vizsgált impulzusfrekvencia értéknél teljes átolvadású varrat keletkezett.



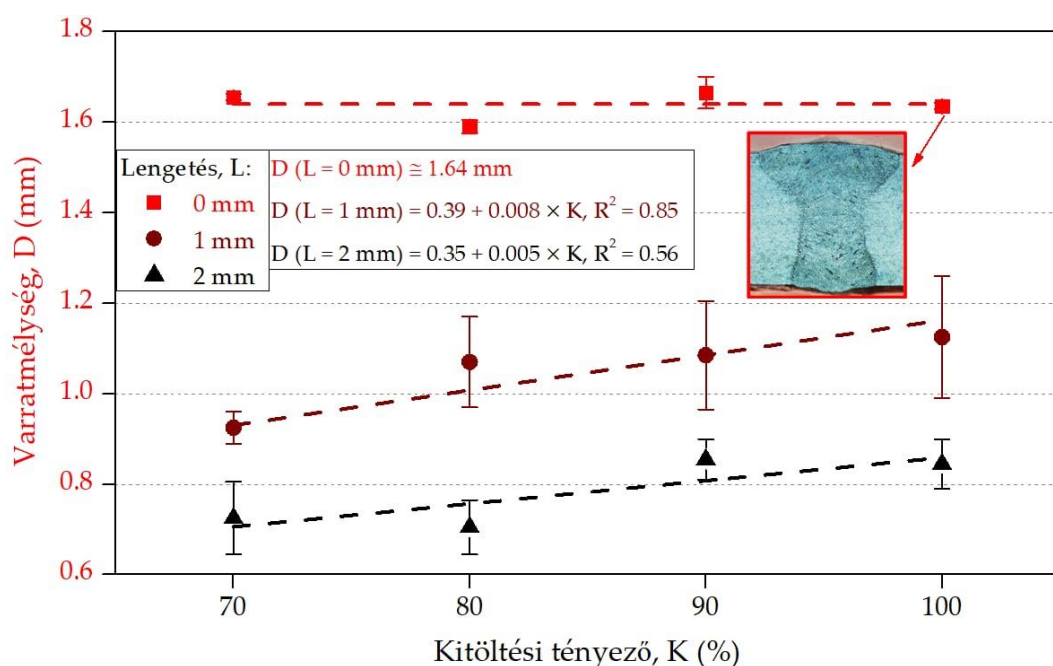
23. ábra: Varratgeometria az impulzusfrekvencia függvényében

A további diagramok a második kísérletsorozat varrataira vonatkoznak. A 24. ábra a varratszélesség alakulását mutatja a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében. A diagram alapján megállapítható, hogy a 2 mm-es lézernyaláb lengetési szélesség beállítása mellett hegesztett varratok szélessége jó közelítéssel egyforma, a kitöltési tényező változtatása nem volt hatással a varratszélességre ebben az esetben. Az 1 mm-es lengetéssel és a lézernyaláb lengetése nélkül hegesztett varratok esetén megfigyelhető, hogy a varratszélesség közel lineárisan növekszik a kitöltési tényező növelésével. Ennek feltételezésem szerint az oka, hogy a kitöltési tényező növelésével egységnyi idő alatt a lézernyaláb egyre több ideig olvasztja az alapanyag felületét, így ki tud alakulni az egyre szélesebb varrat. A diagram értékei alapján levonható a következtetés, hogy a lézernyaláb lengetési szélesség növelése a varratszélesség növekedését eredményezi. Ezt kapta eredményül a [11] hivatkozású kutatás szerzője is. A diagramot szemügyre véve megállapítható továbbá, hogy a varratok összességében szélesebbek lettek, mint a kezelőfelületen beállított lézernyaláb lengetési szélesség érték. Látható például, hogy a 2 mm-es lengetési szélesség beállítása esetén minden vizsgált kitöltési tényező értéknél közel 2,3 mm szélességű varrat keletkezett, míg az 1 mm-es lengetési szélesség beállítása esetén, 70%-os kitöltési tényező értéknél 1,6 mm szélességű varrat alakult ki, 100%-os kitöltési tényező érték esetén pedig 1,8 mm-nél is nagyobb lett a varrat szélessége.



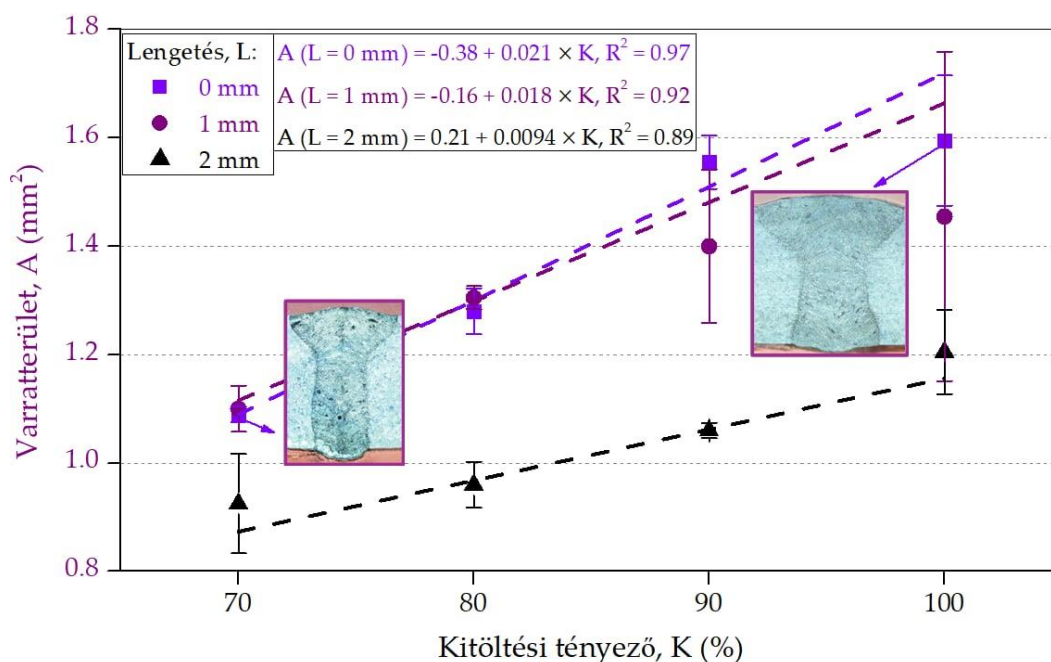
24. ábra: Varratszélesség a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében

A 25. ábrán látható a kialakuló varrat mélységének alakulása a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében. A diagramot megfigyelve levonható a következtetés, hogy a varratmélység a lézernyaláb 2 mm-es és 1 mm-es szélességű lengetése esetén is közel lineárisan növekszik a kitöltési tényező növelésével. Megállapítható továbbá, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül hegesztett varratok esetén a varratmélység jó közelítéssel azonos értéket vesz fel, mivel ezekben az esetekben teljes átolvadású varrat keletkezett. A diagramot megfigyelve kimondható, hogy a lézernyaláb lengetése a lengetés nélküli esethez képest a varrat mélységének csökkenéséhez vezet, valamint, hogy a varratmélység és a varratszélesség aránya kisebb lett a lézernyaláb lengetése nélküli esethez képest. Ezt tapasztalták a [12] hivatkozású kutatás szerzői is.



25. ábra: Varratmélység a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében

A 26. ábra a varratterület alakulását ábrázolja a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében. A diagram alapján kimondható, hogy a varratok területe a lézernyaláb lengetése nélküli esetben, valamint az 1 mm-es és 2 mm-es lengetés esetén is közel lineáris növekedést mutat a kitöltési tényező növelésével. Jól szemlélteti ezt a megállapítást a diagramon látható két mikroszkópi kép. Ezen varratoknak a varratterület értékeit megfigyelve megállapítható, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül és a 70%-os kitöltési tényező beállítása mellett $1,1 \text{ mm}^2$ területű varrat, míg a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett $1,6 \text{ mm}^2$ területű varrat keletkezett, tehát majdnem másfélszeres területű varratot eredményezett a kitöltési tényező 70%-ról 100%-ra való növelése.

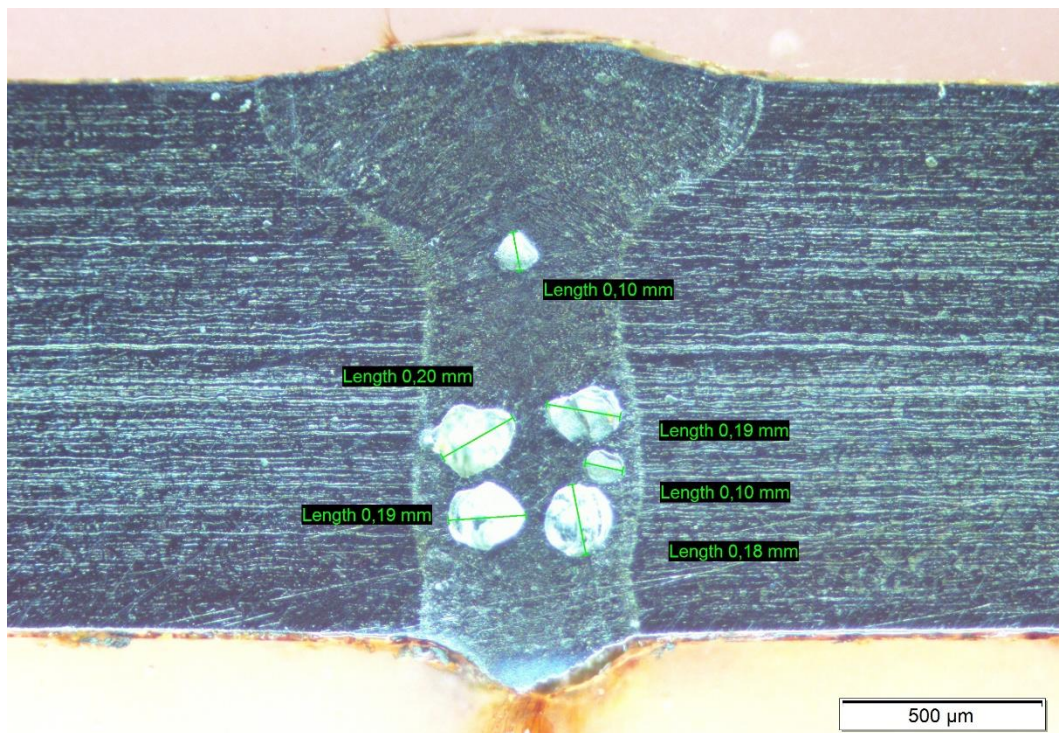


26. ábra: Varratterület a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében

A sztereomikroszkóphoz tartozó Stream Essentials nevű program segítségével készített, mellékletben található mikroszkópi képeken megfigyelhető, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül hegesztett varratok két részből állnak: a csövek külső átmérő felőli felső részen egy szélesebb és sekélyebb rész, míg a belső átmérő felőli alsó részen egy keskenyebb és mélyebb rész látható. A kialakuló két részből álló varratalak szélesebb és sekélyebb része kötővarratok esetén a résáthidalás szempontjából kedvező, hiszen szélessége miatt segíti azt, a mélyebb és keskenyebb résznek pedig a megfelelő beolvadási mélység biztosításában van jelentősége.

A mellékletben található mikroszkópi képeket szemügyre véve megállapítható, hogy a varratok jó részében gázzárványok, porozítások fedezhetők fel.

A varratok megfelelőségének vizsgálatát az MSZ EN ISO 13919-1:2019 [14] jelölésű „Elektron és lézersugaras eltérési szintek” című szabvány alapján végeztem. Ehhez a varratokban található gázzárványokat lemértem, majd a szabvány alapján levontam a következtetést, hogy milyen átvételi szinten fogadható el a varrat. A zárványok méretezéséről a 27. ábrán látható egy szemléltető fotó, mely egyben példaként szolgál, hogy valóban milyen hatalmas porozítások keletkeztek a varratok jó részében.



27. ábra: A 70% kitöltési tényező és 50 Hz impulzusfrekvencia beállításával hegesztett varrat mikroszkópi képe, a mellékletben 1.50.2.-vel jelölve

A szabvány a következőket mondja ki: D átvételi szinten a varratban található gázzárványok legnagyobb mérete a varratmélység fele vagy 5 mm lehet (amelyik kisebb), C átvételi szinten a varratmélység 0,4 része vagy 3 mm (amelyik kisebb), B átvételi szinten pedig a varratmélység 0,3 része vagy 2 mm (amelyik kisebb). A legnagyobb gázzárványok méreteit tanulmányozva arra a megállapításra juthatunk, hogy a porozitások méreteit tekintve mindegyik varrat megfelel a B átvételi szintnek.

A szabvány rendelkezéseket tartalmaz továbbá azzal kapcsolatban, hogy az adott varratterületnek legfeljebb hány százalékát foglalhatja el porozitás. A szabvány kimondja, hogy D átvételi szinten a gázzárványok összegzett területe nem haladhatja meg a varratterület 6%-át, C átvételi szinten a 4%-át, B átvételi szinten pedig a 2%-át. Ezt figyelembe véve megállapítható, hogy az első kísérletsorozat varratai közül a 10 Hz, a 25 Hz és az 50 Hz impulzusfrekvencia beállításával hegesztett varrat egyik átvételi szinten sem felel meg a porozitások szempontjából. A 150 Hz impulzusfrekvencia érték esetén C átvételi szinten elfogadható varrat keletkezett, míg a többi beállított impulzusfrekvencia érték esetén B átvételi szinten lett elfogadható a varrat. Hasonló eredményeket kaptak a [10] hivatkozású kutatás szerzői is, hiszen kísérleteik során a kisebb impulzusfrekvencia értékek jelentős mennyiségű, nagy méretű porozitás kialakulását eredményezték, míg a nagyobb impulzusfrekvencia értékek kevésbé porózus varratok kialakulásához vezettek. A második kísérletsorozat esetén a szabvány előírásai alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül készített

négy varrat közül egyik sem fogadható el egyik átvételi szinten sem. Az 1 mm-es lengetéssel készített varratok közül a 70%-os és a 80%-os kitöltési tényezővel hegesztett varrat D átvételi szinten, a 90%-os kitöltési tényezővel készített hernyóvarrat egyik átvételi szinten sem, míg a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varrat C átvételi szinten fogadható el. A 2 mm-es lengetéssel hegesztett varratok mindegyike B átvételi szinten elfogadható.

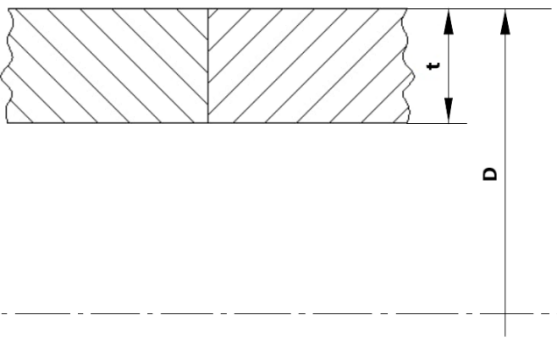
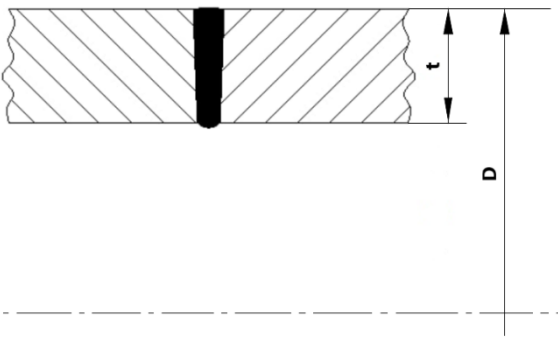
Mivel az iparban, a termelésben a hegesztési varratokkal szemben különféle követelményeket állítanak, és ezeket figyelembe kell venni a varrat elkészítésénél és az adott termék legyártásánál, emiatt úgy gondoltam, hogy ilyen szempontból is megközelítem a témát. Példaként felteszem, hogy a megrendelő a kutatómunkám során általam is használt 1,4 mm falvastagságú, 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél csövekből szeretne terméket gyártatni, melyeket a termék elkészítése során teljes átolvadású tompavarratokkal szükséges összekötni. A varratokkal szemben követelmény továbbá, hogy a koronaoldali varratszélesség érje el az 1 mm-t, valamint, hogy a porozítások szempontjából feleljen meg B átvételi szinten. A kísérleteim eredményei alapján azt tapasztaltam, hogy a kívánt tulajdonságokkal rendelkező varratot a lézernyaláb lengetése nélkül, 80 cm/min haladási sebesség, 500 W teljesítmény, 70% kitöltési tényező és 100 Hz impulzusfrekvencia beállításával lehet elérni modulált üzemmódban az általam használt IPG Photonics Corporation nevű cég által gyártott LightWELD XC típusú optikai szálas kézi lézeres hegesztőgéppel. A varrat elkészítéséhez 18 l/min térfogatáramú, 4.5 tisztaságú nitrogént javaslok védőgázként.

Előzetes gyártói hegesztési utasítást, azaz pWPS-t készítek az EN ISO 15609-4:2009 [15] jelölésű „Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification - Part 4: Laser beam welding” című szabvány alapján, mely a következő oldalakon látható. Az előzetes gyártói hegesztési utasítás olyan dokumentum, melyet a hegesztési feladatot megelőzően készítenek el az előírások és a szakmai tapasztalatok alapján, és tartalmazza a hegesztés lényeges paramétereit. A pWPS alapján készült hegesztés vizsgálatát és minősítését követően készíthető el a WPS lap, azaz a hegesztési munkarendi előírás. [16]

ELŐZETES GYÁRTÓI HEGESZTÉSI UTASÍTÁS (PWPS)

(EN ISO 15609-4:2009 szerint)

Hegesztési eljárás:	521 (szilárdtestlézeres hegesztés)
Kötéstípus:	Tompavarrat (BW)
Munkadarab vastagsága (mm):	$t=1,4$ mm
Külső átmérő (mm):	$D=34$ mm
Hegesztési helyzet:	PA
Előkészítés és tisztítás módja:	vágás, köszörülés
Alapanyag megnevezése:	1.4301

Kötés kialakítása	Varratfelépítés
	

Berendezés jellemzői	
Típus:	IPG LHW-1500-XC-05
Lézernyaláb jellemzői:	sugárdivergencia: 45,3 mrad
Nyalábvezető rendszer:	optikai kábel, $d=50\text{ }\mu\text{m}$
Nyaláb fókuszálásának módja:	lencse
Lézeres hegesztőfej:	IPG LightWELD XC
Készülékezés:	forgató berendezéssel vízszintesen és függőlegesen kényszerezve
Összeállítás módja:	fűzővarrat
Fűzési eljárás:	521 (kézi)

	Fűzővarrat	Hegesztési varratsorok
Teljesítmény (W) Állandó Impulzus Kitöltési tényező Frekvencia	- 500 W 70 % 100 Hz	- 500 W 70 % 100 Hz
Lengetés Lengetési szélesség Lengetési frekvencia	1 mm 200 Hz	-
Nyaláb beesési szöge Függőleges sík Vízszintes sík	17 ° 90 °	17 ° 90 °
Haladási sebesség	-	80 cm/min
Munkatávolság	0 mm	0 mm
Hozaganyag besorolása és kereskedelmi elnevezése	-	-
Védőgáz	N ₂	N ₂
A gáz áramló mennyisége (l/min)	18	18
Gázfúvóka átmérője	10 mm	10 mm
Gépesítési szint	kézi	gépesített
Előmelegítési hőmérséklet	+5 °C	+5 °C
Egyéb információk A varratok elkészítéséhez az összefűzött darabokat forgató berendezésbe kell befogni, ezzel biztosítva a vízszintes és függőleges kényszerezést és az egyenletes haladási sebességet. A kézi lézeres hegesztőpisztolyt befogó készülékbe kell befogni a stabilitás biztosítása érdekében.		

Készítette:
Simon Virág
2024.11.06.

7. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE/KÖVETKEZTETÉSEK

Kutatómunkám során az volt a célom, hogy megvizsgáljam az impulzusfrekvencia, a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség varratgeometriára gyakorolt hatását ausztenites rozsdamentes acél csövek modulált üzemmódú kézi lézeres hegesztése esetén. Ennek érdekében két kísérletsorozatot készítettem, melyek közül az első 7 db, a második pedig 12 db hernyóvarratból áll. Az első kísérletsorozat varratait a lézernyaláb lengetése nélkül és adott kitöltési tényező mellett, az impulzusfrekvenciát varratonként változtatva készítettem el. A második kísérletsorozat esetén az impulzusfrekvencia volt állandó, és a kitöltési tényezőt, valamint a lézernyaláb lengetési szélességet változtattam.

A csöveket a hegesztés után hossz tengelyük mentén elvágtam és elkészítettem a kiértékeléshez szükséges csiszolatokat. A csiszolatokat sztereomikroszkóp alatt vizsgáltam és a hozzátartozó program segítségével fényképeket készítettem, melyeken ezután felvettem a kiértékeléshez szükséges méreteket.

A kiértékelést először szemrevételezéssel végeztem, ezután a mért varratszélesség, varratmélység és varratterület értékek segítségével diagramokat hoztam létre, melyek ezen értékeket ábrázolják az impulzusfrekvencia, a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetési szélesség függvényében, majd ezek alapján vontam le következtetéseket.

A kiértékelések alapján összességében elmondható, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül két részből – egy szélesebb és sekélyebb, valamint egy keskenyebb és mélyebb részből – álló varratalak alakult ki. Az impulzusfrekvencia növelése a varratszélesség és a varratterület csökkenését eredményezte. A varratmélység az impulzusfrekvencia változtatásával nem változott, hiszen a beállított paraméterek mellett teljes átolvadású varrat keletkezett. A mikroszkópi képek azt mutatják, hogy az 50 Hz-es és az alatti impulzusfrekvencia értékek beállítása esetén hatalmas porozitások alakultak ki a varratokban, ezen varratok egyike sem fogadható el egyik átvételi szinten sem. A második kísérletsorozat eredményei alapján megállapítható, hogy a beállított paraméterek mellett csak a lézernyaláb lengetése nélküli esetben volt elérhető teljes átolvadás, azonban ezen varratok mindegyikében jelentős porozitás alakult ki, ezen varratok egyike sem fogadható el egyik átvételi szinten sem. A lézernyaláb lengetési szélesség növelése a varratszélesség növekedéséhez, valamint a varratmélység és a varratterület csökkenéséhez vezetett. A kitöltési tényező növelésével nőtt a varratszélesség, a varratmélység és a varratterület is.

A kísérleteim eredményei alapján az 1,4 mm falvastagságú, 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél csövek hegesztéséhez 80 cm/min haladási sebességet, 500 W

teljesítményt, 70% kitöltési tényezőt és 100 Hz impulzusfrekvenciát javaslok modulált üzemmódban az általam használt IPG Photonics Corporation nevű cég által gyártott LightWELD XC típusú optikai szálalézeres hegesztőgéppel, ha a cél teljes átolvadású, koronaoldali szélességükben legalább 1 mm-t elérő és a porozítások szempontjából B átvételi szinten megfelelő varratok létrehozása. A varrat elkészítését a lézernyaláb lengetése nélkül javaslom, védőgázként 18 l/min térfogatáramú, 4.5 tisztaságú nitrogént alkalmazva.

7.1. Jövőbeli tervek

A kísérletek eredményei alapján úgy gondolom, hogy érdemes lehet a jövőben nagyobb tisztaságú nitrogénnel és más védőgázokkal, valamint más térfogatáramokkal is megismételni a kísérleteket annak érdekében, hogy stabilan porozításmentes varratokat lehessen készíteni. Mivel a teljesítményt és a haladási sebességet nem változtattam, és az impulzusfrekvencia, illetve a kitöltési tényező értékek széles skáláján porozítást tapasztaltam, így az a sejtésem, hogy a gázzárványok kialakulásának oka a nem megfelelő védőgázban vagy annak nem megfelelően beállított térfogatáramában keresendő.

8. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] ABAFFY KÁROLY (2015.05.08.): *Szóbeli előadás a Denso Kft. részére tartott továbbképzésen Lézersugaras technológiák címmel*, Székesfehérvár.
- [2] BAY ZOLTÁN ALKALMAZOTT KUTATÁSI ALAPÍTVÁNY (2000): *Lézer oktató videó*.
- [3] BUZA GÁBOR (2012): *Lézersugaras technológiák I.* Edutus Főiskola, 2800 Tatabánya, Stúdium tér 1.
- [4] KREISZ ISTVÁN (2011): *Lézersugár-vezetés*, Edutus Főiskola, 2800 Tatabánya, Stúdium tér 1.
- [5] ESAB Kft. honlapja (esab.com/hu/eur_hu): *Lézersugaras hegesztés*. (Utolsó megtekintés dátuma: 2024.11.04.)
- [6] MSZ EN 60825-1:2014/A11:2021 *Lézergyártmányok biztonsága. 1. rész: Készülékosztályozás és követelmények*.
- [7] VAVRA GÁBOR (2023.10.26.): *Szóbeli előadás a Nagy energiasűrűségű hegesztés ankéton A kézi lézeres hegesztés biztonsági szempontjai címmel*, Kecskemét.
- [8] R+C Zrt. honlapja (epilog.hu): *Lézerbiztonság*. (Utolsó megtekintés dátuma: 2024.11.04.)
- [9] HALÁSZ GÁBOR (2023.10.26.): *Szóbeli előadás a Nagy energiasűrűségű hegesztés ankéton Kézi lézer berendezések alkalmazási területei, biztonsági kihívásai és fejlesztési trendek címmel*, Kecskemét.
- [10] F. C. NETO, M. PEREIRA, L. E. DOS SANTOS PAES, M. C. FREDEL, L. F. BOSSA (2021): *Effect of power modulation frequency on porosity formation in laser welding of SAE 1020 steels*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 112, pages 2509-2517.
- [11] C. YUCE (2020): *The Effect of Laser Beam Wobbling Mode on Weld Bead Geometry of Tailor Welded Blanks*. Academic Perspective Procedia, Volume 3, pages 282-290.
- [12] P. HORNÍK, H. ŠEBESTOVÁ, J. NOVOTNÝ, L. MRŇA (2022): *Laser beam oscillation strategy for weld geometry variation*. Journal of Manufacturing Processes. Volume 84, pages 216-222.
- [13] AGST Draht & Biegetechnik GmbH honlapja (agst.de): *Rozsdamentes acél 1.4301 adatlap*. (Utolsó megtekintés dátuma: 2023.11.06.)
- [14] MSZ EN ISO 13919-1:2019 *Elektron és lézersugaras eltérési szintek*.

[15] EN ISO 15609-4:2009 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification - Part 4: Laser beam welding.

[16] Ívvilág nevű honlap (<https://www.volfram.hu>): *Hegesztési szótár, terminológia és rövidítések*. (Utolsó megtekintés dátuma: 2024.11.07.)

A forrásmegjelöléssel el nem látott képeket magam készítettem.