



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

KENÉZ ATTILA ZSOLT

Kötéstechnológiák alkalmazhatósága fúrókoronák szegmenseinek rögzítésére

Témavezető:
Dr. Bagyinszki Gyula

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök: Réger Mihály DSc egyetemi tanár, ÓE
Opponensek: Gáspár Marcell PhD egyetemi docens, ME
Czinege Imre CSc prof. emeritus, SZE
Titkár: Varga Péter PhD egyetemi adjunktus, ÓE
Tagok: Gyura László PhD Linde Gáz Magyarország Zrt.
hegesztéstechnológiai vezető, címzetes egyetemi
docens, BME
Pinke Péter PhD egyetemi docens, ÓE
Kovács Tünde PhD egyetemi docens, ÓE

Nyilvános védés időpontja:

Nyilatkozat a munka önállóságáról, irodalmi források megfelelő módon történt idézéséről

Alulírott Kenéz Attila Zsolt kijelentem, hogy a

Kötéstechnológiák alkalmazhatósága fűrőkoronák szegmenseinek rögzítésére

című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2024. június 5.

.....

(aláírás)

Nyilatkozat a nyilvánosságra hozatalról

Alulírott Kenéz Attila Zsolt kérem, hogy a

Kötéstechnológiák alkalmazhatósága fűrókoronák szegmenseinek rögzítésére

című doktori értekezésem interneten történő nyilvánosságra hozatala

- Korlátozás nélkül;
- Elérhetőség csak magyarországi címről;
- A fokozat odaítélését követően 2 év múlva, korlátozás nélkül;
- A fokozat odaítélését követően 2 év múlva, csak magyarországi címről történjen meg.

Budapest, 2024. június 5.

.....

(alíírás)

Tartalomjegyzék

Jelölések és rövidítések jegyzéke	1
1. Bevezetés, a kutatás ipari háttere.....	5
2. Irodalmi áttekintés	7
2.1 A fúrókorona és komponensei.....	7
2.2 Kötési eljárások	7
2.1.1 Lézersugaras hegesztés.....	7
2.2.2 Ellenálláshegesztés	11
2.2.3 Kondenzátorkisütéses hegesztés.....	13
2.2.4 Diffúziós hegesztés.....	14
2.2.5 Ultrahangos hegesztés	15
2.2.6 Dörzshegesztés	17
2.2.7 Keményforrasztás	20
3. Célkitűzés	22
4. Kísérleti anyagok és módszerek	23
4.1 Service ring.....	23
4.2 Szegmens	25
4.2.1 Sűrűség és zsugorodás mérése:.....	25
4.2.2 Keménységmérés:.....	26
4.2.3 Keresztirányú hajlító próba:	27
4.2.4 Mintaelőkészítés metallográfiához:	27
4.3 Lézersugaras hegesztés.....	30
4.4 CT vizsgálat.....	30
4.5 Törésteszt.....	31
4.5.1 Törésteszt nyomatékkulccsal.....	31
4.5.2 Törésteszt anyagvizsgáló géppel	32
4.5.3 Alternatív vizsgálati módszerek a törésérték meghatározására.....	33
4.6 Keménységmérés.....	34
4.7 Mikroszkópi vizsgálatok	34
5. Kísérleti eredmények.....	35
5.1 Lézersugarasan hegesztett kötés vizsgálata.....	36
5.2 Különböző kötőeljárások vizsgálata.....	39
5.2.1 Kondenzátorkisütéses hegesztés vizsgálata.....	39
5.2.2 Láng keményforrasztás vizsgálata.....	43
5.2.3 Alternatív kötőeljárások vizsgálata	45
5.3 Kötőtechnológia kiválasztása a további vizsgálatokhoz	46

5.4 Lézerhegesztett kötés mechanikai tulajdonságainak javítási lehetőségei.....	47
5.4.1 Hegesztési folyamatparaméterek hatásainak vizsgálata	48
5.4.2 Különböző lézerforrások hatásának vizsgálata.....	55
5.4.3 Felülettisztítási módszerek hatásainak vizsgálata	56
5.4.4 Lézeres felülettisztítási módszerek hatásainak vizsgálata	65
5.5 Lézersugarasan hegesztett kötés és hőhatásövezet keménységének előrejelzése	73
5.5.1 Keménység lefutások kiértékelése	73
5.5.2 Karakterisztikus keménységgörbe meghatározása (exponenciális közelítéssel)	74
5.5.3 Karakterisztikus keménységgörbe meghatározása (trigonometrikus közelítéssel)	77
5.5.4 Hegesztési hőhatásövezet hidegrepedés-érzékenységének előrejelzése.....	78
5.5.5 Keménység előrejelző egyenletek módosítása	80
6. Tézisek – új tudományos eredmények	88
7. Eredmények összefoglalása	89
8. Summary of results	91
Köszönetnyilvánítás	93
Irodalomjegyzék	94
Disszertációhoz tartozó publikációk, előadások, mellékletek	99

JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

Görög betűs jelölések

λ	Hővezetési tényező	[W/mK]
ρ	Sűrűség	[g/mm ³]
ρ_e	Elméleti sűrűség	[g/mm ³]
$\rho_{s,g}$	A szegmens szinterezés előtti sűrűsége	[g/mm ³]
$\rho_{s,s}$	A szegmens szinterezés utáni sűrűsége	[g/mm ³]
ρ_w	A víz sűrűsége	[g/mm ³]
σ_b	Hajlítószilárdság	[MPa]
σ_f	Hajlítási feszültség	[MPa]

Latin betűs jelölések

a	Hőmérsékletvezetési tényező	[m ² /s]
Ag	Ezüst	[%]
Al	Alumínium	[%]
Ar	Argon védőgáz	
ANOVA	Eltérések elemzése (Analysis of Variances)	
Astaloy-Mo	Nagy mértékben összenyomható, előötvözött Mo tartalmú por, betétedzéshez és más hőkezelésekhez optimalizálva	
B	Hegesztés után kialakult struktúra bénit tartalma	[%]
BOV	Töréserérték (Break-out value)	[Nm]
c	Fajhő	[J/kgK]
C	Karbon	[%]
CO ₂	Szén-dioxid	[%]
CE	Karbonegyenérték	[%]
CE*	Karbonon kívüli ötvözők karbonegyenértéke	[%]
CEV	EN 1011-2 A módszerben alkalmazott karbonegyenérték	[%]
CET	EN 1011-2 B módszerben alkalmazott karbonegyenérték	[%]
CE (AWS)	Amerikai Hegesztési Társaság-féle karbonegyenérték (American Welding Society)	[%]
CDW	Kondenzátor kisütéses hegesztés (Capacitor discharge welding)	

Cp _k	Folyamatképesség mutató (Process capability index)	
Cp _L	Csak alsó határértékből álló specifikációkra vonatkozó folyamatképesség	
Cp _U	Csak felső határértékből álló specifikációkra vonatkozó folyamatképesség	
CT	Komputertomográfia (Computer tomography)	
Cu	Réz	[%]
DW	Diffúziós hegesztés (Diffusion welding)	
EDS	Energiadiszerzív spektroszkópia (Energy Dispersive Spectroscopy)	
EiQMI	Eilebrecht Minőségirányítási felület (Eilebrecht Quality Management Interface)	
Fe	Vas	[%]
FW	Dörzshegesztés (Friction welding)	
FPL	Varratpozíció	[mm]
FPQ	Defókusz	[mm]
FSL	Femtosekundumos lézerforrás	
h _b	Lemezvastagság	[mm]
He	Hélium	[%]
HMI	Hilti Manufacturing India Ltd.	
HV	Vickers keménység	[-]
HV _B	A varrat bénites keménysége	[HV10]
HV _M	A varrat martenzites keménysége	[HV10]
HV _X	Az anyag hegesztés utáni, maximális hőhatásövezeti keménysége	[HV10]
HV _{Zmax}	A varrat maximális keménysége	[HV10]
HV _(tM0)	0% martenzit keménysége	[HV10]
HV _(tF)	A varrat összetételének megfelelő szövetszerkezet keménysége	[HV10]
HV _(tM100)	100% martenzit keménysége	[HV10]
IIW	Nemzetközi Hegesztési Intézet (International Institute of Welding)	
K ₂	Hőhasznosítási tényező	[-]
LBW	Lézersugaras hegesztés (Laser beam welding)	

LC-line	<i>Alacsony teljesítményű sorozat (Low Class)</i>	
LED	<i>Fény kibocsátó dióda (Light-emitting diode)</i>	
M	<i>Hegesztés után kialakult struktúra martenzit tartalma</i>	[%]
M _b	<i>Hajlítónyomaték</i>	[Nm]
Mn	<i>Mangán</i>	[%]
Mo	<i>Molibdén</i>	[%]
Na	<i>Nátrium</i>	[%]
Nd:YAG	<i>Neodímiummal ötvözött ittrium-alumínium-gránát</i>	
Ni	<i>Nikkel</i>	[%]
O ₂	<i>Oxigén</i>	[%]
P	<i>Lézer teljesítmény</i>	[W]
P	<i>Foszfor</i>	[%]
Pe	<i>Peclet-szám</i>	[-]
PPM	<i>Parts per million (az egymillió legyártott alkatrészre jutó hibás alkatrészek száma)</i>	
q	<i>Fajlagos hőbevitel, vagy vonalenergia</i>	[J/mm]
R _m	<i>Szakítószilárdság</i>	[MPa]
R _{p0,2}	<i>Egyezményes folyáshatár</i>	[MPa]
RW	<i>Ellenálláshegesztés (Resistance welding)</i>	
S _{krit}	<i>Kritikus lemezvastagság</i>	[mm]
S _h	<i>Lemezvastagsági határ</i>	[mm]
S	<i>Kén</i>	[%]
SAP	<i>Rendszerek, alkalmazások és termékek az adatfeldolgozásban (Systems, Applications, and Products in Data Processing)</i>	
SEM	<i>Pásztázó elektronmikroszkópia (Scanning Electron Microscopy)</i>	
Si	<i>Szilícium</i>	[%]
SPC	<i>Statistikai folyamatvezérlés (Statistical Process Control)</i>	
t _{8,5/5}	<i>850 °C-ról 500 °C-ra történő lehűlés ideje</i>	[s]
t _B	<i>Bénit-határ lehűlési idő</i>	[s]
t _F	<i>A varrat összetételének megfelelő szövetszerkezet kialakulásának ideje</i>	[s]

t_M	<i>Martenzit-határ lehülési idő</i>	<i>[s]</i>
t_{M0}	<i>0% martenzit képződés ideje</i>	<i>[s]</i>
t_{M100}	<i>100% martenzit képződés ideje</i>	<i>[s]</i>
T	<i>Hőmérséklet</i>	<i>[°C]</i>
T_0	<i>Előmelegítési hőmérséklet</i>	<i>[°C]</i>
TRS	<i>Keresztirányú szakítószilárdság (Transversal Rupture Strength)</i>	<i>[MPa]</i>
USW	<i>Ultrahangos hegesztés (Ultrasonic welding)</i>	
UT	<i>Kezeletlen minta (Untreated sample)</i>	
v_h	<i>Hegesztési sebesség</i>	<i>[m/s]</i>
w	<i>Varratszélesség</i>	<i>[m]</i>
$W_{s,a}$	<i>A szegmens tömege levegőn mérve</i>	<i>[g]</i>
$W_{s,w}$	<i>A szegmens tömege vízben mérve</i>	<i>[g]</i>
Zn	<i>Cink</i>	<i>[%]</i>

1. BEVEZETÉS, A KUTATÁS IPARI HÁTTERE

Munkahelyemen, a Hilti Szerszám Kft. kecskeméti gyárában akkor találkoztam először a lézersugaras hegesztéssel, amikor 2012-ben áttelepítették ezeket a gyártógépeket a liechtensteini gyárból. Pár év elteltével közelebbről is megismerkedtem a technológiával, amikor új fejlesztésű szegmensgeometriákra kellett a hegesztési paramétereiket kidolgozni. Ezek a projektmunkák indították el a doktori munkámat is és a megszerzett tapasztalatokat fel tudtam használni a kutatásaim során. Vizsgálataimmal hozzájárultam a kötések optimalizálásához és jelenleg is támogatom a kötéseket befolyásoló tényezők feltérképezésével és vizsgálatával. Ezeket az új irányokat majd a későbbiekben fel lehet használni amennyiben szükséges lesz a technológia fejlesztése során.

A Hilti által gyártott fúrókoronákon a használatból eredően elkopnak a szegmensek. A vevők nem dobják el a csövet költségtakarékosság miatt, ezért inkább levágják a szegmenseket és láng keményforrasztással új szegmenseket forrasztanak fel. Az így kialakított forrasztott kötésnek több hátránya lehet a használat során:

- ha nem kellő mértékben ügyeltek a szegmensek pozícionálására, akkor vibráció keletkezhet;
- ha nem ügyeltek a forrasztási hőmérsékletre és a hőeloszlásra, akkor túlhevíthették a szegmenseket, ami változást idézhet elő a mátrixban és hatással lehet a gyémánt szemcsékre is (azaz a fúrési paraméterekre).

A Hilti válasza erre a problémára a cserélhető fejű termék, az ún. Service ring bevezetése volt (1/a. ábra), melyet szabadalom véd. A fúrókorona csöve és a Service ring azonos falvastagságúak és egy csatlakozó felület segítségével egymásba forraszthatók. A Service ring előnyei:

- a szegmensek precízen pozícionáltak és lézerrel vannak felhegesztve;
- lehetőség van a fej cseréjére a szegmensek elkopása után;
- a ring magassága úgy lett meghatározva, hogy a forrasztás ne legyen hatással a szegmensekre;
- Hilti által gyártott szegmensek kerülnek felhasználásra.

2012-ben bevezetésre került a második generációs Service ring, melynek X-Change modul a neve és forrasztás helyett már egy bajonettzárral rögzíthető a fúrókorona csövére (1/b. ábra). Ezzel a megoldással jelentősen rövidült a fej cseréjének ideje. Az X-Change modul vastagabb falú ($3,1 \pm 0,15$ mm), mint a Service ring ($2 \pm 0,15$ mm), ezáltal robusztusabb is, miközben a szegmens vastagsága nem lett változtatva.



1. ábra: a) Fúrókorona katalógusképe a Service ringgel, b) az X-Change modullal [1]

A szegmensek gyártása porkohászati úton történik, a porok előírt arányú összekeverése után egy berendezés rétegről rétegre építi fel a szegmenseket és ekkor kerülnek bele a meghatározott méretű gyémánt szemcsék is. A rétegzési folyamat teljesen szabályozott, szabadon variálható a rétegek vastagsága és száma. A gyémánt szegmensek 2 fő zónából állnak:

- a vágásért felelős „vágózóna”-ból (mely gyémánt szegmenseket tartalmaz) és
- a hegesztéshez szükséges „neutrál” vagy semleges zónából (mely nem tartalmaz gyémánt szemcséket).

A szegmensek elkészülte után beállítják a sűrűségét, mely befolyásolja a hegesztést, a vágás sebességét és a vágótest kopását az alkalmazás során.

A szegmens fejlesztési irányai a geometriai módosításokra és az anyagösszetétel változtatására épülnek, ezért a hegesztési technológiával tisztában kell lenni és állandóan fejleszteni kell a változásoknak megfelelően. Emellett tudnunk kell azt, hol vagyunk az optimális kötéshez viszonyítva. Hegesztési szempontból megvizsgálva a cseremodulokat megállapítható, hogy a Service ring vékonyabb falvastagsága miatt kritikusabb a hegesztett varrat, mint az X-Change modulnál, ezért a kutatásaimat és a vizsgálatokat erre a termékre és annak kötéstechológiájára szeretném irányítani.

Ipari részről felmerült kutatási igény

A jelenleg alkalmazott lézerforrásokat már régóta használják a szériagyártásban és jól működnek. A minőségirányítási rendszerek által előírt gyakorisággal elvégzett hegesztést követő gyártásközi ellenőrzések - mint varratkép optikai ellenőrzése és a törésteszt – gyakorlatilag elegendőek a termék minősítéséhez. Az optikai vizsgálat során az ellenőrzést végző személy egy fényképes hibakatalógusban meghatározott fényképekkel hasonlítja össze a varratot és dönti el, hogy szükséges-e valamilyen beavatkozás. A kézi módszerrel elvégzett törésteszt során a kapott törésérték utal a kötés szilárdságára és minősíti a hegesztési paramétereket.

A gyártókapacitás bővítési igényének felmerülése során vetődött fel a kérdés, hogy a jelenlegi lézersugaras hegesztés mellett van-e más kötőtechnológia, amely alkalmas lenne azonos áteresztési kapacitással, de költséghatékonyabban gyártani a fűrókoronákat.

Szükséges tehát, hogy minél több információ álljon rendelkezésre a lézersugarasan hegesztett kötésről, hogy össze lehessen hasonlítani más eljárások által előállított kötésekkel. Emellett jobban meg kell ismerni a jelenlegi lézersugaras kötetést befolyásoló paramétereket és körülményeket, hogy a meglévő technológiát is tovább lehessen fejleszteni.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 A fúrókorona és komponensei

Átmérőtartomány szerint két különböző elnevezése és gyártástechnológiája van a fúrókoronáknak:

- az Ø8÷ Ø37 mm átmérőtartományt lefedő magfúrókat CO₂ lézerforrással hegesztik;
- az Ø40÷ Ø202 mm átmérőtartományt lefedő fúrókoronákat szilárdtest lézerforrással (diszklézer) hegesztik.

A disszertációban a fejlesztési átmérők közül a Ø102 mm-es terméket vizsgáltam, amely 8 szegmens tartalmaz és ezek a Service ring homloklfelületén egyenlő távolságban vannak elosztva.

A Service ring vékonyfalú, hidegen húzott E235+C (1.0308) anyagminőségű acélcső (EN 10305-1 szabvány szerint [2]). Falvastagsága 2±0,15 mm, átmérője 100±0,15 mm, magassága 56±0,2 mm, a homloklfelületét lézersugaras hegesztés előtt esztergagépben feloldalazzák. A cső kémiai összetételét az 1. táblázat felső sora tartalmazza.

A szegmens típusa ún. LC-line, amit kis- és közepes teljesítményű fúrógépekhez ajánlanak, alkalmazható üreges- és tömör téglához, aszfalthoz, márványhoz, B25÷B35 nyomószilárdságú betonhoz. A szegmens szélessége 3,5±0,2 mm, magassága 10 mm, hossza 24,3 mm, anyagának sűrűsége 7930 kg/m³. A szegmensek neutrál zónájának kémiai összetételét az 1. táblázat alsó sora tartalmazza.

1. táblázat: a Service ring és a szegmens kémiai összetétele

Anyagok	C	Si	Mn	P	S	Astaloy Mo*	Grafitpor	Cink sztearát
Service ring	≤ 0,17%	≤ 0,35%	≤ 1,2%	≤ 0,025%	≤ 0,025%	-	-	-
Szegmens	-	-	-	-	-	99,8%	0,2%	0,5%

* Fe + 1,5% Mo

2.2 Kötési eljárások

2.1.1 Lézersugaras hegesztés

A hegesztés a legrugalmasabb és legsokoldalúbb kötési módszer, amely minden iparágban alkalmazható. A lézersugaras hegesztés (MSZ EN ISO 4063 szabvány szerint 52-es számjelű eljárás) olyan fejlett folyamatként ismeretes, ahol nagy teljesítményű, nagy energiasűrűségű lézersugárra van szükség a kötés létrehozásához. A lézerrezonátorból kilépő – az indukált emisszióra „kényszerített” anyag minőségétől függő hullámhosszúságú – monokromatikus, koherens lézersugarat optikai elemek segítségével a hegesztés helyére fókuszolják. A kis átmérőjű fókuszoltban igen nagy teljesítménysűrűség érhető el, s abszorpció révén az elektromágneses sugárzás hővé alakul a hegesztendő anyagokban. A kialakuló hőmérséklet keskeny sávban megolvasztja a rés nélkül illesztett munkadarabok határzónáját, és az elhaladó sugárzás mögött megdermedt szilárd hegesztett varrat képződik [3].

A lézersugárzást kibocsájtó anyag, illetve a gerjesztés módja szerint megkülönböztetünk [4]:

- gázlézeres hegesztést (10,6 µm-es hullámhosszúságú sugárzást produkáló CO₂-[pontosabban CO₂+N₂+He keverék] gázzal);

- szilárdtest lézeres hegesztést (1,06 μm -es hullámhosszúságú sugárzást produkáló Nd:YAG, vagyis $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ kristállyal);
- diszk lézeres hegesztést (1,03 μm -es hullámhosszúságú sugárzást produkáló $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ vagy YVO_4 tárcsával);
- szállézeres hegesztést (1,07 μm -es hullámhosszúságú sugárzást produkáló $\text{Yb}^{3+}:\text{SiO}_2$ optikai szálakkal);
- dióda lézeres hegesztést (0,9–1,03 μm -es hullámhosszúságú sugárzást produkáló, közvetlen vagy száloptika csatolású félvezetőkkel).

Ezeknek a lézereknek a működési módja szerint megkülönböztetünk impulzusüzemű, folyamatos üzemű és Q-kapcsolású lézeres hegesztést. Az impulzus üzemű lézeres hegesztésnél az impulzus hossza kisebb, mint 0,25 sec. A folyamatos üzemű lézeres hegesztés sugárszaggatás nélküli hegesztés. A Q-kapcsolású lézeres hegesztésnél a kilépőtükör és a lézeraktív anyag közé még egy optikai zárat helyeznek el, ami mindaddig meggátolja a gerjesztett atomok indukált sugárzásának kilépését, amíg a lézeranyagban lehetőleg valamennyi részecskét nem sikerült gerjesztett állapotba hozni.

A lézerhegesztésnek két változata van a lézersugárnak a darab felületén kialakuló teljesítménysűrűségétől függően: hővezetési lézerhegesztés (a teljesítménysűrűség kisebb, mint 10^6 W/cm^2) és mélyvarratos (kulcslyuk) lézerhegesztés (a teljesítménysűrűség nagyobb, mint 10^6 W/cm^2). A hővezetési hegesztés esetén a darab felszínére jutó lézersugár energiája csak hővezetéssel tud a mélyebb rétegekbe jutni. A hővezetési hegesztést többnyire I-varratok (tompavarrat) létrehozására alkalmazzák, hozaganyag nélkül. Hagyományos hegesztőeljárásokhoz képest lényegesen nagyobb az anyagpárosítások lehetősége, egymástól lényegesen különböző összetételű ötvözetek is jól egyesíthetők, a hegesztett kötések szilárdsági jellemzői is jók. A mélyvarratos hegesztés esetén a lézersugárral az anyag felszíni rétegébe juttatott energia lényegesen nagyobb, mint az abból távozó, mert a lézersugár teljesítménysűrűsége nagy. Ezért hamar megolvad és az olvadék felszíne túlhevül, gőzhalmazállapotba jut, az intenzív fémgőzképződés az olvadék felszínén növekvő nyomást eredményez, ami torzítja az olvadék felszínét, mert arra fúvó hatást gyakorol. Az olvadék felszíne behorpad, megnő az abszorpciós felület, tehát időegység alatt több energia jut az olvadékba, mint korábban (miközben a lézersugár teljesítménye nem változik). Az időegység alatt elnyelt energia növekedése azt eredményezi, hogy a fémgőzképződés intenzitása növekszik, nő a gőznyomás az olvadék felszínén, az olvadék még jobban behorpad, még nagyobb felületen képes a lézersugár energiáját elnyelni. Az olvadék bemélyedése addig nő, amíg a gőzképződés intenzitása, a gőznyomás meg bírja tartani az olvadékráter falát [5].

CO_2 lézerekben a rezonátor gázközege jellemzően a 10,6 μm -es hullámhosszúságú (távoli infravörös) sugárzást adó $\text{CO}_2+\text{N}_2+\text{He}$ -gázkeverékkel (4.6 tisztaságú $\text{CO}_2 = 4-8 \%$, 5.0 tisztaságú $\text{N}_2 = 12-30 \%$, 4.6 tisztaságú $\text{He} = 62-84 \%$) történik. Ebben az esetben a CO_2 gáz a lézer „névadója”, ugyanis a CO_2 -molekulák a felső energiaszintről az alsó energiaszintre történő átmenet közben adják le a 10600 nm hullámhosszúságú sugárzást. N_2 alkalmazásával egyszerűbben lehet a CO_2 -molekulákat a felső energiaszintre juttatni, ill. a N_2 -adagolás nagyobb teljesítményt eredményez. A He-atomok a CO_2 -molekulákkal való ütközés során átveszik azok energiáját, amelyet leadnak a környezetnek, ezzel meggyorsítják a CO_2 „relaxálását”, ami szintén a teljesítmény növekedését eredményezi. A nagyon jó hővezető képességű He – segítve a kisülés következtében keletkező hő elvezetését – sokkal stabilabb kisülést eredményez [6,7]. Ezt a közeget nagyfeszültségű árammal gerjesztve, a jelenlévő nitrogén segítségével lézerfény keletkezik. A közegeből féligáteresztő tükrön keresztül lép ki a keletkezett nyaláb. A hegesztés helyére speciális

tükrök és lencsék vezetik a nyalábot. A lézerfény keletkezése során hó képződik, ezért a rezonátor és a közeg hűtéséről, valamint a „fáradt” aktív közeg cseréjéről folyamatosan gondoskodni kell. Ezen lézerrendszerek előnyei és hátrányai a 2. táblázatban találhatóak, míg az elrendezési vázlat a 2. ábrán látható. Ez a lézertípus manapság a legelterjedtebb az iparban, a lézerfény hullámhossza 10,6 mikrométer és a varrat védelme érdekében védőgázt (gyakran héliumot vagy argont) használnak, amely segít a kialakuló plazma mennyiségének korlátozásában. Az argon a hegesztési védőgázkeverékek alapgáza, könnyen ionizálható, viszonylag kicsi a hővezetőképessége. A hélium nagy hővezetőképességű, az ionizációs potenciálja nagyobb, mint az argoné.

2. táblázat: A CO₂ lézerrendszerek főbb előnyei és hátrányai

Előnyök	Hátrányok
<p>könnyen beállítható nagy teljesítmények</p> <p>nagy fényintenzitás</p> <p>viszonylag alacsony gépköltség</p> <p>viszonylag stabil hegesztés</p>	<p>drága, speciális anyagok szükségesek a tükrökhöz</p> <p>nem használható száloptika</p> <p>a fémeknek nagy a visszaverőképessége</p> <p>a lézerenergia nagy abszorpciója a lézer-indukálta plazmában</p>

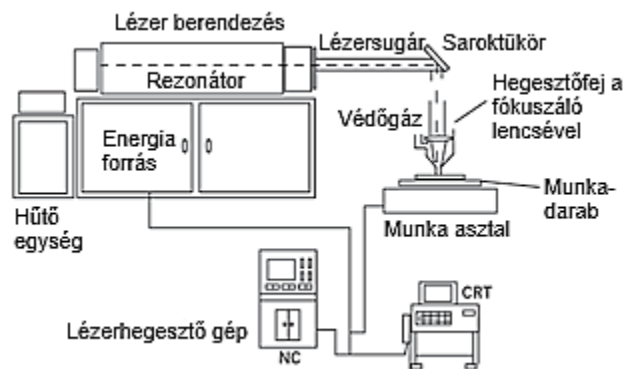
Az ipari alkalmazásra épített, klasszikus szilárdtestlézerben a rezonátor egy ellipsziszalapú, tükröző falú, egyenes üreg. Az egyik fókuszvonalában egy Nd:YAG kristályrúd, a másikban pedig egy villanólámpa csöve van. A geometria törvényei szerint az egyik fókuszról induló sugarak a falon tükröződve a másikba jutnak, függetlenül attól, hogy milyen irányban indultak el. Az Nd:YAG rúd gerjesztési intenzitását növelni lehet azzal, ha az üreg kettős ellipszis alapú. A két ellipszisnek az egyik fókusza közös, így három fókuszvonal alakul ki, melyek praktikusán egy síkban vannak. Ebben az esetben az Nd:YAG rúd a közös fókuszban van, a két szélsőben pedig egy-egy villanólámpa. Természetesen más geometriai elrendezésű és még több fókuszú rezonátor is elképzelhető, megvalósítható. A villanólámpás gerjesztés nagy hátránya, hogy a lámpákból kilépő fény spektruma nagyon széles, amiből a rezonátormédium csak keveset tud hasznosítani a lézerátmenet felső szintjének gerjesztésére. A többi hővé alakul, amit úgy próbálnak kivezetni a rezonátortérből, hogy áramoltatott vízzel árasztják el. Ennek ellenére torzul a rudak vége, mert a palástjuk és a magjuk között hőmérséklet-különbség alakul ki. Jelentősen csökkenthető a rezonátor hőterhelése, ha a gerjesztő sugárzás hullámhosszúsága a villanólámpa spektrumánál jobban illeszkedik a lézermédium felső energiaszintjéhez. A diódalézer éppen ilyen lehetőséget kínál. Amikor megjelentek az elérhető árú, nagy teljesítményű diódalézerek, a villanólámpákat „lecserélték” diódalézertömbökre. Ezzel jelentősen tudták növelni a rezonátor hatásfokát és csökkenteni hőterhelését.

A közeli infravörös tartományban (1,03-1,07 mikrométer) kibocsátó Nd:YAG (3. ábra), korong- vagy száloptikai technológiákon alapuló új generációs szilárdtest lézerek rövidebb hullámhossza lehetővé teszi, hogy a fényt száloptikával továbbítsák és „olcsóbb” lencsékkel fókuszáljanak. Ez jelentős gyakorlati előnyöket biztosít és lehetővé teszi a lézer robothegesztéshez való alkalmazását. Az ilyen lézerek hatásfok növelése érdekében a lézermédiumok anyagválasztéka gyarapodott. A neodímiumot lehet például ittrium-vanadát kristályba is ötvözni (Nd³⁺:YVO₄ lézerek esetében), vagy a neodímium kiváltható itterbiummal (Yb³⁺:YAG, Yb³⁺:YVO₄ lézereknél). A rezonátorból kilépő lézersugár hullámhosszúsága ezek hatására alig változik. Az eredeti 1064 nm-es (közeli

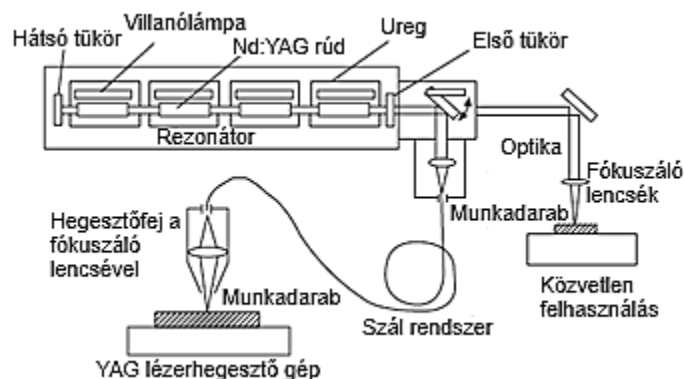
infravörös) hullámhossz az 1000 és 1100 nm közötti tartományba kerül (pl. 1030 nm) a médium anyagától függően [5,6].

A diódalézerek alapját egy jól ismert elektronikai elem jelenti, a félvezető dióda. Ebben az átfolyó áram közvetlenül fénné (LED), sőt lézersugárrá alakul. Egy diódából viszonylag kis fényteljesítmény lép ki, ezért az anyagmegmunkálás céljából tömbösítve készítik, több százat építenek egymás mellé, így akár 100W fényteljesítmény is elérhető. A több kW fényteljesítményű sugárnyaláb eléréséhez további tömbösítésekre vagy sugárcsatolásokra van szükség. Az összerakott diódatömbökből kilépő lézersugarat lencserendszerrel fókuszálják, de csak viszonylag nagy foltátmérő érhető el (ez nem probléma olyan alkalmazásoknál, mint a forrasztás vagy a műanyag hegesztés). A diódák fejlődésével megjelentek nagy teljesítményű lézerek is, amelyek már optikai szálba vezethetőek, így téve könnyebbé a felhasználásukat [5].

A lézersugaras hegesztés alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére: a szegmensek egymástól azonos távolságban helyezkednek el a cső homlokfelületén. A szegmensek a gép kialakításától függően vagy hegesztőtányérban, vagy közvetlen adagolással pozícionálhatóak a cső homlokfelületéhez. Lézerhegesztés esetén rugalmasan változtathatóak a paraméterek (teljesítmény, előtölési sebesség, fókusz távolság), ezért ez a kötési eljárás – mint jelenleg is használt technológia – továbbra is alkalmas a szegmensek hegesztésére. Megvizsgálom a jelenleg használt paramétereket, hogy ezek a legjobb hegesztési paraméterek, vagy van optimalizálási lehetőség. Ezt kísérletsorozat összeállításával, végrehajtásával és kiértékelésével végzem el.



2. ábra: A CO₂ lézerrendszerek elrendezési vázlata [4]



3. ábra: A Nd:YAG lézerrendszerek elrendezési vázlata [4]

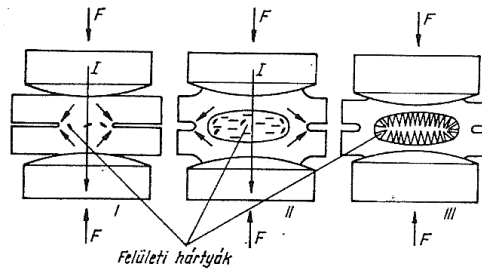
2.2.2 Ellenálláshegesztés

Ellenálláshegesztés (MSZ EN ISO 4063 szabvány szerint 2-es számjelű eljárás) során a munkadarabokon keresztülfolyó áram hevítő hatásával (Joule-hő), a kötési övezet megömlesztésével vagy képlékenyalakításával, sajtoló erő hatása alatt nem-oldható kötés jön létre. Az ellenálláshegesztés fő jellegzetessége a kialakított kötés megbízhatósága, a gépesítés és automatizálás magas foka, az eljárás termelékenysége és a gyártás magas műszaki színvonala. Megkülönböztetünk:

- **ponthegesztést:** a munkadarabokon átlapolt kötést alkalmaznak, különálló érintkezési helyeken (pontokban) kötik össze őket úgy, hogy az érintkezési pontokban a hőmérséklet nagyobb, mint T_{olv} , azaz a kötés folyékony halmazállapotból (ún. ömledéklencséből) való dermedéssel alakul ki (ömlesztve sajtoló hegesztés);
- **dudorhegesztést:** ez a ponthegesztés különleges változata, amelynek során az összehegesztendő anyagok kezdeti érintkezése kis felületű dudor(ok) mentén megy végbe. A dudorokat előzetesen alakítják ki a munkadarabokon, vagy azok alakja révén alakul ki „dudorhatás”. Ezzel lehetőség nyílik a hevítés koncentrálására. A dudorok a hevítés során deformálódnak, majd megolvadnak és a ponthegesztéshez hasonlóan kialakul a hegesztési lencse;
- **csapeglesztést:** ez a dudorhegesztés sajátos esete, melynek során a csap ellendarabhoz ütköző homlokfelületének kialakítása biztosítja az áramkoncentráló hatást;
- **átlapoló vonalhegesztést:** az összehegesztendő átlapolt lemezek között egymást részlegesen átfedő pontok sorából álló kötés (varrat) alakul ki, a ponthegesztés elve szerint. Ha az egyenletes távolságban kialakuló pontvarratok átfedik egymást, tömítő (hermetikus) záróvarrat készíthető;
- **tompá vonalhegesztést:** a többnyire lemezszerű munkadarab(ok) átlapolás helyett tompán illeszkedő élei mentén alakul ki a többnyire hermetikusan záró vonalvarrat, pl. hosszvarratos csövek és zártszelvények gyártásakor;
- **zömítő tompahegesztést:** a munkadarabok érintkező homlokfelületei között jön létre a kötés, a fémet az olvadáspont környékéig ($0,8...0,9T_{olv}$) hevítik, ezután hirtelen megnövelik az nyomóerőt, amelynek eredményeképpen, szilárd halmazállapotban létrejön a hegesztett kötés;
- **leolvasztó tompahegesztést:** a nagyobb keresztmetszetű munkadarabok homlokfelületén létrejövő helyi ívekkel biztosítják a szennyezett felszíni zónák leolvasztását és mögöttük a kellő hőmérsékletre való hevítést. Az ezt követően alkalmazott nagy sajtolóerő, a leolvasztott zónát sorjába nyomja.

Pont- vonal- és dudorhegesztéskor a hegesztett kötés kialakulásának szükséges és elégséges feltétele, hogy az összekötendő munkadarabok érintkező felületein megolvadt anyagréteg (olvadék lencse) alakuljon ki. A hegesztési folyamatot három fő szakaszra lehet bontani (4. ábra). Az első szakasz az áram bekapcsolásával kezdődik, ekkor alakul ki a villamos érintkezés a munkadarabok között. A szilárd fém felmelegszik és kitér, ezáltal a munkadarabok közötti rés megnő, majd az elektródaerő hatására a megolvadt fém kinyomódik a munkadarabok közötti részbe és kialakul a hegesztési lencse záróövezete. A második szakaszban az érintkezési felület tovább nő és az adott munkadarab vastagságától függő átmérőjű hegesztési lencse képződik. Ebben a szakaszban a felületi hárták összetöredeznek és elkeverednek a megolvadt fémbe. A fém tovább tágul és képlékeny alakváltozást szenved. A harmadik szakasz a hegesztőáram kikapcsolása után kezdődik és a fém lehülése és kristályosodása jellemzi. A felhevített fém képlékeny alakváltozása a munkadarabok közötti részben viszonylag nem nagy, de elegendő arra, hogy a munkadarabok felületén lévő oxidhártát eltávolítsa.

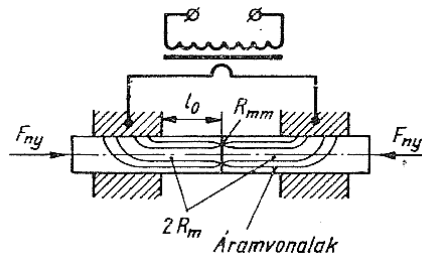
Mégis a képlékenyalakítás a hegesztés egyik tényezője, fémes érintkezést létesít a munkadarabok között és a lencse körül olyan övezetet alakít ki, amely meggátolja a folyékony fém kifröccsenését, a környező légkör és a lencse érintkezését [8].



4. ábra: A ponthegesztett varrat kialakulásának szakaszai [9]

Pont- és vonalhegesztéssel általában 0,05...6 mm vastag alkatrészeket hegesztenek össze, lemezből, sajtolt félkésztermékekből (csőből, idomacélból), öntött, kovácsolt és forgácsolt anyagokból. A legelterjedtebb a kétoldali hegesztés, de ha a munkadarabok szerkezeti kialakítása nem teszi lehetővé, akkor egyoldali hegesztést alkalmaznak. A hegesztési teljesítmény növelésére és a vetemedés elkerülésére széles körben használják a sokpontos és a dudorhegesztést. A legelterjedtebb az átlapolt kötés, itt figyelembe kell venni a fém hegeszthetőségét és a technológiának biztosítania kell az előírt méretű hegesztési lencsét, varratszélességet, pontosztást és átlapolási szélességet. Tompahegesztéskor a munkadarabok homloklapfelületeit képlékenyen alakítják. A fémes kötés kialakulásának körülményeit a homloklapfelületek állapota határozza meg, más előírások vonatkoznak a zömítő tompahegesztésre, mint a leolvasztóra.

Zömítő tompahegesztéskor a homloklapfelületek hőmérséklete mindig alacsonyabb az összehegesztendő fémek olvadási hőmérsékleténél: $(0,8...0,9)T_{olv}$ és a kötések mindig szilárd fázisban alakulnak ki. A homloklapfelületek magas hőmérséklete javítja a fém képlékeny alakíthatóságát és elősegíti az aktív magok kialakulását. Leolvasztó tompahegesztéskor a homloklapfelületek hőmérséklete közel van az összehegesztendő fémek olvadáspontjához. A munkadarabok egymáshoz való közelítésekor a megolvadt fémrétegek a homloklapfelületek között réteget alkotnak, további közelítés során a folyékony fém kinyomódik a homloklapfelületek közül és a homloklapfelületek képlékeny alakváltozást szenvednek. Ez a képlékeny alakváltozás megakadályozza a nem megfelelő szövetszerkezet kialakulását és jelentősen javítja a fém tulajdonságait magas hőmérsékleten.



5. ábra: Hevítés tompahegesztéskor [9]

A tompahegesztés módszerét az anyagminőség és az összehegesztendő munkadarabok keresztmetszetének nagysága és alakja alapján választják ki, figyelembe véve a rendelkezésre álló hegesztőgépeket és a kötés minőségével szemben támasztott követelményeket. Zömítő tompahegesztéssel rendszerint $<250 \text{ mm}^2$ keresztmetszetű, míg leolvasztó tompahegesztéssel $<1000 \text{ mm}^2$ keresztmetszetű munkadarabokat hegesztenek össze. Ennél nagyobb keresztmetszeteket elő kell melegíteni a hegesztéshez:

előmelegítéses leolvasztó tompahegesztéssel 5000...10000 mm² keresztmetszetű, míg ennél nagyobb keresztmetszeteket folyamatos leolvasztású berendezéseken hegesztenek.

A technológiai szempontokat a már a munkadarabok tervezésekor figyelembe kell venni, alakjuk olyan legyen, hogy megbízhatóan lehessen rögzíteni a hegesztőgép megfogó szerkezetében és az árambevezetés a munkadarabba közel legyen a hegesztési övezethez (5. ábra). Mindkét munkadarab érintkezési felületeit körülbelül egyenlő alakúra és méretűre kell készíteni (átmérők eltérése nem lehet nagyobb 15%-nál, az anyagvastagságok eltérése nem lehet nagyobb 10%-nál).

Az ellenálláshegesztés alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére: megvizsgálom, hogy egyszerre egy vagy több szegmens is hegeszthető-e, majd ehhez kell kialakítani a tartót, az elektródát és a technológiai paramétereket. A csövet tengelyszimmetrikusan kell elhelyezni a tartóval és szükséges vagy a cső véglapjának, vagy a szegmensnek az előzetes megmunkálása (a hegesztési eljárásból adódóan). Az összeszorítóerő miatt a szegmens bele fog nyomódni a csőbe.

2.2.3 Kondenzátorkisütéses hegesztés

A kondenzátor impulzushegesztés nem különálló hegesztési eljárás, hanem az ellenálláshegesztések csoportjához tartozik. A hegesztéshez szükséges energiát a korábban feltöltött kondenzátorok egy tirisztoron keresztül a munkadarab speciális transzformátoraihoz vezetik. A töltési idő 0,5...2 másodperc közötti, a hegesztési idő 3...10 ms között van. A kondenzátorkisütéses hegesztés különleges tulajdonságait a következő folyamatjellemzők írják le: meredek áramerősség növekedés, rövid hegesztési idő, nagy hegesztőáramok, alacsony hőbevitel, alacsony hálózati terhelés, magas reprodukálhatóság, különböző anyagvastagságú munkadarabok hegesztése, különböző anyagminőségek hegesztése (pl. acél, sárgaréz), rozsdamentes acélok hegesztése, vékony lemezek hegesztése, galvanikus bevonatokkal ellátott munkadarabok hegesztése, egyszerű minőségbiztosítás a hegesztési adatok rögzítésével (energia, teljesítmény és út), nincs szükség elektróda hűtésre, magas elektróda élettartam érhető el rövid hegesztési impulzussal [3].

A hegesztés egyik legnagyobb előnye az áram meredek növekedése és a hő gyors bevezetése a hegesztési zónába, ami a hegesztési hőmérséklet gyors elérését eredményezi, mielőtt a környező anyag felmelegszik. A többi ellenálláshegesztési eljáráshoz hasonlóan a folyamat célja, hogy annyi energiát biztosítson a hegesztési zónának, ami a hegesztési keresztmetszet felmelegítéséhez szükséges mennyiség mellett az alkatrészekben és elektródákban elvezetett veszteséghőt is kompenzálja. A hegesztéshez szükséges energia/teljesítmény egy változtatható méretű kondenzátortelepből származik. A gépek maximális energiáját és maximális hegesztőáramát ezért csak a gép mérete határozza meg függetlenül a hálózati csatlakozástól. Ezen túlmenően nincsenek magas áramcsúcsok a hálózati vezetéseken, mert a kondenzátort viszonylag lassan töltik (1-2 másodpercig, a töltőkondenzátorok számától függően), a hegesztési szünetekben. Hátránya a kondenzátorok öregedése, amelyek néhány év után gyakran elveszítik a tárolókapacitásukat. A nagyfeszültség használata miatt (>3 kV) a kondenzátoros impulzusos hegesztés különleges folyamatnak számít. Magas hegesztési áramokat produkál (különösen a jó hővezetőképességű anyagoknál) és keskeny varratok esetében használják.

A kondenzátorkisütéses hegesztés alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére: egyszerre egy szegmens hegeszthető ezzel az eljárással, ennek megfelelően kell a tartót és az

elektrodát kialakítani. Szükséges a cső véglapjának, vagy a szegmensnek a hegesztést megelőző előkészítése (recézés a cső esetén, vagy pl. marás a szegmens esetén). Az összeszorítóerő miatt a szegmens bele fog nyomódni a csőbe, meg kell vizsgálnom, hogy milyen hatással van a designra. Számolni kell az elektrodák kopásával és azok felújítási vagy csere költségeivel.

2.2.4 Diffúziós hegesztés

A diffúziós hegesztés (MSZ EN ISO 4063 szabvány szerint 45-ös számjelű eljárás) folyamán az összekötendő alkatrészeket a szolidusz alatti hőmérsékletre hevítik fel, egyidejűleg nyomást létesítenek, amelyet meghatározott ideig fenntartanak. Az összekötendő anyagok kúszása (tartós folyása), illetve az atomok diffúziója révén az érintkezésbe hozott felületek érdességcsúcsain indul a kötéseképződés [10].

Ha két különböző összetételű anyag szorosan érintkezik, akkor az érintkezési felületeken keresztül anyagtranszport történik. Az egyik anyag atomjai a másikba vándorolnak és megfordítva, melyet a kristályok hibái tesznek lehetővé. Meghatározott feltételek között az atomok elhagyhatják, vagy felcserélhetik a helyüket. Az atomok a kristályrácsban hőrezgéseknek vannak kitéve, a rezgésamplitúdók nagysága az atomok hőtartalmától függ, az energia a hőmérséklettel növekszik. A fémek szilárd állapotban csak akkor diffundálhatnak egymásba, ha szilárd oldatot alkotnak. A diffúziót mindenekelőtt a kristályban levő hibák befolyásolják. Ezért az atomoknak a kristály felületén más a diffúziós magatartásuk, mint a belsejében, a kristályfelületen kevésbé erősen vannak kötve (így az atomnak nem kell a rácson keresztül mennie) [11].

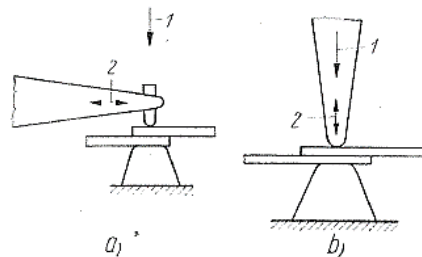
A diffúziós hegesztés tehát az egymással a szolidusz alatti hőmérsékleten érintkező anyagok elemeinek kölcsönös diffúzióján alapszik. Különböző anyagok esetén az alacsonyabb hőmérsékleten olvadó anyag szolidusz vonala alatti értéket kell választani. A hevítési hőmérséklet az olvadási hőmérsékletnek mintegy 0,7...0,8-szerese, így az újrakristályosodási hőmérséklet felett van. A hevítéssel egyidejűleg létesített nyomás következtében létrejön a kötés, de a kötésnek nyomás alatt kell kihűlnie. A hosszú diffúziós idők során az anyag oxidálódásának elkerülése érdekében a hegesztést szükséges vákuumban, vagy semleges védőgáz alatt végezni [12]. A hegesztett kötés nagymértékben függ az összekötendő felületek állapotától, zsírtalanított (alkohollal, acetonnal, maratással stb.) vagy mechanikusan megmunkált (csiszolt) felületre van szükség. Az esetleg jelen lévő oxidokat el kell távolítani a hegesztés előtt, mivel ezek nem sajtolódnak ki a kötésből. A felületelőkészítéstől a hegesztési paraméterek is változnak, mivel az összekötendő felületek jó érintkezéséhez szükséges nyomás a felületek mikrogeometriájától függ. Emellett gyakran nagyon hosszú diffúziós idővel kell számolni a kifogástalan hegesztési kötések létrehozásához, de ez az idő lerövidíthető olyan közbenső réteg behelyezésével, amelynek anyaga mindkét összekötendő anyagba gyorsabban diffundál, mint azok egymásba. Ezeket a rétegeket az anyagpárosításnak megfelelően kell megválasztani [13].

A diffúziós hegesztés alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére: a szegmensek megfelelő pozícióban tartásához egy készüléket kell tervezni, a csövet tengelyszimmetrikusan kell elhelyezni a készülékkel és a szegmensekhez kell nyomni. Ezt a nyomást a viszonylag hosszú diffúziós idő alatt fenn kell tartani. A hevítés történhet semleges védőatmoszférába helyezett indukciós tekerccsel. Mivel a hevítés a szegmens teljes keresztmetszetére hat, így meg kell vizsgálnom a gyémántszemcsés részre gyakorolt hatását.

2.2.5 Ultrahangos hegesztés

Ultrahangos hegesztéskor (MSZ EN ISO 4063 szabvány szerint 41-es számjelű eljárás) a kohéziós kötés felületi nyomás és gerjesztett ultrahang rezgések (mikrosúrlódás, azaz igen kis amplitúdójú, de nagy frekvenciájú rezgőmozgás) által valósul meg. Az ultrahang a felületi kiemelkedéseket és az oxidrétegeket elroncsolja és a fémfelületeket egymásba dörzsöli. A rezgések a viszonylag kis sajtolóerővel együtt előidézik a fém folyását, éppen úgy, mint a hideghegesztés nagy sajtolóerői. A rezgéseknek és a hullámoknak két megjelenési formájuk van – az elektromágneses és a mechanikus hullám. Míg az elektromágneses rezgések hullám alakú terjedéséhez anyagi részecskékre nincs szükség, addig a mechanikus hullámok rugalmas anyaghoz vannak kötve. Ultrahang rezgések elsősorban mechanikus úton kelthetők, legtöbbször nagyfrekvenciás villamos rezgésekkel valamely szilárd testet rugalmas mechanikus önrezgésre gerjesztenek. Ezt két fizikai hatással, a magnetostrikciós és az elektrostrikciós hatással érik el [10].

- Magnetostrikciós ultrahangkeltő: a magnetostrikciós hatás azon alapszik, hogy a ferromágneses rúd vele párhuzamos mágneses térbe helyezve hosszváltozást szenved. Ha ezt a rudat váltakozó mágneses tér hatása alá helyezik, akkor az a tér mágneses váltakozási ütemében deformálódik, a rúd hosszabbodik, illetve rövidül. Ez a hosszváltozás függ az anyag fajtájától, az előkezeléstől, az előmágnesezéstől, a hőmérséklettől. Az elérhető hosszváltozás viszonylag kicsi, 10^{-6} m nagyságrendű. Ha a váltakozó tér frekvenciája és a rúd önrezgése azonos, akkor rezonancia lép fel. A magnetostrikciós hanggenerátorok fő előnye szerkezetük egyszerűsége és olcsósága. Kis frekvenciák esetén jelentős hangenergia állítható elő, amely cm^2 -enként több watt.
- Elektrostrikciós ultrahangkeltő: az elektrostrikciós hatás (ami a piezoelektromos hatás inverze) létrehozásához egy piezoelektromos kristályt váltakozó villamos térbe helyezünk úgy, hogy a tér és a kristály tengelye egy irányba essen, akkor a kristály a villamos tér egyik fázisában nyomást szenved, a másikban húzást. Tehát a váltakozófrekvencia ritmusában villamos rezgések keletkeznek, ezt addig erősítik, míg a kristály sajátfrekvenciája és a gerjesztőfrekvencia között kialakul a rezonancia. Nagyobb frekvenciákkal is nagy hangerősség érhető el, akár több 10 W/cm^2 .



6. ábra: Rezgés és nyomásirány a) fémhegesztésnél; b) műanyaghegesztésnél (Az ábra jelöléseinek jelentése: 1 nyomásirány; 2 rezgés irány) [10]

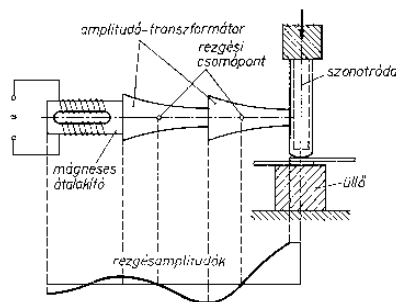
Az elektrostrikciós hatás elvén sok ultrahang készülék működik, az ultrahanghegesztő készülékekben ezzel szemben rendszerint a magnetostrikciós elvét alkalmazzák, mivel a rezgők mechanikai szilárdsága nagyobb és hosszabb az élettartamuk. Az ultrahang nagy hangerősségét úgy érik el, hogy a hangenergiát a legkisebb térre koncentrálnak az ún. koncentrátorral, vagy – 100 kHz alatt – akusztikai transzformátorral (ez fémből készült exponenciális görbével határolt forgástest tölcsér), melyet a magnetostrikciós rezgőkre rákapcsolnak vagy ráhegesztenek, a piezoelektromos rezgőkre pedig felragasztják. A felerősített rezgéseket a szonotródán át továbbítják a hegesztendő alkatrészre. A sajtolóerő következtében a hegesztendő felületeken – a rezgés hatására – létrejövő elcsúszás maradandó alakváltozást okoz (6. ábra). Hegesztés során a pillanatnyi

hőmérséklet elérheti a fémek olvadási hőmérsékletét is, de a kötés átlagos hőmérséklete lényegesen kisebb [14].

Az ultrahangos hegesztésnek négy változata létezik:

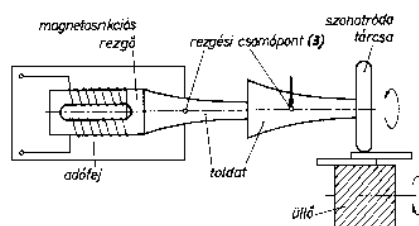
- ultrahangos ponthegesztés,
- ultrahangos projekciós vonalhegesztés,
- ultrahangos torziós vagy körhegesztés (gyűrű alakú varrathoz),
- ultrahangos kontakt vonalhegesztés.

Ultrahangos ponthegesztés esetén az összehegesztendő darabok a szonotróda és az üllő között fekszenek (7. ábra). A szorítónyomást hidraulikusan vagy pneumatikusan hozzák létre, mely merőleges a darabok felületére. A szonotróda a darabok felületének síkjával párhuzamosan vibrál, a kialakult varrat nagyjából elliptikus alakú. Az üllő tömege lehetőleg nagy legyen és saját rezonancia frekvenciája ne egyezzen meg az alkalmazott frekvenciával.



7. ábra: Ultrahangos ponthegesztőgép rezgőrendszere [15]

Ultrahangos projekciós vonalhegesztés elve ugyanaz, mint a ponthegesztésé, de a szonotróda (a hangkeltő az átviteli tagokkal együtt) és az üllő is forgatható (8. ábra). A rezgésirány és a sajtolóerő iránya merőleges. A szorítónyomást a rezgési csomópont adják, a szonotródát nem szabad megnyomni, mivel ennek teljes terjedelmében egyenletesen kell rezegnie. Mindig ügyelni kell arra, hogy a felső hegesztendő darab a szonotródával együtt rezegjen és ne gördüljön le.

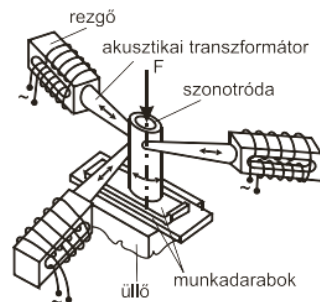


8. ábra: Görgős ultrahang-vonalhegesztőgép rezgőrendszere [15]

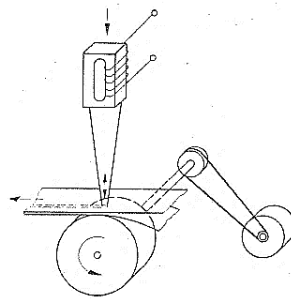
Ultrahangos torziós vagy körhegesztés esetén három rezgő érintőlegesen dolgozik egy cső alakú szonotródán. Az érintőleges elrendezés folytán a szonotróda elfordulással járó torziós rezgéseket hoz létre és hegesztési pontok helyett gyűrű alakú hegesztési varratok keletkeznek. Ezt a megoldást alkalmazzák például tranzisztorházak és konzervdobozok légmentes lezárására (9. ábra). Ultrahangos kontakt vonalhegesztést leginkább műanyagok hegesztésénél alkalmazzák, a legtöbb műanyagot nyomóerővel párhuzamos rezgésekkel hegesztik. Ebben az esetben csak az üllőnek kell forognia, így egyszerűbb a gép felépítése. Műanyagfóliák a hegesztőberendezésen keresztül is húzhatók úgy, hogy nem kell az üllőt hajtani (10. ábra).

Az ultrahanghegesztés mindenekelőtt igen vékony alkatrészekhez alkalmas, másik alkalmazási területe egymástól eltérő anyagok kötése (villamosipar, reaktortechnika

részére). Valamennyi kötés átlapolt kötés, amelyeket ponthegesztéssel, vagy folyamatos vonalhegesztéssel készítenek. Az ultrahanghegesztés legnagyobb alkalmazási területe a villamos ipar – ezen belül is az elektronika, további alkalmazási területe a csomagolóipar (pl. konzervdobozok gyártása, teafilterek zárása, stb).



9. ábra: Körvarrat torziós rezgésekre gerjesztett szonotródával [3]



10. ábra: Műanyagfólia vonalhegesztőgép működési elve [10]

Az ultrahangos hegesztés alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére: a szegmensek egymástól azonos távolságban helyezkednek el a cső homlokfelületén, ezáltal megszakított felületként kell kezelni őket. A szegmensek magassága és a cső hossza jóval meghaladja az általában használt méreteket. A szegmens és a cső között nem lehet létrehozni az átlapolt kötet, ami kizárja a pont- és a vonalhegesztési változatot. A folyamatos varrathegesztést műanyagokhoz használják, így ez sem alkalmazható ebben az esetben. Amit érdemes lenne részletesebben megvizsgálni, az a gyűrű alakú hegesztés, azaz körvarrat készítése a 9. ábra alapján.

2.2.6 Dörzshegesztés

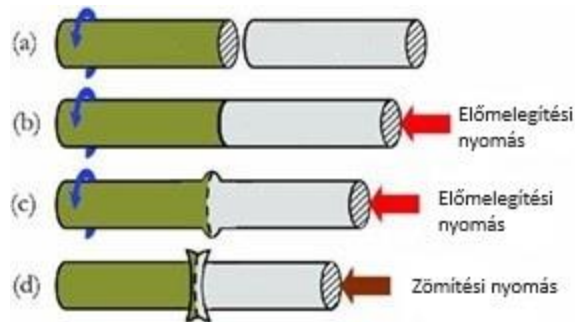
Dörzshegesztéskor (MSZ EN ISO 4063 szabvány szerint 42-es számjelű eljárás) a felületeket nyomás és súrlódás révén hevítik fel, a hegesztési folyamat eredménye hasonlít a kovácshégesztéséhez. Az eljárás nagyon megfelelő olyan alkalmazásokra, ahol legalább az egyik alkatrész forgásszimmetrikus. A kötés az egymáshoz szorított felületek relatív elmozdulásakor fejlődő hő (makrosúrlódás, azaz nagy elmozdulású, de kis frekvenciájú rezgés, illetve forgás) hatására jön létre. Az érintkező felületek szolidusz hőmérsékletig hevülnek, majd a tengelyirányú zömítőnyomás hatására összehegednek (11. ábra). A kötés kialakulásához nincs szükség hozaganyagra [16].

Dörzshegesztés változatai:

- Forgó mozgású dörzshegesztés változatai:
 - Egyik darab forog,
 - Mindkét darab forog, de a szögsebesség eltérő,
 - Két darab forog az álló közdarab (pl. csőtengely) végein,
 - Közdarab forog az álló végdarabok között.

A leggyakrabban alkalmazott dörzshegesztési változat a forgó mozgású dörzshegesztés, azok közül is az a változat amikor csak az egyik darab forog. A gyakorlatban alkalmazzák a folyamatos hajtású és a lendkerekű dörzshegesztést egyaránt. A forgó dörzshegesztés igen gyakori a gépiparban és az autógyártásban. Alkalmazási korlátot az jelent, hogy legalább az egyik darabnak forgás szimmetrikusnak kell lenni. Profilok hegesztésére a forgó dörzshegesztés csak különleges készülékezéssel, illetve pozíciótartó fékrendszerrel használható;

- Forgó gyűrűs dörzshegesztés: Az eljárás változatot vékony falú csövek hegesztésére használják, ugyanis a vékonyfalú csövek megroppanhatnak az egyszerű forgó mozgású dörzshegesztéseknél, ezért egy gyűrű forog a hegesztendő felületek körül;
- Felrakó dörzshegesztés: A felrakó dörzshegesztéssel vékony rétegek hegeszthetők fel akár sík, akár alakos (pl. hengeres) felületekre;
- Rezgő dörzshegesztés: Profilok hegesztésére fejlesztették ki a rezgő és az orbitális dörzshegesztést. A profilok hegesztése ezekkel a változatokkal egyszerűen megoldható;
- Kavaró dörzshegesztés: A legújabban kifejlesztett eljárás változattal („friction stir welding”) például vastagabb lemezek tompakötése is elkészíthető;
- Orbitális dörzshegesztés: a kavaró dörzshegesztés nagyobb átmérőjű, nem forgatható csövek (csővezetékek) körvarratainak elkészítésére továbbfejlesztett változata.



11. ábra: A dörzshegesztés folyamata [17]

Forgó mozgású dörzshegesztés: kezdetben az egyik munkadarabot forgatják, a másik pedig álló helyzetben marad (a). A megfelelő forgási sebesség elérésekor a két munkadarabot összenyomják, kisebb tengelyirányú erőt alkalmazva (b). Az érintkező felületek a súrlódás hatására felhevülnek, kialakul a képlékeny határréteg az érintkező felületek között, a munkadarabok rövidülnek (c). A forgás leállításával és nagyobb tengelyirányú erő alkalmazásával a képlékeny határréteg hirtelen kitüremkedik, a súrlódás befejeződik, kialakul a gallér (d), amely a művelet végén eltávolítható. A munkadarabok súrlódási viszonyai számos tényezőtől függenek [18]:

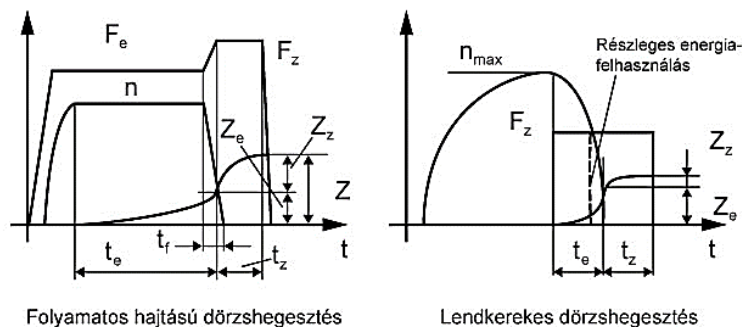
- az anyagok fizikai tulajdonságaitól és az anyagpárosítástól,
- az érintkező felületek geometriájától,
- a felületi érdességtől, a felületek hőmérsékletétől, a súrlódási állapottól,
- a hegesztési jellemzőktől (nyomások, fordulatszám, idők).

Leggyakrabban a folyamatos hajtású és a lendkerekű dörzshegesztéssel találkozhatunk. A folyamatos hajtású dörzshegesztés során a munkadarabot forgótokmányba fogják, majd 3...120 1/s-ra felpörgetik (kedvezőek a 13...50 1/s közötti fordulatszámok). Optimális fordulatszám kalkulálható az $n = 20000/d$ [1/min] összefüggéssel, ha a d átmérőt mm-ben vesszük figyelembe. A fordulatszám elérése után az álló munkadarabot 10...150MPa előmelegítési nyomással érintkeztetik a forgó munkadarabbal. A súrlódás következtében

a munkadarabok 1...150 s-ig hevülnek, a képlékeny anyag nagy része sugárirányban kinyomódik a kötés síkjából. Amint beáll a hőegyensúly, a forgómozgás megszűnik (lefékezik a forgó darabot) és a tengelyirányú erőt növelve a gép a két munkadarabot 20...600 MPa zömítőnyomással egymásba nyomja, kialakítja a kötet. A lendkerékes dörzshegesztéshez szükséges energia forgó lendkerékrendszerben halmozódik fel, a folyamat gyorsabb, mint a folyamatos hajtásúé. A fordulatszám elérése után az álló munkadarabot érintkeztetik a forgó munkadarabbal, a lendkerék forgató hatását egy bizonyos idő eltelte után megszüntetik, majd a tengely irányú erő még néhány másodpercig hat (12. ábra) [14].

A dörzshegesztés alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére: a szegmensek egymástól azonos távolságban helyezkednek el a cső homloklapfelületén, ezáltal megszakított felületként kell kezelni őket. A szegmenseket egy megfelelően kialakított tartóban (a hegytámaszban) lehet elhelyezni - ez biztosítja a szegmensek pozícióját a hegesztés során – és ezt az oldalt tekintve az „álló munkadaraboknak”. A csövet a forgótokmányba lehet befogni, figyelve arra, hogy ne szorítsuk meg túlságosan, mert eldeformálódhat a vékony falvastagság miatt (2mm). Viszont eléggé meg kell szorítani ahhoz, hogy amikor érintkezik a szegmensekkel, akkor ne csússzon meg a tokmányban. Szükség esetén egy persely (vagy vastagabb falú cső) alkalmazható, mely illeszkedik a cső belső átmérőjéhez, így segítve a megfelelő szorítás megvalósítását. A cső teljes hosszát is figyelembe kell venni a hátsó ütköztetés miatt, ha túl hosszú, akkor zömítésnél esetleg kihajolhat a tokmányban (legrosszabb esetben meggyűrődhet).

A kötés kialakítására 1,5mm-es réteg van biztosítva a szegmensen, így csak a lendkerékes dörzshegesztés jöhet szóba a megengedhető anyagfogyást tekintve. Ebből adódóan keskeny hőhatásövezettel számolhatunk, ami nem lesz hatással a gyémántszegekre tartalmazó részre. A megszakított felületek miatt a sorjaképződés irányítása lehet még feladat és szükség szerint a sorja eltávolítása (kísérletek során meg kell vizsgálni a sorjaképződés helyét és mértékét, hogy a felhasználás során okoz-e problémát és milyen hatással van a design-ra).



12. ábra: A folyamatos és a lendkerékes dörzshegesztés munkarendje (Az ábra jelöléseinek jelentése: t_e : előmelegítési idő, n : fordulatszám, n_{max} : maximális fordulatszám, t_f : fékezési idő ($t_f = 0,1...0,5$ s), t_z : zömítési idő, F_e : előmelegítési erő, Z_e : előmelegítési zömülés, Z_z : zömítés alatti zömülés, Z : teljes zömülés) [19]

2.2.7 Keményforrasztás

Az MSZ EN ISO 4063 szabvány szerint 91-es, 92-es, 93-as számjelű eljárás, amelynek során a megolvadt forrasztóanyag nedvesíti és beteríti az összekötendő szilárd felületeket, majd a megszilárdulása után erős adhéziós-diffúziós kötést képez. Amikor a forrasztóanyag olvadáspontja – és így a forrasztás munkahőmérséklete – nagyobb, mint 450°C , az eljárást keményforrasztásnak nevezzük. A keményforrasztás forrasztóanyaga minden esetben lényegesen nagyobb kötési szilárdságot biztosít, mint a lágyforrasztásnál használt forrasztók.

A fémek, ötvözetek és kerámiák keményforraszthatósága az anyagnak azon tulajdonsága, hogy keményforrasztással kialakítható rajta olyan kötés, amely az előírt gyártási folyamat végrehajtásával kielégíti az elvárt üzemi követelményeket. A keményforraszthatóságnak fontos eleme a forrasztó általi nedvesíthetőség. A nedvesedés (nedvesíthetőség) mértéke általában a θ peremszög értékével becsülhető. A peremszög egy kulcsfontosságú technológiai paraméter a forrasztóanyagok kiválasztásában: $\theta \ll 90^{\circ}$ nedvesítési feltétellel van szükség ahhoz, hogy jó minőségű forrasztott kötés jöjjön létre (13. ábra): általában egy anyag forraszthatósága annál jobb, minél kisebb az adott forrasztó esetén a nedvesítési szög [20].



13. ábra A peremszög [20]

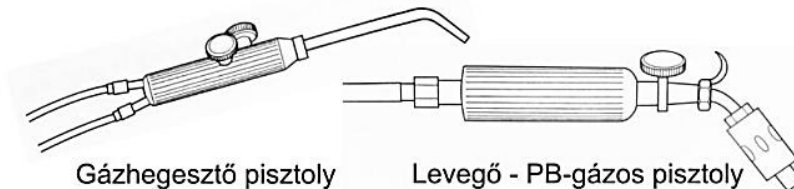
A keményforrasztók olyan eutektikus ötvözetek, amelyek alapalkotója: Al, Ag, Cu, Pd és Ni. Az ötvözetek szerint két-, három- és többalkotós ötvözetek egyaránt beszerezhetők. A keményforrasztók legelterjedtebb anyagai a Cu-Zn, a Cu-P és a Cu-Ag-Zn ötvözetek, amelyek alapvetően eltérő kémiai összetételűek a velük forrasztott legtöbb alapanyagtól. A rézalapú forrasztók kemencés forrasztásnál redukáló atmoszférában forrasztószer nélkül is jól alkalmazhatók. A forrasztóanyagok felhasználásra por, fólia (feltekercselve), paszta és huzal formában készülnek. A keményforrasztás alkalmazási előnyei: vékony alkatrészek kötése nagy szilárdságú kötéssel; készre szerelt szerelvények több pontján egyszerre jöhet létre a kötés; nagy kiterjedésű kötések hozhatók létre; csekély a torzulás; elkerülhető a túlhevülés; az alapanyag nem módosul; vegyes kötések: acél+alumínium, Al+Ti, Al+Mg stb.; a kötés és a hőkezelés egyszerre megtörténhet; optimális hőtechnikai jellemzők a gyártmányokon; jól automatizálható.

A keményforrasztás eljárásváltozatai:

- Diffúziós forrasztás;
- Elektronsugaras forrasztás;
- Ellenállás-forrasztás;
- Indukciós forrasztás;
- Infrasarkan forrasztás;
- Ívforrasztás (nem fogyóelektródás);
- Kemencés forrasztás;
- Lángforrasztás;
- Lézersugaras forrasztás;
- Mártó forrasztás.

Láng keményforrasztás: a legelterjedtebb hevítési mód. A forrasztó pasztaként is adagolható bórxax forrasztószerrel összekeverve, illetve a huzal vagy pálcza kisserelésű

forrasz felhevített vége belemártható a folyasztószerbe, amely így rátapad, és a huzallal együtt jut a kötési zónába, ahol előbb olvad meg, mint a forrasz. A forrasztáshoz a lánghegesztés pisztolya teljesen alkalmas (14. ábra), a hevítést a gázláng biztosítja. Nem a forraszanyagot kell megolvasztani a lánggal, hanem az alkatrészeket kell kellően felmelegíteni, amely a hozzá érintkező forraszt megolvasztja. A használható gázok: acetilén + oxigén, propán + oxigén, pébégáz + oxigén, levegő + földgáz, levegő + pébégáz. A gázok kiválasztását a költségek mérlegelésével kell végezni [20].



14. ábra Hőforrások a láng keményforrasztáshoz [20]

Indukciós forrasztás: nagyfrekvenciás váltakozó árammal gerjesztett indukciós tekercs hevíti a munkadarabokat (15. ábra). A forraszanyagot és a folyasztószert előre el kell helyezni a kötési zónában. Az indukciós forrasztásnál gyakori az Ag-forraszok alkalmazása [20].

Az indukciós forrasztás alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére:

Szükség lehet a szegmensek megtámasztására, hogy forrasztás közben ne mozduljanak el se a megolvadó forraszanyag, se a mágneses erő hatására. Ez csak készülékezéssel oldható meg és a készüléket nem mágnesezhető anyagból kell készíteni, hogy forrasztás közben ne melegedjen fel. Emellett, ha a forraszanyag változik a láng keményforrasztáshoz képest, ennek a hatását is vizsgálni kell mind a szegmens, mind a cső komponensre.



15. ábra Hevítés indukciós tekercessel [20]

A keményforrasztás alkalmazhatósága a szegmensek rögzítésére: a vevők nem akarják eldobni a csövet költségtakarékosság miatt, ezért levágják a szegmenseket és láng keményforrasztással új szegmenseket forrasztanak fel. Ez egy általános javítási módszer az építkezéseken. Emellett létezik a termékportfólióban olyan kis átmérőjű fúrókorona, amelyre ezzel a módszerrel rögzítik a szegmenseket. Ezáltal a nagy átmérőjű terméknel is alkalmazható lenne, viszont számolni kell azzal, hogy a láng keményforrasztott kötésnek kisebb a törőszilárdsága a lézersugarasan hegesztett kötéshez képest, de így is a minimálisan előírt törésérték felett van.

3. CÉLKITŰZÉS

A szakirodalom áttekintése alapján látható, hogy fémes szerkezeti anyagok közötti kötés létrehozására sokféle módszer ismeretes, ezek közül is talán a legdinamikusabban fejlődőek a lézersugaras hegesztések. A különböző eljárások széles skáláján sok publikáció született az egyes eljárások sajátosságairól, paramétereinek hatásáról és a kialakított kötések tulajdonságairól.

PhD munkám során elsődleges szempontnak tekintem, hogy olyan célokat és feladatokat fogalmazzak meg, amelyek összhangban vannak a Hilti Szerszám Kft-nél folyó kutatási és technológiai projektekkel, ezáltal a tudományos eredményeknek gyakorlati haszna is legyen.

Kutatómunkám meghatározásakor a következőkben felsorolt célkitűzéseket követem:

1. Kötésminőséget befolyásoló tényezők feltérképezése:
 - A meglévő lézersugaras hegesztési technológia alaposabb elemzése;
 - A hegesztési varratok tulajdonságainak / minőségének több szempontú értékelése.
2. Alternatív kötési eljárások vizsgálata:
 - Más kötési technológiák keresése, amelyek alkalmasak (lehetnek) a fűrókorona termékek kötéséhez;
 - A megfelelő hegesztési technológia kiválasztásához szükséges összehasonlító vizsgálatok elvégzése.
3. Technológiai paraméterek optimalizálása:
 - A hegesztési varrat tulajdonságait befolyásoló folyamatparaméterek hatásainak vizsgálata és értékelése;
 - Optimálisnak tekinthető hegesztési munkarendek meghatározása.
4. Kötés szilárdságának növelési és szilárdságszórásának csökkentési lehetőségei:
 - A hegesztési varratot befolyásoló további körülmények feltárása, vizsgálata;
 - Kötésszilárdságot/kötésminőséget javító beavatkozási módszerek meghatározása.
5. Tesztelési / vizsgálati módszer fejlesztése:
 - Módszerek keresése, amelyek egyértelműbben és/vagy pontosabban meghatározzák a kötések közötti különbségeket;
 - Gyors minősítő tesztek kidolgozása.
6. Kötés keménységének – ezen keresztül repedésérzékenységének – számszerűsítése:
 - Kötés hőhatásövezeti kiterjedésének előzetes becslése;
 - Keménységfüggvények validálása.

4. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Kísérleteim és vizsgálataim többségét a Hilti AG kecskeméti gyárában, a Hilti Szerszám Kft.-nél végeztem el, de igénybe vettem más Hilti gyárak, magyarországi Egyetemek, laboratóriumok és külső partnerek segítségét is.

4.1 Service ring

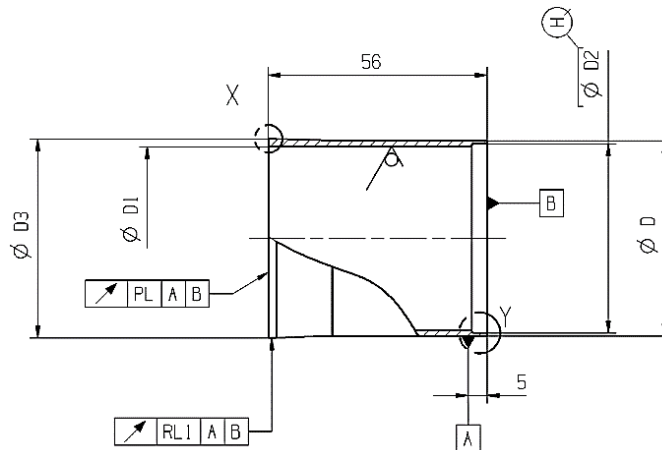
A service ring megmunkálása külső partnernél történik, gyártás közben mérik és dokumentálják az alábbi paramétereiket (16. ábra):

- csatlakozó átmérő ($\varnothing D$) a fúrókorona csőhöz, melynek tűrése $\pm 0,15\text{mm}$;
- külső átmérő a homlokfelületen ($\varnothing D3$), melynek tűrése $\pm 0,25\text{mm}$;
- belső átmérő a homlokfelületen ($\varnothing D1$), melynek tűrése $\pm 0,25\text{mm}$.

A mérési jegyzőkönyvet elküldik a termékekkel együtt, majd a gyár raktárába érkezést követően ún. bejövőáru vizsgálatot végeznek rajta az SAP rendszerben definiált „Bejövőáru ellenőrzés: Rohr CM 35-250” mérési terv alapján (17. ábra). Szemrevételezést követően a $\varnothing D2$ csatlakozó átmérőt megméri egy Mitutoyo Crysta-Plus M574 3D koordináta mérőgépen [21], melynek mérési tartománya 500x700x400mm, mérési pontossága 3,5 μm , a mérendő darab maximális magassága 510mm, súlya 180 kg lehet. A mérőgép kézi működtetésű, súrlódásmentes légcsapágyas felfüggesztéssel minden tengelyen, melyből kettőt rögzíteni kell a vizsgálat előtt és a szabad mozgású tengelyen végezhető el a mérés.

Következő lépésben egy Jenoptik-Hommel Opticline C608 típusú [22] optikai mérőállomáson megméri a radiális ütést és a homlokütést. A C608 mérési tartománya $\varnothing 80 \times 600$ mm, mérési pontossága 0,1 μm (átmérő és hossz mérésnél), $0,0006^\circ$ forgatásnál. Mérési gyorsasága 10–80 mm/s között van és átlagosan 3-30 másodperc alatt végez el egy mérést (a mérendő jellemzők számától függően). Elsősorban tengely alakú, nagyrészt tengelyszimmetrikus munkadarabok mérésére alkalmas, de lapolások és négyzetes felületek is megmérhetők. A mérendő darabokat két csúcs közé kell rögzíteni, ami gyors darabcsere eredményez. A kiértékelő szoftverével nem csak tesztervek készíthetők, hanem minden mérési eredmény megjeleníthető és feldolgozható egy grafikus felhasználói felület segítségével (18. ábra). A mérési eredmények néhány másodperc múlva elérhetők, a mért értékek különböző nézetekben jeleníthetők meg. Az egyes tesztjellemzők értékprogresszív kijelzője be van építve és az adatok továbbíthatóak a statisztikai folyamatvezérléshez (röviden SPC).

A bejövőáru vizsgálati terv alapján az eredményeket rögzítik az EiQMI rendszerben, majd ezt követően kiértékelik. A 19. ábrán a kísérletekhez használt $\varnothing 102$ mm-es csőkomponens értékeiből kiolvasható, hogy az $\varnothing D2$ csatlakozó átmérő eltér az előírásoktól, de a többi jellemző a meghatározott tűrésen belül van. Erre az eltérésre a gyárnak „Kivételes engedély”-t (PA) kellene kérnie, ha széria termékről lenne szó. Mivel a vizsgálataim nem érintik ezt a csatlakozó méretet, ezért használhatom a terméket a kivételes engedély nélkül is.



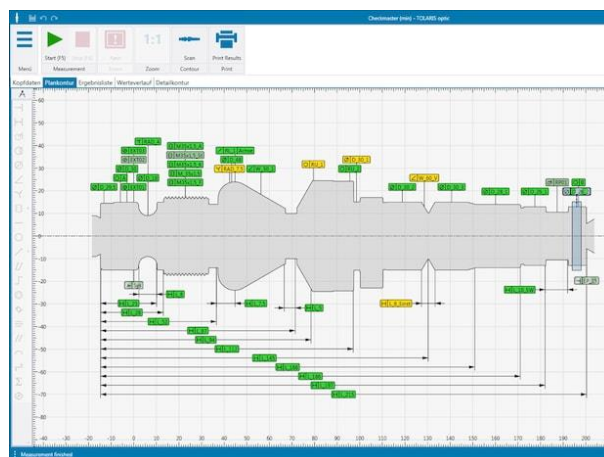
16. ábra: Service ring rajza [23]

HILTI		SAP/R3 - Teilplan		Prog.:	ZPP00XP_OP_LDBXTRC
Material:	Rohr CM 35 - 250			Gedruckt am:	19.05.2023 11:19
Vorgang:	10 Bejövőáru ellenőrzés			Teilplan:	PP
Plangruppe:	4931	PlangruppenZähler:	24	ÄndNr.:	634381
Werk:	518	Status:	Freigegeben allgemein	Folge:	0
				Gültig ab:	04.05.2018
				Arbeitsplatz:	4403
				Sachbearb.:	MAJOORB

Prüfmerkmale:

Prüfmerkmal	Stammnr.	Bezeichnung	Software	obere Tol. untere Tol.	n - c Intervall
P18Q-2		Szemrevételezés			
0020	101A	Epség és sérülésmentesség. A terméknek épek, sérülésmentesnek kell lennie. Bemnyomódás, kézzel érezhető karc, rozsdás nem megengedett. Az éleknek sörjamentesnek kell lenniük!	QM-OK	Átvételi minősítés	5
P18-0720		3D Koordináta mérőgép			
0030	158 H	D2 Átmérő A csatlakozó felület D2 átmérő értékét lásd a táblázat D2 oszlopában!	D2 mm	+0,07 +0,03	5
P18-7270		Profilprojektor			
0040	214	RL1 A és B felülethez képest RL1 Lásd táblázat RL1 oszlopát! Alternatív mérőeszköz: asztali futásvizsgáló - 8255 Mintavételi darabszám: Szigorított vizsgálat esetén: 5db Normál vizsgálat esetén: 1db	RL1 mm	+0,30	Mintavételi gyakoriság szerint
0050	215	PL homlokúts A és B felülethez képest PL Pl értékét lásd táblázat PL oszlopában! Alternatív mérőeszköz: asztali futásvizsgáló - 8255 Mintavételi darabszám: Szigorított vizsgálat esetén: 5db Normál vizsgálat esetén: 1db	0,00 mm	+0,10	Mintavételi gyakoriság szerint

17. ábra: Bejövőáru vizsgálati terv [24]



18. ábra: Mérési eredmények megjelenítése [24]

Customer no.		Customer	Material short text Pipe CM 102		Customer no.	Material no. 24564	Revision	Manufacturer (profit center)				
Vendor no. 1101634	Vendor	QC	Inspection plan Pipe CM 52	Insp. type Z01	Operation no. 0010	Operation Bejövő ellenőrzés - Bejövő ellenőrzés	IP-date					
Production order	Prod. batch 0000958231 - 0001270581	Supplier batch 28-0113 - 3547-1	Order size 113 - 564	Inspection lot 10000938741 - 10001489814	Work center 4403	machine						
No.	Characteristic	Ref. value	LTL	UTL	min	max	\bar{x}	σ	Number	C_p/C_m	C_{p^*}/C_m	SV Histogram
10 / 20	Épség és sérültségmentesség.								115 o.k. 0 n.o.k.			
10 / 30	D2 Átmérő	98.00	98.03	98.07	97.11	98.55	98.2023	0.1252	115 [115]	(0.05)	(-0.35)	
10 / 40	RL1 A és B felülethez képest	0.00		0.30	0.05	0.28	0.1700	0.0742	5		(0.58)	
10 / 50	PL homlokfelület A és B felülethez képest	0.00		0.10	0.02	0.09	0.0380	0.0303	5		(0.68)	
		0.00		0.10	0.00	0.10	0.0377	0.0235	90		(0.89)	

19. ábra: Service ring EiQMI kiértékelése [24]

4.2 Szegmens

A szegmens típusa ún. LC-line, amit kis- és közepes teljesítményű fűrógépekhez ajánlanak. Alkalmazható üreges- és tömör téglákhoz, aszfalthoz, márványhoz, B25...B35 nyomószilárdságú betonhoz. A szegmensek porkohászati úton készülnek, a porok összekeverése után egy készülék rétegenként építi fel a szegmenst, majd hozzáadja az előre meghatározott méretű gyémántszemcséket. A rétegzési folyamat teljesen ellenőrzött, a rétegek vastagsága és száma szabadon változtatható. Ezután beállítják a szegmens sűrűségét (ami befolyásolja a hegesztést a késztermék előállításánál, valamint a vágási sebességet és a vágótest kopását az alkalmazás során).

A szegmensek két fő zónából állnak, az egyik a forgácsolásért felelős „vágó zóna” (amely gyémántszemcséket tartalmaz), a másik pedig a hegesztéshez szükséges „semleges zóna” (amely nem tartalmaz gyémántszemcséket). A hegesztett kötés kialakításában csak a semleges zóna játszik szerepet, ezért az alábbiakban csak ezt a zónát említem és vizsgálom. A szegmensek semleges zónájának kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza. A szegmensek anyagának elméleti sűrűsége 7930 kg/m^3 . A szegmens szélessége $3,5 \pm 0,2 \text{ mm}$, hossza $24,3 \pm 0,2 \text{ mm}$ (20. ábra).

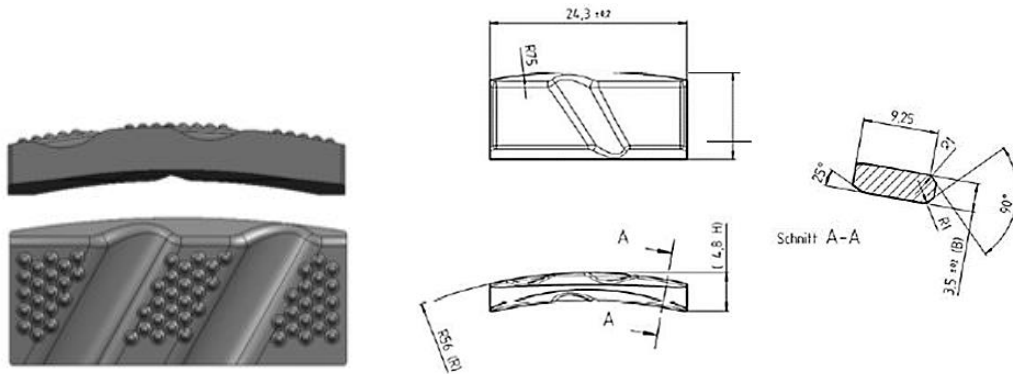
A szegmensek gyártása a Hilti liechtensteini gyárában történik, az SAP rendszer jelzi, ha részletes vizsgálatra van szükség, egyéb esetekben csak vizuális ellenőrzés történik. Csomagolás után kiszállítják a szegmenseket a felhasználási helyre. Amennyiben részletes vizsgálatot jelez a rendszer, akkor

- sűrűség és zsugorodás mérést;
- keménységmérést;
- hárompontos hajlító vizsgálatot (keresztirányú szakítószilárdság, TRS): a próbatest alakváltozásán alapul, lassú erővel hajlítva egészen addig a pillanatig, amíg anyaghiba lép fel a húzófeszültség területén;
- mikroszkópi vizsgálatot végeznek.

4.2.1 Sűrűség és zsugorodás mérése:

A sűrűségméréseket Arkhimédész (i.e. 287-212) törvénye alapján végezték, mely szerint a szilárd anyagot ismert sűrűségű, állandó hőmérsékleten tartott folyadékba merítve a térfogata az igen pontosan mérhető felhajtóerőből ($F_f = V \cdot g \cdot \rho_w = W_{s,a} \cdot g - W_{s,w} \cdot g$) kiszámítható, míg a tömeget analitikai mérleggel nagyon pontosan lehet mérni. A szegmensek tömegét még szinterezés előtt levegőn, majd szinterezés után vízben mérték és amikor a mérleg legalább 4 másodpercig azonos értéket mutatott, az értéket feljegyezték. A szegmensek sűrűségét az (1) alapján számították ki úgy, hogy 10-10

véletlenszerűen kiválasztott szinterezés előtti és utáni szegmens átlagértékét vették figyelembe.



1) 2) 20. ábra: 1) LC-line szegmens katalógusképe 2) főbb méretei [24]

$$\rho_s = \frac{W_{s,a}}{W_{s,a} - W_{s,w}} \rho_w \quad (1)$$

ahol ρ_s a szegmens sűrűsége és ρ_w a víz sűrűsége (water), $W_{s,a}$ a szegmens tömege levegőn (air) és $W_{s,w}$ a szegmens tömege vízben (water).

A lineáris zsugorodás mértékének meghatározására (2) a szinterezés előtti és a szinterezett szegmensek közötti sűrűségkülönbségeket használták:

$$\text{Lineáris zsugorodás} = \frac{\left(\frac{1}{\rho_{s,g}}\right)^{1/3} - \left(\frac{1}{\rho_{s,s}}\right)^{1/3}}{\left(\frac{1}{\rho_{s,g}}\right)^{1/3}} \quad (2)$$

ahol $\rho_{s,g}$ a szegmens szinterezés előtti, $\rho_{s,s}$ a szinterezés utáni sűrűsége. A mért átlagos sűrűségeket összehasonlították az elméleti sűrűségekkel. Az elméleti sűrűség egy teljesen sűrű anyag sűrűségét írja le (porozítások nélkül, ami csak elméletileg elérhető). Az elméleti sűrűséget a rendszer egyes komponenseinek tömeghányada és sűrűsége alapján számítják ki (3):

$$\rho_{\text{elméleti}} = \frac{1}{\frac{W_1}{\rho_1} + \frac{W_2}{\rho_2} + \dots + \frac{W_n}{\rho_n}} \quad (3)$$

ahol a W_n az n -edik komponens tömeghányadát, a ρ_n pedig az n -edik komponens sűrűségét jelöli.

4.2.2 Keménységmérés:

A keménységvizsgálatot egy Emcotest DuraScan 70 G5 készülékkel végezték (21. ábra). A tesztgépet Vickers behatoló testtel és HV 0,025-HV50 terhelési tartománnyal szerelték fel és a vizsgálati eljárás az EN ISO 4498 [25] szerint történt a metallografikusan polírozott keresztmetszeteken azért, hogy a vágás után eltávolítsák a deformációs zónát és sima felületet kapjanak. A keménységet HV5-tel mérték, ami 49,03 N [26] terhelőerőt jelent.



21. ábra: Emcotest DuraScan G5 keménységmérő gép [24]

4.2.3 Keresztirányú hajlító próba:

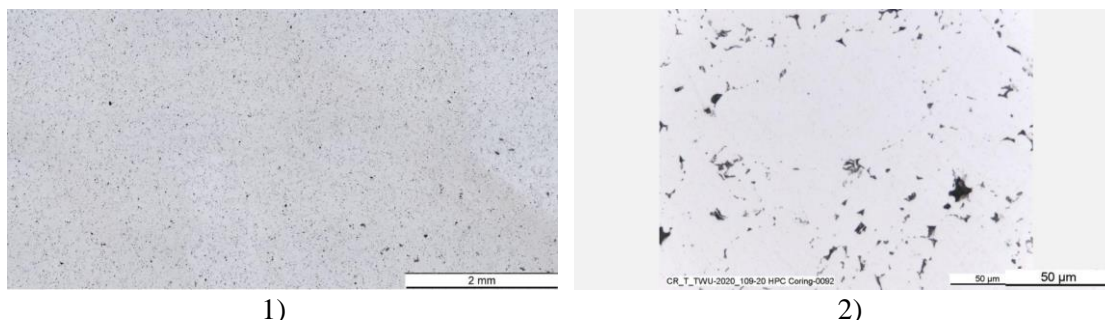
A hárompontos hajlítást Zwick/Roell Zmart.pro géppel végezték. A próbatestet 20 mm hosszúságú támasztófeszítáv közé helyezték, majd a vizsgálatot 10 mm/perc hajlítási sebességgel végezték el. A hajlítási feszültség (σ_f) a következőképpen számítható ki (4):

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4)$$

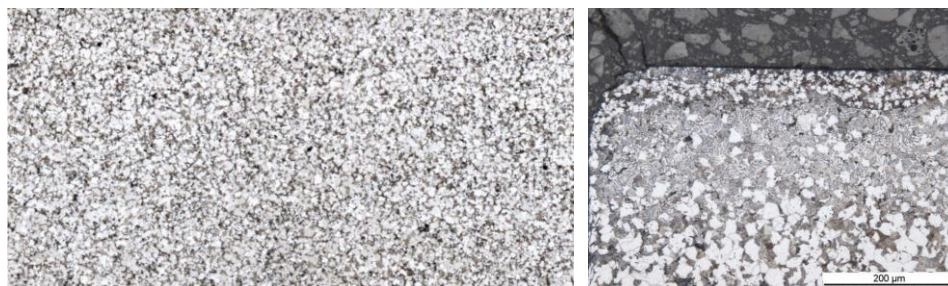
ahol F az erő [N], L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], d a próbatest vastagsága [mm]. A vizsgálatok eredményének összefoglalása a 3. táblázatban található.

4.2.4 Mintaelőkészítés metallográfiához:

A szinterezett szegmenseket egy Ata brilliant 220 metszetvágó géppel és SiC vágókoronggal a szegmens közepén elvágták. A fél mintát etanollal leöblítették és etanollal töltött ultrahangos fürdőben 15 másodpercig tisztították, majd Polyfast fenolgyantába beágyazták 250 bar nyomáson és 180 °C hőmérsékleten. Ezután a Struers által szállított különböző anyagok felhasználásával végzett polírozás következett a Struers Tegramin-25 automata polírozógépet használva az alábbi öt lépésben: 1. MD - Allegro 9 μ m, 2-3. MD - Largo 6 μ m (kétszer egymás után alkalmazva), 4. DAC 3 μ m, 5. NAP 1 μ m. A polírozási lépések között a mintákat etanollal leöblítették, ultrahanggal megtisztították és sűrített levegővel fújták, hogy minden pórus kinyíljon és a szennyeződések eltávolíthatók legyenek. A végső lépésben a minták mikroszerkezetét Jenoptic ProgRes CFscan kamerával felszerelt Leica DM6000M fényoptikai mikroszkóppal vizsgálták maratás előtt (22. ábra) és rövid idejű 2 %-os Nital maratás után (23. ábra). A maratás előtti képek alapján elmondható, hogy delaminációs repedések nem láthatók, többnyire kisméretű pórusok (<10 μ m) mellett néhány nagyobb méretű (30-40 μ m) láthatóak. Maratás után megállapítható, hogy a karbon eloszlása egyenletes a mintában, de erős perlitkoncentráció látható a bal felső szegély mentén.



22. ábra: Maratás előtti szövetszerkezet 1) 5x nagyítással 2) 50x nagyítással [24]



1)

2)

23. ábra: Maratás utáni szövetszerkezet 1) 5x nagyítással 2) 20x nagyítással [24]

3. táblázat: Szegmens vizsgálatok összefoglalása

Vizsgálat	Átlag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sűrűség (kg/m ³)	7640	7720	7710	7670	7650	7620	7610	7660	7600	7550	7570
Lineáris zsugorodás (%)	3,531	3,535	3,565	3,476	3,592	3,563	3,518	3,860	2,799	3,660	3,734
TRS (MPa)	512,9	490	505,3	485	526	535,6	540,2	496,3	497,1	522,5	530,8
Mátrix keménység (HV5)	126,8	132	132	130	128	125	131	122	124	122	122

A kecskeméti gyárba történő beérkezést követően bevételezik a szegmenseket és mérlegeléssel végeznek darabszám ellenőrzést. Ezt követően az SAP rendszer jelzi, ha részletes vizsgálatra van szükség, egyéb esetekben bekerül a széria termék raktárba. Részletes vizsgálat esetén 6db szegmenst lézersugarasan felhegesztenek egy, az átmérőnek megfelelő service ring-re az átmérőhöz igazodó hegesztési paraméterekkel, majd a varratot szemrevételezéssel ellenőrzik és összehasonlítják a fényképes hibakatalógussal (24. ábra). A szériagyártásban is szemrevételeznek minden egyes fúrókoronát, az 1-es csoportba sorolt varratú darabokkal nincs további teendő. A 2-es csoportba sorolt varratú darabokat minden esetben minimum nyomatókra tesztelni kell, ennek értéke 9 Nm (5). A vizsgálatot teljesítő darabok tovább mehetnek a gyártásban, a kieső daraboknál a 3-as csoport szerint kell eljárni. A 3-as csoportba sorolt varratú daraboknál a hegesztést javítani kell szegmens cserével. Szemrevételezést követően nyomatókkel letörlik mind a hat szegmenst és összevetik a töréserőértéket a korábbi értékekkel; a törethépet is ellenőrzik és megállapítják a törés helyét az alábbi kódok szerint:

- a. mátrix;
- b. mátrix-neutrál zóna határa;
- c. neutrál;
- d. neutrál-varrat határa;
- e. varrat;
- f. varrat-cső határa;
- g. cső;
- df. neutrál-varrat-cső (lépcsős töret, mely mindhárom zónában törik).

Ezeket a kódokat is hozzárendelik a törésértékekhez, így teljes képek kapnak a törésvizsgálatról. Optimális esetben a törés a szegmens neutrál zónájában van (ekkor a varrat erősebb, mint a szegmens anyaga), és az esetek 99%-ában itt következik be a törés. A legrosszabb esetben a varratban van a törés, ekkor felül kell vizsgálni a hegesztési paramétereket - amelyek változtatása nem engedélyezett, így a probléma eredete a szegmensben keresendő. A legjobb esetben a csőben van a törés (de inkább csak kihajlik a szegmens a csővel együtt), ebben az esetben a varrat és a szegmens anyaga is erősebb, mint a cső anyaga.

A megfelelő eredményű részletes bejövőáru vizsgálat után a szegmensek bekerülnek a széria termék raktárba.

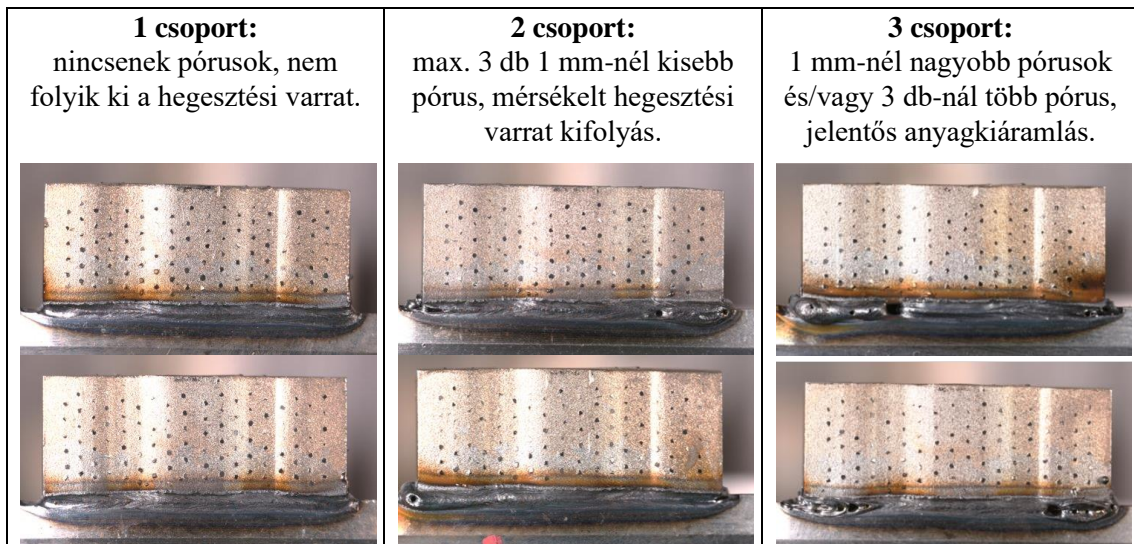
Szegmentált, nem precíziós fúrókoronák esetén az alaptest és a szegmens közötti kapcsolat szilárdságát vagy magának a szegmensnek a szilárdságát úgy kell megtervezni, hogy az alábbi hajlítónyomatékot érje el [27]:

$$M_b = \frac{L_v \times E^2 \times \sigma_b}{6} = \frac{24,3 \times 2^2 \times 600}{6} = 9,72 \text{ Nm} \quad (5)$$

ahol M_b a hajlítónyomaték [Nm], L_v a szegmens hossza [mm], E az alaptest vastagsága [mm], σ_b a hajlítószilárdság értéke [N/mm²]. A kapott értéket korrigálni kell a nyomatékkulcsra csatlakoztatott betét miatt:

$$M_{bk} = \frac{L_1 \times M_b}{L_1 + B} = 9,72 \times \frac{345 \times 9,72}{345 + 27} = 9,01 \text{ Nm} \quad (6)$$

ahol M_{bk} a korrigált hajlítónyomaték [Nm], L_1 a nyomatékkulcs hossza a markolat közepétől a csuklópontig, M_b a hajlítónyomaték [Nm], B a szegmensre illeszkedő betét magassága [mm].



24. ábra: Fényképes hibakatalógus [24]

4.3 Lézersugaras hegesztés

A hegesztési kísérletekhez is a szériagyártáshoz használt Trumpf TruDisk 4002 típusú, max. 4 kW teljesítményű és 1,03 μm hullámhosszúságú lézerforrást használtam, melynek a fókuszolt átmérője 0,4 mm. A lézerforrás egy teljesen automatizált géppel van kapcsolatban: a rezgőadagolóból kerülnek be a szegmensek a belső, kétállásos adagolópozícionáló egységbe, ami a robot által behelyezett cső homlokfelületéhez illeszti a szegmenst. A gép konstrukciója olyan, hogy a lézerfej mozog hegesztés közben és egyszerre egy szegmens hegesztése történik. A hegesztési idő alatt a szegmens adagolóegység előkészíti a következő szegmenst a pozícionáló másik állásába, ezzel csökkentve a mellékidőket és biztosítva a következő szegmens gyors pozícióba kerülését. A kísérleti darabok hegesztéséhez használt paraméterek a 4. táblázatban találhatóak, melyek megegyeznek az $\varnothing 102$ mm-es fúrókorona szériagyártási paramétereivel és a hegesztés során is Ar 4.6 védőgázt használtam. Ezekkel a paraméterekkel a fajlagos hőbevitel (azaz a vonal- vagy szakasz energia) 0,056 kJ/mm az alábbi képlet alapján [28]:

$$\text{Fajlagos hőbevitel} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right) = \frac{\text{Lézer teljesítmény} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right)}{\text{Hegesztési sebesség} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right)} \quad (7)$$

4. táblázat Lézersugaras hegesztési paraméterek

Teljesítmény (kJ/s)	Hegesztési sebesség (mm/s)	Védőgáz	Védőgáz mennyisége (l/min)	Fókusz távolság (mm)	Defókusz (mm)	Hőbevitel (kJ/mm)
2,8	50	Ar	10	20	+ 0,25	0,056

4.4 CT vizsgálat

A komputertomográfiát elsősorban orvosi vizsgálatokra használják. Ma már nem kérdés, hogy ha részletes képet szeretne kapni a szakorvos páciense egyik szervéről, akkor fejlett diagnosztikai eszközöket használ. Ezek közül az egyik legkiemelkedőbb a CT készülék. Ez a vizsgálati módszer más (szervetlen) anyagokon is alkalmazható, nem csak emberi testeken. A komputertomográfia működésének elméleti alapja a következő: a vizsgált objektumot számos pozícióban röntgensugárral világítják át (projekciók) és az átvilágítás másik végén pedig detektorok fogadják az objektumon áthaladt jeleket, majd numerikus formában tárolják (intenzitás görbe). Ez az eljárás a sugárgyengítési törvényen alapul, amely kimondja, hogy a testből kilépő sugárzás intenzitása függ a test sugárgyengítési együtthatójától, a vizsgált objektum vastagságától és természetesen a testbe belépő sugárzás nagyságától. Az egyes projekciókból kapott intenzitás görbe a vizsgált test egy metszetének egydimenziós képe. A több projekcióból kapott intenzitásgörbék feldolgozása után (filtered backprojection) kapjuk meg a vizsgált test egy adott szeletének kétdimenziós képét. Ez a kép a számítástechnikában egy mátrixnak feleltethető meg, amelynek egyes elemei a testen mért térfogategység sugárgyengítésének felel meg.

A képrekonstrukció során a képmátrix egyes elemeit (az anyag 2D metszetének darbjai pixel szinten) ismeretleneknek feltételezzük. Az intenzitásgörbék által kapott értékek és a képmátrix egyes sorai/oszlopai között meghatározunk egy összefüggést, amelyet megoldva kapjuk meg az egyes mátrixelemek valódi értékét. Ha kellően túlhatározott az egyenletrendszer, akkor az egyes mátrixelemek ekként könnyen meghatározhatók. A kép feldolgozása során számos szűrőt alkalmaznak azért, hogy javítsák a képminőséget, mert a rekonstrukció közben zavaró árnyékok jelenhetnek meg a képen, továbbá elmosódások

képződhetnek (például a CT mozgása miatt). Ezeket az eljárásokat a vizsgált objektum ismeretében speciálisan arra a felhasználásra állítják be.

A kísérleti minták mikroszámítógépes tomográfiára való előkészítése után a vizsgálatokat egy WERTH Tomoscope HV 500 géppel végeztem el, 190 kV/0,13 mA mérési adatokkal, 0,0646 mm pixeltávolsággal, 1672 sorral és 1681 oszloppal [29]. A képek elkészítése után egy számítógépes algoritmus rekonstruálta a minta virtuális szakaszait (25.ábra).



25. ábra: Fúrókorona CT felvétele [24]

4.5 Törésteszt

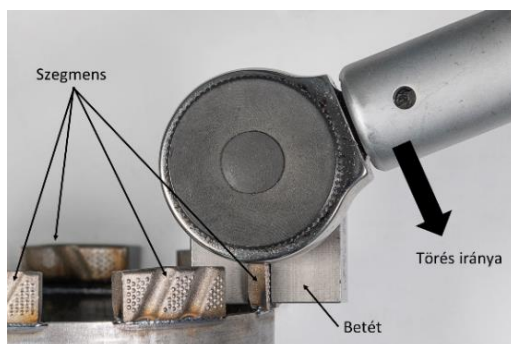
A törésteszt elvégzésénél két eszközt különböztethetünk meg, az első a bejövőáru vizsgálat során alkalmazott nyomatékkulcs, a másik a kísérletek során általam kidolgozott eljárás, ami egy anyagvizsgáló gépre épül és képes az erő-lehajlás diagram felvételére is.

4.5.1 Törésteszt nyomatékkulccsal

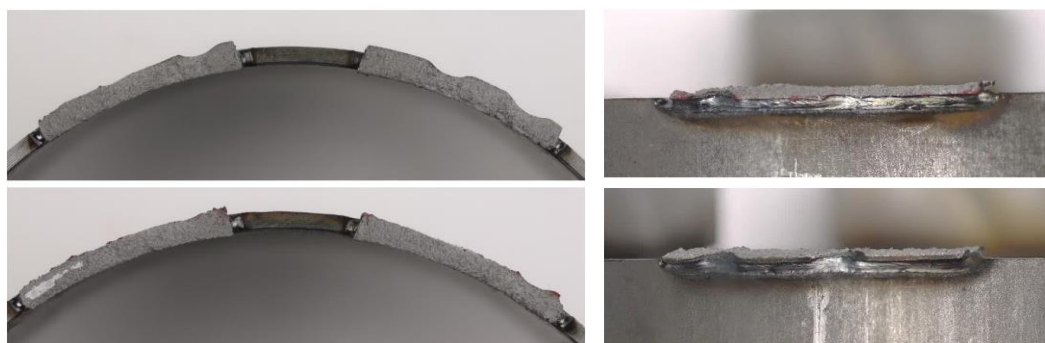
A törésteszt során egy Bahco IZO-DM-135 típusú nyomatékkulcsot használnak, amely 7-135 Nm tartományban használható, por- és fröccsenő víz álló, mérési pontossága 2 %-on belül van (26. ábra). Képes 1000 darab adat eltárolására, így később is visszakereshetők az értékek [30]. A bejövőáru vizsgálatnál végzett törésteszt célja meghatározni a szegmens letöréséhez szükséges nyomaték átlagos értékét, melynek nagyobbak kell lennie az előírt minimumnál, 9 Nm-nél. A törési nyomaték értékének meghatározásához a szegmensre a formájához illeszkedő betétet helyeznek, amely a digitális kijelzésű nyomatékkulcshoz csatlakozik (27. ábra). A nyomatékkulcs nullázása után a szegmenst kifelé irányuló mozdulattal letörik és leolvassák a kijelzett értéket. Ezt követően ellenőrzik a törés helyét, azaz mely zónában következett be a törés (28. ábra). A szériagyártás során is alkalmazzák a nyomatékkulcsot az ún. „Minimum próbá”-hoz, ami azt jelenti, hogy beállítják az előírt minimális nyomatékot (9 Nm) és megterhelik a szegmenseket, melyeknek ezt törés és sérülés nélkül el kell viselniük.



26. ábra: Nyomatékkulcs katalógusképe [30]



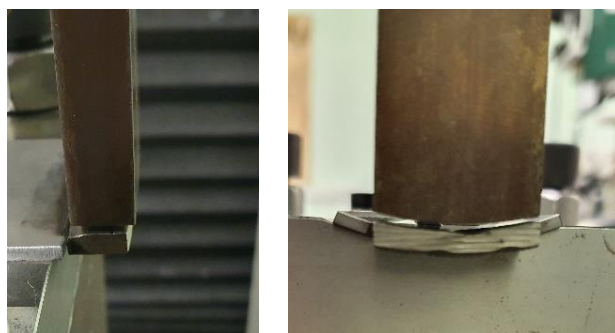
27. ábra: A törési nyomaték értékének meghatározásához szükséges eszközök [24]



1) 2)
28. ábra: Töretképek 1) homlokirányból 2) palástirányból [24]

4.5.2 Törésteszt anyagvizsgáló géppel

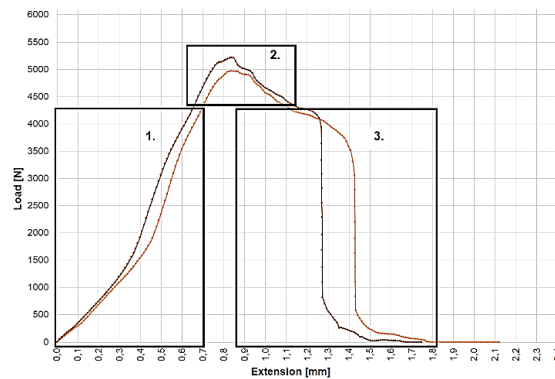
A kísérleti vizsgálatok során a szegmensek letörését Instron 5900R 4482 típusú elektromechanikus, univerzális anyagvizsgáló géppel végeztem, ahol golyósorsókkal történik a középső gerenda mozgatása és ebben helyezkedik el a mérőcella is. A méréshez használt mérőcella max. terhelhetősége 100 kN, mely megegyezik a gép max. terhelhetőségével. Technológiai próba jellege miatt erre a vizsgálatra nem alkalmazható a szabvány, tehát minden esetben egyedi vizsgálatokat kellett lefolytatni. Terveztem egy készüléket, amiben a fúrókoronából kivágott szegmenseket tartalmazó csőszakaszokat lehet rögzíteni a vizsgálat során. A fúrókorona felső éle 1mm-t lóg ki a készülékből, hogy ne a varraton, hanem a cső palástfelületén támaszkodjon fel (29/1. ábra). A készüléket és a szegmens formájához igazodó nyomófejet (29/2. ábra) rögzítettem a vizsgáló gépben úgy, hogy a nyomófej a szegmens alsó éléhez lett pozicionálva. A kötést ebben az esetben nyíró- és hajlító igénybevétel terheli, de a hajlítástól eltekintettem a számítások során.



1) 2)
29. ábra: 1) Vizsgálandó darab rögzítése a készülékben 2) Szegmens alakjához igazított nyomófej [24]

A szegmens letörését 6 mm/min sebességgel végeztem és közben a gép rögzítette az erő-elmozdulás diagramot (30. ábra). Az alakváltozás jellege szerint a görbe az alábbi szakaszokra osztható:

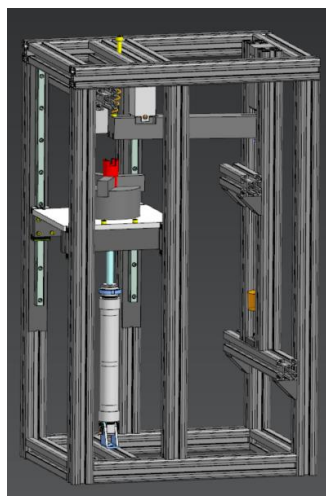
1. meredeken emelkedő szakasz, mely a rugalmas alakváltozás szakasza,
2. enyhe íves szakasz, mely átmegy a maximumba, ez a képlékeny alakváltozási szakasz. Itt az egyenletes képlékeny alakváltozás a jellemző,
3. a maximum után: helyi képlékeny alakváltozás jellemzi, szűk térfogatra korlátozódik a képlékeny alakváltozás (befűződés). A varrat keresztmetszet kontrahál, a varrattól távolabb már nincs képlékeny alakváltozás. A varrat ridegsége, szívóssága befolyásolja a görbe végszakaszát (hirtelen leeső, vagy hosszan elnyúló). A törési munka, azaz a görbe alatti terület mértéke mutatja ezt a ridegséget, illetve szívósságot.



30. ábra: Elmozdulás – erő diagram felépítése [24]

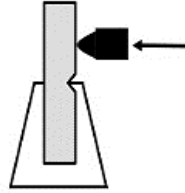
4.5.3 Alternatív vizsgálati módszerek a törésérték meghatározására

Felmerült az igény egy automatizált testállvány tervezésére (31. ábra), amely a szériagyártásban kapna helyet és alkalmas lenne a szegmens letörésére és a minimum próba elvégzésére is kizárva az emberi tényezőt a vizsgálatból. A testállvány alkalmas lesz az Ø52-202 mm-es fúrókoronákhoz a 0-50 Nm közötti tartományban. Az állvány alkatrészei jelenleg gyártás alatt vannak, sikeres test- és próbaüzem után lehet majd kihelyezni a szériagyártó gépek mellé.



31. ábra: Automatizált töréstezt állvány [24]

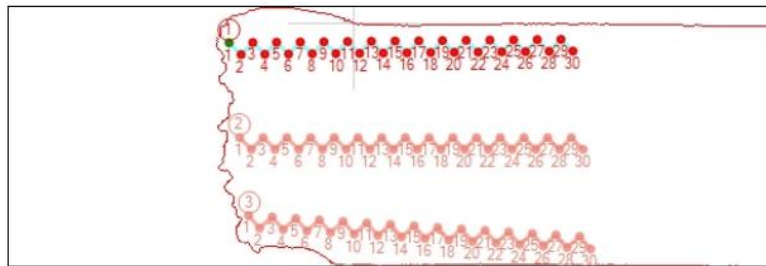
Eltávolodva a kvázi-statikus vizsgálatoktól és közelítve a felhasználás során a termékre ható dinamikus erőkre (amelyek akár különböző hőmérsékleteken is jelentkezhetnek), szóba került a Charpy-Izod vizsgálat (32. ábra), amely alkalmas mindkét jellemző vizsgálatára. Jelenlegi körülmények között erre a vizsgálatra még nincs igény.



32. ábra: Bemetszett próbatest az Izod-vizsgálathoz [31]

4.6 Keménységmérés

A beágyazott mintákon Struers Duramin-40 típusú automata keménységmérő géppel keménységlefutást mértem, 0,196 N terheléssel (HV0,2), kontúrkövetéssel a felület alatt 0,1 mm-rel, a korona oldalon, a varrat közepén és a gyökoldalon (33. ábra), figyelve a szabványban meghatározott minimális lenyomatok közötti távolságra [26].



33. ábra: Keménységmérési helyek meghatározása kontúrkövetéssel [24]

4.7 Mikroszkópi vizsgálatok

A szövetszerkezetet egy Keyence VHX-7000 digitális mikroszkóppal vizsgáltam polírozott és 2% Nital-lal maratott mintákon. Részletes elemzést végeztem a beágyazott minták varratainak elején, közepén és végén. Felvételek készítéséhez egy Leica DMC 4500 színes kamerával ellátott Leica DMi8 inverz mikroszkópot használtam 5x nagyítású objektívvel, emellett panorámakép is készült, hogy a teljes keresztmetszet látható legyen. Az LASX szoftver képes vezérelni a mikroszkópot és méréseket végezni a rögzített képen, így akár később is kiegészíthetőek a mérések más adatokkal.

5. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A kísérletek elkezdése előtt elvégeztem a hegeszthetőségi vizsgálatot, melynek célja annak eldöntése, hogy az adott anyagok, technológia és a szerkezet esetén lehetséges-e megfelelő szilárdságú kötés létesítése. A mintagyártásokat követően roncsolásmentes és roncsolásos vizsgálatokat végeztem, majd a hegesztett kötetést és a hőhatásövezetet vizsgáltam. Hegesztett kötések és/vagy varratok roncsolásos vizsgálatára többnyire az alapanyag vizsgálatára használt eljárásokat alkalmazzák.

A szériagyártásban alkalmazott roncsolásmentes vizsgálatok és mérések [32]:

- optikai vizsgálat: varratkép ellenőrzése szemrevételezéssel, fényképes hibakatalógusban meghatározott követelmények alapján;
- szegmens kiállítás kifelé (mérőeszköz: mérőóra): a szegmensek külső oldalának nagyobb átmérőn kell elhelyezkedniük, mint a cső külső átmérője, a cső kopásának csökkentése érdekében;
- szegmens kiállítás befelé (mérőeszköz: mérőóra): a szegmensek belső oldalának kisebb átmérőn kell elhelyezkedniük, mint a cső belső átmérője, hogy meggátolják a cső belső falának érintkezését a kifűrt (cső belsejébe jutó) anyaggal;
- szegmens dőlés (mérőeszköz: mérőóra): a szegmensek párhuzamossága (ívének koncentrikussága) a cső külső palástjával;
- szegmens csavarodás (mérőeszköz: mérőóra): a szegmens rádiusza mennyire követi a cső rádiuszát;
- minimum-próba (mérőeszköz: nyomatékhatárolóval ellátott nyomaték kulcs a szegmens geometriájához illeszkedő fejjel): a hegesztett kötés minőségét tesztelve, az előírt minimum forgatónyomatékkal terhelik a szegmenst;
- radiális ütés (mérőeszköz: mérőóra): a fűrókoronát körbe forgatva a szegmensek felületén mért radiális ütés.

A szériagyártásban alkalmazott roncsolásos vizsgálat:

- törésteszt (mérőeszköz: digitális kijelzésű nyomaték kulcs): a vizsgálandó termék szegmensére (a formájához illeszkedő) betétet helyeznek, ami nyomaték kulcshoz csatlakozik. A kulcs nullázása után a szegmenst letörik és leolvassák a kijelzett – törés helyére átszámított – értéket. A törés kifelé irányuló mozdulattal történik, a leolvasott érték összehasonlításra kerül az előírt minimális törésértékkel.

A hegesztett kötetést és környezetét az alábbi módszerekkel vizsgáltam:

- CT vizsgálat;
- törésteszt anyagvizsgáló géppel;
- Vickers-eljárással keménységvizsgálat,
- mikroszkópi vizsgálatok.

Az edződési repedés és/vagy a hidrogéntartalommal összefüggő repedés megelőzését célzó előmelegítési hőmérséklet meghatározására számos módszert dolgoztak ki. Az egyik ilyen a hegesztett kötésben megengedhető legnagyobb keménység előírásán és ezen keresztül a megengedhető maximális martenzit-tartalom korlátozásán alapuló módszer. Az eljárás lényege, hogy kis karbontartalmú, ötvözetlen vagy mangán ötvözésű acéloknál – ahol a keménységet növelő egyéb karbidképző nincs jelen – a martenzit-tartalom és a keménység között szoros kapcsolat van. A maximális keménységet a $HV10_{\max} = 983C\% + 283$ összefüggésből lehet közelítőleg meghatározni, ami tulajdonképpen a teljesen martenzites szerkezet keménységét adja. Nagy keménység esetén külső (üzemi) igénybevétel nélkül is repedések jelenhetnek meg a martenzit saját feszültsége és a

lecsökkent alakváltozó képesség miatt. Így pl. 0,2% C esetén a maximális keménység (100% martenzit esetén) 480 HV10 lehet. A kötés merevségének, illetve a hidrogéntartalomnak a hatását a megengedhető martenzit-tartalom, vagyis az ezzel összefüggő keménység előírásában (300, 320, 350, 380, 400 HV10) veszik figyelembe. A keménység-előírás és a karbon egyenérték ismeretében számító összefüggésekkel, vagy átalakulási diagram alapján meghatározható az a minimális hűlési idő, amely mellett már a hegesztett kötésben sehol nem lesz a keménység az előírtnál nagyobb. Az eljárás előnye, hogy egyszerűen mérhető anyagjellemzőhöz köti a kötés megfelelőségének ellenőrzését.

Az acél egyes ötvözőinek hatását az edződési repedésképződésre az ötvözetlen-, és a gyengén ötvözött acélok esetében a karbonhoz viszonyítva határozzák meg. A $C < 0,2\%$ tartalmú ötvözetlen szerkezeti acéloknál „normál hegesztési feltételek” esetén nem kell tartani veszélyes felkeményedéstől, repedésveszélytől és nincs szükség előmelegítésre. Ha az acél a karbonon kívül más ötvözőket is tartalmaz, akkor figyelembe kell venni az ötvözőelemek edződési hajlamot befolyásoló hatását. Különösen a Mn, Cr és a Mo csökkenti a kritikus lehűlési sebességet és így növeli az edződési (repedés) veszélyt [14]. Az előmelegítési hőmérséklet és a repedésveszély meghatározásához ki kell számítani a karbon egyenértéket (CE) az IIW (International Institute of Welding) (8) vagy az EN 1011-2 szerinti összefüggésből (9):

$$CE \% = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (8)$$

$$CET \% = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (9)$$

Mindkét egyenletet elsősorban a hidrogén által okozott hideg repedés elkerülésére alkalmazzák. Emellett a (8) egyenlet főként szén-mangán típusú acélokra vonatkozik, míg a (9) egyenlet főként gyengén ötvözött, nagy szilárdságú acélokra vonatkozik. A két képlet kissé eltérően veszi figyelembe az alkalmazható ötvözetek összetételét, azonban egyik összefüggés sem veszi figyelembe a Si tartalmat, ezért az AWS (American Welding Society) összefüggését használtam (10) mind a cső, mind a szegmens karbon egyenértékének meghatározására.

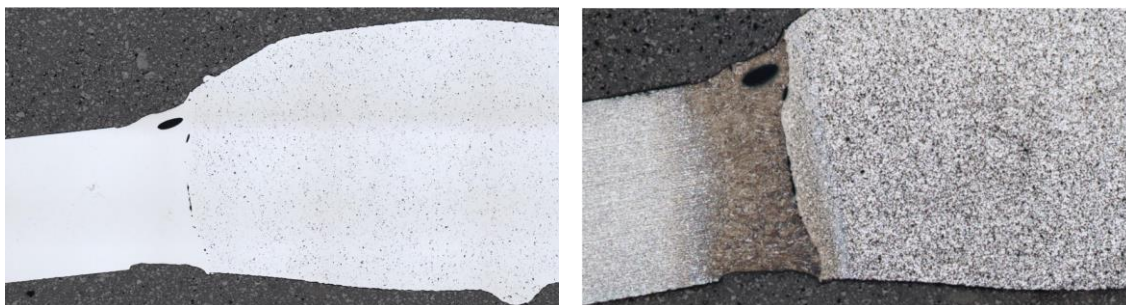
$$CE (AWS) \% = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (10)$$

A számításnál a szabványban szereplő értékeket vettem alapul a cső esetében, mert elég tág határok között változhat az összetétel és ez beszállításonként eltérő lehet, ezért a maximálisan megengedett értékkel számoltam (1. táblázat). A csőnél a $CE (AWS) = 0,428\%$, a szegmensnél a $CE (AWS) = 0,51\%$ érték azt mutatja a Graville-diagramon (a C% függvényében), hogy mindkettő a II. övezetbe sorolható, ami azt jelenti, hogy alulról korlátozott hőbevitellel, de előmelegítés nélkül hegeszthetők.

5.1 Lézersugarasan hegesztett kötés vizsgálata

Kísérleteim alapjául a szériagyártásból vettem ki fúrókoronát, mely megfelel mind geometriailag, mind törésértéket tekintve a rajzi előírásoknak. Néhány szegmensből metszetet vágva és a felületet előkészítve mikroszkópi vizsgálathoz, láthatóvá vált a varrat keresztmetszete és a benne lévő varrathibák is (34/1. ábra). Egy nagyobb gázzárványnak tűnő képi alakzat mellett több kisebb zárvány is látható volt, melyek a varrat szegmens felőli oldalára orientálódtak. A mikroszkópi képen ugyanaz a szövet szerkezet volt látható, mint a nem hegesztett szegmens vizsgálatánál, emellett

delaminációs repedések nem voltak észlelhetők. A 2%-os Nital maratást követően láthatóvá vált a varrat és a hőhatás övezetek (34/2. ábra). A hőhatás övezet hossza a cső felé 1,2 mm volt, a szegmens felé 230 μm a szélén és 410 μm középen.

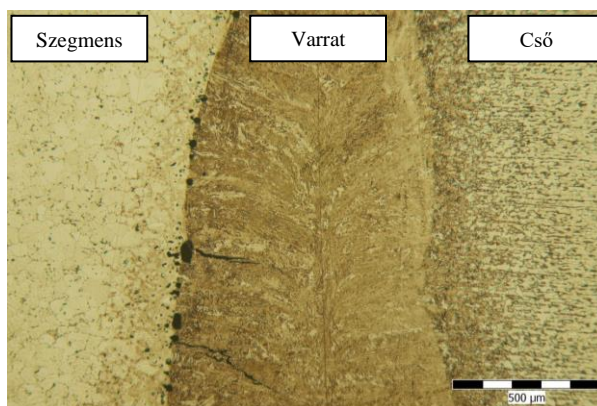


1)

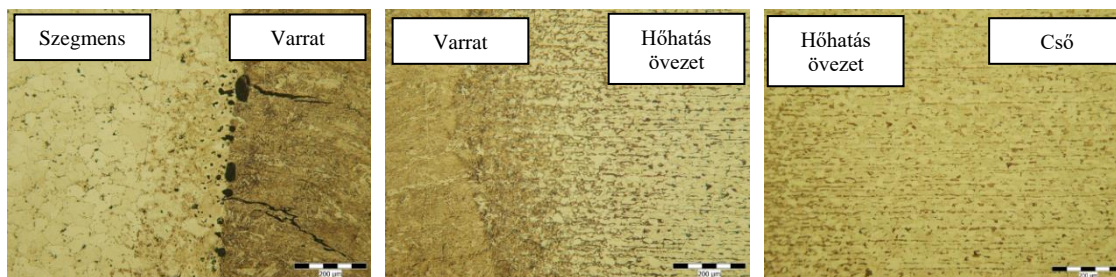
2)

34. ábra: Lézersugarasan hegesztett kötés 1) maratás előtt 2) maratás után [24]

Nagyobb nagyításban megvizsgálva a varratot és a környezetét (35. és 36. ábrák) megállapítható, hogy a kisebb üregek mellett repedések is jelen vannak a varrat szegmens felőli oldalán és a varrat közepe felé mutatnak, de nem érik el a varrat közepét. A varrat cső felőli oldalán a varrat-alapanyag átmenet sokkal egyenletesebb, mint a varrat szegmens felőli oldalán.



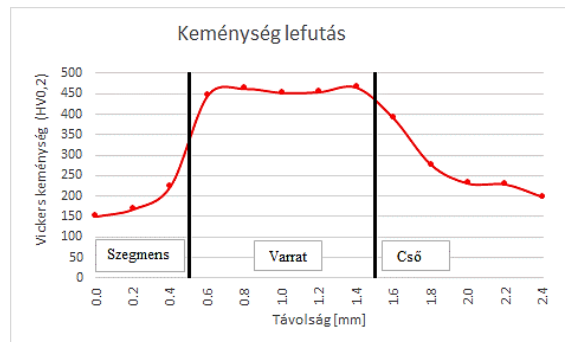
35. ábra: A varratól készült optikai mikroszkópos felvétel (maratott minta), 50x nagyítással [24]



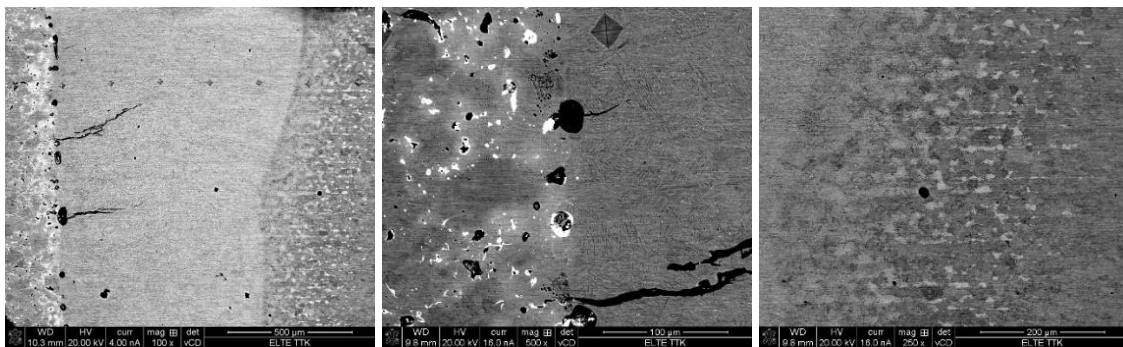
36. ábra: A varrat környezetéről készült optikai mikroszkópos felvételek (maratott minta), 100x nagyítással [24]

A mikroszkópos vizsgálathoz készített csiszolatot használtam fel a keménységméréshez (37. ábra), melyből kiolvasható az a nagy energiasűrűségű eljárásokra jellemző kép, miszerint a legnagyobb értékek a varratban fordulnak elő. A legnagyobb keménység-változás a szegmens felőli oldalon kb. 0,4 mm-en belül mérhető, ami átlagosan 700 HV/mm keménység-gradienst jelent. Ugyanez a cső felőli oldalon – kb. 0,6 mm-en belül – 400 HV/mm-re adódik.

A keménységmérést követően a mintát pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatnak (SEM) vettem alá, majd elemtérképet is készítettem, hogy a varratban történik-e beötvöződés. Az eredmények alapján megállapítható, hogy varratban gázbuborékok és mikrorepedés-szerű képi elemek is észlelhetők (38/1. ábra), melyek jellemzően a szegmens és a varrat határán figyelhetők meg és csak elvétve fordulnak elő a varratban (38/2 és 38/3. ábrák). Az energiadisziperzív spektroszkópiával (EDS) készített varrat elemtérképeken a fő ötvözők tekintetében (C, Mo, Mn, Fe, Cu) nem figyelhető meg számottevő különbség az egyes zónák között, nem történt ötvöződás és beötvöződés a varratban (39. ábra) [33].



37. ábra: Keménységvizsgálat eredménye [24]

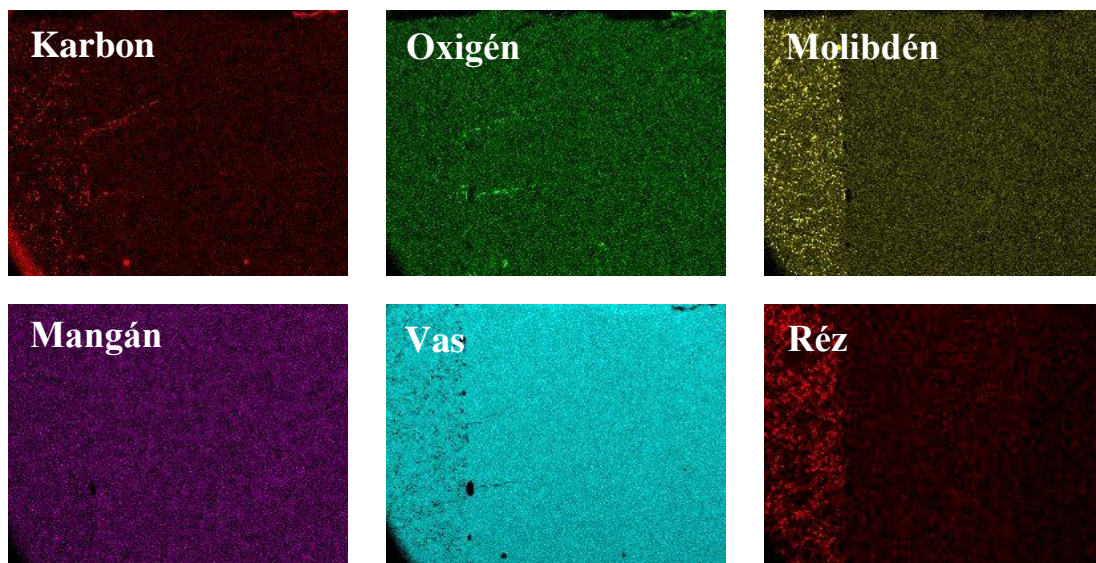


1)

2)

3)

38. ábra: A varrat átfogó SEM képe, 100x nagyítással 1) Varrat és szegmens anyaghatára, 500x nagyítással 2) Varrat széle, jobb oldalt a hőhatási övezettel, 250x nagyítással [24]



39. ábra: A varrat elemtérképe [24]

A törésérték meghatározásához két darab fúrókoronáról letörtem az összes szegmenst, az összesen 16 érték átlaga 17,58 Nm (a minimum 12,1 Nm, a maximum 19,1 Nm), a szórás 1,64 lett. Az értékek megfelelnek a rajzi előírásoknak.

Összegzőképpen elmondható, hogy a roncsolásos vizsgálatokkal új ismereteket szereztem a széria gyártásból kivett fúrókorona varratáról. A feltárt gázzárványok és mikrorepedések ellenére a termék megfelel a műszaki követelményeknek. A továbbiakban ezeket az eredményeket tekintem alapállapotnak és a technológiai kísérletek során is ezeket a vizsgálatokat végzem el az összehasonlíthatóság érdekében.

5.2 Különböző kötőeljárások vizsgálata

Doktori munkám egyik célja megvizsgálni, hogy különböző kötőeljárások hogyan hatnak a porkohászati szegmens és az acélcső vegyes kötésére. A hegesztés és a forrasztás különböző eljárásai közül választottam azt a szempontot szem előtt tartva, hogy azok alkalmasak-e szériakörülmények közötti gyártásra és lehetséges-e alkalmazni azt a jelenlegi lézersugaras hegesztés alternatívájaként. Esetleg alkalmas-e valamelyik eljárás a jelenlegi technológia kiváltására, vagy jobban megfelel-e a szegmens fejlesztési irányoknak, ahol nem csak a geometria változik, hanem a kémiai összetétel is.

Feltérképeztem a Hilti AG különböző gyáregységeiben elérhető kötőeljárásokat, amelyek alkalmasak a fúrókorona technológiai kísérleteinek elvégzésére és az alábbiakban bemutatom a vizsgálati eredményeket.

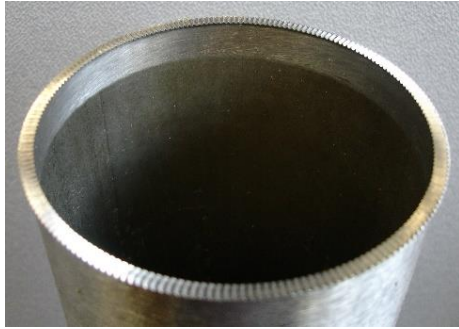
5.2.1 Kondenzátorkisütéses hegesztés vizsgálata

A Hilti indiai gyáregységében (HMI) a kondenzátorkisütéses hegesztést (CDW) használják néhány kisebb teljesítményű fúrókorona gyártásához, ezért az első kísérletemhez ezt az eljárást választottam. A kondenzátorkisütéses hegesztési eljárásnál nincs szükség hozaganyagra a kötés kialakításához, azonban szükséges a cső vagy a szegmens felületének hegesztés előtti (előkészítő) megmunkálása. Ennek két változata lehet:

- a cső homlokfelületét rovátkolják/recézik és a szegmens felülete sík marad (40/1 ábra);
- a cső homlokfelülete sík marad és a szegmens felületébe készítenek keresztirányú hornyot (40/2 ábra).

A cső előkészítését választottam a kísérlethez, mert ezt használják a széria termékek gyártásánál is. A felületi rovátkolás mérési eredményei az 5. táblázatban találhatóak. A kísérletet egy függőleges elrendezésű géppel végezték el, 198/160 V impulzusfeszültséggel és 3,2 bar pneumatikus szorítónyomással. A gép kialakításából adódóan egyszerre egy szegmens hegesztése történik. A szegmens egy automatikus adagolószerkezettel kerül az elektródához. A csőhöz egy másik elektróda csatlakozik (41/1. ábra). Összeérintik a komponenseket, majd ráadják a szorítóerőt. Ezután a hegesztéshez szükséges energiát a korábban feltöltött kondenzátorból az elektródák révén a hegesztési helyre vezetik, majd végbe megy a termikus ciklus. A szorítóerőt a hegesztés befejezése után szüntetik meg, majd a darab kivehető a gépből (41/2. ábra).

A kísérlet során 5 darab fúrókorona került legyártásra, amiből egy termék a törésteszthez, egy másik termék a mikroszkópi vizsgálatokhoz lett felhasználva, míg a többi termék a raktárba került későbbi vizsgálatok céljára. A törésértékek a 6. táblázatban találhatóak.



1)

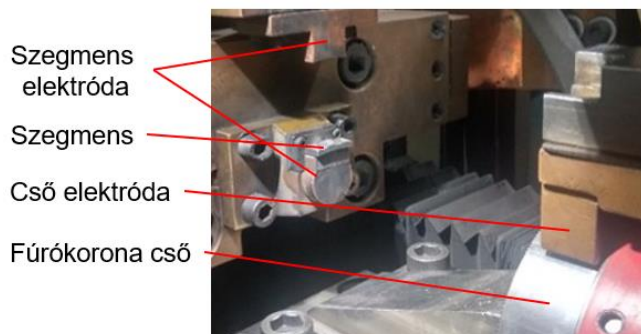


2)

40. ábra: Hegesztés előtti felület előkészítés 1) cső esetében 2) szegmens esetében [24]

5. táblázat Felületi rovátkolás mérési eredményei

	Jellemző	α °	β °	d (mm)
	Mért érték	32,34°; 33,09 °; 35,88 °; 31,34 °	33,09 °; 33,52 °; 30,48 °; 34,75 °	0,47; 0,43; 0,38; 0,43
	Átlag érték	33,16 °	32,96 °	0,43



1)



2)

41. ábra: 1) CD hegesztőgép elrendezése 2) CD hegesztett fúrókorona [24]

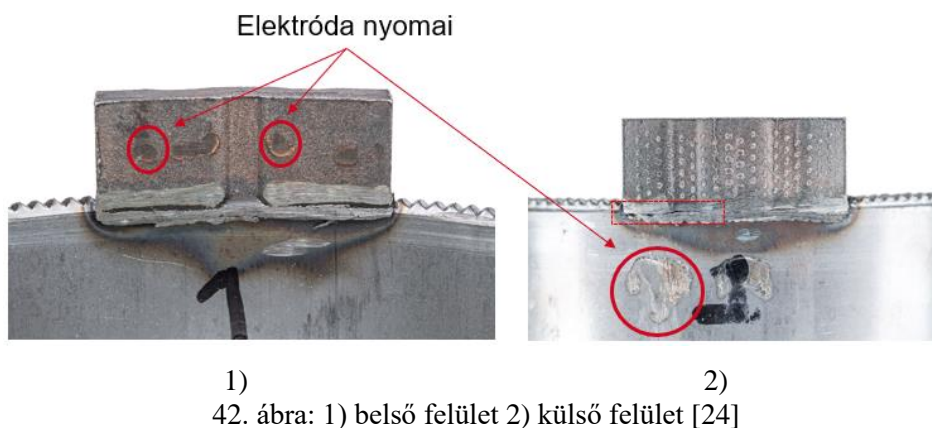
6. táblázat CD hegesztés utáni szegmens vizsgálatok eredményei

Paraméter	Fúrókorona száma	1	2	3	4	5
Szegmens magassága hegesztés után (mm) *	Minimum	8,50	8,45	8,52	8,52	8,50
	Maximum	8,80	8,77	8,85	8,75	8,82
Külső kiállás (mm)	Minimum	0,90	0,95	0,80	0,95	0,98
	Maximum	1,40	1,45	1,50	1,58	1,47
Töréserő (Nm)	Mért érték	24, 23, 25, 26, 27, 22, 28, 23	-	-	-	-
	Átlag érték	24,7	-	-	-	-

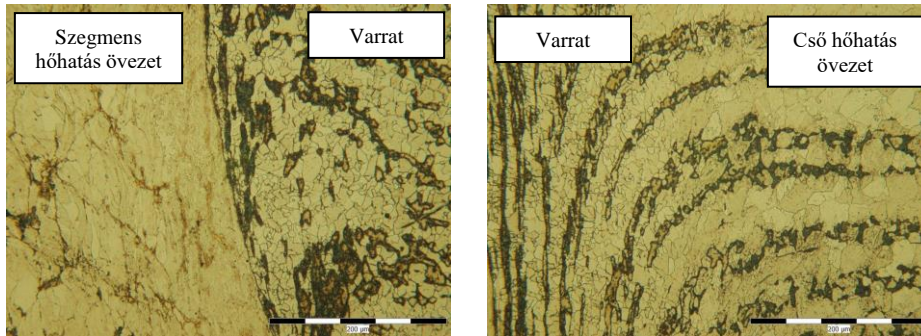
* A szegmens kiinduló magassága 10,2-10,3 mm között volt

A hegesztést követő optikai vizsgálat egységes hegesztési varrat megjelenést mutatott. Technológiából adódóan a szegmens be van nyomódva a csőbe kb. 1,5-1,7 mm mélyen és a hegesztési anyag kitüremkedéseket manuálisan kell majd lecsiszolni. Nem egyenletes a hőhatásövezet képződés, ez látható a külső és a belső oldalon is, emellett az érintkezési ellenállás és hegesztőáram nyomai is láthatóak úgy a szegmensen, mint a csövön (42/1. és 42/2. ábrák).

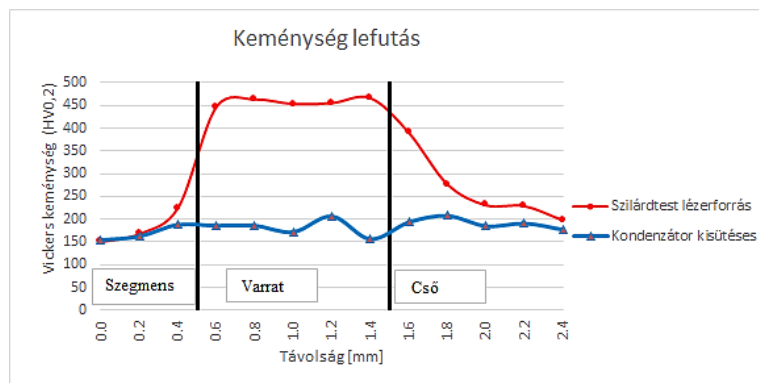
Mikroszkópos vizsgálatához előkészítettem a mintákat és sztereo mikroszkópos képen (43. ábra) az ellenállás hegesztésre jellemző nagymértékű képlékeny alakváltozást elszenvedett zónák figyelhetők meg mind a szegmens, mind a cső komponensben. Különösen jelentős ez az alakváltozás a megolvadt, illetve kilágyult fém kisajtolódása a minta külső oldalain. A kötés környezetében a nagymértékű képlékeny alakváltozás következtében jelentősen torzult a szemcse szerkezet mind a felhegesztett szegmens, mind a cső alapanyag esetében. A kisajtolódás következtében a képlékenyen alakváltozott anyagok jellegzetes soros, szálas morfológiát mutatnak, amely különösen jól megfigyelhető a cső anyagának érintett zónájában (44. ábra). Egyébként a varratban hibára utaló zárvány, repedés vagy össze nem olvadt felület nem figyelhető meg [33]. A mikroszkópi vizsgálatához készített csiszolatot használtam fel a keménységméréshez (45. ábra) és a lefutási görbét összehasonlítottam a lézersugaras varrat keménységével. A kondenzátorkisütésesen hegesztett minta keménységértékei kb. 50 HV_{0,2} sávon belül ingadoznak.



43. ábra: Mikroszkópi felvétel a varratról [24]



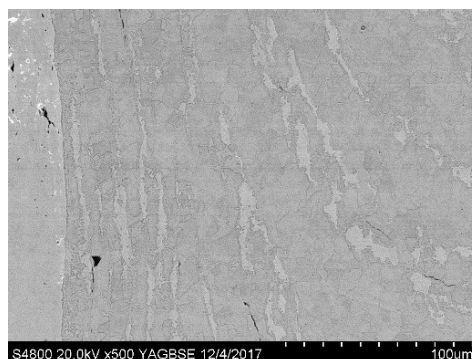
44. ábra: A varrat környezetéről készült optikai mikroszkópos felvételek (maratott minta), 100x nagyítással [24]



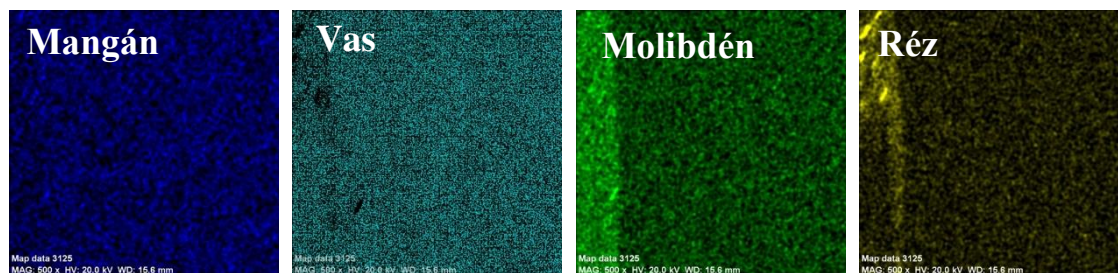
45. ábra: Keménységvizsgálat eredménye [24]

Keménységmérést követően pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatot (SEM) végeztem, amiből megállapítható volt, hogy a varratban mikrorepedés-szerű képi elemek észlelhetők (46. ábra). Az energiadiszperzív spektroszkópiával (EDS) készített varrat elemterképeken a fő ötvözők tekintetében nem figyelhető meg számottevő különbség az egyes zónák között, nem történt ötvöződúsulás és beötvöződés a varratban (47. ábra) [33]. A lézersugaras hegesztéssel való összehasonlítás a 7. táblázatban található.

Összegzésként elmondható, hogy ez az eljárás alkalmas a fűrókorona szegmenseinek rögzítésére, de a nagymértékű képlékeny alakváltozás miatt a termékfejlesztéssel való kapcsolatfelvétel javasolt további vizsgálatok céljából.



46. ábra: A varrat átfogó SEM képe, 500x nagyítással [24]



47. ábra: A varrat elem térképe [24]

7. táblázat: A kondenzátorkisütéssel és a lézersugaras hegesztett varratok összehasonlítása

Kondenzátorkisütéses hegesztés	Lézersugaras hegesztés
A cső enyhe deformációja	Nincs deformáció a csőben
A szegmens nincs tökéletesen igazítva a csőhöz	A szegmens jobban van igazítva a csőhöz
Az elektróda nyomai láthatók a csövön és a szegmensen is	Nincs befogási nyom
Jelentős hegesztési sorja	Nincs hegesztési sorja
„Nagy” hőhatásövezet	„Kis” és egységes hőhatásövezet
Nincsenek látható belső hegesztési hibák	Belső hegesztési varrat hibái
„Magas” törésértékek	„Alacsonyabb” törésértékek
Elhanyagolható keménységnövekedés	Jelentős keménységnövekedés
Recézett cső homloklap felület szükséges	Sík cső felület

5.2.2 Láng keményforrasztás vizsgálata

A Hilti kecskeméti gyáregységében a láng keményforrasztást alkalmazzák néhány kisebb teljesítményű fúrókorona gyártásához, ezért a második kísérletemhez ezt az eljárást választottam. A láng keményforrasztási eljárásnál szükség van hozaganyagra a kötés kialakításához, azonban nem szükséges sem a cső, sem a szegmens felületének hegesztés előtti (előkészítő) megmunkálása. A kísérlethez a Fontargen A324 jelű EN ISO 3677 szabványnak megfelelő forrasztóanyagot használtam (összetétele a 8. táblázatban található), míg folyasztószerként Easy-floTM 100 Flux Paste-t. A forrasztóanyaghoz ajánlott forrasztási munkahőmérséklet 690 °C [34]. A kísérletet kézi eljárással végeztem, a cső homloklap felületét és a szegmens alját bekentem folyasztószerrel. A szegmenset a csőre illesztettem és a cső belső oldalán mágnissel rögzítettem. Lánggal melegítettem a csövet úgy, hogy távolról indultam és lassan közelítettem a szegmenshez, elkerülve annak túlhevítését. Amikor megjelent egy vékony sárga „csík” – jelezve a megfelelő hőmérsékletet – forrasztóanyagot adagoltam a kötési zónába és lánggal eloszlattam. A forrasztóanyag megszilárdulása után sűrített levegővel lehűtöttem a kötés környezetét [33].

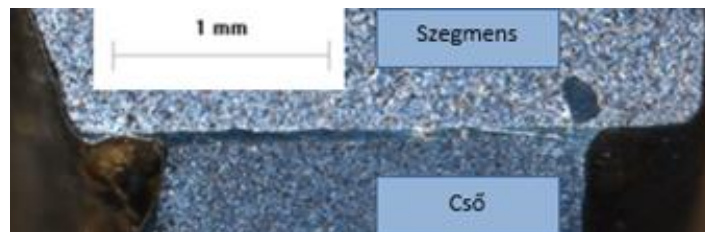
A mikroszkópi vizsgálathoz előkészített képekről megállapítható volt, hogy a minta jó részképpel, egyenes forrasztóanyag-vastagságot mutat (átlagosan 200 µm) (48/1. ábra), a forrasztás lényegében hibamentes, csak apróbb, zárványok tűnő képi elemek figyelhetők meg a metszeten (48/2. ábra). Ez állapítható meg a SEM felvételen is (49/1. ábra), emellett sem a neutrális zónában, sem a cső alapanyagban szövetszerkezeti változás nem volt megfigyelhető. Az EDX spektrumból, melyet a 49/1. ábrán látható területről gyűjtöttem (49/2. ábra), kiválasztottam a komponensek (szegmens, cső és forrasztóanyag)

összetételére jellemző elemeket, majd megállapítottam, hogy nem történt beötvöződés (50. ábra). Az elvégzett törésvizsgálat alapján a minta megfelel a rajzi előírásoknak, 13,3 Nm átlagos törésértékkel a minimális törésérték felett van.

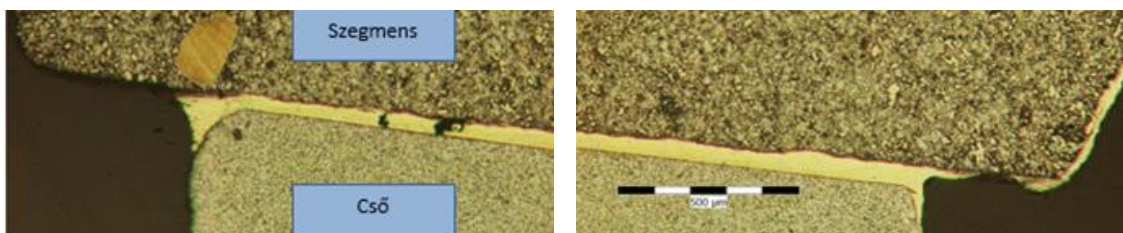
Összességként elmondható, hogy ez az eljárás alkalmas a fűrókorona szegmenseinek rögzítésére, de a magas ciklusidő és a teljesen kézi munkavégzés miatt nem felel meg a sorozatgyártási követelményeknek. Természetesen gépesítéssel ez utóbbi „nem megfelelés” korrigálható.

8. táblázat: Fontargen A324 kémiai összetétele

Ag	Zn	Cu	Mn	Ni
49 %	23 %	16 %	7,5 %	4,5 %

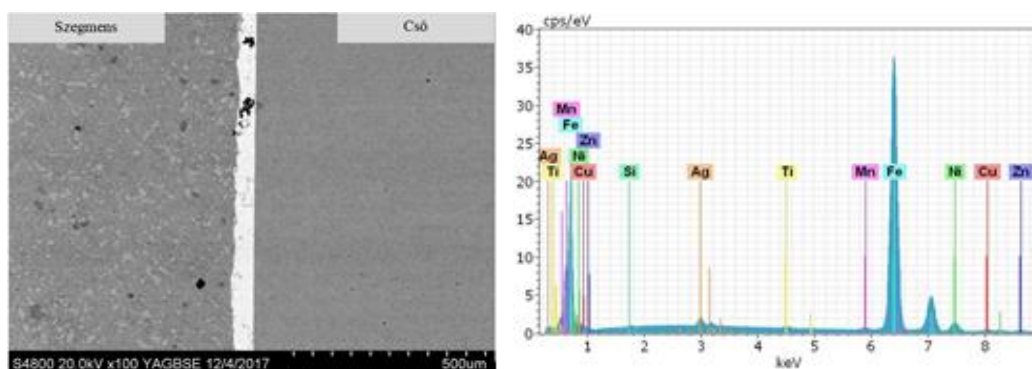


1)



2)

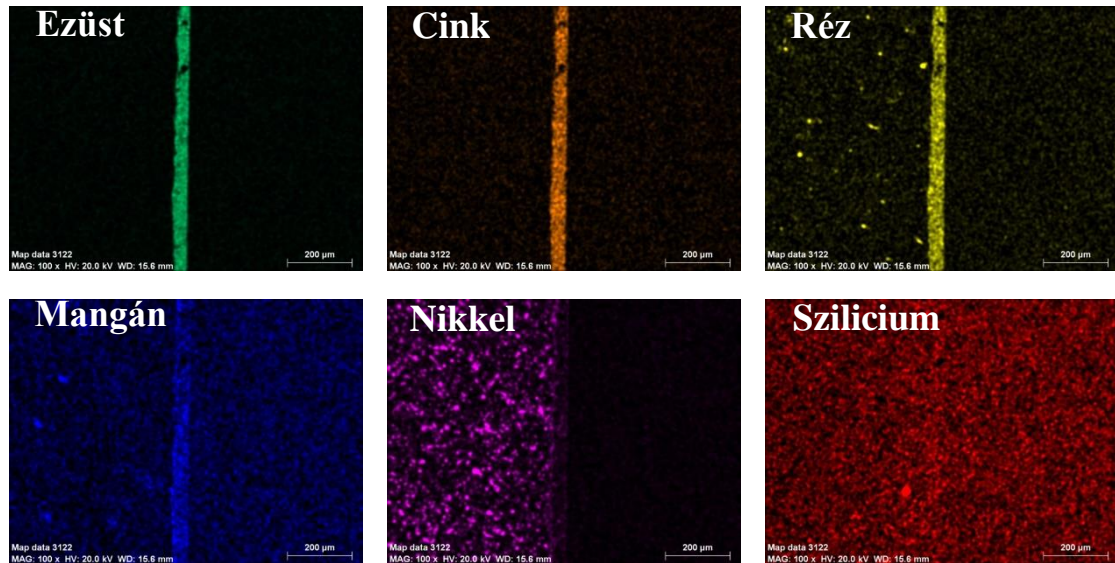
48. ábra: 1) Sztereo mikroszkópos felvétel 2) Optikai mikroszkópos felvétel a forrasztott mintáról [24]



1)

2)

49. ábra: 1) Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel, 500x nagyítással 2) EDX spektrum [24]



50. ábra: A forrasztott minta elem térképe [24]

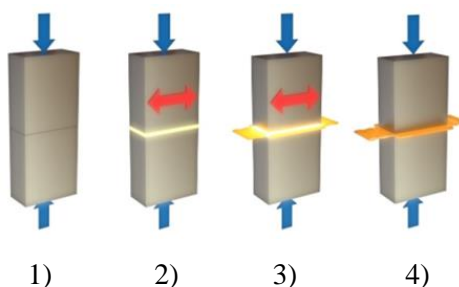
5.2.3 Alternatív kötőeljárások vizsgálata

Az alább felsorolt különböző energiaforrást használó kötőeljárások alkalmasak még a szegmensek rögzítésére; sőt az elektromos energiaforrást használó eljárásokat használják a Hilti németországi gyárában (P6) különböző átmérőjű fúrótermékeknel. Sajnos ezek a szériatermelésben használt gépek nem alkalmasak nagy átmérőjű csövek és a szegmensek megfogására, így mintagyártás nem történt. A termokémiai és a mechanikai energiaforrást használó eljárások felsorolt változatai nincsenek alkalmazásban a Hilti-n belül és sajnos más cégekkel felvett kapcsolat során sem jutottam el a mintagyártásokig. A későbbiekben, ha a technológia fejlesztése megkívánja, egy projekt keretén belül meg lehet majd vizsgálni, hogy a fúrókoronán kívül melyik Hilti terméknel lehet alkalmazni ezen technológiákat és akkor majd mintagyártásra is sor kerülhet.

- Elektromos energiaforrást használó eljárások közül:
 - ellenállás hegesztés,
 - nagyfrekvenciás, indukciós hegesztés (51. ábra);
- Termokémiai energiaforrást használó eljárások közül:
 - diffúziós hegesztés,
 - sajtoló lánghegesztés;
- Mechanikai energiaforrást használó eljárások közül:
 - ultrahangos hegesztés (52. ábra),
 - vibrációs (rezgő) dörzshegesztés [35].



51. ábra: Nagyfrekvenciás, indukciós hegesztés [36]



52. ábra: Ultrahangos hegesztés / Lineáris dörzshegesztés 1) kontakt 2) kondicionálás 3) felmelegítés 4) összenyomás [37]

5.3 Kötőtechnológia kiválasztása a további vizsgálatokhoz

Az elvégzett kísérletek eredményei alapján a lézersugaras hegesztés a legalkalmasabb a teljes fűrókorona portfólió gyártására bármilyen design vagy gyártástechnológiai változtatás nélkül (9. táblázat). A kötésben talált hibák mérete és száma csökkenthető, de nem szüntethető meg teljes mértékben (a szegmens gyártástechnológiájából eredően). A kötés szilárdságának növelésére több módszer is alkalmazható, amelyeket a továbbiakban elvégzett kísérletekkel igazolok.

9. táblázat: Kötőtechnológiák összehasonlítása

Lézersugaras hegesztés	Kondenzátorkisütéses hegesztés	Láng keményforrasztás	Alternatív kötőeljárások (ellenállás és indukciós hegesztés)	Alternatív kötőeljárások (ultrahangos és rezgő dörzshegesztés)
Nincs deformáció a csőben ✓	A cső enyhe deformációja ✗	Nincs deformáció a csőben ✓	A cső enyhe deformációja feltételezhető ✗	Nem kell számítani a cső deformációjára ✓
Nincs befogási nyom ✓	Az elektróda nyomai láthatók a csövön és a szegmensen is ✗	Nincs befogási nyom ✓	Előfordulhat befogási nyom ✗	Nem kell számítani befogási nyomra ✓
A szegmens jobban van igazítva a csőhöz ✓	A szegmens nincs tökéletesen igazítva a csőhöz ✗	A szegmens jobban van igazítva a csőhöz ✓	Számítani kell a nem tökéletes szegmens igazításra ✗	Számítani kell a nem tökéletes szegmens igazításra ✗
Nincs hegesztési sorja ✓	Jelentős hegesztési sorja ✗	Hozaganyag kifolyás előfordulhat ✗	Számítani kell a sorja képződésre ✗	Számítani kell a sorja képződésre ✗
„Kis” és egységes hőhatásövezet ✓	„Nagy” hőhatásövezet ✗	„Nagy” hőhatásövezet ✗	Számítani kell a „nagy” hőhatásövezetre ✗	„Kis” hőhatásövezetre kell számítani ✓
Belső hegesztési varrat hibái ✗	Nincsenek látható belső hegesztési hibák ✓	Belső forrasztott kötés hibái ✗	Számítani kell a belső hegesztési varrat hibáira ✗	Számítani kell a belső hegesztési varrat hibáira ✗
„Közepes” törésértékek ✓	„Magas” törésértékek ✓	„Alacsonyabb” törésértékek ✗	„Közepes” törésértékre kell számítani ✓	„Közepes” törésértékre kell számítani ✓
Jelentős keménységnövekedés ✓	Elhanyagolható keménységnövekedés ✓	Nincs keménységnövekedés ✓	Nem kell számítani keménységnövekedésre ✓	Számítani kell keménységnövekedésre ✗
Nem szükséges felületelőkészítő megmunkálás ✓	Szükséges a felület előkészítő megmunkálása ✗	Nem szükséges felületelőkészítő megmunkálás ✓	Technológiától függően szükség lehet a felület előkészítő megmunkálására ✗	Nem szükséges felületelőkészítő megmunkálás ✓

5.4 Lézerhegesztett kötés mechanikai tulajdonságainak javítási lehetőségei

A lézersugarasan kialakított varrat egységes megjelenésű, sima felületű, szélbeégés mentes, keskeny hőhatásövezettel rendelkezik (53. ábra). Azonban a varrat geometriája és szövetszerkezete befolyásolható a technológiai paraméterek változtatásával, a felületen lévő szennyeződések eltávolításával, vagy a védőgáz változtatásával. A 10. táblázat részletesebben tartalmazza a lehetséges változókat, amit különböző kísérlettervezési stratégiákkal lehet vizsgálni:

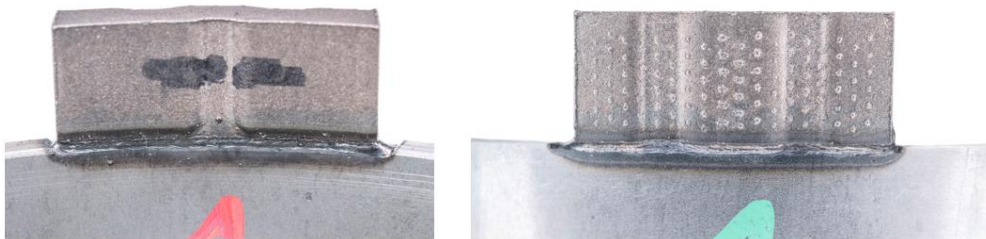
A statisztikai alapokon nyugvó kísérlettervezés lépései:

- Sejtés (az eredeti hipotézis, ami motiválja az egész kísérlet végrehajtását);
- Kísérlet (a vizsgálatok, tesztek lefolytatása, hogy a sejtést ellenőrizzük);
- Elemzés (a kísérlet során nyert adatok statisztikai elemzése);
- Következtetés (mit tudunk meg a kísérletek elemzéseiből?).

Gyakran egy kísérlet elvégzése az eredeti sejtés módosításához és egy új kísérlet szükségességéhez vezet.

A kísérletek lehetséges stratégiái:

- A legjobb találgatás módszere: gyakran használják, de nem biztos, hogy az optimális választ találják meg. Ha találnak egy elfogadhatóan jó megoldást, nem biztos, hogy tovább találgatnak;
- Egyszerre egy faktor változtatása: könnyen reprodukálható eljárás, nagyon sok kísérleti lépés szükséges, az egyes faktorok kölcsönhatása nem derül ki a kísérletből, a vizsgálat során nem lehet figyelembe venni a zavaró hatásokat;
- Faktoros kísérletek: több faktort egyidejűleg változtatnak (így kevesebb kísérleti lépés szükséges), az egyes faktorok kölcsönhatása is kiderül a kísérletekből [38].



1) 2)
53. ábra: 1) belső felület 2) külső felület [24]

10. táblázat: A varratot befolyásoló paraméterek

Hegesztési folyamatparaméterek	Felülettisztítási módszerek	Hegesztési környezet
lézerteljesítmény, defókususz, varrat pozíció (54. ábra), hegesztési sebesség, hegesztési szög * (54. ábra).	mechanikai, kémiai, elektromechanikai.	védőgáz mennyisége, védőgáz összetétele.

* A hegesztési szög úgy lett megállapítva, hogy a szegmensnek a belsejéből és a cső külsejéből olvasszon le több anyagot a lézersugár, ezért ez a paraméter nem lett változtatva a kísérletek során.



54. ábra: Hegesztési szög és varratpozíció a fúrókoronához viszonyítva [24]

5.4.1 Hegesztési folyamatparaméterek hatásainak vizsgálata

A kísérletek elvégzéséhez az „egyszerre egy faktor változtatása” módszert választottam, hogy megkapjam azt a tartományt, amelyen belül érdemes elvégezni a faktoros kísérleteket, ezáltal megismerjem a paraméterek egymásra hatásait is. A 10. táblázat felsorolásának megfelelően kerültek vizsgálatra a paraméterek:

1. a lézerteljesítményt csökkentettem a széria paramétértől (2800 W) indulva 10%-os lépésekkel, azaz 400 W-tal mindaddig, amíg a cső anyaga még éppen átolvadt teljes keresztmetszetében, ezt szemrevételezéssel ellenőriztem. Az eredmények a 11. táblázatban találhatóak, a diagramok a 55. ábrán láthatóak;
2. a defókuszt változtattam a széria paramétértől (0,25 mm) indulva 1 mm-es lépésközzel a felülettől távolodva, majd 0,5 mm-es lépésekkel a felülethez közelítve. Az eredmények a 12. táblázatban találhatóak, a diagramok a 56. ábrán láthatóak;
3. a varratpozíciót eltoltam 0,1 mm-es lépésközzel a szegmens élétől indulva a cső irányába. Az eredmények a 13. táblázatban találhatóak, a diagramok a 57. ábrán láthatóak [39].

Az adatok kiértékelése során mindhárom paraméterre átlagos törési értéket, szórást, folyamatképesség-mutatót és minimális törési értéket számoltam:

- átlagos törésérték (\bar{X}) számítása, hogy a kötés teljesítette-e a rajzi előírást;
- szórás (σ) számítása, hogy az adott paraméter a hegesztés során mennyire megbízható:
 - a magas szórás esetén a beállítás még lehet jó, de a paraméter túl érzékeny a különböző hatásokra, melyek lehetnek a szegmens vagy az alaptest anyagából eredőek, vagy akár valamilyen szennyeződés következményei a felületen;
 - az alacsony szórás utal a beállított paraméter külső hatásokra való érzéketlenségére, függetlenül attól, hogy az honnan ered, valamint mutatja a technológia hosszú távú alkalmazhatóságát a szériagyártásra;
- folyamatképesség mutató (Cpk) számítása, melynek két része van: alsó (11) és felső (12), a Cpk (13) a kettő közül a kisebbik érték. Ha Cpk értéke:
 - > 1 , akkor a folyamat kielégítő, az alatt nem elégíti ki a minimális követelményeket sem;
 - ≥ 2 , akkor a folyamat az elvárásoknak megfelelő, a hibás darabok részaránya kb. 5 PPM;
 - ≥ 5 , akkor a folyamat felültervezett (nincs szükség ilyen jó minőségre, ill. nem indokolt az ezzel járó esetleges többletköltség);

A szériatermékek gyártása során az értéknek magasabbnak kell lennie 1,33-nál.

$$CP_L = \frac{\text{Átlag} - \text{Alsó tőrés}}{3 \times \text{Szórás}} \quad (11)$$

$$CP_U = \frac{\text{Felső tőrés} - \text{Átlag}}{3 \times \text{Szórás}} \quad (12)$$

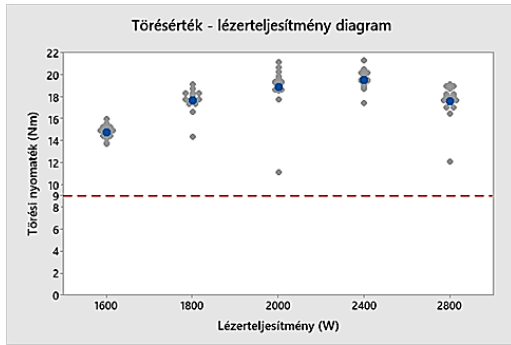
$$CP_K = \text{Min}(CP_L, CP_U) \quad (13)$$

- a minimális törésérték fontossága a funkcionalitásból ered (minél magasabb egy aktuális beállítás minimális törésértéke, annál nagyobb biztonsággal állítható, hogy a paraméterek megfelelőek).

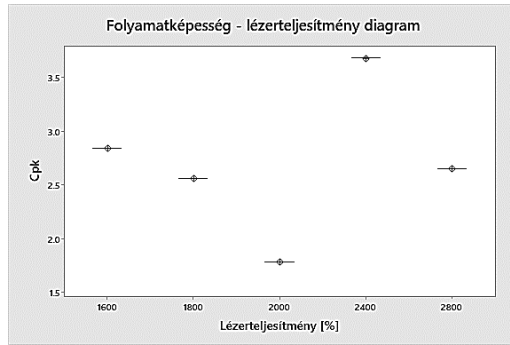
Minden mintánál 16 darab szegmenst törtem le, az értékeket a Minitab programban rögzítettem. Alsó határértékként a minimális 9 Nm-es előírást adtam meg, de felső határérték nélkül végeztem el a számításokat. A program minden mintánál megrajzolta az eloszlásgörbét, kiszámolta az átlagértéket és a folyamatképesség mutatót. Az ANOVA (Analysis of Variances) funkciót használtam a paraméterváltozások kiértékelésére, összehasonlítására mindhárom lépésnél külön-külön. A lézerteljesítmény változtatásánál az 55/1. ábráról leolvasható, hogy a teljesítmény csökkenésével először emelkedik, majd csökken a törésérték, ami az 1800 W-os mintánál szinte teljesen megegyezik a 2800 W-os mintáéval (különbség közöttük csak a minimális törésértékben van). Az 55/2. ábráról látható folyamatképesség mutató (függőleges tengely) - teljesítmény (vízszintes tengely) függvényből más olvasható le: a teljesítmény csökkenésével először hirtelen emelkedés (2400 W-os minta), majd hirtelen csökkenés (2000 W-os minta) után az 1800 W-os mintánál az értékek újra szinte teljesen megegyeznek a 2800 W-os mintáéval. Ebben a kísérletben azt a teljesítményt kerestem, ahol még teljes keresztmetszetben átolvad a cső anyaga. Az 1600 W-os mintánál már nem teljesült ez a feltétel, ezért a két utolsó minta közötti teljesítménykülönbség meg lett felezve és ezzel a paraméterrel már teljes keresztmetszetben átolvadt varrat volt látható, így az 1800 W teljesítményt vettem alapul a következő lépésekhez.

Feltételezésem szerint a felülettől távolodó defókuszt nem a jó irány, ezért csak egy lépést hajtottam végre. Az 56/1. ábrán a törésérték van ábrázolva a függőleges tengelyen a defókuszt függvényében (vízszintes tengely). Az ábráról leolvasható, hogy a felülettől távolodó defókuszt (1,25 mm minta) negatív hatással van a törésértékre, míg a felülethez közeledő defókuszt egy tartományon belül „nincs” hatással a törésértékre (0,25 mm és -1,25 mm minta között), majd enyhén csökken. Az 56/2. ábrán a folyamatképesség mutató (függőleges tengely) - teljesítmény (vízszintes tengely) függvényén látható egy érték, ami kiemelkedik a többi közül. Ez az érték abban a tartományban van, ahol a törésérték „nem változik” a defókuszt hatására. Ebben a kísérletben azt a defókuszt értéket kerestem, ahol a gépképesség mutató a legmagasabb, ezt a -0,75 mm paraméter teljesítette.

Az 57/1. ábráról leolvasható - ahol a törésérték van ábrázolva a függőleges tengelyen a varrat pozíció (vízszintes tengely) függvényében, hogy a szegmens élétől a cső irányába induló varrat pozíció eltolása növeli a törésértéket, a maximum elérése után viszont hirtelen csökken és nullára esik. Az 57/2. ábrán a folyamatképesség mutató (függőleges tengely) - teljesítmény (vízszintes tengely) függvényén látható egy érték, ami kiemelkedik a többi közül, ez az érték ott van, ahol a törésérték maximuma is van. Ebben a kísérletben azt a varrat pozíció értéket kerestem, ahol a folyamatképesség mutató a legmagasabb, ezt a -0,2 mm paraméter teljesítette.

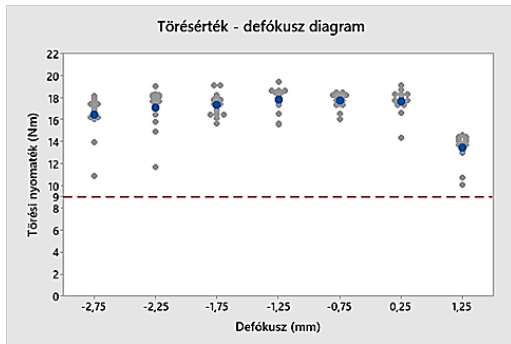


1)

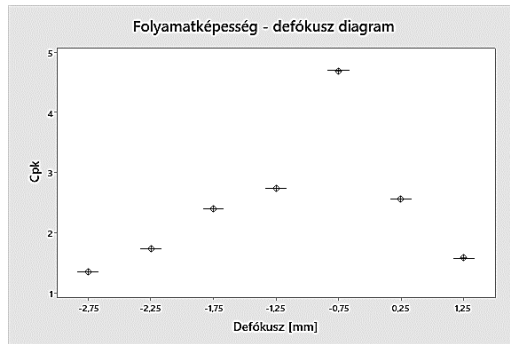


2)

55. ábra: 1) Törésérték változása és a 2) Gépképesség mutató változása a lézerteljesítmény függvényében [40]

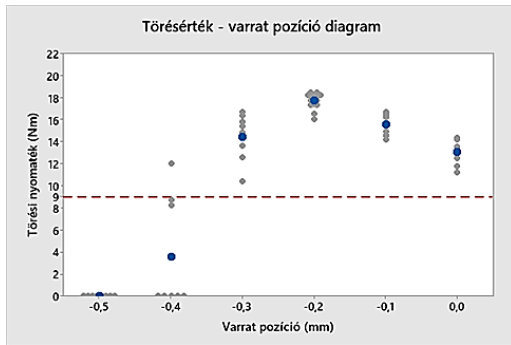


1)

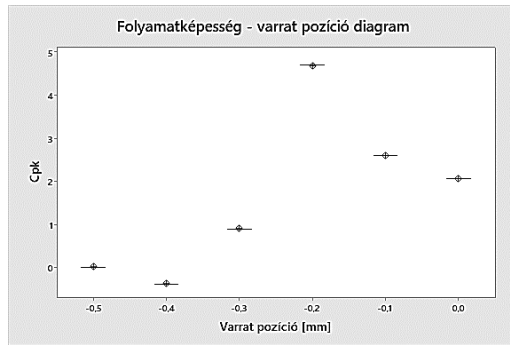


2)

56. ábra: 1) Törésérték változása és a 2) Gépképesség mutató változása a defókusz függvényében [40]



1)



2)

57. ábra: 1) Törésérték változása és a 2) Gépképesség mutató változása a varrat pozíció függvényében [40]

11. táblázat: Lézerteljesítmény hatása

Minta száma	Átlagos törésérték [Nm]	Szórás	Folyamatképesség mutató	Minimum törésérték [Nm]
1 (2800 W)	17,575	1,640	2,65	12,1
2 (2400 W)	19,506	0,589	3,68	17,4
3 (2000 W)	18,793	2,216	1,78	11,1
4 (1600 W)	14,773	0,611	2,84	13,7
5 (1800 W)	17,620	1,108	2,56	14,3

12. táblázat: Defókusz hatása

Minta száma	Átlagos törésérték [Nm]	Szórás	Folyamatképesség mutató	Minimum törésérték [Nm]
6 (1,25 mm)	13,431	1,271	1,58	10,1
7 (0,25 mm)	17,620	1,108	2,56	14,3
8 (-0,75 mm)	17,731	0,690	4,69	16
9 (-1,25 mm)	17,818	1,104	2,74	15,5
10 (-1,75 mm)	17,275	1,025	2,39	15,6
11 (-2,25 mm)	17,086	1,823	1,73	11,7
12 (-2,75 mm)	16,433	1,848	1,35	10,9

13. táblázat: Varratpozíció hatása

Minta száma	Átlagos törésérték [Nm]	Szórás	Folyamatképesség mutató	Minimum törésérték [Nm]
13 (0 mm)	13,025	1,105	2,05	11,2
14 (-0,1 mm)	15,500	1,044	2,59	14,2
15 (-0,2 mm)	17,731	0,690	4,69	16,0
16 (-0,3 mm)	14,450	2,134	0,89	10,4
17 (-0,4 mm)	3,612	5,106	-0,39	0
18 (-0,5 mm)	0			0

A kapott eredmények alapján azt a következtetést vontam le, hogy a vizsgált folyamatparaméterek közül a varrat pozíció van a legnagyobb hatással a törésértékre, ennek az értéknek a változása hirtelen elrontja a minőséget. Ezt követi a lézerteljesítmény és a defókusz változása, ebben a sorrendben. Az „egyszerre egy faktor változtatása” stratégiát követve három lépésből eljutottam egy jó megoldásig, aminek a paraméterei: lézerteljesítmény: 45%, defókusz: -0,75mm, varrat pozíció: -0,2mm. Ennek a stratégiának a hátránya, hogy nem ismerjük a faktorok kölcsönhatásait. Ezt alátámasztandó, ezekkel a paraméterekkel gyártottam egy mintát, melynek eredményét a 14. táblázatban foglaltam össze. Megállapítható, hogy ez messze elmarad a korábbi eredménytől.

Az eddig elvégzett kísérleteket úgynevezett szűrő kísérletnek tekintem (Screening Experiments), amikor nagy számú faktor (kb. 6-15) bevonásával a cél annak megállapítása, hogy mely faktoroknak van jelentős hatása. Ezután a szignifikáns faktorokkal (kb. 2-5) részletesebb vizsgálatokat végzünk a válasz értékének optimalizálására. Az input faktorok minimális és maximális szintjét gondosan kell megválasztani. Egyrészt célszerű, hogy elég nagy különbség legyen az értékük között ahhoz, hogy a válasz változó átlagos értékében mérhető különbség legyen a két szint között, másrészt nem szabad, hogy a szintek kívül essenek a folyamat normális működését biztosító tartományon. A további kísérlethez a 15. táblázatban látható paraméter-tartományokat használom (mint az egyes faktorok minimális és maximális értéke) és a Minitab program segítségével állítom elő a kétszintes, teljes faktoriális kísérlettervet (58. ábra). Ez azt jelenti, hogy az összes lehetséges faktorszint-kombináció

mellett elvégzem a kísérletet. A terv 16 mintából áll (4 faktor, mindegyik 2 értékkel), mivel a változó paraméterek közé felvettem a sebességet is. A 17. minta a faktorok középértéke. Két faktor (A és B) esetén az AB kölcsönhatás nagyságát úgy határozzuk meg, hogy kiszámítjuk az A faktor átlagos hatását akkor, amikor a B faktor a maximális szinten van, valamint kiszámítjuk az A faktor átlagos hatását, amikor a B faktor a minimális szinten van és e két átlagos hatás különbségének a felét vesszük. A kölcsönhatást kettőnél több faktor esetén is hasonlóan értelmezzük, illetve a kölcsönhatás nagyságát hasonlóképpen számíthatjuk. A kísérleteket randomizálva (véletlenszerűsítve) és blokkosítva (csoportosítva) hajtom végre [41].

A kísérleteket a megadott RunOrder sorrendben végeztem el (azaz C2 oszlop szerint) és a törésértékeket beírtam az első üres oszlopba (azaz a C9-be), amit előzőleg BV-nek neveztem el. A kiértékelésekben a német nyelvből átvett és a kecskeméti gyárban is használt rövidítéseket alkalmaztam (P: lézerteljesítmény (%), S: hegesztési sebesség (mm/s), FPQ: defókusz (mm), FPL: varrat pozíció (mm)). A numerikus kiértékelést a p-érték (P-Value) vizsgálatával kezdtem (59/1. ábra). Amennyiben ez az érték kisebb, mint 0,05, az azt jelzi, hogy annak a faktornak a főhatása szignifikáns és azoknak a faktoroknak a kölcsönhatása is szignifikáns. A pirossal bekeretezett értékek meghaladják a 0,05-ös szignifikancia szintet, ami azt jelenti, hogy nincs szignifikáns kölcsönhatás sem a jelölt faktor, sem a jelölt faktorok kölcsönhatása esetén.

14. táblázat: Legmagasabb folyamatképességű minták közös eredménye

Minta száma	Átlagos törésérték [Nm]	Szórás	Folyamatképesség mutató	Minimum törésérték [Nm]
19	15,275	2,401	0,77	10,7

15. táblázat: Paraméter tartományok a faktoros kísérlethez

Folyamat-paraméter	Mértékegysége	Minimum érték	Maximum érték
Lézer teljesítmény	W	1800	2800
Defókusz	mm	-1,25	0,75
Varrat pozíció	mm	-0,2	0
Hegesztési sebesség	mm/s	30	50

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Lézer teljesítmény [%]	Hegesztési sebesség [mm/s]	Defókusz [mm]	Varrat pozíció [mm]
1	2	1	1	1	70.0	30	-1.25	-0.30
2	16	2	1	1	70.0	50	0.75	0.00
3	7	3	1	1	45.0	50	0.75	-0.30
4	3	4	1	1	45.0	50	-1.25	-0.30
5	1	5	1	1	45.0	30	-1.25	-0.30
6	13	6	1	1	45.0	30	0.75	0.00
7	15	7	1	1	45.0	50	0.75	0.00
8	10	8	1	1	70.0	30	-1.25	0.00
9	14	9	1	1	70.0	30	0.75	0.00
10	11	10	1	1	45.0	50	-1.25	0.00
11	17	11	0	1	57.5	40	-0.25	-0.15
12	9	12	1	1	45.0	30	-1.25	0.00
13	5	13	1	1	45.0	30	0.75	-0.30
14	6	14	1	1	70.0	30	0.75	-0.30
15	12	15	1	1	70.0	50	-1.25	0.00
16	4	16	1	1	70.0	50	-1.25	-0.30
17	8	17	1	1	70.0	50	0.75	-0.30

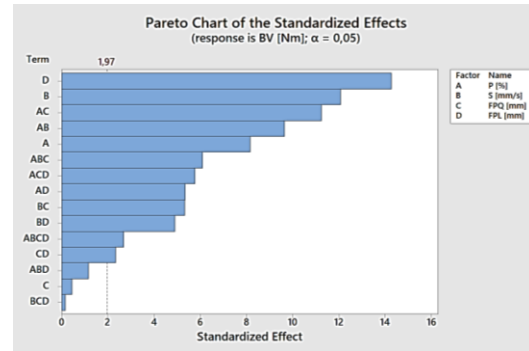
58. ábra: Randomizált kétszintes, faktoriális kísérletterv [24]

Mivel a kísérletben az ismétlések száma nagyobb, mint 1, a Minitab az ún. standardizált hatások nagyságát (az adott hatáshoz tartozó t statisztika (T-value) értékét) hasonlítja össze a kritikus értékkel (a Pareto ábrában az abszolút értékek nagyságával). Ezt a kritikus értéket (esetünkben 1,97) a t-eloszlás és az alfa szignifikancia szint alapján számítja. A kódolt Pareto diagramról is leolvasható ugyanaz eredmény (59/2. ábra), mint a numerikus kiértékelésből, a kritikus érték alatti faktorok és kölcsönhatások nem szignifikánsak. Ezért újraépítettem a modellt oly módon, hogy eltávolítottam a modelltől a nem szignifikáns tagokat. Ezután az analízist ezzel a módosított modellel újra futtattam és az 60/1. ábrán látható numerikus kiértékelést szintén a p-érték (P-Value) vizsgálatával kezdtem. Amint látható az ebben a modellben szereplő mindegyik taghoz tartozó p-érték kisebb, mint 0,05, a szignifikáns és a kritikus érték (1,97) sem módosult (60/2. ábra). Azonban van két kölcsönhatás, ami ezen érték közelében van és a p-értéke nagyobb, mint nulla. Ezt a két kölcsönhatást is eltávolítottam a modelltől és újra futtattam azt. A kapott numerikus eredmény azt mutatja (61/1. ábra), hogy minden faktornak és kölcsönhatásnak 0,000 a p-értéke, ezért ezt a modellt tekinthetem a végleges modellnek. A módosított modellben benne hagyott összes tag továbbra is szignifikáns maradt (61/2. ábra).

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		17,195	0,103	167,52	0,000	
P [%]	1,727	0,863	0,106	8,16	0,000	1,00
S [mm/s]	-2,556	-1,278	0,106	-12,08	0,000	1,00
FPQ [mm]	0,097	0,048	0,106	0,46	0,647	1,00
FPL [mm]	3,022	1,511	0,106	14,28	0,000	1,00
P [%]*S [mm/s]	2,041	1,020	0,106	9,64	0,000	1,00
P [%]*FPQ [mm]	2,381	1,191	0,106	11,25	0,000	1,00
P [%]*FPL [mm]	-1,131	-0,566	0,106	-5,35	0,000	1,00
S [mm/s]*FPQ [mm]	-1,130	-0,565	0,106	-5,34	0,000	1,00
S [mm/s]*FPL [mm]	1,039	0,520	0,106	4,91	0,000	1,00
FPQ [mm]*FPL [mm]	0,495	0,248	0,106	2,34	0,020	1,00
P [%]*S [mm/s]*FPQ [mm]	1,292	0,646	0,106	6,11	0,000	1,00
P [%]*S [mm/s]*FPL [mm]	-0,245	-0,123	0,106	-1,16	0,247	1,00
P [%]*FPQ [mm]*FPL [mm]	-1,220	-0,610	0,106	-5,77	0,000	1,00
S [mm/s]*FPQ [mm]*FPL [mm]	-0,034	-0,017	0,106	-0,16	0,871	1,00
P [%]*S [mm/s]*FPQ [mm]*FPL [mm]	-0,569	-0,284	0,106	-2,69	0,008	1,00

1)



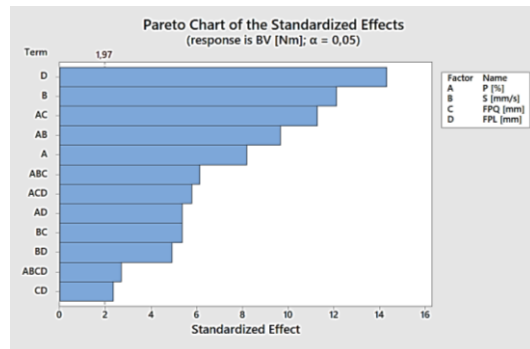
2)

59. ábra: Minitab kiértékelés 1) Numerikusan 2) Grafikusan [40]

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		17,195	0,102	167,98	0,000	
P [%]	1,727	0,863	0,106	8,18	0,000	1,00
S [mm/s]	-2,556	-1,278	0,106	-12,11	0,000	1,00
FPL [mm]	3,022	1,511	0,106	14,32	0,000	1,00
P [%]*S [mm/s]	2,041	1,020	0,106	9,67	0,000	1,00
P [%]*FPQ [mm]	2,381	1,191	0,106	11,28	0,000	1,00
P [%]*FPL [mm]	-1,131	-0,566	0,106	-5,36	0,000	1,00
S [mm/s]*FPQ [mm]	-1,130	-0,565	0,106	-5,35	0,000	1,00
S [mm/s]*FPL [mm]	1,039	0,520	0,106	4,92	0,000	1,00
FPQ [mm]*FPL [mm]	0,495	0,248	0,106	2,35	0,020	1,00
P [%]*S [mm/s]*FPQ [mm]	1,292	0,646	0,106	6,12	0,000	1,00
P [%]*S [mm/s]*FPL [mm]	-1,220	-0,610	0,106	-5,78	0,000	1,00
P [%]*FPQ [mm]*FPL [mm]	-0,569	-0,284	0,106	-2,70	0,007	1,00

1)



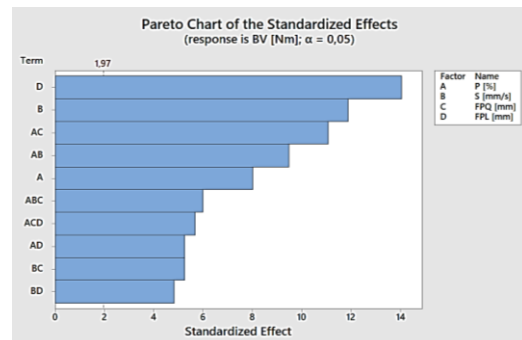
2)

60. ábra: Újraépített modell kiértékelése 1) Numerikusan 2) Grafikusan [40]

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		17,195	0,104	164,62	0,000	
P [%]	1,727	0,863	0,108	8,02	0,000	1,00
S [mm/s]	-2,556	-1,278	0,108	-11,87	0,000	1,00
FPL [mm]	3,022	1,511	0,108	14,03	0,000	1,00
P [%]*S [mm/s]	2,041	1,020	0,108	9,48	0,000	1,00
P [%]*FPQ [mm]	2,381	1,191	0,108	11,06	0,000	1,00
P [%]*FPL [mm]	-1,131	-0,566	0,108	-5,25	0,000	1,00
S [mm/s]*FPQ [mm]	-1,130	-0,565	0,108	-5,25	0,000	1,00
S [mm/s]*FPL [mm]	1,039	0,520	0,108	4,83	0,000	1,00
P [%]*S [mm/s]*FPQ [mm]	1,292	0,646	0,108	6,00	0,000	1,00
P [%]*S [mm/s]*FPL [mm]	-1,220	-0,610	0,108	-5,67	0,000	1,00

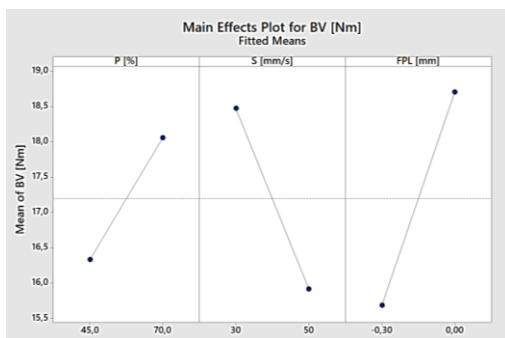
1)



2)

61. ábra: Végleges modell kiértékelése 1) Numerikusan 2) Grafikusan [40]

A faktorok főhatás ábrájában szemléletesebben látható a numerikus eredményeknél közölt hatások. A törésérték átlagos értéke (BV) növekszik a lézerteljesítmény (P) növelésével, a sebesség (S) növelésével csökken és a varrat pozíció (FPL) szegmenshez közelítésével növekszik (62/1. ábra). A törésérték előrejelzésére a program egy képletet határozott meg (62/2. ábra), amelybe behelyettesítve a faktorok kívánt értékeit megadja a várható törésértéket. A faktorok kölcsönhatás ábrájából kiolvashatóak az egymásra hatások (63/1. ábra). A kék folytonos vonal a faktor minimális értékéhez tartozó változást mutatja, míg a zöld szaggatott vonal a faktor maximális értékéhez tartozó változást mutatja. A piros négyzet a középértékhez tartozó értéket mutatja. A boxplot diagram (63/2. ábra) megmutatja az átlagos törésértéket és a hozzá tartozó szórást minden kísérletnél. A diagramból kiolvasható, hogy a 6-os számú mintának a legmagasabb az átlagos törésértéke és a legkisebb a szórása. Ehhez az értékhez a P=45% (1800 W) lézer teljesítmény, S=30 mm/s hegesztési sebesség, FPQ=-0,75 mm defókusz és FPL=0 mm varrat pozíció paraméterkombinációja tartozik. Egyedül a 3-as minta nem teljesítette a minimum 9 Nm törési erőt.



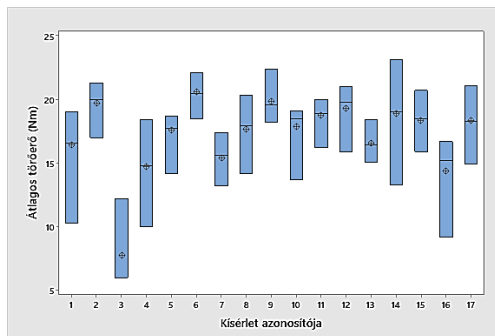
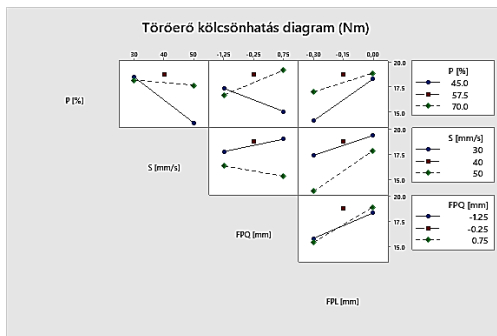
Regression Equation in Coded Units

$$\begin{aligned}
 BV [Nm] = & 17,195 + 0,863 P [\%] - 1,278 S [mm/s] + 1,511 FPL [mm] + 1,020 P [\%] S [mm/s] \\
 & + 1,191 P [\%] FPQ [mm] - 0,566 P [\%] FPL [mm] - 0,565 S [mm/s] FPQ [mm] \\
 & + 0,520 S [mm/s] FPL [mm] - 0,646 P [\%] S [mm/s] FPQ [mm] \\
 & - 0,610 P [\%] FPQ [mm] FPL [mm]
 \end{aligned}$$

1)

2)

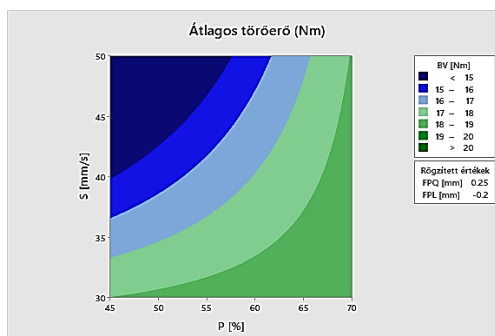
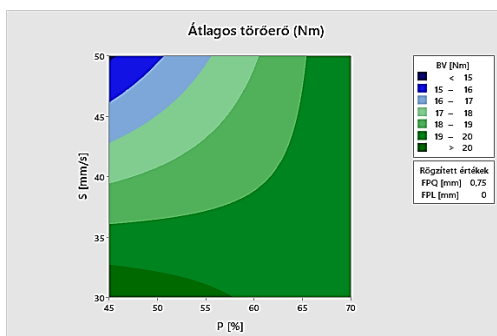
62. ábra: 1) Faktorok főhatás ábrája 2) Keménység előre jelző képlet [40]



1)

2)

63. ábra: 1) Faktorok kölcsönhatás ábrája 2) Törésérték változása a kísérletek során [40]



1)

2)

64. ábra: Kontúrdiagramok összehasonlítása 1) 6-os minta 2) Széria paraméter [40]

A kontúrdiagram egy válaszváltozó és két faktor közötti kapcsolat vizsgálatára alkalmas. A kontúrdiagramban a két faktor értékei az x- és y-tengelyen jelennek meg, a válaszváltozó értékeit pedig árnyékolt régiók, úgynevezett kontúrok jelzik. A kontúrdiagram olyan, mint egy topográfiai térkép, amelyben a hosszúság, szélesség és magasság helyett az x-, y- és z-értékek vannak ábrázolva. A 64/1. ábrán a 6-os számú mintához tartozó kontúrdiagram látható, mely a hegesztési sebesség (S) és a lézerteljesítmény (P) hatását mutatja a törésértékre, miközben a defókususz és a varrat pozíció értéke rögzítve van. A sötétkék terület mutatja a legkisebb törésértékhez tartozó paramétereket, míg a sötétzöld terület mutatja a legmagasabb törésértékhez tartozó paramétereket. Így ki lehet választani azt a hegesztési sebességet és lézerteljesítményt, amivel a kívánt törésértéket el tudjuk érni.

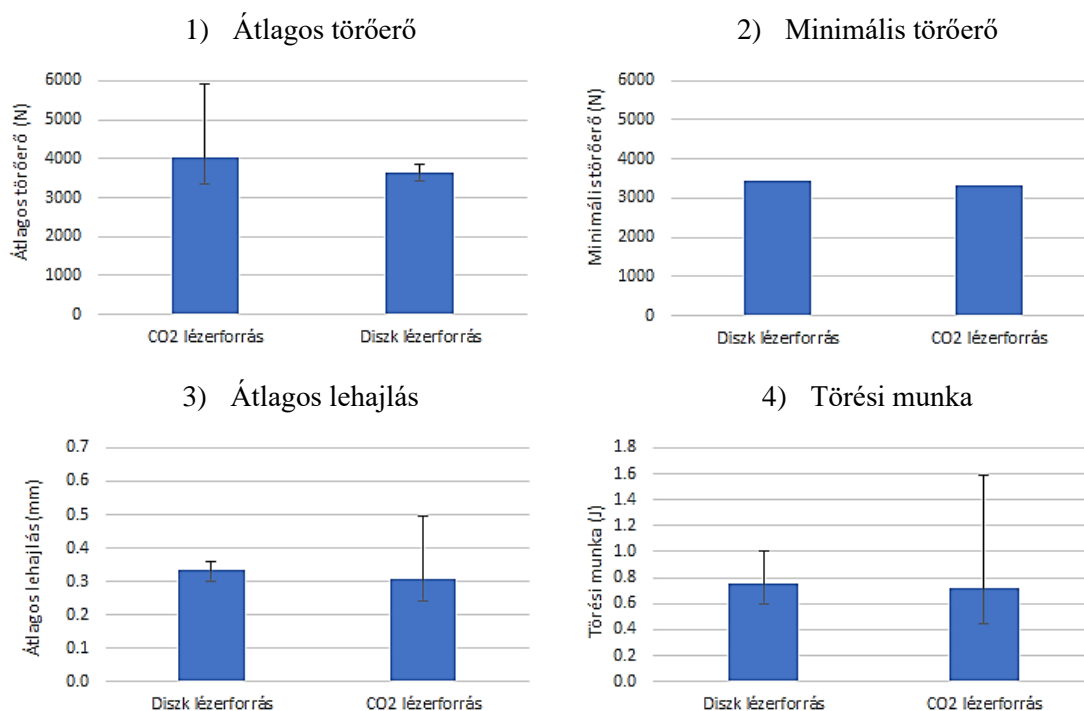
Összehasonlításképpen a jelenlegi szériagyártásban használt defókususz és varrat pozíciónál rögzített diagrammal (64/2. ábra) látható, hogy az alacsonyabb törésértékhez tartozó sötétkék terület sokkal nagyobb és hiányzik a 19 Nm feletti törésérték terület. A szűrő kísérletnél már megállapítottam és a faktoriális kísérletnél is beigazolódtott, hogy a defókusznak nincs szignifikáns hatása a törésértékre, így a különbség csak a varrat pozíció értékének változásából eredhet, melynek szignifikáns hatása van a törésértékre (mind a szűrő kísérlet, mind a faktoriális kísérlet alapján). Összegzésképpen elmondható, hogy mind a szériagyártásnál, mind a 6-os mintánál használt paraméterek teljesítik a rajzi előírásokat. A szériagyártásban a ciklusidőnek van az egyik legnagyobb hatása a gyártási költségekre, így a maximális hegesztési sebességhez beállított lézerteljesítmény, defókususz és varrat pozíció preferált a gyár részéről.

5.4.2 Különböző lézerforrások hatásának vizsgálata

A fúrókorona szériagyártásánál használt Trumpf TruDisk 4002 típusú, max. 4 kW teljesítményű és 1,03 μm hullámhosszúságú lézerforrás mellett a kecskeméti gyár rendelkezik egy Dr. Fritsch által gyártott BSM300 lézerhegesztő géppel is, amely egy max. 2,5 kW-os teljesítményű és 10,6 μm hullámhosszúságú CO₂ lézerforrással van felszerelve és alkalmas fúrókoronák hegesztésére. Kísérletet végeztem, hogy összehasonlítsam a két lézerforrást, majd a hegesztett mintákat az Instron anyagvizsgáló géppel végzett törésteszt eredményei alapján értékeltem ki.

Az eredmények alapján elmondható, hogy az átlagos törőerő a CO₂ lézerforrással hegesztett minták esetén +11%-kal magasabb, azonban az érték szórása is magasabb, majd 5,8-szerese, mint a diszk lézerforrással hegesztett minták esetén (65/1. ábra). A minimális törőerő esetén (mely az adott mintán belül a legalacsonyabb törőerőt mutatja) a CO₂ lézerforrás 2%-kal kisebb értéket mutat (65/2. ábra). Az átlagos lehajlásnál a CO₂ lézerforrás 9%-kal kisebb értéket mutat, viszont az érték szórása magasabb, majd 4,3-szerese, mint a diszk lézerforrás (65/3. ábra). A törési munkánál is hasonló a különbség, -4% és a szórás 2,9-szeres (65/4. ábra).

Összefoglalásként elmondható, hogy mindhárom vizsgált jellemző (átlagos törőerő, átlagos lehajlás és törési munka) esetén nem volt szignifikáns különbség a két különböző lézerforrással hegesztett minták között. Azonban a CO₂ lézerforrással hegesztett mintáknak jóval nagyobb volt a szórása mindhárom vizsgált jellemzőnél. Elmondható, hogy mindkét lézerforrás alkalmas a fúrókoronák szériagyártására, de a nagy szórás miatt a CO₂ lézerforrással készült minták további vizsgálatait elhalasztottam és a további kísérletekben a szériagyártásnál alkalmazott lézerforrást használtam.



65. ábra: Különböző lézerforrások hatása [40]

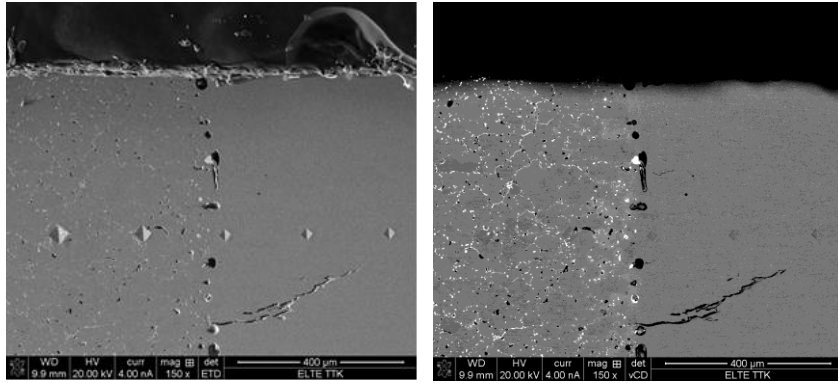
5.4.3 Felülettisztítási módszerek hatásainak vizsgálata

Felmerült, hogy a fúrókorona komponensei még hegesztés előtt szennyezettek lehetnek, emiatt alakult ki a zárványosság és a repedés a varratban. Ezért a lézersugarasan hegesztett varratról készült csiszolatot ismételt SEM vizsgálatnak vettem alá, melynek célja a zárványok, gázbuborékok kialakulási mechanizmusának felderítése volt. A vizsgálatot Quanta 3D FEG kétsugaras pásztázó elektron mikroszkóppal végeztem (20 kV gyorsítófeszültséggel, 4 nA nyalábárammal, másodlagos (felületi információ) és visszaszórt (rendsámkontraszt) elektron leképezési móddal). A vizsgálat során készített képek alapján (66. ábra) megállapítható volt, hogy a repedések minden esetben a hegesztés során kialakult gázbuborékok okozta feszültségterek következményeként alakultak ki. Szintén a képek alapján kijelenthető, hogy a gázbuborék kialakulása felületi szennyezéshez köthető, hiszen úgy a buborék belső falán, mint a repedések buborékokhoz közeli oldalán szennyezés okozta intermetallikus fáziskialakulás figyelhető meg (karbid, nitrid), míg a repedésekben főleg szén dúsulása jellemző, ami karbidképződésre utal.

A felületi szennyeződés jelenlétét ellenőrizendő, hegesztés előtt álló csövet és néhány szegmenst is megvizsgáltam ugyanazzal a mikroszkóppal, előkészítés nélkül. A cső keresztmetszeti képén (67. ábra), a felületen nagy széntartalmú (feltehetőleg szerves anyag-, olajszármazék) részletek jelenléte ismerhető fel. Az EDS analízis alapján kijelenthető a szén és oxigén domináns jelenléte a felületen, mely egyértelmű bizonyíték a szennyezettségre. Az elemzés összefoglalása a 16. táblázatban található. Hegesztés során (a fellépő magas hőmérsékletek miatt) ezen elemek a jelen lévő fémekkel reakcióba lépnek és a szerves anyagokból távozó szén okozta buborékok környezetében karbid és oxid fázisokat képeznek.

A szegmens vizsgálatát HITACHI TM4000+ asztali elektronmikroszkóppal végeztem (5 kV gyorsítófeszültséggel (felületérzékeny mérés), 1 nA nagyságrendű nyalábárammal, visszaszórt elektron leképezési móddal), szintén előkészítés nélkül. A 68. ábra alapján

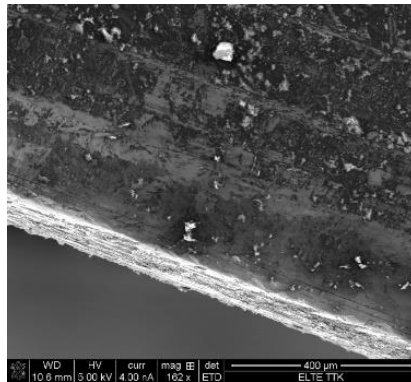
kijelenthető a szegmens felületi szennyezettsége A visszaszórt elektronképen 100x és 150x nagyításokban jól megfigyelhető ismétlődő sötét (fekete) felületi struktúra alacsony rendszámú elemekhez köthető (C és O₂). A karbidos, oxidos szennyezésen kívül megfigyelhető még magasabb rendszámú elemek jelenléte, melyek leginkább az 500x nagyítású képen vehetők ki igazán. A szennyezés durván mikronos egységekből képződött, összetételét tekintve pedig réz és molibdén oxidfázisú aggregátumok sokasága.



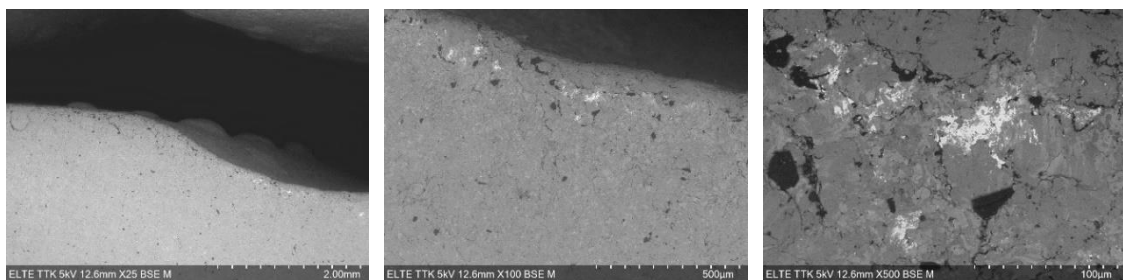
1)

2)

66. ábra: Azonos területről készült 1) másodlagos elektronkép 2) visszaszórt elektronkép [24]



67. ábra: Átfogó kép a keresztmetszetről [24]



1)

2)

3)

68. ábra: Átfogó kép a keresztmetszetről 1) 100x nagyítás 2) 500x nagyítás [24]

16. táblázat: A cső EDS analizisének összefoglaló táblázata

Elemek	C	O ₂	Fe	Na	Al	Si	S	Összesen
At %	29,39	12,14	55,22	1,69	0,2	0,54	0,81	100
m/m %	56,64	17,15	22,88	1,71	0,17	0,45	0,59	100

A kísérleti munka megkezdése előtt áttekintettem a szakirodalmat, hogy milyen eljárások alkalmasak a cső felületén lévő szennyeződések eltávolítására. Különös tekintettel voltam a tömeggyártásban használt felülettisztítási eljárásokra, amelyek alkalmasak a rozsdra, az olaj és a zsír eltávolítására.

Az eljárásokat három csoportba soroltam, mint mechanikai, kémiai és elektromechanikus. A legismertebb hagyományos mechanikai felülettisztítási technikák a szemcseszórás (fém, mint koptatóanyag felhasználásával), a homokfúvás (homok, mint koptatóanyag felhasználásával) és a szárazjégfúvás (CO₂-pellet, mint koptatóanyag felhasználásával). A homokfúvást gyakran ajánlják a mechanikai tulajdonságok javítására [42,43]. Ez a művelet nagy nyomás alatt csiszolóanyagot irányít a felületre azért, hogy megtisztítsák azt vagy befolyásolják annak alakját [44-46]. A szárazjégfúvási eljárás pneumatikus alapú, és szárazjég-pellettel, mint egyirányú fúvóközeggel működik [47]. A szárazjég-pelletek szilárd szén-dioxidból (CO₂) állnak -78,5 °C hőmérsékleten [48,49]. A szárazjégfúvás alkalmazási területei közé tartozik az atomerőművek tisztítása és fertőtlenítése, a rozsdra, a kagylók és a festék eltávolítása tengeri alkalmazásokban, tisztítás és festékeltávolítás a felújítás során, valamint repülőgép- és vonatipar, nyomdagépek tisztítása, csőtisztítás, valamint a gyanták, lakkok, ragasztók, olajok, zsírok, bitumen és tömítések eltávolítása [50]. Egyes esetekben ezek a technikák műanyagdeformációt és felületi hibákat idézhetnek elő [51], a koptató részecskék pedig ronthatják a működési környezetet és növelhetik a munkavállalók egészségügyi kockázatát [52].

A kémiai tisztítás során a felületi szennyeződések eltávolítása a felületi szennyeződések és a savas oldatok, például izopropil-alkohol, aceton és lúgos savas folyadék közötti kémiai reakció révén történik [53,54]. A viszonylag hosszú folyamatidő miatt nehezen illeszthető be egy rövid ciklusidejű sorozatgyártásba, mint a lézersugaras hegesztés.

A lézereket a gyártási ágazatokban számos anyagmegmunkálási alkalmazásban használják, a nanofibrillációtól a felülettisztításig [55-57]. A lézeres felülettisztítást a felületi szennyeződések eltávolítására használják [45,58-61] érintésmentesen, könnyű vezérelhetőséggel és nagy pontossággal. Ezenkívül környezetbarát eljárás, mivel nem igényel csiszolóanyagokat vagy savas oldatokat, amelyek másodlagos hulladékot okoznak.

A kísérlet során azokat az eljárásokat alkalmaztam, amelyek elérhetőek a kecskeméti gyárban is. A cső felülettisztítását követően ráhegesztettem a szegmenseket a széria gyártásban használt lézersugaras hegesztőgéppel (69. ábra). A hegesztett varratot számítógépes tomográfiával vizsgáltam, hogy megfigyelhessem a felülettisztítási módszerek hatását a hegesztési hibákra. Ezen kívül a mechanikai tulajdonságokat is vizsgáltam töréstesztel és keménységvizsgálattal. Az eredményeket összehasonlítottam egy tisztítatlan mintával is, amit a szériagyártásból vettem ki [62]. A továbbiakban a 17. táblázatban megadott jelölésekre való hivatkozással azonosítom a mintákat. A táblázat emellett tartalmazza még a hegesztési paramétereket is.

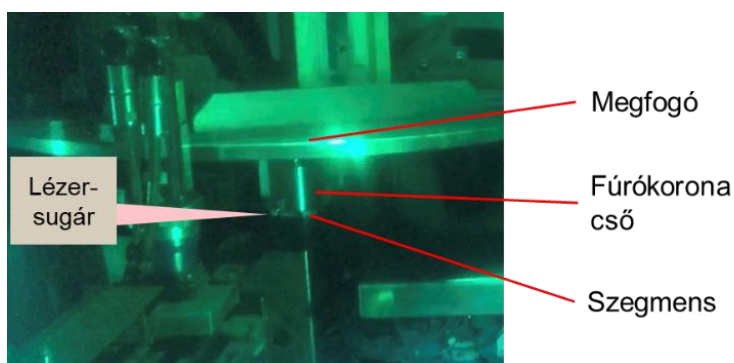
A varratkép fényképes hibakatalógusban meghatározott követelmények alapján került ellenőrzésre. Optikai varratvizsgálattal megállapítottam, hogy sem felületi, sem felületre kifutó eltérés, hiba nem volt tapasztalható egyik minta esetében sem. A varratokat CT vizsgálattal is elemeztem, de porozitást vagy repedéseket nem találtam. Továbbá, amikor az intenzitás szürke skálája létre lett hozva, kiderült, hogy az összes tisztított minta nagyobb abszorpciót mutatott, mint a tisztítás nélküli minta. A varratok röntgensugárzási

elnyelődése alapján a szürkeárnyaltos intenzitások statisztikai eloszlásán alapuló módszert alkalmaztam a mikro-CT-felvételek képi jellemzőinek kinyerésére. A szürkeárnyaltos intenzitásokat közvetlenül a mikro-CT-felvételek pixeleiből nyertem. Az intenzitások pozitív egész számok 0 és 255 közötti értékekkel, minél magasabb az érték, annál nagyobb az abszorpció, és ezek információt adnak a felület tisztaságáról is (70/1. ábra, csökkenő sorrendbe rendezve az értékeket).

A felülettisztítási módszerek közül

- jelentős hatással volt a kötés tisztaságára:
 - aceton (T3) 66%-kal,
 - izopropil-alkohol (T2) 59%-kal;
- pozitív hatással volt a kötés tisztaságára:
 - lúgos kémhatású folyadék (T5) 48%-kal,
 - lézersugaras tisztítás (T7) 48%-kal,
 - homokfúvás (T6) 46%-kal,
 - szárazjég fúvás (T8) 44%-kal,
 - lúgos kémhatású folyadék (T4) 22%-kal

a tisztítás nélküli mintához (T1) képest.



69. ábra: Átfogó kép a hegesztésről [24]

17. táblázat: Jelölések és hegesztési paraméterek

Minta jele	Tisztítási módszer	Lézer teljesítmény (W)	Hegesztési sebesség (m/s)	Védőgáz	Védőgáz mennyisége (l/min)	Fókusz távolság (mm)	Defókusz (mm)	Hőbevitel (kJ/mm)
T1	Tisztítás nélkül	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56
T2	Izopropil alkohol	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56
T3	Aceton	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56
T4	Lúgos folyadék *	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56
T5	Lúgos folyadék **	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56
T6	Homok szórás	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56
T7	Jelölő lézer	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56
T8	Szárazjég	2800	3	Ar	10	20	+0,25	0,56

*: ipari mosógép ultrahangos rásegítéssel (15 perces program)

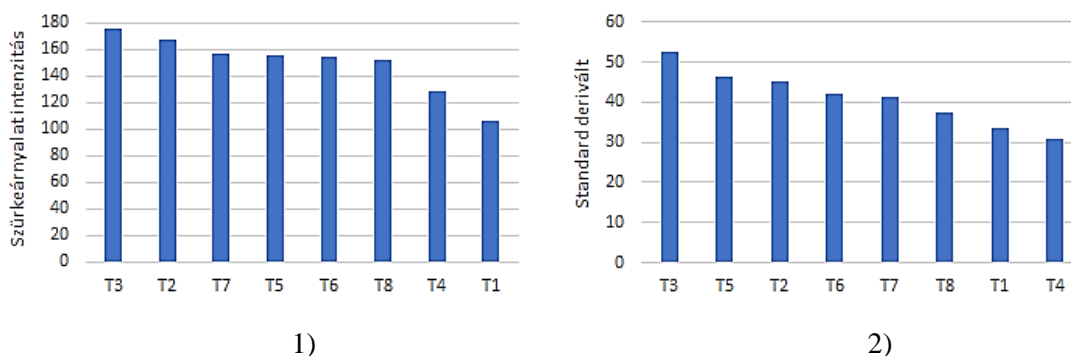
** : ipari mosógép ultrahangos rásegítéssel (48 perces program)

A 70/2. ábra a standard derivált értéket mutatja, csökkenő sorrendbe rendezve az értékeket. A felülettisztítási módszerek közül

- jelentős hatással volt a kötés tisztaságára:
 - aceton (T3) 55%-kal;
- pozitív hatással volt a kötés tisztaságára:
 - lúgos kémhatású folyadék (T5) 37%-kal,
 - izopropil-alkohol (T2) 35%-kal,
 - homokfúvás (T6) 24%-kal,
 - lézersugaras tisztítás (T7) 23%-kal,
 - szárazjég fúvás (T8) 11%-kal;
- negatív hatással volt a kötés tisztaságára:
 - lúgos kémhatású folyadék (T4) -8%-kal

a tisztítás nélküli mintához (T1) képest.

A mikro-CT-vizsgálatot összegezve a felülettisztítási módszerek közül az acetonnal tisztított minta (T3) mutatta a legjobb eredményeket.



70. ábra: A fúrókoronáról készült felvételek alapján 1) szürkeárnyalatok átlaga 2) standard deriváltak [40]

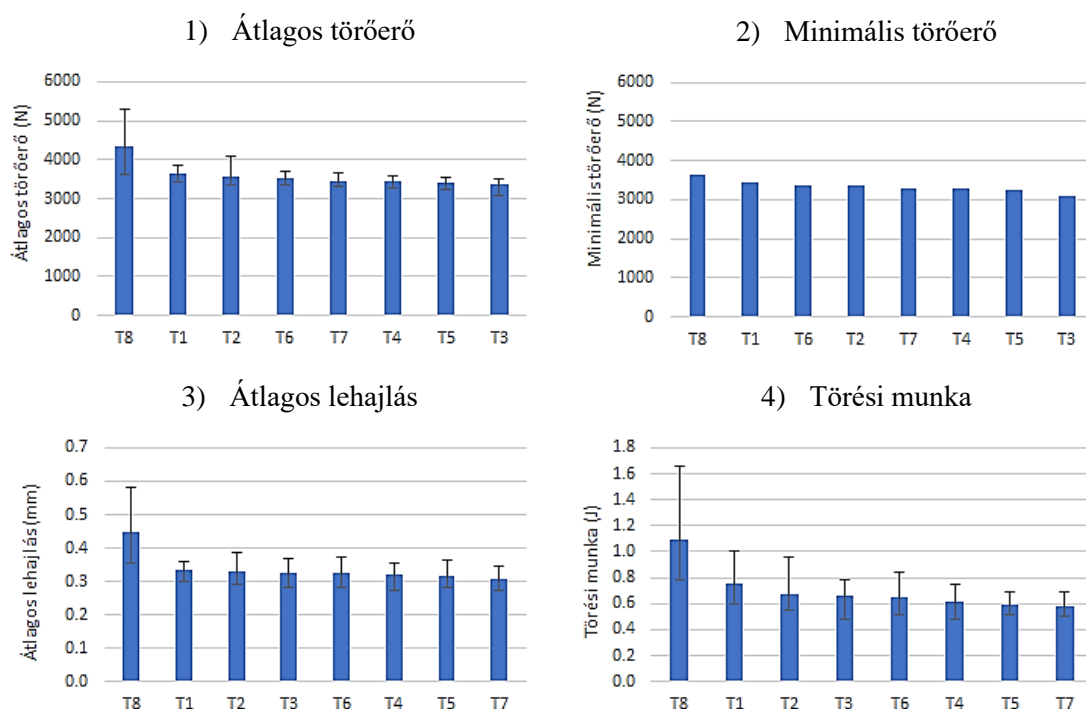
A szegmensek meg lettek számozva a felhegesztési sorrendnek megfelelően, majd a szegmensek letörése is ebben a sorrendben történt, így következtéseket lehet levonni a technológiából, vagy a szegmens pozíciójából eredően. Minden szegmens letörésekor rögzítésre került az erő-elmozdulás diagram (30. ábra), melyből kiolvashatók mind a folyáshatárnál ébredő erők és lehajlások, mind az erő maximális értékei a hozzá tartozó lehajlási értékekkel.

A 71/1. ábrán az átlagos törőerők vannak csökkenő sorrendbe rendezve. Megállapítható, hogy a szárazjeges tisztításnak 19%-kal magasabb a törőereje a tisztítás nélküli mintához képest (T8 a T1-hez képest), míg a többi tisztítási módszernek valamivel kisebb a törőereje a tisztítás nélküli mintához képest (-2 és -7% között). A szárazjeges tisztításnak van a legnagyobb szórása, míg a többi tisztított minta szórása között nincs jelentős különbség. A 71/2. ábra a minimális törőerőt mutatja. Ez egyetlen érték, a legalacsonyabb törőerő tisztítási mintánként (minél magasabb ez az érték, annál nagyobb a varrat szilárdsága). Megállapítható, hogy a szárazjeges tisztításnak van a legmagasabb értéke (T8 minta), de ez nem különbözik jelentősen a többi tisztított mintától.

A 71/3. ábra az átlagos lehajlási értékeket mutatja, azaz a varrat milyen hosszan képes ellenállni a terhelésnek. Megállapítható, hogy a szárazjeges tisztításnak 33%-kal magasabb a lehajlási értéke a tisztítás nélküli mintához képest (T8 a T1-hez képest), míg a többi tisztítási módszernek valamivel kisebb a lehajlási értéke a tisztítás nélküli mintához képest (-1 és -8% között). A szárazjeges tisztításnak van a legnagyobb szórása, míg a többi tisztított minta szórása között nincs jelentős különbség.

A 71/4. ábra a görbe alatti területet mutatja, amely a törési munkát adja meg, ami a varratok ridegségét vagy szívósságát jelzi. Megállapítható, hogy a szárazjeges tisztításnak 46%-kal magasabb a törési munkája a tisztítás nélküli mintához képest (T8 a T1-hez képest), míg a többi tisztítási módszernek valamivel kisebb a törőereje a tisztítás nélküli mintához képest (-11 és -22% között). A szárazjeges tisztításnak van a legnagyobb szórása, míg a többi tisztított minta szórása között nincs jelentős különbség.

A törésteszt összegzéseként a száraz jéggel tisztított minta (T8) mutatta a legmagasabb átlagértéket mindhárom jellemzőre, azaz az átlagos törőerőre, a lehajlásra és a törési munkára. A többi tisztítási módszer nem különbözött jelentősen a tisztítás nélküli (T1) mintától. Azonban a szórás értéke is ennél a mintánál volt a legnagyobb, ami azt jelzi, hogy az eljárás nem volt a legstabilabb.



71. ábra: Tisztítási módszerek hatása [40]

18. táblázat Folyáshatárhoz tartozó erő – tisztítási módszer összefoglaló táblázata

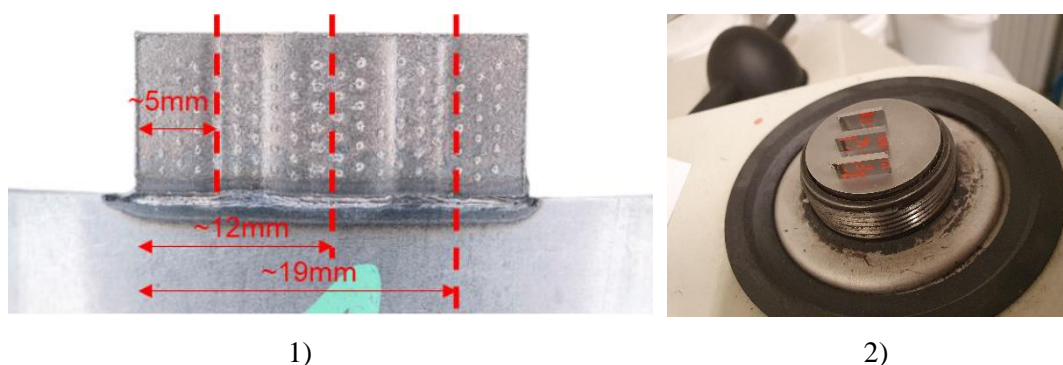
Tisztítási módszer	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Átlagos törőerő (N)	3629	3552	3368	3449	3419	3511	3462	4334
Minimális törőerő (N)	3425	3369	3078	3280	3233	3371	3299	3626
Maximális törőerő (N)	3868	4093	3517	3574	3559	3708	3659	5305
Szórás	163	236	146	97	125	120	115	521
Terjedelem	444	724	439	294	326	337	360	1679

19. táblázat Folyáshatárhoz tartozó lehajlás – tisztítási módszer összefoglaló táblázata

Tisztítási módszer	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Átlagos lehajlás (mm)	0,335	0,331	0,326	0,319	0,316	0,324	0,309	0,446
Minimális lehajlás (mm)	0,301	0,292	0,280	0,272	0,284	0,283	0,272	0,353
Maximális lehajlás (mm)	0,360	0,387	0,368	0,357	0,365	0,371	0,347	0,581
Szórás	0,022	0,032	0,031	0,032	0,032	0,029	0,032	0,082
Terjedelem	0,059	0,094	0,088	0,085	0,081	0,089	0,076	0,228

20. táblázat Folyáshatárhoz tartozó törési munka – tisztítási módszer összefoglaló táblázata

Tisztítási módszer	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Átlagos törési munka (J)	0,75	0,67	0,66	0,62	0,59	0,65	0,58	1,10
Minimális törési munka (J)	0,60	0,55	0,47	0,48	0,51	0,52	0,51	0,79
Maximális törési munka (J)	1,00	0,96	0,79	0,75	0,69	0,84	0,69	1,66
Szórás	0,14	0,13	0,11	0,08	0,08	0,10	0,07	0,29
Terjedelem	0,40	0,41	0,31	0,27	0,17	0,32	0,18	0,87



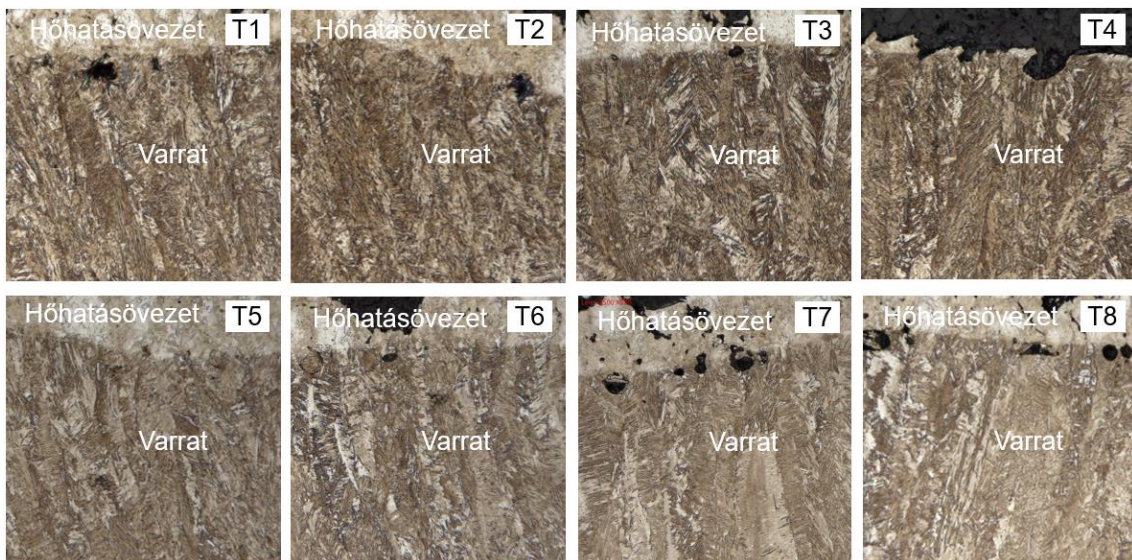
72. ábra: 1) Metszétvágsági pozíciók 2) Melegbeágyazásra előkészített metszetek [24]

A töréstanvizsgálat követően a hasonló törési értékekkel rendelkező mintákat választottam ki és mikroszkóposan elemeztem. Ehhez a szegmensekből metszeteket vágtam ki a 72/1. ábrának megfelelően a varrat elejéből, közepéből és a végéből. Ezt követően a metszeteket melegbeágyaztam (72/2. ábra), majd csiszolás, polírozás és 2 %-os Nital maratás után szövetszerkezeti képeket készítettem a Keyence VHX-7000 digitális mikroszkóppal. A minták vizsgálatakor látható volt, hogy a hegesztett varrat szövetszerkezete egy porkohászati szegmens és acél vegyes kötésének felelt meg, azaz többnyire bénites, helyenként martenzites. A hegesztett varratban nem voltak zárványok vagy egyéb hibák. A 73. ábrán a minták képei láthatóak a hegesztési varrat és a szegmens oldalán lévő hőhatásövezet határán, mivel a felülettisztítási eljárások csak ezt a területet

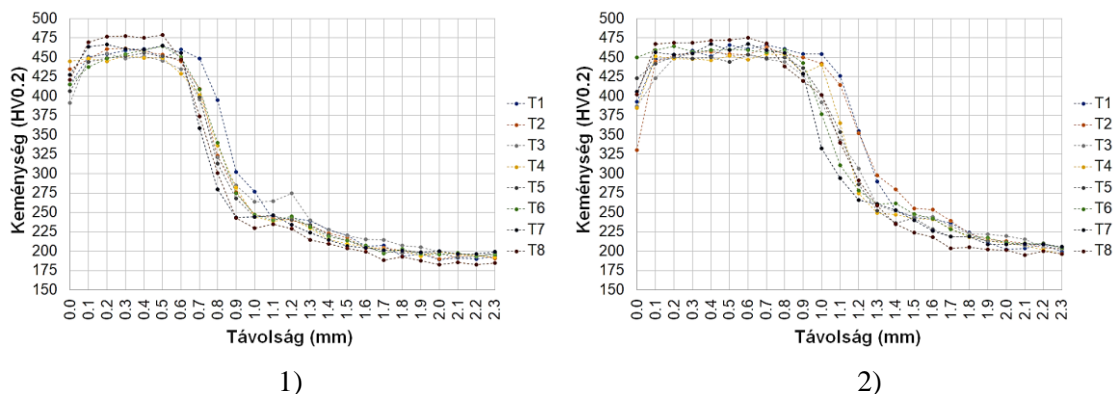
érintették. A T1, T2, T4, T6 és T7 mintákon látható, hogy a zárványok a varrat-szegmens határán helyezkednek el. A T3-as minta esetében megfigyelhető volt, hogy az előző mintákhoz képest lényegesen kevesebb zárvány volt látható ezen a területen. A T5 mintában csak egy zárvány van, azonban ez két-háromszor akkora, mint a többi mintában; a törés nem hatolt be a varratba és ezen a nagyobb póruson kívül nincsenek zárványok. A T8-as mintában a zárványok száma a minta gyökoldalához közeledve növekszik. Összefoglalva a mikroszkópos elemzést megfigyelhető volt:

- a hegesztés során kialakult szövetszerkezetben sem a magban, sem a varrat szélén nem látható megszilárdulási repedés;
- a pórusok száma azt mutatja, hogy a kémiai módszerek, mint az acetonos tisztítás (T3 minta) és a lúgos savas folyadék (T5 minta) pozitív hatással voltak a kezeletlen (T1) mintához képest.

A beágyazott mintákon Struers Duramin-40 típusú automata keménységmérő géppel keménységlefutást mértem, 0,196 N terheléssel (HV0,2), kontúrkövetéssel a felület alatt 0,1 mm-rel, mind a korona oldalon, mind a gyökoldalon (33. ábra), figyelve a szabványban meghatározott minimális lenyomatok közötti távolságra [26]. A keménységet mind a nyolc mintán megmértem mind a korona-, mind a gyökéroltagon, és a 74. ábrán látható diagramon ábrázoltam. A minták keménységeloszlása a nagy energiasűrűségű folyamatok jellemzőjét mutatja, amely szerint a legnagyobb értékek a varratban fordulnak elő.



73. ábra: Mikroszkópi képek tisztítási mintánként [24]



74. ábra: Keménység értékek 1) korona oldalon 2) gyökoldalon [40]

A 74/1. ábra a keménységértékeket mutatja a koronaoldalon és a maximális keménységek között nincs jelentős különbség, maximum 30 HV0,2. A legmagasabb keménységértéket a száraz jéggel tisztított mintán mértem (T8). A 74/2. ábra a gyök felőli keménységértékeket mutatja, a maximális keménységek között nincs jelentős különbség, maximum 29 HV0,2. A legmagasabb keménységértéket szintén a száraz jéggel tisztított mintán mértem (T8). A keménységfutási görbéken észrevehető a varratszélesség különbsége a korona és a gyökoldal között (kb. 0,5 mm a koronaoldalon és 0,8 mm a gyökoldalon).

A lézerhegesztett varrat keménysége a szénttartalomtól függ. Minden csőalkatrész ugyanabból a gyártási tételből származik, így a szénttartalomban nem lehet nagy különbség. Ettől függetlenül a szénttartalmat SPECTROMAXx LMF17 helyhez kötött fémanalizátorral vizsgáltam. Az elemzés csak a harmadik tizedesjegyben talált különbséget, tehát a szénttartalom különbsége nem felelős a varratkeménységben mutatkozó különbségért. A felületi tisztítások hatása is kizárható, mivel azok csak a szegmens és a varrat határán mért keménységértéket befolyásolták volna, de a teljes varratkeménységre nem voltak hatással. A szövetszerkezetben nem találtam különbséget a minták között. Véleményem szerint a keménységi eltérések a keménységvizsgáló gép természetes szórásából adódnak. Az ISO 6507-2 szabvány 5. táblázata [63] szerint a vizsgálógép maximálisan 9%-os eltérést mutathat 400 HV0,2 tartományban, ami akár 36 HV0,2 is lehet. A maximális eltérés 30 HV0,2 volt a varratok között, tehát belefér a maximális eltérési tartományba.

Összefoglalva a keménységmérési vizsgálatot, a szárazjéggel tisztított minta (T8) mutatta a legmagasabb keménységi értéket a varratban, de ez nem különbözik jelentősen a többi mintától.

A „Felülettisztítási módszerek hatásainak vizsgálata” kísérletsorozat eredményei alapján az alábbi megállapításokat tettem:

1. a mikro-CT elemzés révén a felülettisztítási módszerek közül a kémiai módszerek, mint az acetonnal tisztított minta, mutatták a legjobb eredményeket;
2. a törési érték vizsgálatával megállapítottam, hogy a szárazjéggel tisztított minta mutatta a legmagasabb átlagértéket mindhárom jellemző, mint a törőerő, a lehajlás és a törési munka tekintetében. Azonban a száraz jéggel tisztított minta mutatta a legnagyobb szórást a fenti jellemzők esetében, ez nem különbözik jelentősen a többi mintától;
3. a törési érték a fő minősítési érték a tömeggyártásban és ennek a vizsgálatnak az eredményét súlyozni kell;
4. a mikrokeménység vizsgálat esetében a száraz jéggel tisztított minta mutatta a legmagasabb keménységi értéket a varratban, de ez nem különbözik jelentősen a többi mintától;
5. a kísérleti lézeres felülettisztítás során a falvastagságból néhány század milliméter eltávolításra került, ami befolyásolhatja az eredményeket. Ezenkívül a kémiai és mechanikai tisztítási módszerekben használt anyagok minimális mennyisége a felületen maradhat, ami szintén befolyásolhatja a kapott eredményeket, kivéve a szárazjeges tisztításnál, ahol nem marad maradék anyag.

5.4.4 Lézeres felülettisztítási módszerek hatásainak vizsgálata

A felülettisztítási módszerek közül a szárazjeges tisztításnál volt mérhető a legnagyobb törőerő, de a legnagyobb szórás mellett. A többi vizsgált eljárás esetén maradhat a felületen olyan anyag, ami befolyásolhatja az eredményeket, kivéve a lézeres felülettisztítást, aminek a ciklusideje nagyságrendileg megegyezhet a lézersugaras hegesztés ciklusidejével. Ezért áttekintettem a szakirodalmat, hogy milyen lézeres felülettisztítási eljárások alkalmasak a cső felületén lévő szennyeződések eltávolítására. Viszonylag új kutatási terület a femtoszekundumos lézerek alkalmazása ezen a területen, ezért ezt az eljárást választottam a felülettisztítási módszerek kísérletsorozat kiegészítésére és azokkal való összehasonlításra.

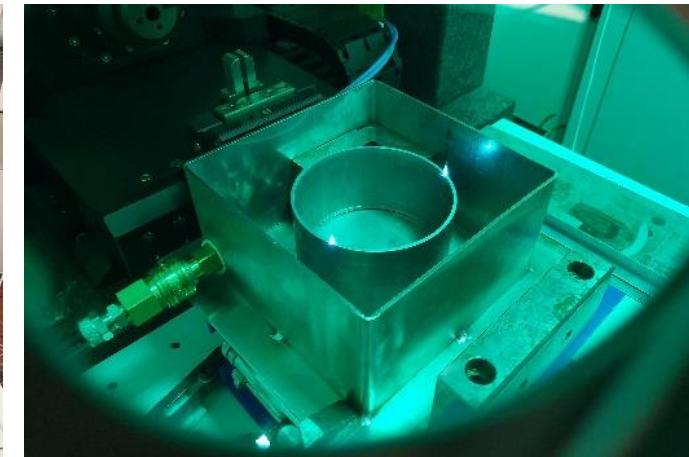
A legtöbb tanulmány a felületek nedvesedési tulajdonságainak megváltoztatására összpontosít [64-67]; az alkalmazástól függően a femtoszekundumos lézeres kezeléssel hidrophil és hidrofób között változó nedvesedési tulajdonságú felületek állíthatók elő [68-70]. Ragasztás vagy festés esetén fontos az adhéziós tulajdonság és fordítva, a korrózióállóság növelésekor fontos a tasztítás; különböző oldószerek keverésekor pedig az egymásban való oldódás befolyásolása. A femtoszekundumos lézeres kezelés a tribológiai tulajdonságok javítására is alkalmazható [71]. Egy másik fontos vizsgálati terület a mikromegmunkálás [72-77], ahol nano és mikroméretű felületi struktúrák hozhatók létre, mivel a femtoszekundumos lézerek rugalmasak és jól szabályozhatók. A létrehozott nano- és mikroméretű struktúrák az alkalmazások széles körében felhasználhatók, mivel a felületi összetétel változása gyakran elhanyagolható [78].

A femtoszekundumos lézer a felületi bevonatok eltávolításának hatékony eszközeként felülettisztításra is alkalmas, oxidok és felületi szennyeződések eltávolítása festményekről, szobrokról és alkatrészekről [79-81]. Alkalmas alumínium-oxid vagy üveg hegesztésére is, ahol akár a felületi oxidréteg megrepesztésére vagy helyi megolvasztására van szükség [82,83]. Különböző kezelési alkalmazásokhoz is alkalmas, pl. acélfelületek edzése vagy csatornák marása különböző anyagfelületekbe [83-85].

A kísérlet során a fúrókorona cső felülettisztítását követően ráhegesztettem a szegmenseket a széria gyártásban használt lézersugaras hegesztőgéppel. A hegesztett varratot ugyanazokkal a vizsgálatokkal ellenőriztem [86], mint a felülettisztítási módszerek esetében, hogy az eredményeket össze tudjam hasonlítani.

A lézeres felülettisztítási kísérletben egy COHERENT Monaco 1035-80-60 típusú lézerforrást használtam (60 W, 1,035 μm hullámhossz, maximális energia 80 μJ (750 kHz-en), maximális impulzusszélesség 350 fs, ismétlési frekvencia 50 MHz-ig, sugárátmérő a kimenetnél $2,7 \pm 0,3$ mm) a cső felületének megtisztítására, a 21. táblázatban található paraméterekkel és az 75. ábrán látható összeállítással. A paramétereket a minimális és maximális ismétlési frekvencián, valamint 750 kHz-en határoztam meg, ahol a lézersugár forrásának a maximális energiája van [87,88].

A cső pásztázását négy irányból végeztem a homogén felület biztosítása érdekében: 1 irány: 0° , 2 irány: 45° , 3 irány: 90° , 4 irány: 135° , közvetlenül egymás után. A cső állt a kezelés során, a lézersugár pedig követte a pásztázási irányokat. A kísérlet során Ar védőgázt használtam. A minták azonosítója a Femto Second Laser (FSL) rövidítéséből származik. A bevitt energiát a (14), (15) és (16) képlettel számoltam, és az 22. táblázatban foglaltam össze.



1)

2)

75. ábra: Femtoszekundumos lézeres kezelés 1) kísérleti összeállítás 2) pillanatkép kezelés közben [24]

21. táblázat Folyamatparaméterek

Minta kódja	Tisztítási módszer	Ismétlési gyakoriság	Pásztázási sebesség (m/s)	Impulzus szélesség (fs)	Lézer teljesítmény (W)	Védőgáz	Védőgáz mennyisége (l/min)	Defókusz (mm)
FSL1	fs	188 kHz	5	277	100 %	Ar	10	0
FSL2	fs	188 kHz	2.5	277	100 %	Ar	10	0
FSL3	fs	750 kHz	5	277	100 %	Ar	10	0
FSL4	fs	750 kHz	2.5	277	100 %	Ar	10	0
FSL5	fs	50 MHz	5	277	100 %	Ar	10	0
FSL6	fs	50 MHz	2.5	277	100 %	Ar	10	0

Energetikai jellemzők kiszámítása a folyamatparaméterek alapján:

$$\text{Csúcsteljesítmény (W)} = \frac{\text{Átlagteljesítmény (W)}}{\text{Ismétlési gyakoriság (Hz)} \times \text{Impulzus szélesség (s)}} \quad (14)$$

$$\text{Impulzusonkénti energia (J)} = \text{Csúcsteljesítmény (W)} \times \text{Impulzus szélesség (s)} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{Csúcsteljesítmény sűrűség} \left(\frac{\text{W}}{\text{mm}^2} \right) &= \\ &= \frac{\text{Átlagteljesítmény (W)}}{\text{Ismétlési gyakoriság (Hz)} \times \text{Impulzus szélesség (s)} \times \text{Lézersugár területe (mm}^2\text{)}} \quad (16) \end{aligned}$$

A femtoszekundumos lézeres kezelés után megmértem a cső homlokfelületének felületi érdességét egy Mitutoyo Surftest SJ-210 hordozható mérőműszerrel, amelynek paraméterei a következők voltak: 10 mm-es mérési tartomány, 0,5 mm/s mérési sebesség, 2,5 mm-es vágási hossz és ISO 4287:1997 szabványt használták a vizsgálathoz [89]. A

felületi érdesség mérése után ugyanazt a felületet megvizsgáltam egy Leica DMC 4500-as kamerával felszerelt Leica M205A sztereomikroszkóppal.

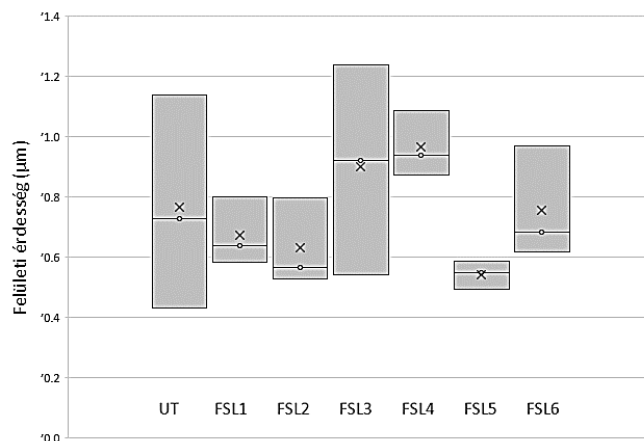
22. táblázat: Energetikai jellemzők összesítése

Jellemző	FSL1 és FSL2	FSL3 és FSL4	FSL5 és FSL6
Ismétlési gyakoriság (Hz)	188×10^3	750×10^3	50×10^6
Csúcsteljesítmény (W)	$1,152 \times 10^9$	$2,888 \times 10^8$	$4,332 \times 10^6$
Impulzusonkénti energia (J)	$4 \times 20 \times 10^{-6}$	$1 \times 80 \times 10^{-6}$	$1 \times 1,2 \times 10^{-6}$
Csúcsteljesítmény sűrűség (W/mm^2)	$4,024 \times 10^8$	$1,009 \times 10^8$	$1,513 \times 10^8$

A felületi érdességet minden egyes minta kezelt felületén három méréssel, egymástól 120° távolságra mértem. Az 76. ábrán a box-plot diagram mutatja az eredményeket. Az FSL1, FSL2, FSL5 és FSL6 minták átlagos felületi érdessége kisebb volt, mint a kezeletlen mintáé (UT), míg az FSL3 és FSL4 mintáké nagyobb volt. Emellett a hat minta közül ötnek kisebb volt a szórása, mint a kezeletlen mintának. Összefoglalva a felületi érdesség mérését, az FSL5 minta a mutatta a legsimább felületet a legkisebb szórás mellett.

A 77. ábrán a kezelt felület mikroszkópos képei láthatók. Enyhe korrózió az UT és az FSL3 minták felületén volt megfigyelhető, amit a felületi érdesség mérésénél figyelembe vettem és elkerültem. A különböző kezelési paraméterek különböző felületi struktúrákat eredményeztek. Azonban minden képen "vízszintes vonalak" láthatók, amelyek lehet, hogy a csőalkatrész sorozatgyártása során keletkezettek, és láthatóak maradtak a kezelés után is.

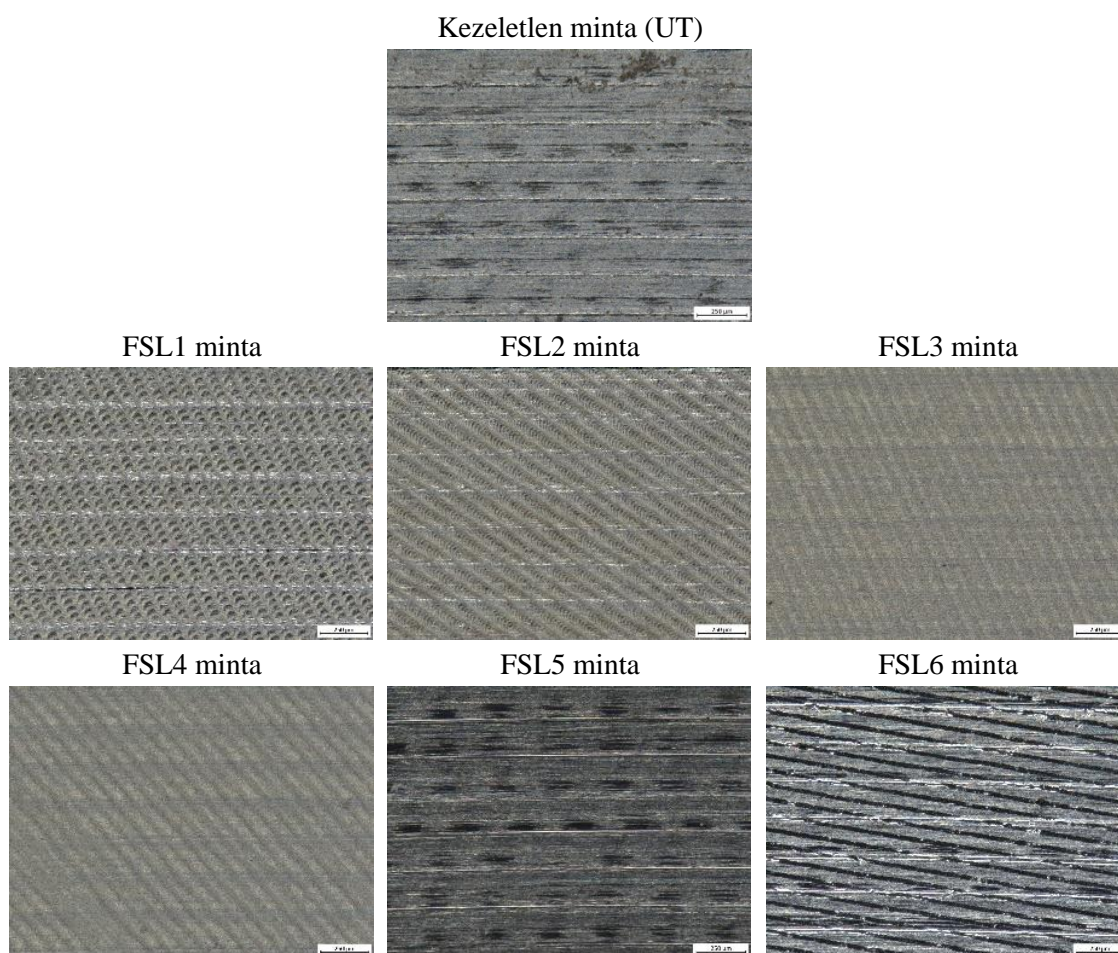
A lézersugaras hegesztést követően a hat különböző paraméterrel tisztított és egy kezeletlen minta hegesztett varratát vizuálisan megvizsgáltam. Nem találtam egyik darabon sem felületi eltérést vagy hibát, amely hátrányosan befolyásolta volna a mechanikai tulajdonságokat.



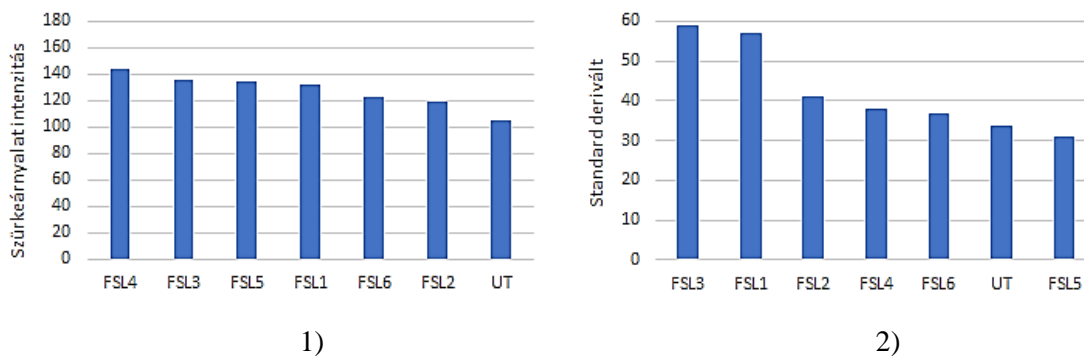
76. ábra: A felületi érdesség értékelési diagramja [40]

A mikro-CT vizsgálatok szürkeárnyalat értékei a 78/1. ábrán láthatóak, ahol az értékek már csökkenő sorrendbe lettek rendezve a legmagasabb értéktől kezdve. A legalacsonyabb érték a kezeletlen minta esetében figyelhető meg (UT), míg az FSL1, FSL3, FSL4, és az FSL5 minták esetében jelentős, átlagban +26%-kal magasabb értéket mutattak. Az FSL2 és az FSL6 minták átlagban +20,4%-kal magasabb értéket mutattak. A standard deriváltak értékei a 78/2. ábrán láthatóak, ahol az értékek már csökkenő sorrendbe lettek rendezve a legmagasabb értéktől kezdve. A legalacsonyabb érték az FSL5 mintánál figyelhető meg (-8,3% a kezeletlen mintához viszonyítva). Az FSL2, FSL4 és FSL6 minták átlagosan +14,2%-kal magasabb értéket mutattak, mint a kezeletlen minta (UT). Az FSL1 és FSL3 minták esetében jelentős, átlagosan +71,3%-kal magasabb értéket mutattak.

Összehasonlítva a legmagasabb szürkeárnyalat értékét a felülettisztítási módszerek szürkeárnyalat értékével, a T3 módszer (acetonos felülettisztítás) +29,6%-kal magasabb volt, mint az FSL4 minta értéke. A standard deriváltak esetében az FSL3 minta értéke +19,1%-kal magasabb volt, mint az T3 minta értéke.



77. ábra: A különböző lézeres besugárzások felületi morfológiája [24]

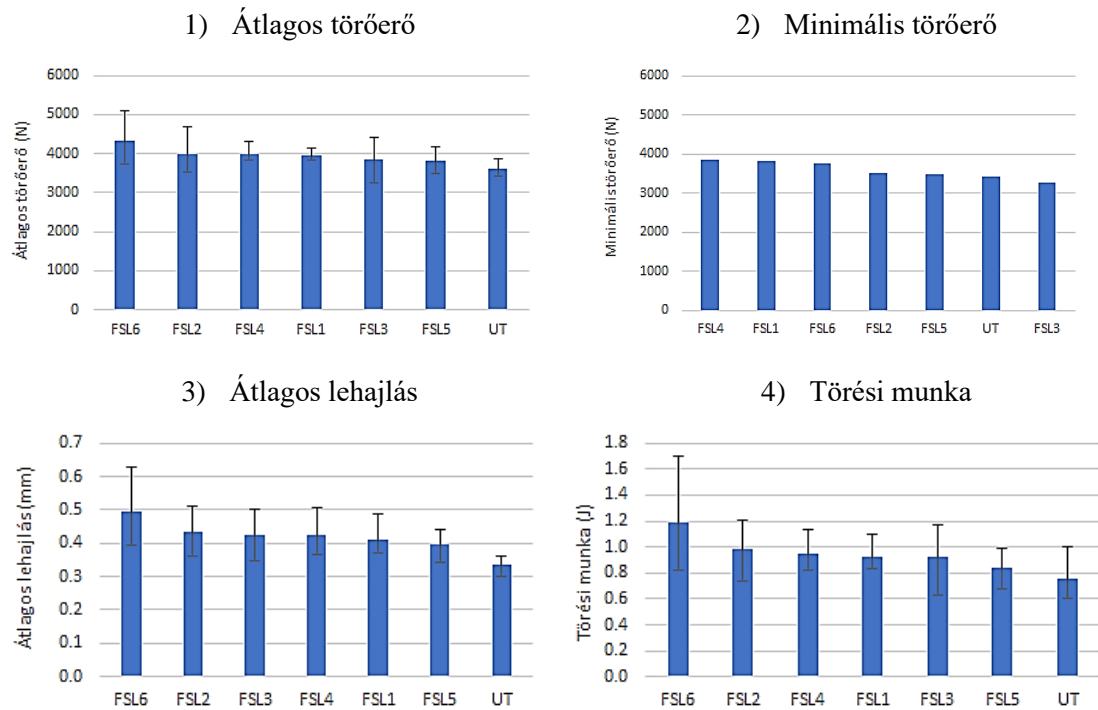


78. ábra: A fúrókoronáról készült felvételek alapján 1) szürkeárnyalatok átlaga 2) standard deriváltak [40]

A törésteszt eredményeit kiértékelve, a 79/1. ábra az átlagos törőerőket mutatja, ahol az FSL6 minta átlagos értéke +19%-kal volt magasabb a kezeletlen mintához viszonyítva, viszont ennek a mintának a legnagyobb a szórása is. A többi kezelt minta és a kezeletlen minta között nincs jelentős különbség, átlagosan +7,5%. A legalacsonyabb szórással az FSL1 minta rendelkezik (23. táblázat első sora). A 79/2. ábra a minimális törőerőt mutatja, az FSL1, FSL4 és FSL6 minták átlagosan +10,5%-kal jobb eredményeket értek el, mint az FSL2 és FSL5 minták (melyek átlagosan +2,5%). Az FSL3 minta -5%-os értéket mutatott a kezeletlen mintához (UT) viszonyítva.

A 79/3. ábra az átlagos lehajlásokat mutatja, az FSL6 minta átlagértéke jelentősen, +49%-kal magasabb, az FSL2, FSL3 és FSL4 minták átlagosan +28,5%-kal, az FSL1 és FSL5 minták pedig átlagosan +20%-kal magasabb átlagértékkel rendelkeznek, mint a kezeletlen minta. Az FSL6 mintának a legnagyobb a szórása is (23. táblázat harmadik sora). A 79/4. ábra mutatja a törési munkát, Az FSL6 minta szignifikánsan, +58%-kal magasabb átlagértékkel rendelkezik, az FSL1, FSL2, FSL3 és FSL4 minták pedig átlagosan +26,5%-kal jobb eredményeket mutatnak, mint az FSL5 minta, de minden kezelt minta jobb értékeket mutatott, mint a kezeletlen minta. Az FSL1 minta rendelkezik a legalacsonyabb szórással, míg az FSL6 minta rendelkezik a legmagasabb szórással (23. táblázat ötödik sora).

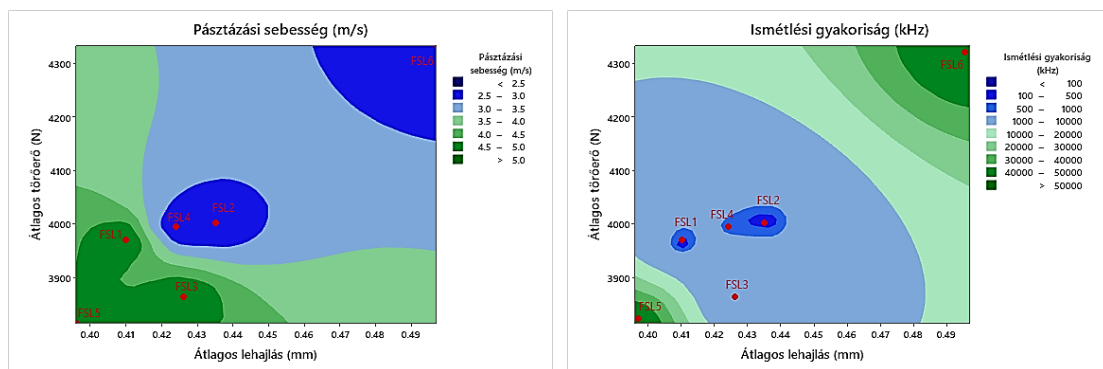
A Minitab szoftver segítségével előállított kontúrdiagramok vizuálisan jelenítik meg a femtoszekundumos lézeres felülettisztítás két paraméterének, a pásztázási sebességnek és az ismétlési gyakoriságnak hatását a törőerőre és a lehajlásra. A 80/1. ábrából kiolvasható, hogy maximum 3,5 m/s pásztázási sebességgel egyszerre érhető el magas törőerő és lehajlás. A 3,5-4,0 m/s esetén vagy magas törőerő vagy magas lehajlás érhető el, 4,0 m/s felett alacsonyabb értékek érhetőek el. A 80/2. ábra alapján a 188 kHz és 750 kHz ismétlési gyakorisággal közepes törőerő és lehajlás értékek érhetőek el (az értékek között nincs szignifikáns különbség). A magasabb törőerő és lehajlás értékek a 10 MHz feletti ismétlési gyakorisággal és alacsony (maximum 3,5 m/s) pásztázási sebességgel érhetőek el.



79. ábra: Tisztítási módszerek hatása [40]

23. táblázat Törésteszt összefoglaló táblázata

Jellemző		UT	FSL1	FSL2	FSL3	FSL4	FSL5	FSL6
Törőerő (N)	Szórás	163	122	394	327	157	231	583
	Terjedelem	444	317	1190	1169	453	668	1349
Lehajlás (mm)	Szórás	0,022	0,040	0,063	0,065	0,050	0,039	0,082
	Terjedelem	0,059	0,119	0,148	0,155	0,141	0,098	0,233
Törési munka (J)	Szórás	0,14	0,09	0,19	0,18	0,12	0,10	0,35
	Terjedelem	0,40	0,26	0,48	0,54	0,31	0,31	0,89

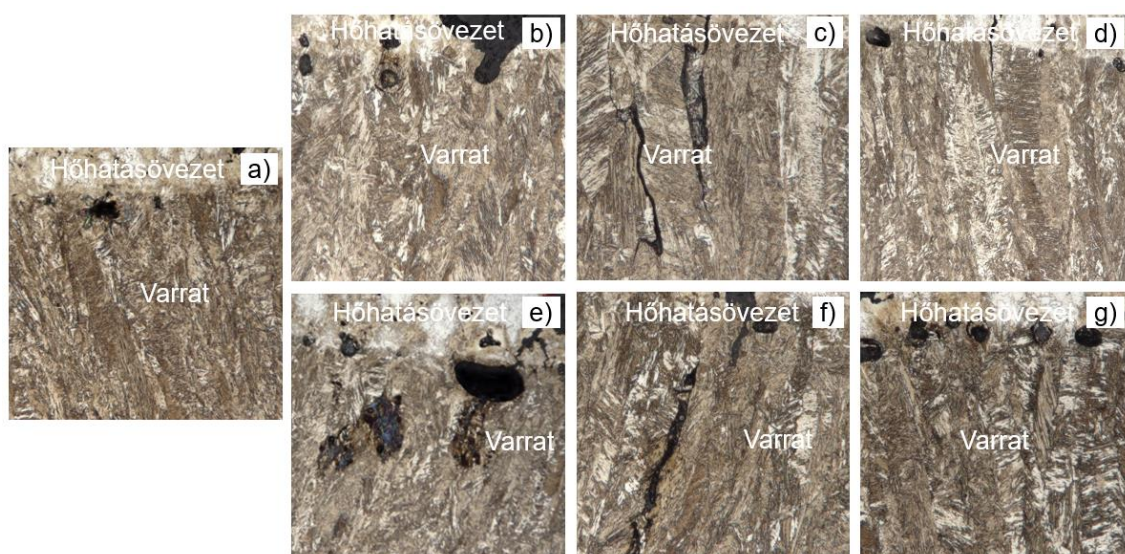


80. ábra: 1) Pásztázási sebesség 2) Ismétlési gyakoriság hatása a törőerőre és a lehajlásra [40]

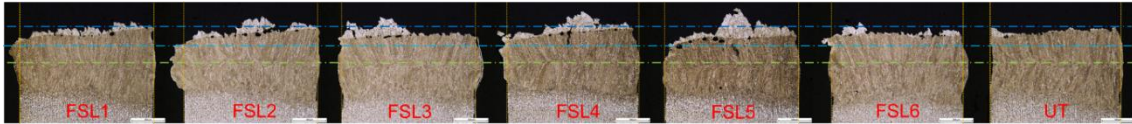
Összefoglalva a törésteztet, az FSL6 minta mutatta a legmagasabb átlagértéket az átlagos törőerőnél, átlagos lehajlásnál és törési munkánál is. Összehasonlítva ezeket az értékeket a felülettisztítási módszerek legmagasabb értékeivel (ahol a T8 minta volt a legjobb, azaz a szárazjeges tisztítás) szinte megegyeznek. Azonban az FSL6 minta eredményeit összehasonlítva a T7 minta eredményeivel (felülettisztítás jelölő lézerrel) már szignifikánsan magasabb értéket mutat az FSL6 minta. A kísérleti eredmények alapján a lézeres felülettisztítás esetében a femtoszekundumos lézer hatékonyabb, mint a jelölő lézer.

A töréstezt után a mintákat egy Leica DMi8 inverz mikroszkóp Leica DMC 4500 színes fényképezőgépével, 5× objektívvel elemeztem, panorámaképet is készítettem, hogy a teljes keresztmetszetet láthassam. A 81. ábra a varrat és a szegmens felőli hőhatásövezet határának képeit mutatja, mivel a felületi kezelések csak ezt a területet érintették. Minden mintán látható, hogy a zárványok a varrat-szegmens határán helyezkednek el. Az FSL2 és FSL5 minták esetében megfigyelhető volt, hogy a varrat-szegmens határának közelében, a varrat közepén egy megszilárdulási repedés látható. Az FSL3 minta esetében a repedés a törésteztből eredhetett, mivel a repedés a varraton kívülről indult.

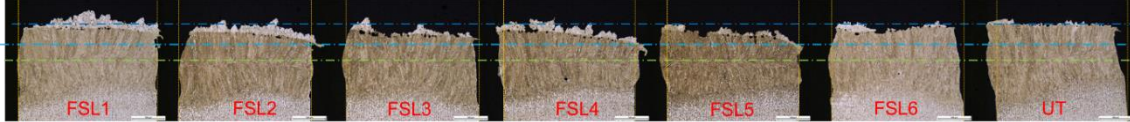
A 82. ábra a varrat elején készült képeket mutatja, a 83. ábra pedig ugyanennek a varratnak a végéről. A képek úgy vannak igazítva, hogy a hegesztés pozíciója ugyanabban a síkban látható, ezt a zöld szaggatott vonal jelzi (alsó vonal a képen). A szegmens oldali hőhatásövezet, amely a világoskék és a sötétkék szaggatott vonalak között található (középső és a felső vonal) a hegesztéstől ugyanolyan távolságra van mind a varrat elején, mind a végén. Az LASX szoftver segítségével megszámoltam a varratban lévő pórusokat. A területet három mintán mértem meg minden egyes mintánál, majd a varratból kitört rész átlagát (azaz, hogy a töret mekkora része volt a varratban a varrat teljes hosszához viszonyítva). Az eredményeket átlagoltam és a 24. táblázatban foglaltam össze. Megállapítható, hogy a felületi kezelések pozitív hatással voltak a varrat szilárdságára, mivel a varratból kitört rész átlaga minden kezelt mintánál kisebb volt, mint a kezeletlen minta esetében (a 24. táblázat harmadik sora). A pórusok átlagos száma kisebb volt az FSL1, FSL3 és FSL5 mintákban, mint a kezeletlen mintában. A pórusok átlagos területe kisebb volt az FSL1, FSL2 és FSL3 mintákban, mint a kezeletlen mintában. Összefoglalva az optikai mikroszkópiát, az FSL1 minta mutatta a legjobb eredményeket mindhárom jellemző esetében.



81. ábra: Mikroszkópi képek tisztítási mintánként a) UT; b) FSL1; c) FSL2; d) FSL3; e) FSL4; f) FSL5; g) FSL6 [24]



82. ábra: Töretképek a varrat elejéről [24]



83. ábra: Töretképek a varrat végéről [24]

A „Lézeres felülettisztítási módszerek hatásainak vizsgálata” kísérletsorozat eredményei alapján az alábbi megállapításokat tettem:

1. a felületi érdesség mérés a hat paraméter közül egyetlen paraméternél (FSL5) mutatott szignifikánsan jobb eredményt, mint a kezeletlen minta (UT);
2. a mikro-CT elemzés révén a hat kezelési paraméter közül négynek (FSL1, FSL3, FSL4 és FSL5) volt szignifikánsan jobb hatása, de az FSL4-nek volt a legmagasabb értéke;
3. a törési érték a fő minősítési érték a tömeggyártásban és ennek a vizsgálatnak az eredményét súlyozni kell;
4. a törési értékek azt mutatják, hogy csak egyetlen kezelési paraméter (FSL6) volt jelentős hatással;
5. a mikroszkópos elemzés egyetlen paraméter (FSL1) esetében mutatott ki szignifikánsan jobb eredményeket, mint a kezeletlen minta esetében.

A négy különböző vizsgálati módszer, mint a felületi érdesség mérés, a mikro-CT elemzés, a törésteszt és az optikai mikroszkópia négy különböző paraméterrel kezelt minták esetében mutatta a legjobb eredményeket: ezek az FSL1, FSL4, FSL5 és FSL6. Mivel a törőerő értékét tekintetem a legfontosabb jellemzőnek, ezért az FSL6 paramétert tekintem a legjobbnak.

24. táblázat Mikroszkópi vizsgálat összefoglaló táblázata

Jellemzők	UT	FSL1	FSL2	FSL3	FSL4	FSL5	FSL6
Pórusok átlagos száma	7,75	6,50	10,25	7,50	10,50	7,00	9,50
Pórusok átlagos területe (mm ²)	9,987 ×10 ⁻³	3,389 ×10 ⁻³	8,736 ×10 ⁻³	8,386 ×10 ⁻³	10,016 ×10 ⁻³	10,084 ×10 ⁻³	10,906 ×10 ⁻³
A varratból kitört rész átlaga * (%)	36	0	6	14	14	8	19

*: a varrat teljes hosszához viszonyítva

5.5 Lézersugarasan hegesztett kötés és hőhatásövezet keménységének előrejelzése

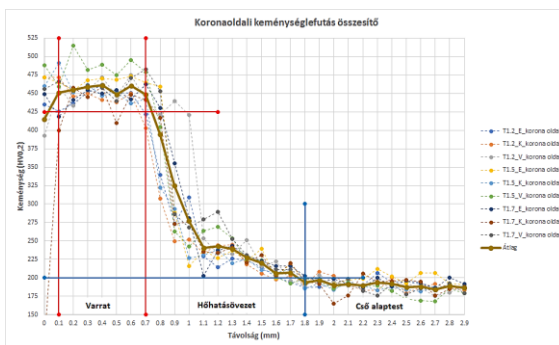
A vizsgálatok során már ábrázoltam a keménység értékeket két különböző időpontban hegesztett széria termék esetében (37. ábra és 74. ábra). Különösebb összehasonlítás nélkül megállapítható, hogy az értékek közel azonosak és a görbék jellege is hasonló. Ebben a fejezetben szeretném részletesen megvizsgálni a keménység lefutásokat és egy keménység előrejelzést adni a varratra és a hőhatásövezetre a kezeletlen minta esetében (mely azonos a széria gyártási paraméterekkel készült mintáival).

5.5.1 Keménység lefutások kiértékelése

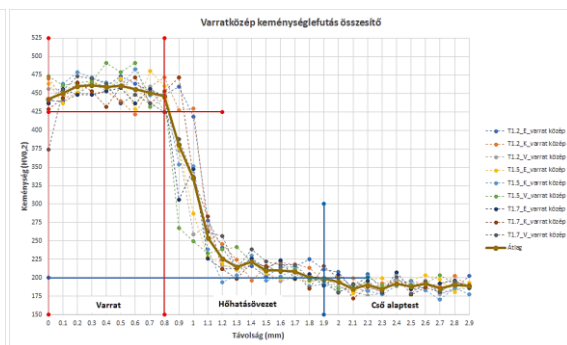
A mérések elvégzéséhez három szegmensből vágtam metszeteket a 72/1. ábrán megadott távolságokban, ezeket a diagramokon a varrat eleje (E), közepe (K), vége (V) betűkkel jelöltem. Mindhárom távolságban mértem keménységet a korona oldalon, a varrat közepén és a gyökoldalon is (84. ábra). A kilenc lefutás mellett ábrázoltam még az átlagértéket is. A varrathoz tartozó keménységszakasz meghatározásához az átlag-görbe 425 HV_{0,2}-nél magasabb keménységértékeit vettem figyelembe, míg a hőhatásövezetbe tartozó keménységszakasz végének meghatározásához az átlag-görbe azon pontját, ahol a 200 HV_{0,2} értéket eléri (ez az érték a cső alapkeménységének értéke). A varrat és a hőhatásövezet jellemzőit a 25. táblázatban összesítettem.

Az ábrákból kiolvasható, hogy a koronaoldaltól a gyökoldal felé szélesedik a varrat (ami abból adódik, hogy a defókusz a felület előtt van 0,25 mm-rel), de ez a szélesség különbség nem látható a hőhatásövezet szélességében. Az átlag keménységek sem mutatnak különbséget a három mérési helyen és a keménységértékek szórása között sincs szignifikáns különbség. A hőhatásövezetben a keménység-gradiens (a keménység csökkenése 250 HV₁₀-re) a korona oldalon 534 HV/mm, a varrat közepén 622 HV/mm, a gyökoldalon 513 HV/mm.

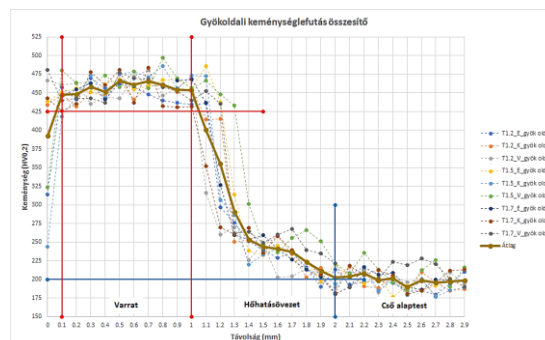
Korona oldal keménység lefutása



Varratközép keménység lefutása



Gyökoldal keménység lefutása



84. ábra: Keménység értékek [40]

25. táblázat: Varrat és hőhatásövezet jellemzőinek összesítése

Jellemző	Korona oldal	Varrat közép	Gyökoldal
Varrat szélessége (mm)	0,6	0,8	0,9
Varrat átlagkeménysége (HV0,2)	454,5	455,4	454,0
Varrat minimális keménysége (HV0,2)	448,2	446,2	447,6
Varrat maximális keménysége (HV0,2)	460,7	461,4	465,9
Varrat keménység szórása	5,38	5,61	6,67
Hőhatásövezet szélessége (mm)	1,1	1,1	1,0

A következő fejezetekben szeretném számításokkal meghatározni ezeket a keménység értékeket, azaz becslést adni a várható varratkeménységre.

5.5.2 Karakterisztikus keménységgörbe meghatározása (exponenciális közelítéssel)

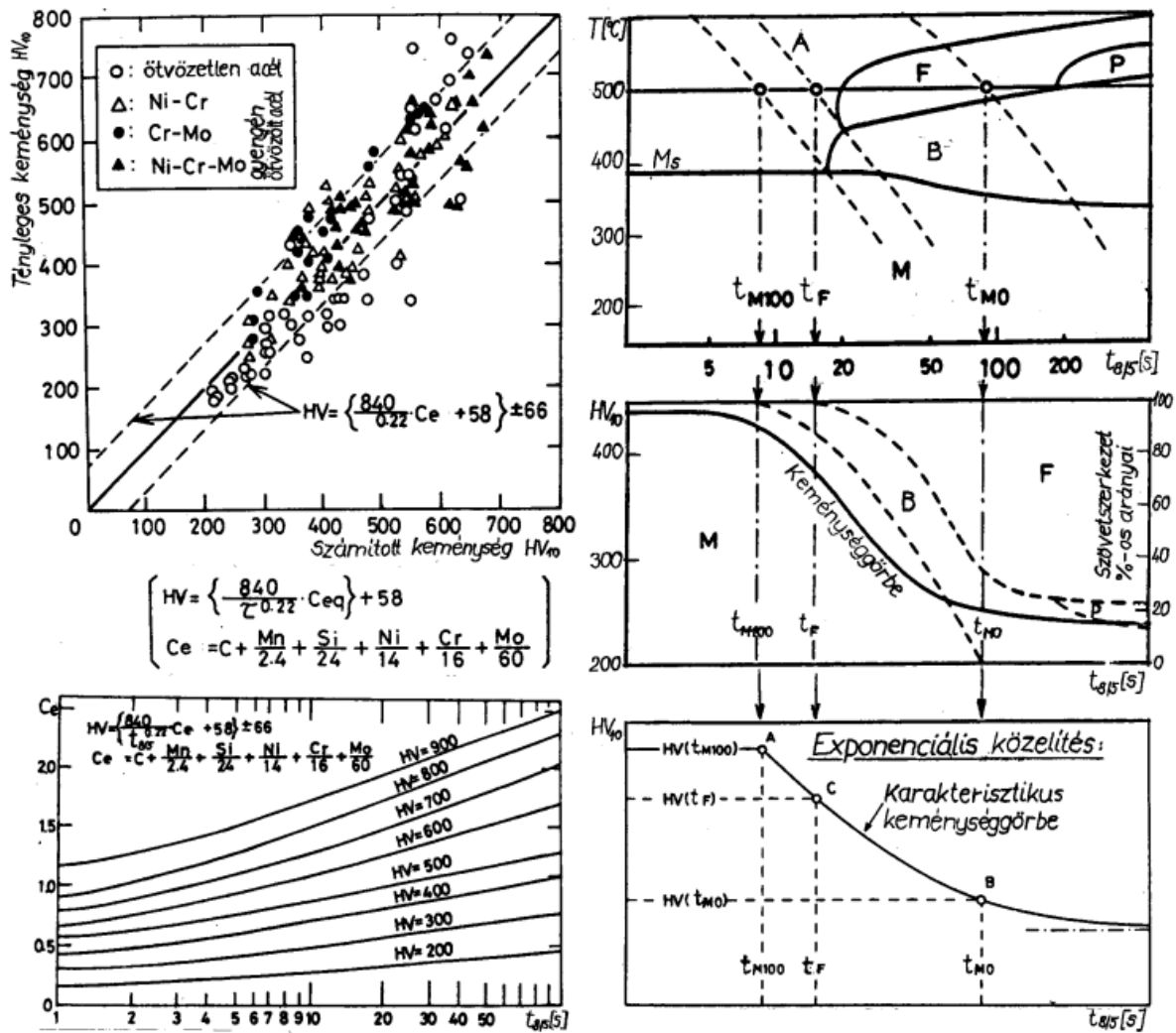
Az acélok hegesztés hőfolyamatában létrejövő gyors dermedés és fázisátalakulások során bekövetkező beedződés (martenzites szövet képződése) jelentősen csökkenti az adott zóna alakváltozó-képességét. Az ugyancsak fellépő helyi belső feszültségcsúcsok folytán megnő a hidegrepedés veszélye. Az alakváltozó-képességet a keménységgel szokás jellemezni, ami szoros összefüggésben van a martenzit-tartalommal, ezt pedig a karbonegyenérték (C + ötvözők) és az adott hőmérséklettartományban létrejövő lehülési sebesség (hülési idő) befolyásolja [90].

A koncepció „Arata-féle elektronsugaras hegeszthetőség”-ként ismeretes, a levezetett általánosított egyenlet már egy hülési függvény és egy ötvözőelem függvény alapján állítható elő [91]. Ennek a koncepciónak más eljárásokra való kiterjesztése is ismeretes, azaz a hegesztett kötés maximális keménysége becsülhető a hegesztésre kidolgozott (folyamatos hülésre vonatkozó) átalakulási diagramokból, illetve meghatározhatók a még teljesen martenzites és a martenzitet már nem tartalmazó szövetszerkezet kialakulását lehetővé tevő lehülési idők is (t_{M100} , t_{M0}).

A lehülési idő és a keménység összefüggését kifejező karakterisztikus keménységgörbe A és B pontjai a már említett 100%, illetve 0% martenzithatárt jelző kritikus értékek, a C pont megadásával pedig a ferrit-kiválás kezdete jelölhető ki. Az A pontból indulva a keménység exponenciálisan csökken, érintve a B (vagy B és C) pontot (85. ábra), a koordinátákat a (17)-(25) egyenletek jelölik ki. Különbséget kell tenni a hagyományos hegeszthető acélok és a nagyszilárdságú hegeszthető acélok között az együtthatókban és a konstansokban. A számításokat az elektronsugaras hegesztésre kidolgozott egyenletekkel végeztem el hagyományos hegeszthető acélokra, de a hőbevitel számításánál a lézersugaras hegesztés paramétereit alkalmaztam. A 26. táblázat, mely az 1. táblázat szűkített változata, azokat a szegmens és a cső kémiai elemeket tartalmazza, amelyek a számítások során előfordulnak.

26. táblázat: a számításokhoz használt kémiai összetételek

Anyagok	C	Si	Mn	P	S	Mo
Service ring	≤ 0,17%	≤ 0,35%	≤ 1,2%	≤ 0,025%	≤ 0,025%	-
Szegmens	≤ 0,2%	-	-	-	-	1,5%



85. ábra: Karakterisztikus keménységgörbe meghatározása I. [90]

A-pont (100% martenzit határt jelző keménység és hűlési idő értékek):

$$HV(t_{M100}) = 835[C] + 287 = 835 \cdot 0,37 + 287 = 596 \text{ HV10} \quad (17)$$

$$lgt_{M100} = 2,55 \left(C + \frac{Mn}{6,3} + \frac{Si}{3,6} \right) - 0,92 = 2,55 \left(0,37 + \frac{1,2}{6,3} + \frac{0,35}{3,6} \right) - 0,92 = \quad (18)$$

$$= 0,757$$

$$t_{M100} = \exp(lgt_{M100}) = 5,72 \text{ s} \quad (19)$$

B-pont (0% martenzit határt jelző keménység és hűlési idő értékek):

$$HV(t_{M0}) = 273 \left(C + \frac{Mn}{13} + \frac{Si}{9,7} \right) + 133 = 273 \left(0,37 + \frac{1,2}{13} + \frac{0,35}{9,7} \right) + 133 =$$

$$= 269,1 HV10 \quad (20)$$

$$lgt_{M0} = -0,37 \left(C - \frac{Mn}{1,1} - \frac{Si}{0,44} \right) + 1,02 = -0,37 \left(0,37 - \frac{1,2}{1,1} - \frac{0,35}{0,44} \right) +$$

$$+1,02 = 1,581 \quad (21)$$

$$t_{M0} = \exp(lgt_{M0}) = 38,11 s \quad (22)$$

C-pont (a ferrit-kiválás kezdetét kijelölő keménység és hűlési idő értékek):

$$HV(t_F) = -277 \left(C - \frac{Mn}{12} - \frac{Si}{2,4} \right) + 339 = -277 \left(0,37 - \frac{1,2}{12} - \frac{0,35}{2,4} \right) +$$

$$+339 = 304,6 HV10 \quad (23)$$

$$lgt_F = 5,77 \left(C + \frac{Mn}{17} + \frac{Si}{14} \right) - 0,88 = 5,77 \left(0,37 + \frac{1,2}{17} + \frac{0,35}{14} \right) - 0,88 =$$

$$= 1,806 \quad (24)$$

$$t_F = \exp(lgt_F) = 64,04 s \quad (25)$$

800°C és 500°C közötti lehűlési idő meghatározása:

$$t_{8/5} = \frac{1}{4\pi\lambda c\rho} * \frac{1}{h_b^2} * \left(\frac{P}{v_r} \right)^2 * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] =$$

$$= \frac{1}{4 * \pi * 0,654 * 0,458 * 7,745} * \frac{1}{0,2^2} * \left(\frac{2800}{560} \right)^2 *$$

$$* \left[\left(\frac{1}{500 - 20} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - 20} \right)^2 \right] = 0,725 s \quad (26)$$

$$t_{8/5} \leq t_{M100} \quad (27)$$

A t_{M100} -nál kisebb hűlési idő 100% martenzitet és ennek megfelelő keménységet eredményez (megegyezik az A-pont keménységével):

$$HV = 835[C] + 287 = 835 * 0,37 + 287 = 596 HV10 \quad (28)$$

Összegzésként elmondható, hogy a (27) alapján a $t_{8/5}$ egy nagyságrenddel kisebb, mint a t_{M100} , ezért a varratban 100% martenzitet feltételez az egyenlet. A jelzett keménység magasabb a (28) alapján, mint a mért keménység a 25. táblázat alapján.

5.5.3 Karakterisztikus keménységgörbe meghatározása (trigonometrikus közelítéssel)

Az előző fejezetben bemutatott exponenciális közelítés mellett létezik egy trigonometrikus megközelítés is [90], ahol a jellemző pontokhoz tartozó keménységek az előzőhöz (17) alakilag hasonló képletekből (29)-(30), de az argumentumok és a hűlési idők attól eltérően határozhatóak meg (35)-(36) [91].

$$HV_M = 884[C] + 294 \quad (29)$$

$$HV_B = 197 * Ce_{II} + 117 \quad (30)$$

Többféle karbon egyenérték képlet használatos az egyes koordináták meghatározásához:

$$Ce_I = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr(1 - 0,16Cr)}{8} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{15} =$$

$$= 0,37 + \frac{1,2}{6} + \frac{0,35}{24} + \frac{1,5}{4} = 0,96 \quad (31)$$

$$Ce_{II} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2,5} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{10} =$$

$$= 0,37 + \frac{1,2}{5} + \frac{0,35}{24} + \frac{1,5}{2,5} = 1,225 \quad (32)$$

$$Ce_{III} = C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{20} =$$

$$= 0,37 + \frac{1,2}{5} + \frac{1,5}{4} = 1,078 \quad (33)$$

800°C és 500°C közötti lehülési idő meghatározása az általános képlettel - (26) szerint-
 $t_{8/5} = 0,725$ s.

800°C és 500°C közötti lehülési idő meghatározása a dimenziótlan Peclet-számmal, mely így minden anyagra alkalmazható:

$$\begin{aligned}
t_{8/5} &= 0,51 \left(1 + \frac{0,1}{Pe^{1,8}} \right) \frac{w^2}{a} = 0,51 \left(1 + \frac{0,1}{\left(\frac{v_h * w}{4 * \frac{\lambda}{c * \rho}} \right)^{1,8}} \right) \frac{w^2}{\frac{\lambda}{c * \rho}} = \\
&= 0,51 \left(1 + \frac{0,1}{\left(\frac{0,05 * 0,002}{4 * \frac{65,389}{458,472 * 7745}} \right)^{1,8}} \right) \frac{0,002^2}{\frac{65,389}{458,472 * 7745}} = 0,117 \text{ s}
\end{aligned} \tag{34}$$

A 100% és 0% martenzit határt jelző hűlési idők:

$$t_M = e^{10,6 * Ce_I - 4,8} = e^{10,6 * 0,96 - 4,8} = 215,2 \text{ s} \tag{35}$$

$$t_B = e^{6,2 * Ce_{III} + 0,74} = e^{6,2 * 1,078 + 0,74} = 1678,5 \text{ s} \tag{36}$$

A (26) és (34) egyenletek alapján is a 800°C és 500°C közötti lehűlési idő kisebb, mint a t_M , ezért a keménység meghatározásához a (29) egyenletet használva:

$$t_{8/5} \leq t_M \tag{37}$$

$$HV_M = 884[C] + 294 = 884 * 0,37 + 294 = 621,1 \text{ HV10} \tag{38}$$

Összességként elmondható, hogy a (34) alapján a $t_{8/5}$ több nagyságrenddel kisebb, mint a t_M , ezért a varratban 100% martenzitet feltételez az egyenlet. A jelzett keménység magasabb a (38) alapján, mint a mért keménység a 25. táblázat alapján.

5.5.4 Hegesztési hőhatásövezet hidegrepedés-érzékenységének előrejelzése

A hegesztés technológiatervezésekor a hegesztendő anyag hegesztési hőfolyamat hatására bekövetkező viselkedését kell elsődlegesen figyelembe venni. Ez alapvetően a hegeszthetőség megítélését jelenti, melynek egyik fontos kritériuma a hidegrepedés-mentesség [92]. Ennek meghatározásához egy számítási modell áll rendelkezésre [93].

A hegesztési hőfolyamat és a fajlagos hőbevitel alapján a 2D/3D hőelvezetés meghatározása:

$$s_h = Y * \left(\frac{q_{eff}}{v}\right)^{0.51057} = 4,5332 * 0,056^{0.51057} = 3,371 \text{ mm} \quad (39)$$

$$h_b = 2 \text{ mm}, \quad < s_h \rightarrow 2D \text{ hőelvezetés} \quad (40)$$

Hőhasznosítási tényező meghatározása:

$$K_2 = 0,35 - (3,7 * 10^{-5} * T_0) = 0,35 - (3,7 * 10^{-5} * 20) = 0,34926 \quad (41)$$

800°C és 500°C közötti lehülési idő meghatározása:

$$t_{8/5}^* = K_2 * 10^7 * \left(\frac{q_{eff}}{v}\right)^2 * \frac{1}{s^2} * \left[\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2}\right] =$$

$$= 0,34926 * 10^7 * 0,056^2 * \frac{1}{4} * \left[\frac{1}{(480)^2} - \frac{1}{(780)^2}\right] = 0,738 \text{ s} \quad (42)$$

Karbonon kívüli ötvözők karbonegyenértéke a $t_{8/5}^* < 1$ együtthatókkal:

$$Ce^* = \frac{1}{37} Si + \frac{1}{26} Mn + \frac{1}{19} Mo = \frac{1}{37} 0,35 + \frac{1}{26} 1,2 + \frac{1}{19} 1,5 = 0,135 \% \quad (43)$$

Martenzit-határ lehülési idő:

$$t_M = 10^{\frac{1217 * C + 605,7 * Ce^* - 239}{1009,5 * C + 52,8}} = 10^{0,647} = 4,862 \text{ s} \quad (44)$$

Bénit-határ lehülési idő:

$$t_B = 10^{\frac{1669 * C + 255,7 * Ce^* - 35}{1009,5 * C + 52,8}} = 10^{1,43} = 27,999 \text{ s} \quad (45)$$

Az anyag martenzites keménysége:

$$HV_M = 802 * C + 305 = 802 * 0,37 + 305 = 601,7 \text{ HV10} \quad (46)$$

Az anyag bénites keménysége:

$$HV_B = 350 * (C + Ce^*) + 101 = 350 * 0,477 + 101 = 277,6 \text{ HV10} \quad (47)$$

Összegzésként elmondható, hogy a (42) alapján a $t_{8/5}$ egy nagyságrenddel kisebb, mint a t_M , ezért a varratban 100% martenzitet feltételez az egyenlet. A jelzett keménység magasabb a (46) alapján, mint a mért keménység a 25. táblázat alapján.

5.5.5 Keménység előrejelző egyenletek módosítása

Az előző alfejezetekben bemutatott megközelítések egyike sem adta vissza a mért keménység értékét. A számításokhoz a szabványban megadott értékekkel számoltam, melyek tág határokat adnak meg a karbon- és ötvöző tartalomra. Ezért spektrométeres vizsgálatot végeztem a csőre és a szegmensre is egy SpectroMAXx elemző géppel és a Spark Analyzer Pro MAXx V.2.00 szoftverrel. Az eredmények a 86. ábrán láthatóak és a számításokhoz használt összetételek a 27. táblázatban vannak összesítve.

1) 2)
86. ábra: 1) Cső 2) Szegmens spektrométeres analízis eredménye [24]

27. táblázat: kémiai összetételek a spektrométeres vizsgálat alapján

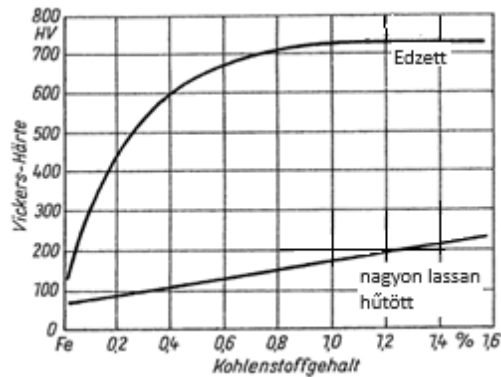
Anyagok	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	V %	Ni %
Service ring	0,0693	0,0136	0,660	0,0265	0,0082	0,0057	0,0384
Szegmens	0,219	0,0457	0,120	0,0683	1,55	0,0032	0,0453

Az exponenciális megközelítés egyenleteit újra számolva a spektrométeres vizsgálat szerinti összetételekkel, a (28) egyenlet értéke HV=527,7 HV10 -re módosult (eredetileg 596 HV10 volt).

A trigonometrikus megközelítés egyenleteit újra számolva a spektrométeres vizsgálat szerinti összetételekkel, a (38) egyenlet értéke HV=548,9 HV10 -re módosult (eredetileg 621,1 HV10 volt).

A hegesztési hőhatásövezet hidegrepedés-érzékenységének előrejelzési egyenleteit újra számolva a spektrométeres vizsgálat szerinti összetételekkel, a (46) egyenlet értéke HV_M=536,2 HV10 -re módosult (eredetileg 601,7 HV10 volt).

Az újraszámolt keménységek megfelelnek a martenzit elméleti maximális keménységének, a 87. ábra alapján [94] a 0,288% karbontartalomnál ~530 HV10 keménység érhető el.



87. ábra: Martenzit keménysége a karbontartalom függvényében. [94]

A három eltérő modell keménység értékének számításai alapján (melyek szinte azonosak), korrekcióra van szükség, hogy a mért keménységhez közelebbi értéket adjanak. A modellek HV10-ben adják meg a keménység értékét, viszont a mérések HV0,2-ben lettek elvégezve, mert a keskeny hőhatásövezetet nem lehetett volna kimérni HV10-ben. Sajnos nem érhető el olyan összehasonlító táblázat, ami két HV érték közötti átváltást adna meg, ezért egy összehasonlító mérést végeztem el, hogy megállapítsam a két különböző terheléssel mért keménységek közötti különbséget.

Keménységmérőgépekhez használt etalonon (553 HV10, azonosítószáma: 0603 20) mértem mindkét terheléssel és az átlagértékek közötti különbség 35,21 HV lett (28. táblázat). Ezzel az értékkel megnövelem a modellek keménységértékeit, hogy HV0,2-ben adják meg az értéket. Ezt követően módosítom az egyenletek együtthatóit, azonban ezek csak a spektrométeres vizsgálat szerinti összetételre érvényesek, eltérő összetétel esetén újabb keménységvizsgálatot kell végezni és a módosított keménység előrejelző egyenletek helyességét igazolni. A keménység egyenletében a karbontartalom a fő együttható, de a szegmensben lévő magas molibdén tartalom miatt a karbon egyenérték számításokat is korrigálni kell. Ezek viszont hatással vannak a hűlésidők számítására is (100% martenzit és 0% martenzit határ).

Azt is szeretném megvizsgálni, hogy a számított $t_{8/5}$ hűlési idő és a mért $t_{8/5}$ hűlési idő között van-e különbség. Ezért a [95] alapján a mérési kísérletet a 88. ábrán látható módon végeztem el. Egy mérés alkalmával három hőelem volt elhelyezve a szegmens hosszirányában a 72/1. ábrán megadott távolságokra, a falvastagság feléig kifűrt furatban (azaz 1 mm mélységben). Három-három mérés lett elvégezve a homlokfelülettől 1,25 mm, 1,50 mm, 1,75 mm, 2,00 és 2,25 mm távolságra. A hőciklusok összesítő diagramja a 89. ábrán látható. A homlokfelülettől való távolságok úgy lettek meghatározva, hogy csak a hőhatásövezetben történjen mérés, mivel a hőelem mérési tartománya nem tette lehetővé a varratban való mérést (mert a hegesztés során a hőelem is beolvadt volna a varratba).

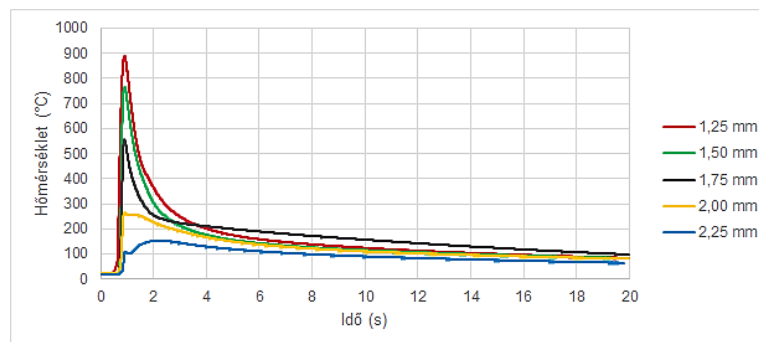
28. táblázat: Különböző terheléssel mért keménységek összehasonlítása HV10 etalonon

Keménység	1	2	3	4	5	Átlag
HV0,2	613,62	588,09	580,77	569,08	595,73	589,46
HV10	552,29	553,90	557,04	554,43	553,58	554,25

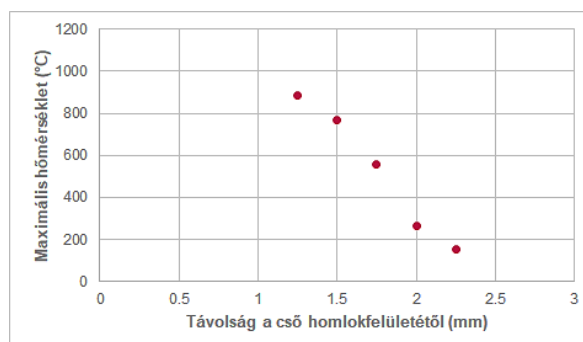
A 90. ábrán a maximális hőmérsékletet lettek ábrázolva a homloklaplattól való távolság függvényében. Az 1,25 mm-es távolság esetében volt nagyobb a hőmérséklet, mint 800 °C, így csak ebből a görbéből tudtam meghatározni a $t_{8/5}$ hűlési idő, ami 0,407 s lett. Ez ugyan kisebb, mint a számított értékek a (26) és (42) alapján. A különbség abból adódhat, hogy kisebb a megömlesztett térfogat, gyorsabb a hevítés és hűlés, mint az elektronsugaras hegesztésnél.



88. ábra: Hűlési idő meghatározási kísérlet [24]



89. ábra: Hőciklus ábrák összesítése a homloklaplattól való távolság függvényében [40]



90. ábra: Maximális hőmérséklet a homloklaplattól való távolság függvényében [40]

A (26) egyenlet szerinti lehűlési időt veszem alapul az exponenciális és a trigonometrikus megközelítésnél ($t_{8/5} = 0,725$ s) és a (42) egyenlet szerinti lehűlési időt veszem alapul a hőhatásövezet hidegrepedés-érzékenysége előrejelzésénél ($t_{8/5} = 0,738$ s).

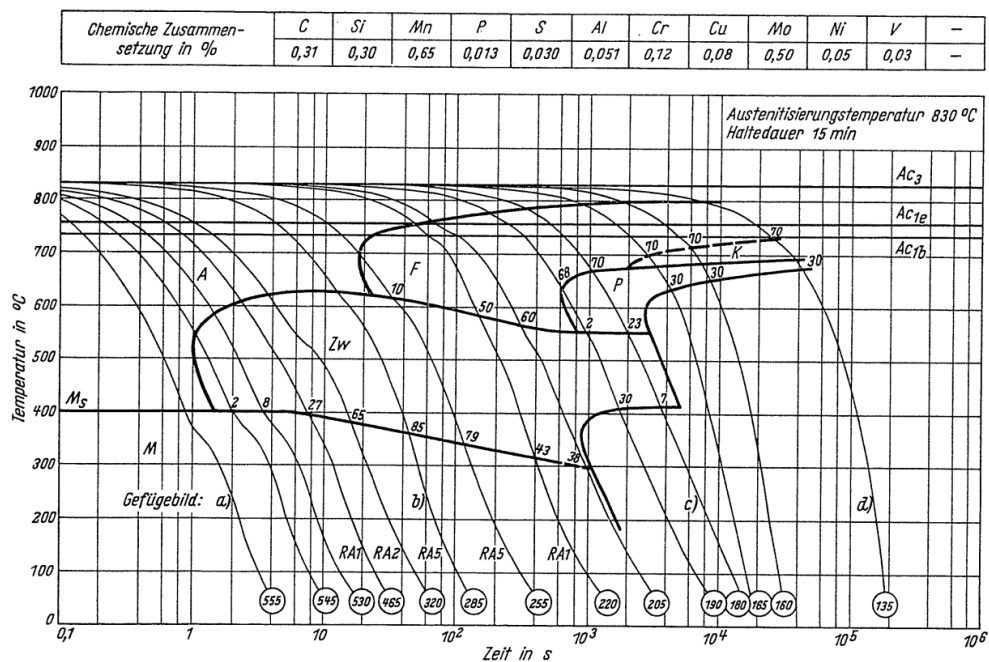
A 73. és 81. ábrák alapján nem 100%-ban martenzites a varrat szövetszerkezete, ezért a t_M és t_B határ lehűlési idők módosítására is szükség van, hogy a keménység egyenletek esetében se a 100% martenzites keménység legyen érvényes a varrat keménységére. A

29. táblázat összesíti azokat a karbon- és ötvözőtartalom tartományokat, ahol érvényesek a közelítő egyenletek. Összehasonlítva az adatokat a 27. táblázattal, a molibdén tartalomban van háromszoros különbség, ezért a hűlési idők és a karbonegyenérték egyenletekben a molibdén összetevőjét háromszorosára növeltem. Nem találtam a spektrométeres vizsgálatnak megfelelő összetételű acélra vonatkozó folyamatos hűtésre érvényes hűlésgörbét, ezért a 29. táblázat tartományai alapján kerestem egy hűlésgörbét a hőkezelési atlaszban [96]. A választásom a „20Mn5 felcementált 0,31% karbontartalomra” görbére esett (91. ábra), de ezt a görbét csak összehasonlításra fogom használni a hűlési idők és a keménységek módosításánál.

29. táblázat: Számítási modellek alkalmazhatósági tartományai

Modell	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	Cu %	Ni %	V %	Nb %	Al %
Exponenciális közelítés	min. 0,10	min. 0,20	min. 0,40	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	-	-	-
	max. 0,55	max. 0,30	max. 0,90	max. 3,00	max. 0,50	max. 0,20	max. 3,50			
Trigonometrikus közelítés	min. 0,10	min. 0,20	min. 0,40	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	-	-	-
	max. 0,55	max. 0,30	max. 0,90	max. 3,00	max. 0,50	max. 0,20	max. 3,50			
Hídegrepedés érzékenységi	min. 0,02	min. 0,00	min. 0,40	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00	min. 0,00
	max. 0,22	max. 0,50	max. 2,10	max. 0,50	max. 0,50	max. 0,60	max. 3,50	max. 0,10	max. 0,06	max. 0,06

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild
(kontinuierlich)



91. ábra: 20Mn5 (felcementált 0,31% karbontartalomra) folyamatos hűtésre érvényes hűlésgörbéje [96]

Az alábbi egyenletek mindegyikénél a 27. táblázat karbon- és ötvözőértékeit alkalmaztam. Az exponenciális közelítés esetében a (18), (19), (21) és (22) egyenletek módosításai:

A-pont (100% martenzit határt jelző hűlési idő értékek):

$$\begin{aligned} lgt_{M100} &= 2,55 \left(C + \frac{Mn}{6,3} + \frac{Si}{3,6} \right) - 1,49 = 2,55 \left(0,29 + \frac{0,78}{6,3} + \frac{0,06}{3,6} \right) - 1,49 = \\ &= -0,397 \end{aligned} \quad (48)$$

$$t_{M100} = \exp(lgt_{M100}) = 0,40 \text{ s} \quad (49)$$

B-pont (0% martenzit határt jelző hűlési idő értékek):

$$\begin{aligned} lgt_{M0} &= -0,37 \left(C - \frac{Mn}{1,1} - \frac{Si}{0,44} \right) + 1,9 = -0,37 \left(0,29 - \frac{0,78}{1,1} - \frac{0,06}{0,44} \right) + \\ &+ 1,9 = 2,105 \end{aligned} \quad (50)$$

$$t_{M0} = \exp(lgt_{M0}) = 127,51 \text{ s} \quad (51)$$

A trigonometrikus közelítés karbonegyénérték egyenletei (31). (32) és (33) és a hűlési idő egyenletek (35) és (36) módosításai:

$$\begin{aligned} Ce_I &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr(1 - 0,16Cr)}{8} + \frac{Mo}{12} + \frac{Cu}{15} = \\ &= 0,29 + \frac{0,78}{6} + \frac{0,06}{24} + \frac{0,08}{12} + \frac{0,02(1 - 0,16 * 0,02)}{8} + \frac{1,55}{12} = 0,569 \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} Ce_{II} &= C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{7,5} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{10} = \\ &= 0,29 + \frac{0,78}{5} + \frac{0,06}{24} + \frac{0,08}{18} + \frac{0,09}{5} + \frac{1,55}{7,5} = 0,680 \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} Ce_{III} &= C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{12} + \frac{Cu}{20} = \\ &= 0,29 + \frac{0,78}{3,6} + \frac{0,08}{9} + \frac{0,09}{5} + \frac{1,55}{12} = 0,663 \end{aligned} \quad (54)$$

A 100% és 0% martenzit határt jelző hűlési idők:

$$t_M = e^{10,6 * Ce_I - 6,96} = e^{10,6 * 0,569 - 6,96} = 0,40 \text{ s} \quad (55)$$

$$t_B = e^{6,2 * Ce_{III} + 0,74} = e^{6,2 * 0,663 + 0,74} = 127,88 \text{ s} \quad (56)$$

A hidegpedés-érzékenységének előrejelzése (43), (44) és (45) egyenletek módosításai:

Karbonon kívüli ötvözők karbonegyenértéke a $t_{8/5}^* < 1$ együtthatókkal:

$$\begin{aligned} Ce^* &= \frac{1}{37}Si + \frac{1}{26}Mn + \frac{1}{54}Ni + \frac{1}{17}Cr + \frac{1}{31}Cu + \frac{1}{54}Mo = \\ &= \frac{1}{37}0,29 + \frac{1}{26}0,78 + \frac{1}{54}0,08 + \frac{1}{17}0,09 + \frac{1}{54}1,55 = 0,067 \% \end{aligned} \quad (57)$$

Martenzit-határ és bénit-határ lehülési idők:

$$t_M = 10^{\frac{611,3 \cdot C + 605,7 \cdot Ce^* - 353}{1009,5 \cdot C + 52,8}} = 10^{\frac{611,3 \cdot 0,29 + 605,7 \cdot 0,067 - 353}{1009,5 \cdot 0,29 + 52,8}} = 0,402 \text{ s} \quad (58)$$

$$t_B = 10^{\frac{1413,3 \cdot C + 5257 \cdot Ce^* - 35}{1009,5 \cdot C + 52,8}} = 10^{\frac{1413,3 \cdot 0,29 + 5257 \cdot 0,067 - 35}{1009,5 \cdot 0,29 + 52,8}} = 127,91 \text{ s} \quad (59)$$

Mindhárom közelítésnél $t_B < t_{8/5} < t_M$, ezért a keménység egyenleteket úgy módosítottam, hogy ez a kritérium teljesüljön. Emellett ez a feltétel megfelel a mikroszkópi vizsgálat eredményeinek (73. és 81. ábrák), azaz a varrat szövetszerkezete nem 100%-ban martenzites.

Az exponenciális közelítés esetében a (28) egyenlet módosítása és a varratkeménység meghatározása (61):

$$HV_{max} = 835[C] + 287 = 835 \cdot 0,29 + 325,5 = 566,2 \text{ HV}0,2 \quad (60)$$

$$HV = \frac{HV t_{M0}}{e^{lg t_{8/5} + lg t_{M100}}} = \frac{190,9}{e^{-0,13991 - 0,39712}} = 460,5 \text{ HV}0,2 \quad (61)$$

A trigonometrikus közelítés esetében a (29) és (30) egyenletek módosításai és a varratkeménység meghatározása (64):

$$HV_M = 884[C] + 311,3 = 884 \cdot 0,29 + 311,3 = 566,2 \text{ HV}0,2 \quad (62)$$

$$HV_B = 197 \cdot Ce_{II} + 57 = 197 \cdot 0,68 + 57 = 190,9 \text{ HV}0,2 \quad (63)$$

$$\begin{aligned} HV_{Zmax} &= \frac{HV_M + HV_B}{2} - \frac{HV_M - HV_B}{2,2} * \arctg \left(4 \frac{lg \frac{t_{8/5}}{t_M}}{lg \frac{t_B}{t_M}} \right) - 0,94 = \\ &= 460,6 \text{ HV}0,2 \end{aligned} \quad (64)$$

A hidegpedés-érzékenységének előrejelzése esetében a (46) és (47) egyenletek módosításai és a varratkeménység meghatározása (67):

$$HV_M = 802 \cdot C + 335 = 802 \cdot 0,29 + 335 = 566,2 \text{ HV}0,2 \quad (65)$$

$$HV_B = 350 * (C + Ce^*) + 66 = 350 * 0,357 + 66 = 190,3 \text{ HV}_{0,2} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} HV_X &= 1184[C(1 - 0,5lgt_{8/5}) + 0,3Ce^*] + 66(1 - 0,8lgt_{8/5}) = \\ &= 1184[0,29(1 - 0,5lgt_{8/5}) + 0,3 * 0,067] + 66(1 - 0,8lgt_{8/5}) = \\ &= 460,6 \text{ HV}_{0,2} \end{aligned} \quad (67)$$

Hegesztés után kialakult struktúra martenzit tartalma:

$$M = \frac{HV_X - HV_B}{HV_M - HV_B} * 100 = \frac{460,6 - 190,3}{566,2 - 190,3} * 100 = 71,89 \% \quad (68)$$

Hegesztés után kialakult struktúra bénit tartalma:

$$B = 100 - M = 100 - 71,89 = 28,11 \% \quad (69)$$

A három eltérő modell keménység értékének számításait korrekcióztam, hogy a mért keménységnek megfelelő értéket adjanak, továbbá a modellek HV_{0,2}-ben adják meg a keménység értékét.

A módosított egyenletek helyességét igazolandó, további cső beszállítási adagokból végeztem spektrométeres vizsgálatot, hogy lássam, milyen tartományban változik a kémiai összetételük. Az eredményeket a 30. táblázatban foglaltam össze, melynek első sorában a korábbi mérési eredményt is feltüntettem összehasonlításként. Csak a cső összetételét vizsgáltam, mivel a szabvány szerint tág határok között változhat az összetétel, míg a szegmens összetételére a gyártástechnológiájából eredően szigorúbb tűrések vonatkoznak.

30. táblázat: További cső beszállítások kémiai összetétele spektrométeres vizsgálattal

Beszállítás	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	V %	Ni %
Adag 1 *	0,0693	0,0136	0,660	0,0265	0,0082	0,0057	0,0384
Adag 2	0,0822	0,0219	0,402	0,0446	0,0096	0,0069	0,0593
Adag 3	0,0782	0,0197	0,524	0,0562	0,0093	0,0065	0,0703

*: 27. táblázat első sorában megadott eredmény

Az exponenciális megközelítés egyenleteit újra számolva az

- „Adag 2” szerinti összetétellel: a (60) egyenlet értéke HV_{max}=577 HV_{0,2}, a (61) egyenlet értéke HV=479,7 HV_{0,2}-re módosult,
- „Adag 3” szerinti összetétellel: a (60) egyenlet értéke HV_{max}=573,7 HV_{0,2}, a (61) egyenlet értéke HV=469,4 HV_{0,2}-re módosult.

A trigonometrikus megközelítés egyenleteit újra számolva az

- „Adag 2” szerinti összetétellel: a (62) egyenlet értéke HV_M=577,6 HV_{0,2}, a (63) egyenlet értéke HV_B=184,4 HV_{0,2} a (64) egyenlet értéke HV_{zmax}=437,6 HV_{0,2}-re módosult,

- „Adag 3” szerinti összetétellel: a (62) egyenlet értéke $HV_M=574$ HV0,2, a (63) egyenlet értéke $HV_B=189$ HV0,2 a (64) egyenlet értéke $HV_{zmax}=457,8$ HV0,2-re módosult.

A hegesztési hőhatásövezet hidegrepedés-érzékenységének előrejelzési egyenleteit újra számolva az

- „Adag 2” szerinti összetétellel: a (65) egyenlet értéke $HV_M=576,6$ HV0,2, a (66) egyenlet értéke $HV_B=192$ HV0,2 a (67) egyenlet értéke $HV_X=474$ HV0,2-re módosult,
- „Adag 3” szerinti összetétellel, a (65) egyenlet értéke $HV_M=573,4$ HV0,2, a (66) egyenlet értéke $HV_B=192,5$ HV0,2 a (67) egyenlet értéke $HV_X=470,9$ HV0,2-re módosult.

A spektrométeres vizsgálat eredményei alapján, mivel nincs szignifikáns különbség az összetételek között, ezért csak a keménység előrejelző egyenleteket számoltam újra, keménységmérést nem végeztem.

A számítások alapján a keménység értékek kb. 20 HV0,2 tartományon belül változnak, ami belül van az automata keménységmérő gép pontosságán [63]. A keménység előrejelző egyenletek korrekciózásait megfelelőnek tartom azzal a megszorítással, hogy csak az acélcső és a porkohászati szegmens vegyes kötésére alkalmazhatóak.

6. TÉZISEK – ÚJ TUJOMÁNYOS EREDMÉNYEK

[T1] Az E235+C acélcső és a porkohászati szegmens vegyes kötésének vizsgálatai esetében az általam kidolgozott törésteszt jelentősen csökkentette a törésértékek szórását a kézi törésteszt eredményeihez képest, ezáltal javult a törésértékek összehasonlíthatósága.

[T2] Az E235+C acélcső és a porkohászati szegmens vegyes kötésének kialakítására elvégzett összehasonlító technológiai kísérletek alapján megállapítottam, hogy a lézersugaras hegesztés a legalkalmasabb a szériagyártásra, tekintettel a lefedhető széles átmérőtartományra és az annak megfelelően változó felhegesztendő szegmens számra.

[T3] Az E235+C acélcső és a porkohászati szegmens lézersugaras hegesztési folyamatparaméter-kísérletei során igazoltam, hogy a varratpozíció változása a 0...0,3 mm tartományban megfelelő törésértéket ad, ennél nagyobb pozícióértéknél a törésérték a rajzi tűrésen kívül esik. Emellett azt is igazoltam, hogy a defókusz a +0,75... -2 mm tartományban nincs hatással a törésértékre.

[T4] A lézersugarasan hegesztett kötések esetében az elvégzett SEM és EDS vizsgálatokkal igazoltam, hogy a cső felületén lévő olaj és zsírmaradványok (szennyeződések) okozzák a varratban keletkező gázzárványokat és a mikrorepedéseket.

[T5] A lézersugarasan hegesztett kötések szövetszerkezeti vizsgálatai alapján megállapítottam, hogy a szegmens-varrat határán lévő gázzárványok száma jelentősen csökkenthető, az ezekből kiinduló mikrorepedések megszüntethetők a felülettisztítás hatására, függetlenül az eljárás jellegétől. Egyes felülettisztítási eljárásokkal a gázzárványok is teljesen megszüntethetők, ezzel hibamentes kötések érhetők el.

[T6] A lézersugarasan hegesztett kötések vizsgálatai során igazoltam, hogy a felülettisztítási eljárások javítják a kötés szilárdságát, de a keménységlefutások értékelése alapján a felülettisztítások nincsenek hatással a varrat keménységére.

[T7] A három eltérő számítási modellen alapuló keménység előrejelző egyenletek elemzése révén az értékek közel azonos eredményt adtak, de nem egyeztek meg a mért keménység értékekkel. Ezért a modellek hűlési idő, karbonegyenérték és keménység számítási egyenleteiben az együtthatókat úgy módosítottam, hogy megegyezzenek a mért hűlési idő és a keménység értékeivel, ezáltal alkalmazhatóak legyenek az E235+C acélcső és a porkohászati szegmens lézersugaras hegesztésekor kialakuló keménység előrejelzésére.

7. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Doktori munkám célkitűzése volt, hogy a kutatási irány összhangban legyen a Hilti Szerszám Kft.-nél folyó kutatási és technológiai projektekkel, ezáltal a tudományos eredményeknek a gyakorlatba való átültetése is biztosított legyen.

Fő célom volt egy tesztelési vagy vizsgálati módszer kifejlesztése, amivel a jelenlegi lézersugarasan hegesztett kötés is jobban megismerhető, a folyamatparaméterek változtatása esetén is kimutathatóak a kötések közötti különbségek. Továbbá felhasználható a kötésminőséget javító beavatkozások és az alternatív kötőtechnológiák összehasonlítására is. Emellett csökkenti a törésértékek szórását a nyomatékkelcsal végzett kézi törésteszthez képest.

Az általam kidolgozott módszer azon alapszik, hogy egy készülékbe helyezett szegmens csőszakasról ellenőrzött körülmények között letörjük a szegmenst. A készülék egy univerzális anyagvizsgáló gépbe helyezhető, a gép mérőcellája méri, miközben a szoftvere rajzolja a töréserő – elmozdulás diagramot a beállított sebesség függvényében. A diagramból kiolvashatóak mind a folyáshatárhoz tartozó, mind a maximális törőerőhöz tartozó erő és lehajlás adatok is.

Az erre a laborkörülmények között végezhető módszerre épülő kompakt méretű automatizált tesztállvány legyártásra került, a szériagyártásba integrálása folyamatban van. A doktori munkám során a laborkörülmények közötti módszert használtam.

A törésteszt mellett mikroszkópi vizsgálatokat is végeztem a varratkép ellenőrzésére. A szériagyártásból kivett darabok esetében zárványok voltak láthatóak, a SEM vizsgálat megállapította, hogy mikrorepedések is kiindulnak ezekből a zárványokból. Az is megállapítható volt, hogy a zárványok a szegmens és a varrat határán helyezkednek el.

A varrathibák ellenére a termék megfelel a rajzi előírásoknak és a minimális törőerőnek, mint minősítő paraméternek. Eldöntendő kérdés lett, hogy a zárványok a technológiából, vagy a komponensekből eredően kerülnek a varratba. Két eltérő, de más gyártók fúrókoronáinál alkalmazott kötőtechnológiát vizsgáltam meg, a kondenzátorkisütéses hegesztést és a láng keményforrasztást. Az előbbi esetében elektróda nyomok voltak láthatóak a szegmens felületén és a kötési zóna nagy deformációt szenvedett a összenyomóerő hatására és a szövetszerkezeti képeken mikrorepedések voltak láthatóak. Emellett felületelőkészítő megmunkálásra volt szükség a hegesztés előtt és az elektródák kopása is a gyártási költség növekedését irányozta elő.

A láng keményforrasztott minták esetében csak a forraszanyagban voltak apróbb zárványnak tűnő képi elemek és a törésérték is a minimum érték felett volt, de a kézi eljárás nem felelt meg a szériagyártás követelményeinek.

A két eltérő kötőeljárással készült minták vizsgálatai alapján a jelenleg alkalmazott lézersugaras hegesztés maradt a további vizsgálataim középpontjában, mint rugalmasan változtatható paraméterű és gyors ciklusidejű kötőeljárás.

A lézersugaras hegesztés folyamatparamétereinek - mint lézerteljesítmény, hegesztési sebesség, defókusz és varratpozíció – önálló és több paraméter egymásra gyakorolt hatásait megvizsgálva azt állapítottam meg, hogy a varratpozíciónak van szignifikáns hatása a törőerőre (kismértékű változás is elrontja a termék minőségét). A varrathibák továbbra is láthatóak voltak a mikroszkópi képeken.

Megvizsgáltam más lézerforrás (CO₂) hatását a varratra, de nem volt szignifikáns különbség a diszklézerforráshoz képest és a varrathibák továbbra is láthatóak voltak a mikroszkópi képeken.

A fűrókorona komponenseinek hegesztés előtti vizsgálatai megállapították, hogy zsír és olajmaradványok (szennyeződések) vannak a felületen, amelyek a megmunkálások során kerülnek oda és ezek okozhatnak gázzárványokat a hegesztéskor fellépő magas hő hatására. Ezért megvizsgáltam olyan mechanikai, kémiai és elektromechanikai (azaz lézeres) felülettisztítási eljárásokat, amelyek képesek eltávolítani a szennyeződések a felületről. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy mindegyik eljárás pozitív hatással volt a kötés tisztaságára, megszűntek a mikrorepedések és a gázzárványok. A kötés mechanikai tulajdonságai is javultak, nőtt a törőerő értéke. Mindezek az eredmények lehetővé teszik a fűrókorona varratminőségének javítását és a varrat mechanikai szilárdságának növelését.

A szövetszerkezeti vizsgálatok mellett keménységmérést is végeztem, mely alapján megállapítható a lézersugaras hegesztésekre jellemző kép, azaz a maximális keménység a varratban mérhető. A kialakuló varratkeménység előrejelzésére ismertek különböző megközelítések, ezek közül három közelítés számításait végeztem el, hogy milyen pontossággal közelítik a mért értékeket. Mindhárom közelítés szinte azonos eredményt adott, azonban ezek távol estek a mért értéktől. A számításokat a szabványban megadott ötvözetartományra számoltam ki, de ezek tág határok között változhatnak. Ezért spektrométeres vizsgálattal meghatároztam az aktuális kémiai összetételt és újra számoltam az egyenleteket. Az eredmények még mindig magasabbak voltak, mint a mért érték. Ezért a modellek hűlési idő, karbonegyenérték és keménység számítási egyenleteiben az együtthatókat úgy módosítottam, hogy megegyezzenek a mért hűlési idő és a keménység értékeivel. Több cső beszállításból is mértem kémiai összetételt, ezek között nem volt szignifikáns különbség. Az egyenletekbe behelyettesítve a mért értékeket maximálisan 20 HV0,2 eltérés adódott, ezért a módosításokat megfelelőnek tartom a megszorítással, hogy csak az acélső és a porkohászati szegmens vegyes kötésére alkalmazhatóak.

Az elért eredmények alapján fontosnak tartom a kutatás folytatását, hogy mely felülettisztítási eljárás integrálható a szériagyártásba a lézersugaras hegesztés rövid ciklusideje mellé.

8. SUMMARY OF RESULTS

The objective of my doctoral thesis was to ensure that the research direction is in line with the research and technology projects at Hilti Szerszám Kft., thus ensuring the transfer of scientific results into practice.

My main goal was to develop a testing or inspection method to better understand the current laser welded joints, to detect differences between joints even when process parameters are changed. Furthermore, it can also be used to compare interventions to improve joint quality and alternative jointing technologies. It also reduces the variance of fracture values compared to manual fracture testing with a torque wrench.

The method I have developed is based on breaking off a segment from a segmented section of the tube under controlled conditions using a specialist device. The device can be placed in an universal material testing machine, the measuring cell of the machine measures while the software draws the breaking force - displacement diagram as a function of the set speed. The diagram shows both the force and deflection data for the yield strength and the maximum breaking force.

The aforementioned specialist automated test device has been built, which was developed to be used under laboratory conditions. The integration of said device to the production process is currently in development. Therefore, the results achieved under laboratory conditions have been utilised in this thesis.

In addition to the fracture test, I also performed microscopic examinations to check the weld pattern. The samples taken out of serial production showed inclusions in the weld seam. The scanning electron microscope (SEM) examination revealed that microcracks also appeared as a result of these inclusions. Furthermore, it was determined that the inclusions were located at the boundary of the segment and the seam.

Despite the seam defects, the product meets the drawing specifications and the minimum breaking force as a qualifying parameter. The question of whether the inclusions in the weld seam are resulted by the technology or the components has become a crucial issue. Two different joining technologies used on drill bits by other manufacturers were investigated, condenser brazing and flame brazing. In the former case, electrode marks were visible on the segment surface and the bonding zone suffered large deformation due to the compressive force, microcracks were also visible in the fabric structure images. In addition, surface preparation machining was required prior to welding and the electrode wear was also expected to increase the manufacturing cost.

In the case of the flame brazed samples, only the solder material had what appeared to be small inclusions and the fracture value was above the minimum, but the manual process did not meet the requirements for mass production.

Based on the tests of the samples made with the two different bonding procedures, the currently used laser beam welding remained the focus of my ongoing investigations as it is a flexible variable parameter and fast cycle time bonding procedure.

Examining the effects of laser beam welding process parameters such as laser power, welding speed, defocus and weld position individually and in combination, I found that the weld position has a significant effect on the breaking force (even a small change will degrade the quality of the product). Weld defects were still visible on the microscopic images.

I examined the effect of other laser sources (CO₂) on the weld, but there was no significant difference compared to the disk laser source and weld defects were still visible in the microscopic images.

Pre-weld tests of the drill bit components have revealed that there are greas and oil spots on the surface that are introduced during machining and these can cause porosity due to the high heat generated during welding. Therefore, I have investigated mechanical, chemical and electromechanical (i.e. laser) surface cleaning processes to determine whether any of these methods can effectively remove contaminants from the surface. The results showed that each of these processes had a positive effect on the cleanliness of the bond, eliminating micro-cracks and porosity. The mechanical properties of the bonding were also improved, with an increase in the breaking strength. All these results allow to improve the weld quality of the drill bit and to increase the mechanical strength of the weld.

In addition to the fabric structure tests, I also measured the hardness, which gives a picture typical of laser beam welds, i.e. the maximum hardness can be measured in the weld. Different approaches are known for predicting the resulting weld hardness, and three of these approximations were calculated to see how accurately they approximate the measured values. All three approximations gave almost identical results, but they were far from the measured value. The calculations were made for the range of alloying values given in the standard, but these can vary within a wide range. I therefore determined the actual chemical composition was determined by spectrometric analysis and the equations have been recalculated. The results were still higher than the measured value. Therefore, I modified the coefficients in the calculation equations for cooling time, carbon equivalent and hardness of the models to match the measured cooling time and hardness. I measured chemical compositions from several tube supplies, and there was no significant difference between them. Substituting the measured values into the equations resulted in a maximum difference of 20 HV0.2, so I consider the modifications appropriate with the restriction that they are only applicable to the mixed bonding of steel tube and powder metallurgical segment.

Based on the results obtained, I consider it important to continue the research on which surface cleaning process can be integrated into series production in addition to the short cycle time of laser beam welding.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik segítségemre voltak kutatómunkám során, valamint doktori disszertációm elkészítésében.

Köszönettel tartozom Takács Gyulának, aki elindított tudományos pályámon és mindvégig mellettem állt.

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Bagyinszki Gyulának az elmúlt hét és fél évben nyújtott támogatását és útmutatását.

Köszönöm Kovács Tünde tanszékvezetőnek és a tanszék összes munkatársának a támogatásukat.

Szeretném továbbá megköszönni mindazoknak, akik segítették munkám előrehaladását: a kísérleti minták gyártása során a termelésirányító kollégáim rugalmasságát, a vizsgálatok során a laborban dolgozó kollégáim erőfeszítéseit.

Köszönöm a partner kapcsolatban álló Egyetemek és Kutatóintézetek szakmai segítségét.

Szeretném megköszönni Feleségemnek és Fiamnak, hogy megteremtették a nyugodt családi háttérrel és mindvégig mellettem álltak és támogattak. Köszönöm szüleimnek és egész családomnak, hogy mindig hittek bennem és támogattak.

Köszönettel tartozom Borsa Juditnak a doktori tanulmányaim adminisztratív irányításában nyújtott segítségéért.

Köszönöm Réger Mihálynak, a doktori iskola vezetőjének és a doktori iskola többi tagjának a szakmai segítséget.

IRODALOMJEGYZÉK

- 1 Hilti fúrókorona portfólió áttekintő,
https://www.hilti.com/c/CLS_POWER_TOOL_INSERT_7126/CLS_DIAMOND_CORE_BIT_7126, 2024
- 2 EN 10305-1: Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions. Part 1: Seamless cold drawn tubes, 2002. november.
- 3 Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő, Hegesztéstechnika I., Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2010, ISSN 2068 – 3081
- 4 Handbook of laser welding technologies, Woodhead Publishing Limited, 2013, ISBN 978-0-85709-877-1
- 5 Buza Gábor: Lézersugaras technológiák I., 2012, 2010-0017_50
- 6 Laser Welding: A Practical Guide (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies) 1st Edition, 1992, ISBN-13 978-1855730342
- 7 Halász Gábor: Ipari gázok a lézertechnikában, Edutus Főiskola, 2012,
http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_22_ipari_gazok/adatok.html
- 8 B. D. Orlov: Ellenálláshegesztés, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1980, ISBN 2399971768780
- 9 Bagyinszki Gyula: Hegesztéstechnológiák II. (BAXHT22MLE) előadás anyaga Power Point prezentáció
- 10 Beckert – Neumann: A hegesztés alapismeretei, Különleges hegesztési eljárások. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1973, ISBN 2399956108587
- 11 Welding processes handbook, Woodhead Publishing Ltd, 2003, ISBN 1 85573 689 6
- 12 Welding Handbook, Eighth Edition, Volume 2: Welding processes, Editor: R. L. O'Brien, 1997, ISBN 10: 0871713543
- 13 A.Sz. Gelman: Sajtolóhegesztés, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1973, ISBN 2399966941426
- 14 Szerkesztette: Gáti József, Hegesztési zsebkönyv. COKOM Mérnökiroda Kft, Miskolc, 2003, ISBN 978 963 04 8287 5
- 15 Dr. Orbulov Imre Norbert, Hegesztés és rokon technológiák Sajtoló hegesztési eljárások hőbevitel nélkül,
https://att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBGF1/eloadasok/11_Hegeszt%C3%A9s_3.pdf
- 16 V.I.Vill: Dörzshegesztés, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1973, ISBN 2399966941372
- 17 Dörzshegesztés folyamata,
https://th.bing.com/th/id/OIP.VBlZs_nU9m6yOSItAwHiwHaEH?rs=1&pid=ImgDetMain
- 18 Dr. Palotás Béla (2013) Hegesztés technológia 2., Digitális tankönyvtár, 2010-0013
- 19 Dörzshegesztés munkarendje,
https://att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBGF1/eloadasok/10_Hegeszt%C3%A9s_2.pdf
- 20 Egyetemi tananyag: Anyagtechnológiák (BME, ÓE, SZIE) 2012, ISBN: 978-963-279-531-7
- 21 Mitutoyo Crysta-Plus M 574m 3D koordináta mérőgép,
https://www.mitutoyo.com/Images/002/291/1957_CrystaPlusM.pdf
- 22 Jenoptik-Hommel Opticline C608 mérőállomás, Opticline-c-technische-daten-2023-07-de%20(3).pdf
- 23 Saját rajz
- 24 Saját kép
- 25 EN ISO 4498:2010: Sintered metal materials, excluding hardmetals, Determination of apparent hardness and microhardness
- 26 ISO 6507–1:2018: Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method

- 27 EN 13236_2019: Safety requirements for superabrasive products
- 28 C. Köse, C. Topal, Effect of heat input and post-weld heat treatment on surface, texture, microstructure, and mechanical properties of dissimilar laser beam welded AISI 2507 super duplex to AISI 904L super austenitic stainless steels. *Journal of Manufacturing Processes* 2022, Volume 73, pp. 861-894, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.040>
- 29 Stock, M.; Pasler, M.; Birkfellner, W.; Homolka, P.; Poetter, R.; Georg, D. Image quality and stability of image-guided radiotherapy (IGRT) devices. *Radiother. Oncol.* 2009, 93, 1–7
- 30 https://www.bahco.com/gb_en/3-8--digital-torque-wrench-with-interchangeable-head-13-5-n-m-135-n-m-izo-d-135.html
- 31 Bemetszett próbatest az Izod-vizsgálathoz, <https://jobso.co.za/izod-test-example-and-specimen/>
- 32 Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.: Gyémánt fűrészegmensek lézeres hegesztésének vizsgálata, *Acta Materialia Transylvanica* (HU): 1 (2) pp 85-88 (2018), ISSN 2601-1883, ISSN 2668-1366
- 33 A. Zs. Kenez, Gy. Bagyinszki: Applicability Investigation of Joining Technologies for Diamond Core Bits, *Műszaki Tudományos Közlemények* (EN): 10 (1) pp 31-40 (2019), ISSN 2601-5773
- 34 Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.: Gyémántszegegmenses fűrészegmensek rögzítéstechnológiáinak vizsgálata, 29. Nemzetközi Hegesztési Konferencia: pp 199-209 (2018), ISBN 9789633581605
- 35 A. Zs. Kenez, Gy. Bagyinszki: Pressure Welding Processes of Tubular Parts and Pipe Segments, *Műszaki Tudományos Közlemények* (EN): 11 (1) pp 109-112 (2019), ISSN 2601-5773
- 36 Nagyfrekvenciás, indukciós hegesztés, <https://www.induction-meltingfurnace.com/photo/pl34438601-hf-induction-welding-equipment-for-soldering-and-heating-metal.jpg>
- 37 Ultrahangos hegesztés, <https://www.acb-ps.com/sites/default/files/linear.jpg>
- 38 A. Zs. Kenez, Gy. Bagyinszki: Inspection of The Effect of Process Parameters on The Break Out Values of Laser Welded Drill Bits, *Acta Materialia Transylvanica* (EN): 3 (2) pp 76-80 (2020), ISSN 2601-8799
- 39 Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.: Hegesztési paraméterek hatásának vizsgálata a lézerhegesztett gyémántszegegmenses fúrókoronák törésértékeinek viselkedésére, *Bánki Közlemények*: 2 (2) pp 10-15 (2019), ISSN 2560-2810
- 40 Saját diagram
- 41 Dr.Bognár László: Kísérletek tervezése és elemzése, 2014, drbognar@gmail.com
- 42 C.-K Fang, T.H Chuang: Surface morphologies and erosion rates of metallic building materials after sandblasting (1999), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00097-6)
- 43 G. Rotella, M. Alfano, T. Schiefer, I. Jansen, Evaluation of mechanical and laser surface pre-treatments on the strength of adhesive bonded steel joints for the automotive industry (2016), DOI: <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1123559>
- 44 Echt A, Dunn KH, Mickelsen RL.: Automated abrasive blasting equipment for use on steel structures (2000), DOI: <https://doi.org/10.1080/10473220050129310>
- 45 Surface Treatment in Bonding Technology (2019), DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817010-6.00005-9>
- 46 A. Rudawska, I. Danczak, M. Müller, P. Valasek, The effect of sandblasting on surface properties for adhesion (2016), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010>
- 47 G. Spur, E. Uhlmann, F. Elbing: Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application (1999), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00204-5)
- 48 B. Axmann, F. Elbing: Strahlverfahren (1997) *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF* 92 (3), pp. 76-77

- 49 R. Steiner, Carbon dioxide's expanding role (1993), Chem. Eng., 100 (3), pp. 114-119
- 50 T. Donnelly, Dry ice blasting: a new technology for corebox cleaning (1991), Modern Casting, 81 (6), pp. 30-31
- 51 H.J. Yoo, S. Baek, J.H. Kim, J. Choi: Effect of laser surface cleaning of corroded 304L stainless steel on microstructure and mechanical properties (2022), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.147>
- 52 Kambham K, Sangameswaran S, Datar S, Kura B.: Copper slag: optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting (2007), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.024>
- 53 P. Gaspara, C. Hubbard, D. McPhail, A. Cummings: A topographical assessment and comparison of conservation cleaning treatments (2003), DOI: [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01211-6](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01211-6)
- 54 A. Agrawal, K.K.Sahu: An overview of the recovery of acid from spent acidic solutions from steel and electroplating industries (2009), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.099>
- 55 Marimuthu S, Sezer HK, Kamara AM.: Applications of Laser Cleaning Process in High Value Manufacturing Industries (2019), DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815577-6.00007-4>
- 56 Leone C, Genna S, Caggiano A.: Resource efficient low power laser cleaning of compact discs for material reuse by polycarbonate recovery (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.01.005>
- 57 T.L. See, I. Metsios, D. Qian, M. Antar, S. Marimuthu: Feasibility study and demonstration of cleaning with laser adaptively by novel use of sensors (2018), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.146>
- 58 European commission, Integrated pollution prevention and control: Surface treatment of metals and plastic (2006), https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/stm_bref_0806.pdf
- 59 Delaporte P, Gastaud M, Marine W, Sentis M, Uteza O, Thouvenot P, et al.: Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination (2003), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)01360-0](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01360-0)
- 60 D. Ahn, D. Jang, T. Park, D. Kim: Laser removal of lubricating oils from metal surfaces (2012), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.028>
- 61 C. Mandolino, 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.054>
- 62 A. Zs. Kenez, T. Foldes, E. Lubloy: Effect of surface cleaning on seam quality of laser beam welded mixed joints, Case Studies in Construction Materials (2023), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01904>
- 63 ISO 6507-2 :2018: Metallic materials - Vickers hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines
- 64 J. Yong, F. Chen, Q. Yang, X. Hou. Femtosecond Laser Controlling Wettability of Solid Surfaces. Soft Matter (accepted man-uscript), 2015, DOI: 10.1039/C5SM02153G
- 65 P. Bizi-Bandoki, S. Benayoun, S. Valette, B. Beaugiraud, E. Audouard. Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment. Applied Surface Science 2011, Volume 257, pp. 5213–5218, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.12.089>
- 66 S. Moradi, S. Kamal, P. Englezos, S. G Hatzikiriakos. Femtosecond laser irradiation of metallic surfaces: effects of laser pa-rameters on superhydrophobicity. Nanotechnology 2013, Volume 24, DOI: 10.1088/0957-4484/24/41/415302
- 67 G. Schnell, C. Polley, S. Bartling, H. Seitz. Effect of chemical solvents on the wetting behavior over time of femtosecond laser structured Ti6Al4V surfaces. Nanomaterials 2020, Volume 10, DOI: 10.3390/nano10061241

- 68 D. Shen, W. Ming, X. Ren, Z. Xie, X. Liu. Progress in non-traditional processing for fabricating superhydrophobic surfaces. *Micromachines* 2021, Volume 12, DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12091003>
- 69 D. Yan, Z. Yu, T. Zou, Y. Lin, W. Kong, J. Yang. Long-time persisting superhydrophilicity on sapphire surface via femtosecond laser processing with the varnish of TiO₂. *Nanomaterials* 2022, Volume 12, DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12193403>
- 70 B. Wang, W. An, L. Wang, L. Jiao, H. Zhang, H. Song, S. Liu. Superhydrophobic and antibacterial hierarchical surface fabricated by femtosecond laser. *Sustainability* 2022, Volume 14, DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912412>
- 71 J. Bonse, S.V. Kirner, M. Griepentrog, D. Spaltmann, J. Krüger. Femtosecond laser texturing of surfaces for tribological applications. *Materials* 2018, Volume 11, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11050801>
- 72 Y. Zhang, G. Zou, L. Liu, A. Wu, Z. Sun, Y. N. Zhou. Vacuum Brazing of Alumina to Stainless Steel Using Femtosecond Laser Patterned Periodic Surface Structure. *Materials Science & Engineering A* (accepted manuscript) 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.068>
- 73 G. Ye, W. Wang, D. Fan, P. He. Effects of femtosecond laser micromachining on the surface and substrate properties of poly-lactic acid (PLA). *Applied Surface Science* 2021, Volume 538, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148117>
- 74 J. Cheng, W. Perrie, S.P. Edwardson, E. Fearon, G. Dearden, K.G. Watkins. Effects of laser operating parameters on metals micromachining with ultrafast lasers. *Applied Surface Science* 2009, Volume 256, pp. 1514-1520, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.09.013>
- 75 L.K. Nolasco, G.F.B. Almeida, T. Voss, C.R. Mendonça. Femtosecond laser micromachining of GaN using different wave-lengths from near-infrared to ultraviolet. *Journal of Alloys and Compounds* 2021, Volume 877, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160259>
- 76 B. Guo, J. Sun, Y. Hua, N. Zhan, J. Jia, K. Chu. Femtosecond Laser Micro/Nano-manufacturing: Theories, Measurements, Methods, and Applications. *Nanomanufacturing and Metrology* 2020, Volume 3, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41871-020-00056-5>
- 77 A. Sikora, S. Nourry, M. Faucon, B. Chassagne, R. Kling, G. Mincuzzi. Role of the intensity profile in femtosecond laser surface texturing: An experimental study. *Applied Surface Science Advances* 2021, Volume 6, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100136>
- 78 G. Giannuzzi, C. Gaudio, R. Di Mundo, L. Mirengi, F. Fraggelakis, R. Kling, P. M. Lugar`a, A. Ancona. Short and long term surface chemistry and wetting behaviour of stainless steel with 1D and 2D periodic structures induced by bursts of femtosecond laser pulses. *Applied Surface Science* 2009, Volume 494, pp. 1055-1065, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.126>
- 79 N. Maharjan, W. Zhou, Y. Zhou, Y. Guan. Femtosecond laser cleaning for aerospace manufacturing and remanufacturing. *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, Singapore, 31 July 2017 - 04 August 2017, DOI: 10.1109/CLEOPR.2017.8119087
- 80 D. Prokuratov, A. Samokhvalov, D. Pankin, O. Vereshchagin, N. Kurganov, A. Povolutckaia, A. Shimko, A. Mikhailova, R. Balmashnov, A. Reveguk, O. Smolyanskaya, D. Redka, V. Bobrovs. Investigation towards laser cleaning of corrosion products from Lead Objects. *Heritage* 2023, Volume 6, DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage6020071>
- 81 T. Harada, S. Spence, A. Margiolakis, S. Deckoff-Jones, R. Ploeger, A. N. Shugar, J. F. Hamm, K. M. Dani, A. R. Dani. Obtaining cross-sections of paint layers in cultural artifacts using femtosecond pulsed lasers. *Materials* 2017, Volume 10, DOI: 10.3390/ma10020107

- 82 L. Xiaopeng, F. Jing, F. Jikang, P. Yong, W. Kehong. Parametric investigation of femtosecond laser welding on alumina using Taguchi technique. *Optik* 2021, Volume 225, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165891>
- 83 S. Kim, J. Kim, Y. Joung, J. Choi, C. Koo. Bonding Strength of a Glass Microfluidic Device Fabricated by Femtosecond Laser Micromachining and Direct Welding. *Micromachines* 2018, Volume 9, DOI: 10.3390/mi9120639
- 84 N. Maharjan, W. Zhou, Y. Zhou, Y. Guan, N. Wu. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration. *Surface & Coatings Technology* 2019, Volume 366, pp. 311-320, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.036>
- 85 T. Wulz, B. K. Canfield, L. M. Davis, S. Spanier, E. Lukosi. Pulsed femtosecond-laser treatment and deep reactive ion etching of diamond. *Diamond & Related Materials* 2017, Volume 74, pp. 108-113, DOI: 10.1016/j.diamond.2017.02.018
- 86 A. Zs. Kenez, E. Lubloy, Gy. Bagyinszki, T. Foldes: Femtosecond laser surface cleaning for diamond segmented drill bit manufacturing, *Crystals* (2023), 13, 672, DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13040672>
- 87 M. Berczeli, F. Tajti. Optimization of material removal parameters by femtosecond laser pulses. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 903 2020, 012026, DOI:10.1088/1757-899X/903/1/012026
- 88 F. Tajti, M. Berczeli. Development of high power femtosecond laser microstructures on automotive stainless steel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 903 2020, 012025, DOI:10.1088/1757-899X/903/1/012025
- 89 ISO 4287:1997: Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions, and surface texture parameters. Available online: <https://www.iso.org/standard/10132.html> (accessed on 04 1997)
- 90 Bagyinszki Gyula: Nagy energiasűrűségű hegesztési eljárással készített kötések hegeszthetőségének kérdései (Hegesztő szakmérnöki diplomaterv), BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Intézet, 1993, 139 oldal
- 91 Editor: Yoshiaki Arata: Plasma, Electron and Laser Beam Technology, American Society for Metals, Ohio, 1986, Corpus ID: 137106949
- 92 Bagyinszki Gyula: Hegesztési hőhatásövezet hidegrepedés-érzékenységének előrejelzése számítással (Tudományos diákköri dolgozat), BME Mechanikai Technológia Tanszék, 1987, 37+33 oldal
- 93 C.F. Düren – K.A. Niderhoff: Hardness in the Heat-affected Zone of Pipeline Girth Welds, Third International Conference on Welding and Performance of Pipelines, The Welding Institute, London, 1986
- 94 Metallografie, 14. Auflage, Herausgegeben von H. Oettel und H. Schumann, 2005, WILEY-VCH Verlag GmbH & KGaA, Weinheim ISBN 3-527-30679-X
- 95 P. L. Moore. Novel Method of Recording Cooling Curves During Laser and Laser/Arc Hybrid Welding. Paper presented at JOM 11, 25-28 May 2003, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/novel-method-of-recording-cooling-curves-during-laser-laser-arc-hybrid-welding-may-2003>
- 96 Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Band2, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 1972 ISBN 3-514-00413-7

DISSZERTÁCIÓHOZ TARTOZÓ PUBLIKÁCIÓK, ELŐADÁSOK, MELLÉKLETEK

Tudományos publikációk:

[S1] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** Gyémánt fűrészegmensek lézeres hegesztésének vizsgálata, *Acta Materialia Transylvanica* (2018) 85-88 oldalak

[S2] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** Gyémántszemcsés fűrészegmensek rögzítéstechnológiáinak vizsgálata, 29. Nemzetközi Hegesztési Konferencia (2018) 199-209 oldalak

[S3] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** Hegesztési paraméterek hatásának vizsgálata a lézerhegesztett gyémántszemcsés fűrészegmensek törésértékeinek viselkedésére, *Bánki közlemények* (2019) 10-15 oldalak

[S4] **A. Zs. Kenéz, Gy. Bagyinszki:** Applicability Investigation of Joining Technologies for Diamond Core Bits, *Műszaki Tudományos Közlemények* (2019) 31-40 oldalak

[S5] **A. Zs. Kenéz, Gy. Bagyinszki:** Pressure Welding Processes of Tubular Parts and Pipe Segments, *Műszaki Tudományos Közlemények* (2019) 109-112 oldalak

[S6] **A. Zs. Kenéz, Gy. Bagyinszki:** Inspection of The Effect of Process Parameters on The Break Out Values of Laser Welded Drill Bits, *Acta Materialia Transylvanica* (2020) 76-80 oldalak

[S7] **A. Zs. Kenez, T. Foldes, E. Lubloy:** Effect of surface cleaning on seam quality of laser beam welded mixed joints, *Case Studies in Construction Materials* (2023), 18, **IF: 4,934**

[S8] **A. Zs. Kenez, E. Lubloy, Gy. Bagyinszki, T. Foldes:** Femtosecond laser surface cleaning for diamond segmented drill bit manufacturing, *Crystals* (2023), 13, 672-683 oldalak, **IF: 2,67**

Nem tudományos publikációk:

[S9] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** Gyémántszemcsés fűrészegmensek gyártása és tesztelése. *Hegesztéstechnika* (2018) 63-67 oldalak

Előadások, konferenciák:

[E1] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** XXIII. Fial Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2018, March 22–23, Cluj-Napoca, Romania

[E2] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** 29. Nemzetközi Hegesztési Konferencia, 2018, May 24–26, Miskolc, Hungary

[E3] **A. Zs. Kenéz, Gy. Bagyinszki:** FEMS Junior EUROMAT, 2018, July 8-12, Budapest, Hungary

[E4] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** 10th International Engineering Symposium at Bánki, 2018, November 21, Budapest, Hungary

[E5] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** XIX. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2018, November 24, Cluj-Napoca, Romania

[E6] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** XXIV. Fial Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2019, March 28–29, Cluj-Napoca, Romania

[E7] **Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.:** XXV. Fial Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2020, March 26–27, Cluj-Napoca, Romania

[E8] **A. Zs. Kenéz, Gy. Bagyinszki:** International Conference on Innovative Research (ICIR Euroinvent 2020), 2020, May 21-22, Iasi, Romania