

Hegesztési paraméterek hatásának vizsgálata a lézerhegesztett gyémántszezmenses fúrókoronák törésértékeinek viselkedésére

Inspection of the Effect of Welding Parameters on the Behaviour of Breaking Values of Laser Welded Diamond Segment Drill Bits

Kenéz Attila Zsolt *, Bagyinszki Gyula **

* Hilti Szerszám Kft., Kecskemét, Magyarország

* Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

** Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország
attila.kenez@hilti.com, bagyinszki.gyula@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — Korábbi cikkünkben már beszámoltunk gyémántszezmenses fúrókoronák hegesztett kötéseinek végzett vizsgálatainkról, amiket 4 kW-os TRUMPF TruDisk4002 szilárdtest lézerforrással készítettünk. Hegesztési hibákat és esetleges átötvöződéásokat kerestünk, szövetszerkezeti- és keménységvizsgálatokat végeztünk. Ebben a cikkben azt vizsgáljuk, hogy a lézerhegesztési folyamatparaméterek - pl. lézerteljesítmény (P), hegesztési sebesség (S), fókuszpont eltolások (FP) – milyen hatással vannak a kötési zónára. Kísérleti tervet készítünk egyszerre egy faktor módosításával (One Factor At a Time) annak megállapítására, hogy a különböző paramétereket milyen tartományra érdemes leszűkíteni ahhoz, hogy minél kevesebb mintából meg tudjuk állapítani a hatásukat. Természetesen ezzel a módszerrel nem tudjuk meghatározni több faktor együttes hatását. A kapott eredményeket felhasználva készítjük el a paraméter-kísérleti tervet DoE módszerrel, hogy megállapítsuk a szignifikáns jellemzőket (és az esetleges együttes hatásokat), amelyek változtatása jelentős hatással van a kötési zónára.

Kulcsszavak: lézerhegesztés, gyémánt szezmens, paraméterkísérlet

Abstract — In our previous article we have already analyzed welded joints of diamond segment drill bits, which were made with a 4kW TRUMPF TruDisk4002 solid-state laser source. We were looking for a possible welding errors and when an alloy was formed, we inspected the microstructure and hardness tests were performed. In this paper we examine the effect of laser beam welding process parameters such as laser power (P), welding speed (S) and focal distance (FP) on the joining zone. An experiment plan is made simultaneously by modifying a factor (One-Factor-At-A-Time) to determine the range of different parameters that should be narrowed down to the minimum number of samples to determine their effect. Of course, we cannot determine the combined effect of several factors with this method. Using the results obtained, we prepare the parameter experiment plan using a DoE method to determine the significant characteristics (and possible

combine effects) change of which has a significant effect on the joining zone.

Keywords: laser welding, diamond segment, parameter study

1 BEVEZETÉS

A lézersugaras hegesztésnek számos előnye van, mint pl. koncentrált, így fajlagosan alacsony hőbevitel, keskeny hőhatásövezet, kismértékű torzulás, könnyű automatizálhatóság. A hagyományos hegesztési eljárásokhoz képest mélyebb a beolvadás, nagyobb a hegesztési sebesség, a pontosság, a megbízhatóság, a hatékonyság és magasabb a termelékenysége [1].

Lézerrel eltérő minőségű fémek anyagok is hegeszthetők azzal a feltétellel, hogy a két fém képes legyen egyidejűleg megömleni és közös ömledéket képezni és ne keletkezzenek megengedhetetlen intermetallikus fázisok, átmeneti vegyületformák a hegesztési folyamat során. [2, 15-16.o]. Többen különböző módszerekkel vizsgálták már a lézerhegesztési folyamatparaméterek hatását (pl. a keménységre, a szövetszerkezetre, a mechanikai tulajdonságok változására, stb). Legtöbbször egy szoftver által meghatározott értékhez hasonlították a kísérleti eredményeket, visszaigazolandó a szoftver „pontosságát”.

Esetünkben porkohászati úton gyártott szezmenseket hegesztettünk vékonyfalú acél csőre. Egy korábbi cikkünkben már vizsgáltuk a kötési zónákat [3], jelen cikkünkben a törésértékekből készítettünk egy kiértékelést, ahol a lézerhegesztési folyamatparaméterek hatását vizsgáltuk - mint lézerteljesítmény, hegesztési sebesség, fókuszpont eltolások. A kiértékeléseket felhasználtuk további kísérlettervek készítésére.

2 A KÍSÉRLETEK FOLYAMATA

A lézeres hegesztési folyamat paraméterei, mint például a lézer teljesítmény, a hegesztési sebesség, a védőgáz és a fókusz távolság befolyásolják a hegesztési minták minőségét. Ebben a vizsgálatban két folyamatparamétert,

a lézer teljesítményt (P) és fókuszávolságot (FP) vettünk figyelembe. A fókuszávolság hatását viszont két irányban is vizsgáltuk, a felületre merőleges irányban (FPQ) és a szimmetriatengellyel párhuzamos irányban (FPL). Kiinduló értéként FPQ = 0,25mm és FPL = -0,2mm értéket állítottunk be. A hegesztési sebességet (S) állandó paraméternek tekintettük, mivel a lézerhegesztőgépen beállítható maximális sebességet használtuk a kísérletek során. A kísérletben alkalmazott folyamatparamétereket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

A termékportfólióból kiválasztottuk az Ø102 mm-es terméket (1. ábra), mely 8 szegmenst tartalmaz a cső homlokfelületén egyenlő távolságban elosztva.

2.1 A kísérletekhez felhasznált anyagok

2.1.1 Szegmens

A szegmens gyártása porkohászati úton történik, a porok összekeverése után egy berendezés rétegről rétegre építi fel a szegmenst és ekkor kerülnek bele a meghatározott méretű gyémánt szemcsék is. A rétegzési folyamat teljesen szabályozott, szabadon variálható a rétegek vastagsága és száma. Ezután beállítják a szegmens sűrűségét, mely befolyásolja a hegesztést a gyártás során, ill. a vágás sebességét, a vágótest kopását az alkalmazás során. A szegmensek 2 fő zónából állnak, az egyik a vágásért felelős „vágózóna”, a másik a hegesztéshez szükséges „neutrál” vagy semleges zóna. A szegmensek neutrál zónájának kémiai összetétele: Astaloy-Mo = 99,8%, Grafitpor = 0,2%, Cink-sztearát = 0,5%.

2.1.2 Acélcső

A szegmenseket egy vékonyfalú acélcsőre rögzítjük, mely hidegen húzott E235+C (1.0308) anyagminőségű, EN 10305-1 szabvány szerinti [4], $2 \pm 0,15$ mm falvastagságú. A cső kémiai összetétele: C $\leq 0,17\%$, Si $\leq 0,35\%$, Mn $\leq 1,2\%$, P $\leq 0,025\%$, S $\leq 0,025\%$.

2.2 A kísérletekhez felhasznált lézerforrás

A kísérletet egy Trumpf TruDisk 4002 (max. 4,0 kW teljesítményű, 1,03 μ m hullámhosszúságú) lézerforrással végeztük el. A lézerforrás egy teljesen automatizált géppel van kapcsolatban: egy rezgőadagolóból kerülnek be a szegmensek a belső, kétállásos adagoló-pozicionáló 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 pozicionáló másik állásába, ezzel csökkentve a mellékidőket és biztosítva a következő szegmens gyors pozícióba kerülését.



1. ábra: Ø102 mm-es fúrókorona katalógusképe

1. táblázat: A kísérlet folyamatparaméterei

Folyamat-paraméter	Mértékegysége	Jele	Min. értéke	Max. értéke
Lézer teljesítmény	W	P	40%	70%
Fókuszpont-eltolás keresztirányban	mm	FPQ	-2,75	1,25
Fókuszpont-eltolás tengelyirányban	mm	FPL	-0,5	0

2.3 A kísérlettervezés folyamata

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 kísérletezés stratégiái:

- A legjobb találgatás módszere (Best-guess approach): gyakran használják, de nem biztos, hogy az optimális választ találjuk meg. Ha találunk egy elfogadhatóan jó megoldást, nem biztos, hogy tovább találgatunk.
- Egyszerre egy faktor változtatása (OFAT: One factor-at-a-time): könnyen megismételhető 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 (Factorial Experiments): több faktort egyidejűleg változtatunk (kevesebb kísérleti lépés szükséges), az egyes faktorok kölcsönhatása is kiderül a kísérletekből. Lehetővé válik a beállításokhoz kapcsolódó középértékek és az ún. hatások számítása.

A kísérletek elvégzéséhez az „egyszerre egy faktor változtatása” stratégiát választottuk és az alábbi lépéseket hajtottuk végre:

- első lépésként a lézerteljesítményt (P) csökkentettük 10 %-os lépcsőkben addig, amíg a cső anyaga még éppen átolvadt teljes keresztmetszetében. Ezt a legkisebb teljesítményt vettük alapul a következő lépéseknél azért, hogy a fókuszávolság változtatásakor jobban láthatóak legyenek a változások;
- második lépésként a fókuszpontot toltuk el keresztirányban (FPQ), először távolodva, majd közeledve a felülethez. Azt az értéket kerestük, ahol a legmagasabb a gépképesség mutató (Cpk) és ezt vettük alapul a következő lépésnél;

- harmadik lépésként a fókuszpontot toltuk el tengelyirányban (FPL), a szegmens életől indulva a cső irányába. Azt az értéket kerestük, ahol a legmagasabb a gépképesség mutató (Cpk).

2.4 Vizsgálati módszer

Hegesztett kötések és/vagy varratok roncsolásos vizsgálatára többnyire az alapanyag vizsgálatára használt eljárásokat alkalmazzák, viszont a roncsolásmentes vizsgálatok során a vizsgálandó munkadarab nem károsodik.

Roncsolásmentes vizsgálati eljárások:

- optikai vizsgálat;
- geometriai vizsgálat;
- minimum-próba;
- radiográfiai vizsgálat (röntgenvizsgálat, izotópos vizsgálat);
- mágnesezhető poros vizsgálat;
- folyadékbehatolásos vizsgálat;
- ultrahangos vizsgálat;
- örvényáramos vizsgálat;
- CT (computer tomográfia) vizsgálat.

Roncsolásos vizsgálati eljárások:

- törésteszt (statikus hajlítás);
- keménységvizsgálat;
- energiadiszperzív spektroszkópia;
- makrociszolát vizsgálat;
- optikai fénymikroszkópos vizsgálat;
- pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat;
- szakítóvizsgálat;
- hajlítóvizsgálat (korona- és gyökoldali);
- ütővizsgálat;
- fárasztóvizsgálat.

A roncsolásos vizsgálati eljárások közül ebben a cikkben a törésteszt eredményeit használtuk fel. A vizsgálat célja volt meghatározni a szegmens letöréséhez szükséges nyomaték átlagos értékét, melynek nagyobbak kell lennie, mint az előírt min. 9 Nm. A vizsgálat végrehajtásakor a szegmensre a formájához illeszkedő betétet helyeztünk, ami nyomatékhatárolóval ellátott nyomaték kulcshoz csatlakozik. A kulcs nullázása után a szegmenst kifelé irányuló mozdulattal letörtük és leolvastuk a kijelzett értéket. A kiértékeléséhez a Minitab szoftvert használtuk.

3 EREDMÉNYEK

3.1 Első lépés eredményei

A lézerteljesítményt (P) csökkentettük 10%-os lépcsőkben addig, amíg a cső anyaga még éppen átolvadt teljes keresztmetszetében. Az átolvadást a cső belső felületén vizsgáltuk szemrevételezéssel. A 4. számú mintánál már nem láttuk kialakulni a varratot a cső belső felületén, ezért megfeleztük a két utolsó minta közötti teljesítmény-különbséget és ezzel a paraméterrel még teljes keresztmetszetben átolvadtt varratot kaptunk. Az eredmények a 2. táblázatban találhatóak. Az 5. számú minta teljesítményparaméterét vettük alapul a további lépésekhez.

2. táblázat: Az első lépés eredményei

Minta száma	Átlagos törésérték [Nm]	Szórás	Cpk	Minimum törésérték [Nm]
1 (70%)	17,575	1,640	2,65	12,1
2 (60%)	19,506	0,589	3,68	17,4
3 (50%)	18,793	2,216	1,78	11,1
4 (40%)	14,773	0,611	2,84	13,7
5 (45%)	17,620	1,108	2,56	14,3

3. táblázat: A második lépés eredményei

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

3.2 Második lépés eredményei

A keresztirányú fókuszpont-eltolást változtattuk 1 mm-es lépésközzel a felülettől távolodva, majd 0,5 mm-es lépésekkel a felülethez közelítve. Feltételeztük, hogy a felülettől távolodó fókuszpont-eltolás nem a jó irány, ezért csak egy lépést hajtottunk végre. Az eredmények a 3. táblázatban találhatóak. A legmagasabb gépképesség-mutatójú (Cpk) minta paraméterét vettük alapul a harmadik lépéshez.

3.3 Harmadik lépés eredményei

A tengelyirányú fókuszpont-eltolást változtattuk 0,1 mm-es lépésközzel a szegmens életől indulva a cső irányába. Az eredmények a 4. táblázatban találhatóak. A legmagasabb gépképesség-mutatójú (Cpk) minta paraméterét kerestük.

4 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A kiértékelés során az adott paraméterekre átlagos törési értéket, szórás és gépképesség-mutatót számoltunk. A minimális törési érték fontossága a funkcionalitásból ered. Minél magasabb egy aktuális beállítás minimális törésértéke, annál nagyobb biztonsággal állítható, hogy a paraméterek megfelelőek. A szórás azt mutatja meg, 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, melyet az aktuális paraméter nem „tolerál”. Az alacsony szórás viszont utal a beállított paraméter külső hatásokra való érzéketlenségére, függetlenül attól, hogy az honnan ered, valamint mutatja a technológia hosszú távú alkalmasságát a szériagyártásra. A legfontosabb kiértékelési szempont a gépképesség mutató.

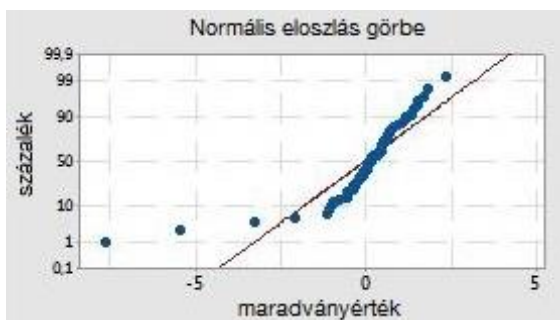
4. táblázat: A harmadik lépés eredményei

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

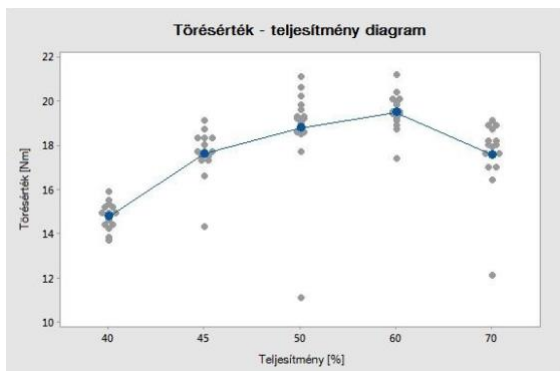
A kapott gépképesség mutató értékének a szériatermékek gyártása során magasabbnak kell lennie 1,33-nál. A gépképesség mutatót a szórás, a minimum és maximum értékek, a bevitt értékek száma, illetve az előírt minimális törési érték is befolyásolja.

Minden mintánál 16 darab szegmenset törtünk le, az értékeket a Minitab programban rögzítettük. Alsó határtárhékként a minimális 9 Nm-es előírást adtuk meg, de felső határtékek nélkül végeztük el a számításokat. A program minden mintánál megrajzolta az eloszlásgörbét, kiszámolta az átlagértéket és a gépképesség mutatót. Ezek az adatok találhatóak meg (kiegészítve a minimális törésértékkel) a 2., 3. és 4. táblázatokban. Az ANOVA (Analysis of Variances) funkciót használtuk a paraméterváltozások kiértékelésére, összehasonlítására mindhárom lépésnél külön-külön.

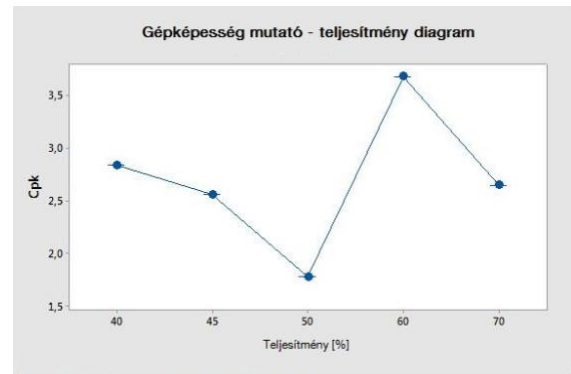
A 2. ábra mutatja az 1. lépés törésértékeinek eloszlását, ahol néhány adat nem illeszkedik a normális eloszláshoz. Ezek a „kieső” értékek megtalálhatóak a 3. ábrán is, ahol a törésérték van ábrázolva a függőleges tengelyen a teljesítmény függvényében (vízszintes tengely).



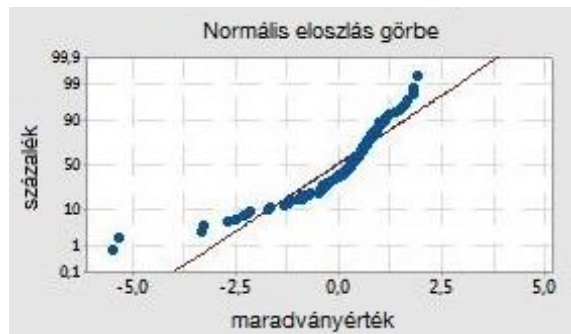
2. ábra: 1. lépés törésértékeinek eloszlása



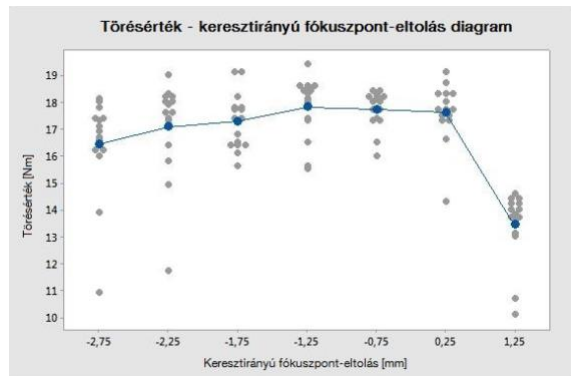
3. ábra: 1. lépés törésértékeinek változása a teljesítmény függvényében



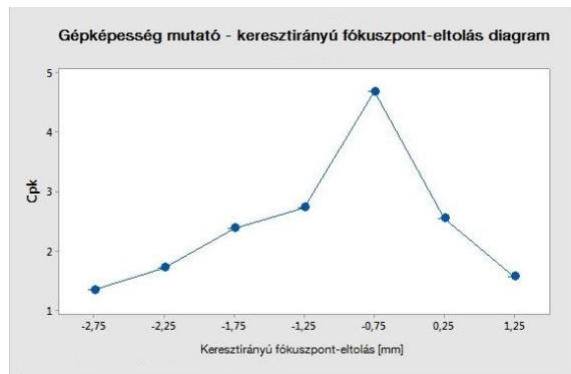
4. ábra: 1. lépés gépképesség mutató értékeinek változása a teljesítmény függvényében



5. ábra: 2. lépés törésértékeinek eloszlása



6. ábra: 2. lépés törésértékeinek változása a keresztirányú fókuszpont-eltolás függvényében



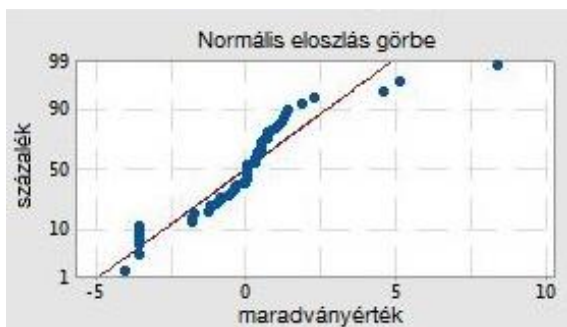
7. ábra: 2. lépés gépképesség mutató értékeinek változása a keresztirányú fókuszpont-eltolás függvényében

Az ábráról az is leolvasható, hogy a teljesítmény csökkenésével először emelkedik, majd csökken a törésérték, ami az 5. mintánál szinte teljesen megegyezik

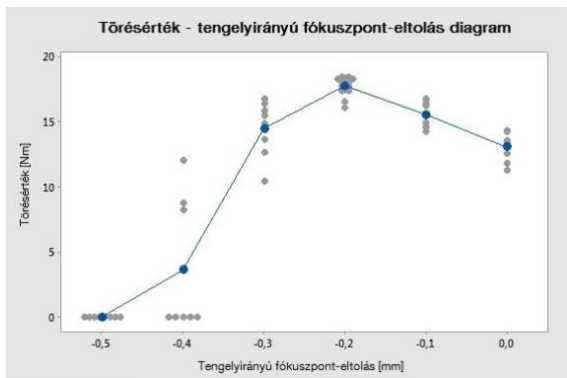
az 1. mintáival (különbség közöttük csak a minimális törésértékben van). A 4. ábrán látható gépképesség mutató (függőleges tengely) - teljesítmény (vízszintes tengely) függvényéből más olvasható le. A teljesítmény csökkenésével először hirtelen emelkedés (2. minta) majd hirtelen csökkenés (3. minta) után az 5. mintánál az értékek újra szinte teljesen megegyeznek az 1. mintáival.

Ebben a lépésben azt a teljesítményt kerestük, ahol még teljes keresztmetszetben átolvad a cső anyaga, ezt az 5. minta paramétere teljesítette, de nem szabad figyelmen kívül hagyni a 2. minta magas törésértékeit és a magas gépképesség mutatóját sem.

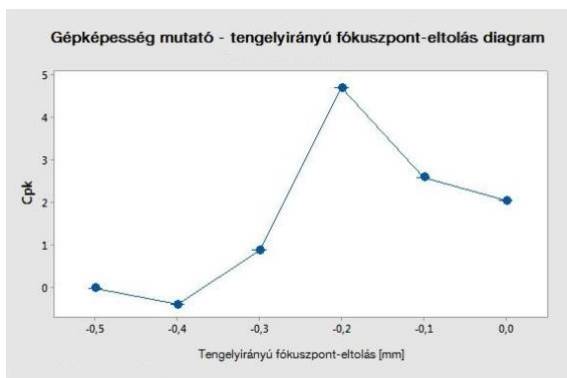
Az 5. ábra mutatja a 2. lépés törésértékeinek eloszlását, néhány adat nem illeszkedik a normális eloszláshoz. Ezek a „kieső” értékek megtalálhatóak a 6. ábrán is, ahol a törésérték van ábrázolva a függőleges tengelyen a keresztirányú fókuszpont-eltolás függvényében (vízszintes tengely). Az ábráról az is leolvasható, hogy a felülettől távolodó fókuszpont-eltolás (6. minta) negatív hatással



8. ábra: 3. lépés törésértékeinek eloszlása



9. ábra: 3. lépés törésértékeinek változása a tengelyirányú fókuszpont-eltolás függvényében



10. ábra: 3. lépés gépképesség mutató értékeinek változása a tengelyirányú fókuszpont-eltolás függvényében

van a törésértékre, míg a felülethez közeledő fókuszpont-eltolás egy tartományon belül „nincs” hatással a törésértékre (7. és 8. minta), majd enyhe csökkenést mutat. A 7. ábrán látható gépképesség 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 fókuszpont-eltolás hatására.

Ebben a lépésben azt a keresztirányú fókuszpont-eltolást kerestük, ahol a gépképesség mutató a legmagasabb, ezt a 7. minta paramétere teljesítette.

A 8. ábra mutatja a 3. lépés törésértékeinek eloszlását, az adatok nagy része nem illeszkedik a normál eloszláshoz, valószínűleg azon minták befolyásolják, ahol nagy a szórás értéke. A 9. ábráról leolvasható - ahol a törésérték van ábrázolva a függőleges tengelyen a tengelyirányú fókuszpont-eltolás (vízszintes tengely) függvényében, hogy a szegmens élétől a cső irányába induló tengelyirányú fókuszpont-eltolás növeli a törésértéket, a maximum elérése után viszont hirtelen csökken és nullára esik. A 9. ábrán látható gépképesség 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 lépésben azt a tengelyirányú fókuszpont-eltolást kerestük, ahol a gépképesség mutató a legmagasabb, ezt a 7. minta paramétere teljesítette.

5 KÖVETKEZTETÉSEK, ÖSSZEZÉS

Az „egyszerre egy faktor változtatása” stratégiát követve három lépésből eljutottunk egy jó megoldásig, aminek a paraméterei:

- lézerteljesítmény: 45%
- keresztirányú fókuszeltolás: -0,75mm
- tengelyirányú fókuszeltolás: -0,2mm.

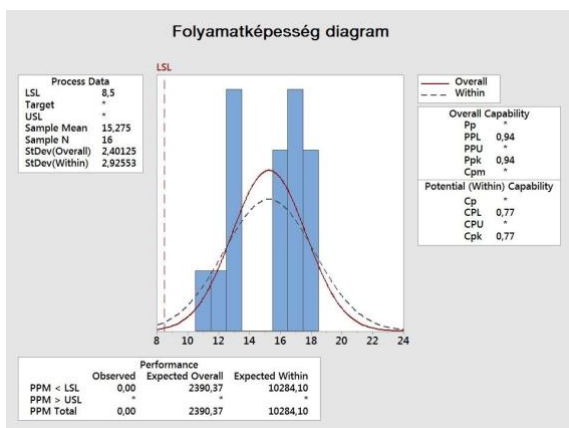
A kapott eredmények alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a vizsgált folyamatparaméterek közül a tengelyirányú fókuszpont-eltolás van a legnagyobb hatással a törésértékre, ennek az értéknek az „elállítódása” hirtelen elrontja a minőséget. Ezt követi a lézerteljesítmény és a keresztirányú fókuszpont-eltolás változása, ebben a sorrendben.

Ennek a stratégiának a hátránya, hogy nem ismerjük a faktorok kölcsönhatásait. Ezt alátámasztandó, még egy kísérlettel kiegészítettük a vizsgálatunkat: mindhárom lépés eredményeiből kiválasztottuk azokat a paramétereket, ahol a gépképesség mutató a legmagasabb értéket adta. A 11. ábrán látható az eredmény, amit az 5. táblázatban foglaltunk össze és messze elmarad a korábbi eredménytől. A fenti eredmény csak a 45% lézerteljesítményre és a hozzá tartozó fókuszpont-eltolásokra érvényes, tehát léteznek még jó megoldások ezen kívül is. Vélhetőleg a különböző lézerteljesítményekhez más-más fókuszpont-eltolás adja a legjobb eredményt.

Ezt csak faktoros kísérlettel lehet igazolni. A fenti kísérlet eredményeit fel tudjuk használni arra, hogy egy szűkített tartományban végezzük el a faktoros kísérletet, kizárva azokat a paramétereket, amiknél nagyon alacsony törésértéket kaptunk. A kísérlethez a 6. táblázatban látható paramétertartományokat használjuk és a Minitab programmal állítjuk elő a teljes faktoriális kísérlettervet, mely a 12. ábrán látható. A változó paraméterek közé

felvettük a sebességet is (S), bővítve a folyamat paraméterek számát. Teljes faktoros kísérlet esetén mind a 2^k darab beállítás mellett legalább kétszer ($n \geq 2$) elvégezzük a kísérletünket. Ez lehetőséget ad a teljes valószínűségi modell használatára, ami az összes fő faktor hatását és az összes lehetséges faktor és szint kombinációt jelentő kölcsönhatást tartalmazza. Esetünkben 2^4 , azaz 16 mintából áll (4 faktor, mindegyik 2 értékkel), a 17. minta a faktorok középértéke. A kísérleteket véletlenszerűen, azaz randomizálva kell végrehajtani. A randomizálás alapvető követelmény ahhoz, hogy használhassuk a statisztikai módszereket. Randomizálás alatt mind a vizsgált kísérleti egységek, mind a kísérleti beállítások véletlenszerű sorrendjének biztosítását értjük. A statisztikai módszerek azon a feltevéseken alapulnak, hogy a megfigyelések (a hibák) független valószínűségi változók. A randomizálás általában biztosítja ennek a feltételnek az érvényességét.

A kiértékelések során felfigyeltünk arra, hogy a töréserőértékekben sok a „kieső” érték, ezek túl messze esnek az átlagos töréserőértéktől (3. és 6. ábra). A 13. ábrán és a 14. ábrán két töretfelület látható a 10. mintából, a 3.



11. ábra: A legjobb gépképesség mutatójú paraméterek kombinációinak eredménye

5. táblázat: A legjobb gépképesség mutatójú paraméterek kombinációinak eredménye

Minta száma	Átlagos töréserő [Nm]	Szórás	Cpk	Minimum töréserő [Nm]
19	15,275	2,401	0,77	10,7

6. táblázat: Faktoros kísérletterv folyamatparaméterei

Folyamat-paraméter	Mértékegysége	Jele	Min. értéke	Max. értéke
Lézer teljesítmény	W	P	45%	70%
Fókuszpont-eltolás keresztirányban	mm	FPQ	-1,25	0,75
Fókuszpont-eltolás tengelyirányban	mm	FPL	-0,3	0
Sebesség	mm/s	S	30	50

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	P [%]	S [mm/s]	FPQ [mm]	FPL [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

12. ábra: Faktoros kísérletterv (Minitab)



13. ábra: 10. számú minta (varratkép a külső oldalon)



14. ábra: 10. számú minta (varratkép a belső oldalon)

szegmens töréserőértéke 11,7 Nm volt, a 4. szegmensé 17,3 Nm. Szemrevételezéssel nem láttunk különbséget a két varrat között, a különbség megállapítására részletesebb vizsgálatokra van szükség. A későbbiekben megfontoljuk ezen vizsgálatok elvégzését.

Még egy további érdekességre felfigyeltünk fel, miszerint az 1. minta és az 5. minta töréserőértékei és gépképesség mutatójú szintje megegyeznek. A két minta között a lézerteljesítmény volt a különbség, azaz a hőbevitel értéke változott. A későbbiekben megfontoljuk ennek a két mintának a részletesebb vizsgálatát, hogy a varratok között van-e különbség szövetszerkezetben, keménység-lefutásban, varratszélességben, stb.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] M. Li, Z. Li, Y. Zhao, H. Li, Y. Wang, J. Huang, *Advances in Materials Science and Engineering* (2011). (doi:10.1155/2011/767260)
- [2] Bagyinszki Gy., Bitay E.: Nagy energiasűrűségű eljárások hegeszthetőségi szempontjai. In: XVII. Fiaatal Műszaki Tudományos Ülésszaka. Kolozsvár, Románia, Műszaki Tudományos Füzetek. 2012. 13-18. o. ISSN 2067 - 6 808
- [3] Kenéz A. Zs., Bagyinszki Gy.: Gyémánszemcsés fűrészegmensek rögzítéstechnológiáinak vizsgálata. In: 29. Nemzetközi Hegesztési Konferencia. Miskolc, Magyarország. 2018. 199-209.o. ISBN: 978-963-358-160-5
- [4] EN 10305-1: Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions. Part 1: Seamless cold drawn tubes, 2002. november.