MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Gyémántvasalt munkadarab-felületek felületi érdességének 3D-s vizsgálata

Ferencsik Viktória
I. éves gépészmérnök MSc hallgató

Konzulens:
Dr. Varga Gyula
egyetemi docens

Miskolci Egyetem
Gyártástudományi Intézet

Miskolc, 2013. november 14-26.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS 3
2. FELÜLETSZILÁRDÍTÓ ELJÁRÁSOK 4
   2.1. Felülethengerlés 5
   2.2. Ütőtestes felületszilárdítás 6
   2.3. Felületvasalás 8
      2.3.1. Belső hengeres felületek vasalása 9
      2.3.2. Külső hengeres felületek vasalása 10
      2.3.3. Felületi tulajdonságokat befolyásoló paraméterek 12
3. FAKTORIÁLIS KÍSÉRLETTERVEZÉS 15
      3.1. A karakterisztikus együtthatók módszere 15
      3.2.A faktoriális kísérlettervezés empirikus függvények meghatározása 16
4. KÍSÉRLETI MUNKA 21
   4.1. Kísérleti körülmények 21
      4.1.1. A vasalandó munkadarab jellemzői 21
      4.1.2. A megmunkáláshoz alkalmazott szerszámgép 22
      4.1.3. A vasalószerszám 23
      4.1.4. A felületi érdesség mérése 24
   4.2. A kísérlet végrehajtása 25
5. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE 29
6. ÖSSZEFOGLALÁS 32
7. IRODALOMJEGYZÉK 33

1. BEVEZETÉS

A hidegképlékeny befejező megmunkálások napjainkban is jelentős szerepet töltenek be a befejező megmunkálásokban. Ezen belül a felületszilárdító eljárások közé tartozik többek között a felületvasalás, hengerlés és görgőzés. A dolgozatban ezen eljárások közül részletesen a külső hengeres felületek vasalását tanulmányozom.

Az eljárás elve, hogy egy adott paraméterekkel rendelkező nyomószerszám egyenes vonalú mozgást végezve végighalad a vasalandó, forgó mozgást végző munkadarab felületén. A gyémántvasalás alkalmazásának előnyei: a munkadarab felületi érdessége javul, a felület keménysége növekszik, mikro-szerkezete javul és a felületközeli rétegben negatív, azaz nyomó feszültség keletkezik. Ennek hatására a vasalt munkadarabok kifáradási határa jelentősen megnő.

A gyémántvasalási eljárást használják külső és belső hengeres felületek megmunkálásakor, fő alkalmazási területét pedig az autóipari főtengelyek, a belső és külső csapágy futógyűrűk, stb. alkotják.

A vasalást végző szerszám kialakítása lehet rugalmas vagy merev. A vasalást végző betét alakja hengeres vagy gömbfelület alakú, legfőbb anyagai: gyémánt, keményfém, ill. köbös bórnitrid. Vizsgálatainknál gyémánt anyagú, gömb megmunkáló felületű vasaló szerszámot alkalmazunk.

A vasalandó munkadarab anyagminősége és keménysége széles tartományban változhat. Vizsgálatunk tárgya C45 jelű edzetlen acél volt.

Dolgozatom első részében a különböző felületszilárdító eljárásokat, kiemelten a vasalás folyamatát ismertetem, kitérve az azt befolyásoló technológiai tulajdonságok jelentőségére.

A faktoriális kísérlettervezés elvének összegzését követően, az említett paraméterek közül a vasalási sebesség-, előtolás-, erő- és a kenőanyag-változás felületminőségre gyakorolt hatását vizsgálom és kísérleti eredményeimet egy adott méretű külső hengeres felület vasalása során mutatom be.

A kísérletek megtervezéséhez és végrehajtásához a Taguchi-féle teljes faktoriális kísérlettervet alkalmazom, mellyel empirikus összefüggések hatékonyan képezhetők. A felületi érdesség méréséhez a Gyártástudományi Intézetben lévő AltiSurf 520 típusú 3D-s felületi érdességmérő berendezést alkalmazom.

Dolgozatom utolsó fejezetében pedig a mért eredményeket egy speciálisan meghatározott viszonyszám összehasonlításával értékelem ki, s az adott technológiai

paramétertartományokon belül a legjobb felületi érdességet szolgáltató paraméter-beállítási értékeket határozom meg.

Tudományos diákköri dolgozatom a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák Kiválósági Központ keretében valósult meg.

2. FELÜLETSZILÁRDÍTÓ ELJÁRÁSOK

A gépek működésekor a legtöbb igénybevétel elsősorban a gépelemek felületét, illetve bizonyos vastagságú felületi rétegét éri. A megmunkált felület mikrogeometriája nagy hatással van a gépelem kopásállóságára, fárasztó igénybevételek esetén pedig feszültséggyűjtő hatása számottevő. A gépelem felületi rétegét elsősorban súrlódáskor, illetve fárasztáskor éri károsodást okozó terhelés [1].

A gépelem felületének érdessége esetenként hatékonyabban csökkenthető a tartósságnövelő mechanikai megmunkálásokkal, mint forgácsolással.

Az anyagszerkezet és a tulajdonságok kapcsolatrendszerének elemzése során számos szilárdságnövelő mechanizmust megismerhetünk, ezek egyike az alakítási keményedés, a hidegalakítás következményeként fellépő szilárdságnövekedés. A felületi rétegre korlátozott hidegalakítás révén ez a szilárdságnövelő mechanizmus is kihasználható a terhelhetőség növelésére és mindenekelőtt a kifáradással szembeni ellenállás fokozása révén az élettartam növelésére.

A mechanikai felületszilárdítás anyag- és energia-takarékos megoldásainak, eljárásainak közös jellemzője, hogy csökkentik a felületi érdességet, az anyagszerkezeti hibák, diszlokációk átrendezése révén növelik a felületi réteg keménységét, jelentős mértékű nyomófeszültséget eredményeznek a felületi rétegben [3].

A mechanikai felületszilárdítás technológiai megoldásai abban különböznek egymástól, hogy a munkadarab és a szerszám működő felületeinek relatív elmozdulása milyen jellegű. Eszerint megkülönböztethetőek a csúszó relatív elmozdulást alkalmazó vasalás, a gördülő relatív elmozdulásra épülő görgőzés, és a dinamikus hatással alakító ütőtestes felületszilárdító technológiai eljárások [13], melyek főbb típusait az 1. ábra mutatja.

1. ábra

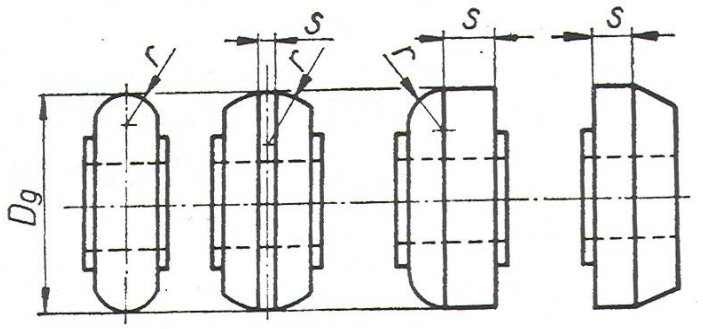
Hidegképlékeny felületszilárdító eljárások főbb típusai

Az 1. ábrán látható főbb típusok legfontosabb jellemzőit a következőkben részletezem.

2.1. Felülethengerlés

A felülethengerlés alkalmazható síkfelületek, külső és belső hengeres felületek szilárdítására. Célja a munkadarab felületi érdességének csökkentése és a felületi réteg szilárdítása. Az eljárás során a megmunkálandó anyagnál jóval keményebb golyó vagy különféle gyűrű (görgő) alakú szerszámot meghatározott erővel a felületre nyomjuk és legördítjük.

Megkülönböztetünk szilárdító és simító hengerlést. A szilárdító hengerlést elsősorban a kifáradási szilárdság, illetve a kopásállóság növelésére alkalmazzák. A munkadarab és az alakító görgő érintkezésének geometriájából következik, hogy viszonylag kis erővel nagy felületi nyomást lehet elérni, ami elősegíti a képlékeny alakváltozások mélyebb behatolását az anyagba. Felkeményedés következik be, javul az érdesség, változik a méret [13].



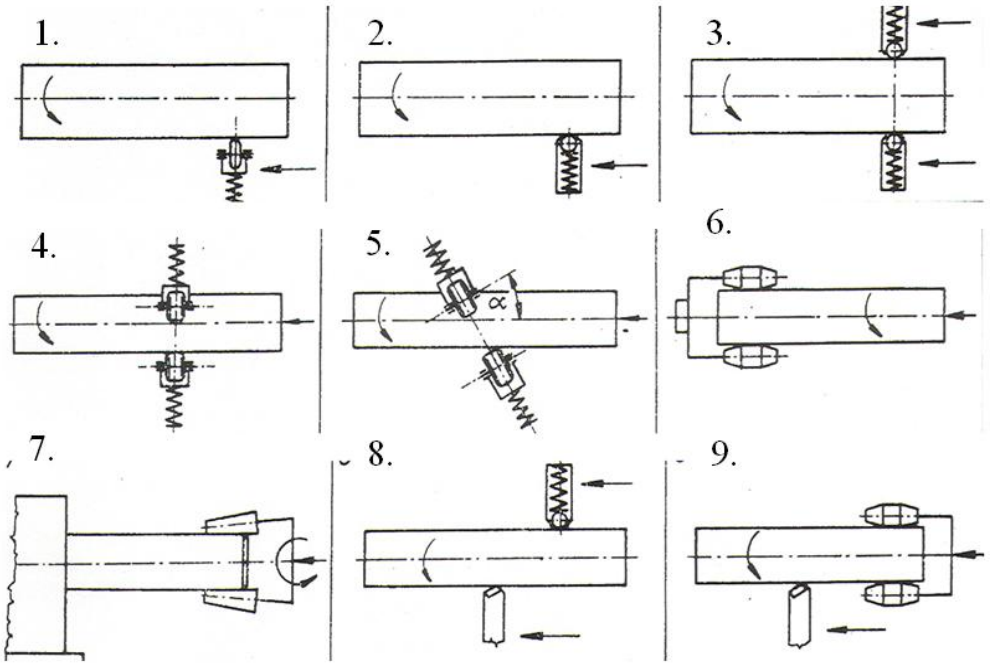
2. ábra

Felülethengerlés jellegzetes szerszámai [1]

A szerszám anyaga szerszám- vagy golyóscsapágyacél. A szerszámra ható nyomóerő 200-20000 N, amely rugóval, hidraulikus vagy pneumatikus munkahengerrel hozható létre. A hengerlés sebessége lényegesen nem befolyásol, ezért 30-90 m/min értékek között

változtatható. A felületi érdesség a görgőzés hatására lényegesen csökken, de befolyásolja az előző művelettel készített érdesség is. Függ továbbá a szerszám lekerekítési sugarától, a nyomóerőtől és a szerszám tengelyének hajlásszögétől. A görgőző erő növekedésével kezdetben csökken, majd egy minimális érdesség elérése után nő a felület érdessége. A felülethengerlés előtolása nagyértékben befolyásolja a felületi érdességet. A fogások számával szintén befolyásolható a felület érdessége, de sok fogás a felület roncsolódását okozhatja [4].

A hengerléssel szilárdított felület keménysége az acél széntartalmától függően 240-320 HV közötti érték. A hengerelt felületben nyomófeszültségek maradnak vissza, ezért az alkatrész kifáradási határa növekszik.



1. egygörgős hengerlőszerszám, 2. egygolyós hengerlőszerszám,

3. kétgolyós hengerlőszerszám, 4. kétgörgős hengerlőszerszám,

5. kétgörgős hengerlőszerszám (ferde elhelyezésű),

6. kétgörgős simító hengerlőszerszám,

7. kétgörgős kúpos simító hengerlőszerszám,

8. esztergálás és egygolyós szerszámmal való hengerlés,

9. esztergálás és simító felülethengerlés

3. ábra

Jellegzetes felülethengerlési eljárások [1]

2.2. Ütőtestes felületszilárdítás

A felületminőség változását a megmunkálandó anyagnál keményebb anyagú, szabad vagy korlátozott mozgású ütőtestek és a szilárdítandó felület ütközésekor végbemenő

dinamikus kölcsönhatás eredményezi. Emiatt szokás dinamikus szilárdításnak is nevezni ezen eljárásokat.

A szabadon mozgó ütőtestes megmunkálás a sörétezés, amikor a 0,5-3 mm átmérőjű szemcsékből álló sörétnyalábot gravitációs úton, 3-4 m magasból, vagy pneumatikus vagy, mechanikus berendezésekkel 5-150 m/s sebességgel ütköztetünk a munkadarab felületére (4. ábra). A szemcsék anyaga öntöttvas vagy nagy széntartalmú acél. A sörétezett felület érdessége függ a munkadarab keménységétől, a sörét minőségétől és méretétől, a sörétezés idejétől. Elérhető átlagos érdesség Ra = 25-5 μm. A felkeményedett réteg vastagsága 0,2-0,5 mm. Sörétezett laprugók kifáradási szilárdságnövekedése elérheti az 50%-ot is. A kényszermozgású ütőtestes megmunkáláskor a szerszám általában egy forgó tárcsa kerületén korlátozott mozgású golyó (5. ábra) vagy gyűrű alakú ütőtestekkel (6. ábra) dolgozik. Az ütőtestek elmozdulása sugárirányban kb. 1 mm.

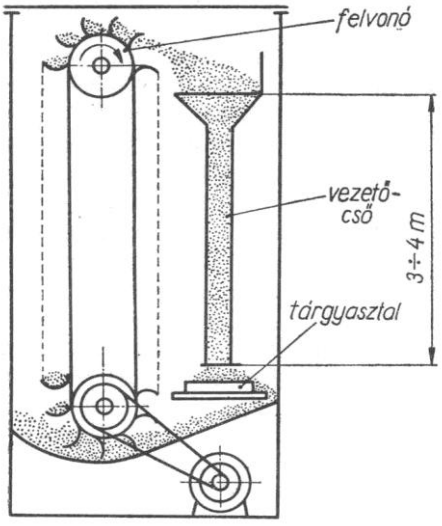
Az eljárással sima felület készíthető (Ra = 0,02-0,05μm). A szerszám kerületi sebességét a munkadarab anyagától függően választjuk meg:

acélokhoz v_{sz} = 12-40 m/s

öntöttvashoz v_{sz} = 15-20 m/s

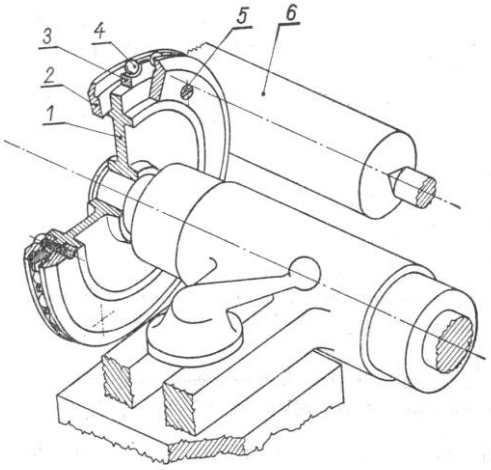
színesfémekhez v_{sz} = 8-12 m/s

Az ütőtestek és a munkadarab felületének átfedése f = 0,05-0,8 mm. A fajlagos ütésszám szokásos értéke 30-70 ütés/mm^2. Az előtolás és az ütés sebességét a szerszám határozza meg. Külső hengeres felületek megmunkálásához a szerszámot köszörűgépre vagy esztergán szánköszörűre foghatjuk fel, mivel az ütőerő viszonylag kicsi (5-20 N) [4].



4. ábra

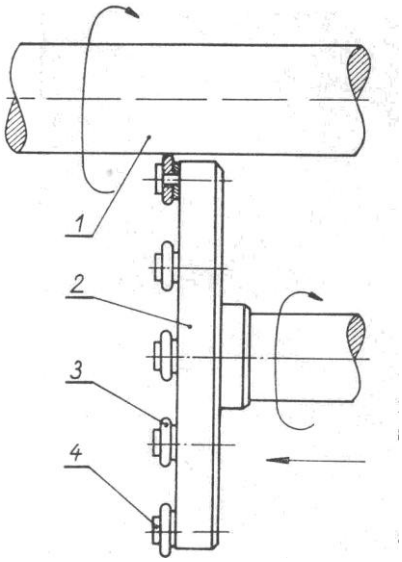
Gravitációs sörétező berendezés [1]



1. alaptárcsa, 2. oldaltárcsa, 3. golyóskosár, 4. acélgolyó ütőtest, 5. szorítócsavar, 6. munkadarab

5. ábra

Ütőtestes (acélgolyós) felületszilárdítás [1]



1. munkadarab, 2. alaptárcsa, 3. alakos gyűrű ütőtest, 4. felfogócsap

6. ábra

Tömörítőszerszám alakos gyűrű ütőtestekkel [1]

2.3. Felületvasalás

Felületvasaláskor a felület érdességének csökkenését és a felületi réteg szilárdítását a megmunkálandó anyagnál jóval keményebb anyagú szerszám és a szilárdítandó felület csúszási súrlódásakor végbemenő kölcsönhatása jellemzi. A szerszám anyaga lehet edzett acél, keményfém, ásványi kerámia, természetes vagy mesterséges gyémánt. A hidegalakítás

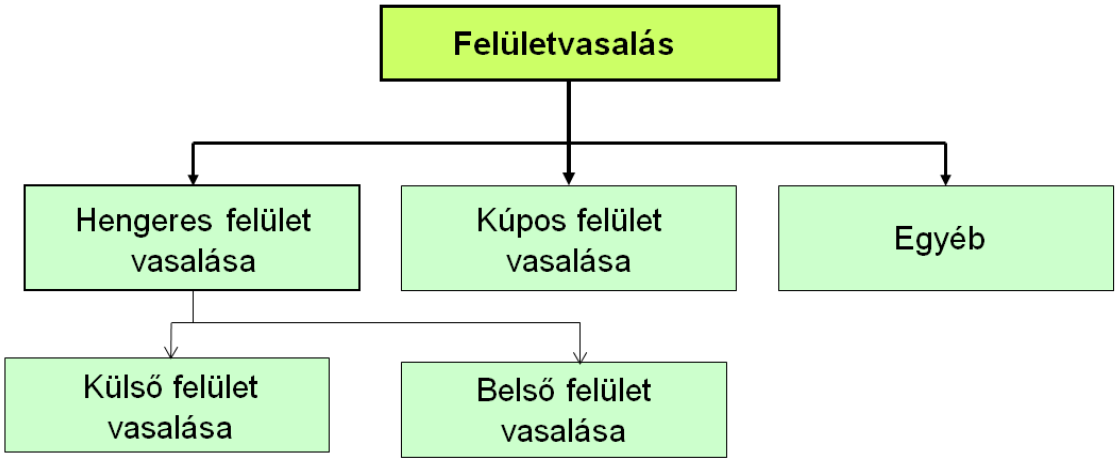
megvalósulásához szükséges nyomás a szerszám működő és a munkadarab alakítandó felülete közötti átfedés hatására jön létre [1], [9], [10].

Külső és belső hengeres felületek nagy pontosságú és kis érdességű, működő felületeinek befejező művelete. Az alakítóelem és a munkadarab felületének statikus érintkezése révén bekövetkezett képlékeny alakváltozás tipikusan 0.01-0.2 mm vastagságú felületi rétegben valósul meg.

A folyamat a forgácsolás utáni felületi zónában lévő húzó maradó feszültséget nyomó maradó feszültséggé alakítja, mely javítja a mechanikai tulajdonságokat. A felületi feszültség javulása főleg arra szolgál, hogy a munkadarab dinamikus terhelés alatti kifáradási viselkedését javítsa. Továbbá, a folyamat az esztergálás utáni húzó maradó feszültséget áttranszformálja nyomó maradó feszültséggé.

A megmunkálás célja, kiterjedése szerint megkülönböztetünk simító vasalást (érdesség-csökkentés kis átfedéssel), felület-vasalást (alakítás meghatározott mélységben) és alakító vasalást (alakítás teljes keresztmetszetben).

A felületvasalást külső hengeres felületek, furatok felületszilárdítására használják, fő alkalmazási területét pedig az autóipari főtengelyek, a belső és külső csapágy futógyűrűk, stb. alkotják (7. ábra).



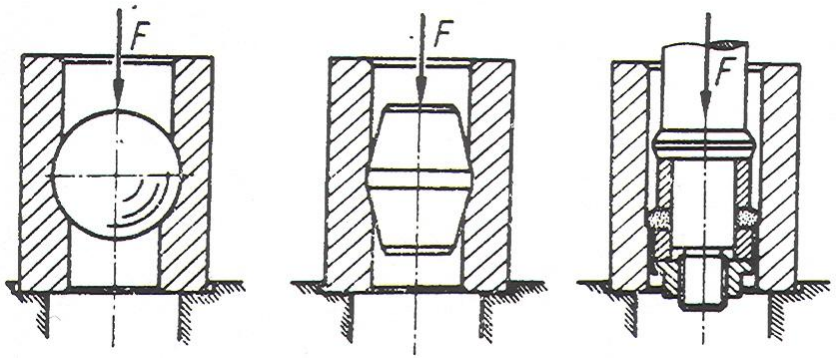
7. ábra

Vasalási eljárások osztályozása

2.3.1. Belső hengeres felületek vasalása

A furatvasalás célja a méretpontosság, a felületi simaság, a kopásállóság és a kifáradással szembeni ellenállás fokozása. A furatvasalásra merev szerszámok használhatók, ezeket átnyomják vagy áthúzzák a furaton.

A szerszám anyaga színesfém alkatrészekhez G03, G04 jelű golyóscsapágyacél vagy szerszámacél, acélokhoz keményfém (8. ábra). A furatvasaláskor a felületi terhelést a szerszám és a furat túlfedése, a munkadarab anyaga és geometriai kialakítása szabja meg.



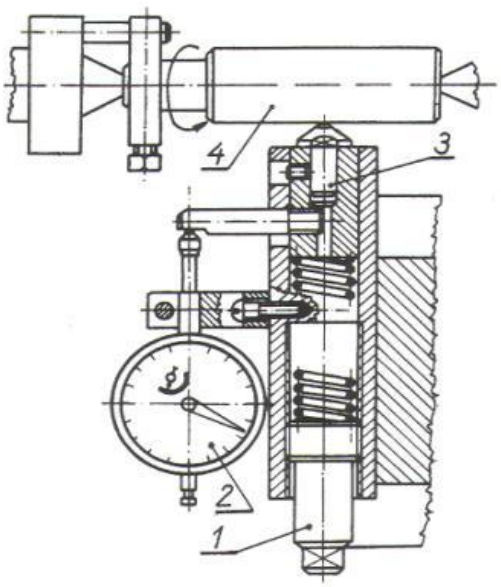
8. ábra

Acélgolyó (a), merev vasalótest (b), szerelt (c) vasalószerszám [1]

2.3.2. Külső hengeres felületek vasalása

Tengelyek nagy pontosságú és kis érdességű működő felületeinek befejező műveletei a köszörülést követő tükörsimítás, vagy fényesítés. Ezek a műveletek számottevően csökkentik a köszörült felület érdességét, de lényegében csak kis mértékben változtatják meg a felület alatti réteg tulajdonságait. Ezeknek a viszonylag alacsony termelékenységű és költséges megmunkálásoknak esetenkénti helyettesítésére, a külső hengeres felületek gyémántszerszámmal történő vasalását alkalmazzák. A mesterséges illetve természetes gyémánt ilyen alkalmazását az teszi lehetővé, hogy súrlódási tényezője fémfelületekkel történő súrlódáskor igen kis értékű, valamint, hogy az igen kemény vasalószerszámmal a felület kis érdességűvé változtatható.

Külső hengeres felületek vasalását hagyományos egyetemes, vagy modern CNC esztergákon végzik a gyakorlatban. A gyémánt vasalófejet hordozó szerszámbefogót a késtartóba fogják be (9. ábra).

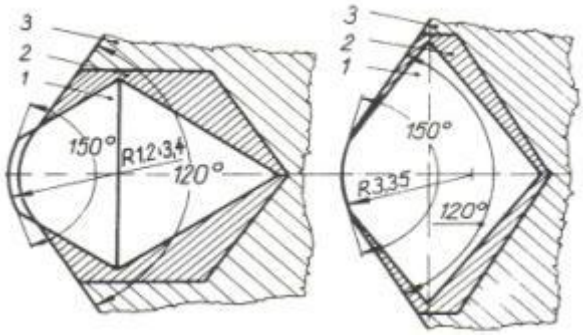


1. feszítőcsavar, 2. mérőóra, 3. gyémánt végű foglalat, 4. munkadarab

9. ábra

A gyémántvasalási művelet vázlata [1]

A gyémánt vasalófejben alacsony olvadáspontú fémmel rögzítik a vasalógyémántot, amelyet hengeresre vagy szférikusra csiszolnak (10. ábra).



1. vasalógyémánt, 2. befoglaló-fém, 3. foglalat

10. ábra

A vasalógyémánt [1]

Vasalás céljaira 1-2 karát nagyságú gyémántokat alkalmaznak. A gyémánt befogásakor figyelembe kell venni, hogy kopásállósága különböző irányban eltérő.

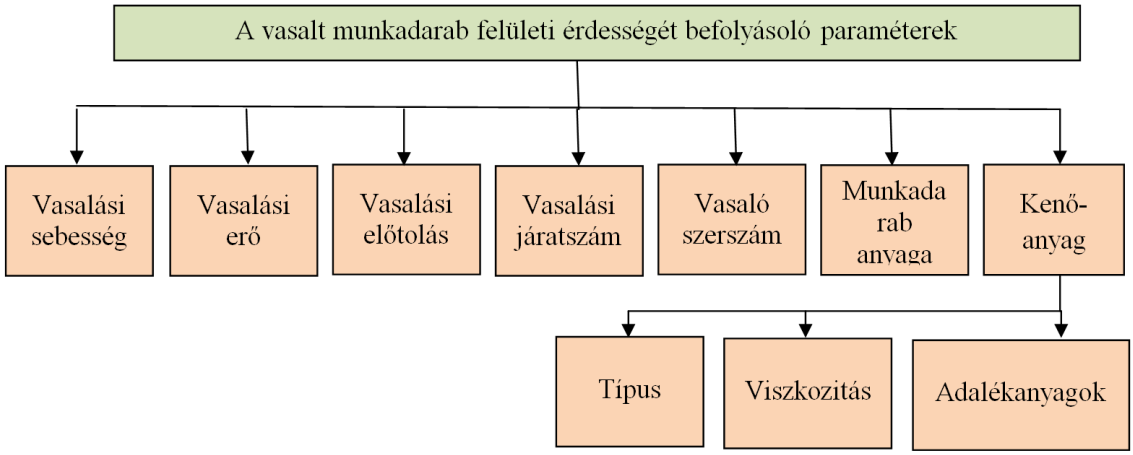
Hengeresre munkált gyémánt vasalószerszám alkalmazásakor a megmunkálás hatékonysága függ a gyémánthenger tengelye és a hengeres felület tengelye közötti szög nagyságától. Mesterséges gyémánttal végzett kísérletek tapasztalatai szerint a tengelyek közötti optimális szög nagysága 120° [1], [2].

2.3.3. Felületi tulajdonságokat befolyásoló paraméterek

Több kutató kísérletileg tanulmányozta a vasalási folyamat során alkalmazott technológiai paraméterek felületi minőségre gyakorolt hatását [8], [17]. A munkadarabban lévő, a vasalási folyamatot megelőző, illetve követő maradó feszültségek, szintén vizsgálat tárgyát képezték. Az eredmények szerint a felület nyomó maradó feszültsége, amely az alkatrész működési idejének meghosszabbítása miatt előnyös, a vasalási folyamatból következik. Azt tapasztalták, hogy a vasalási járatszám egy további fontos paraméter a megmunkált alkatrész felületi érdessége és keménysége szempontjából.

Megvizsgálták továbbá, hogy milyen hatással van a folyamat eredményére a vasalószerszámban lévő gyémánt golyó átmérőjének és az alkalmazott különböző olajminőségeknek. A folyadéknyomással generált érintkezési erő végső érdességre tett hatását szintén bemutatták. Az eredmények szerint, a folyamatban lévő nyomás hatása jelentős, akárcsak a keményesztergálás utáni eredeti érdesség. Luca és társai pedig beszámoltak arról, hogy acél munkadarabok forgácsképződés nélküli vasalása csapágyacél vagy wolframkarbid golyókkal eredményesebb a forgácsolt barázdák lesimítása szempontjából [7].

Tehát a felületi tulajdonságokat befolyásoló paraméterek: a vasalási sebesség, erő, előtolás, vasalási ismétlési szám, vasalórész anyaga, munkadarab anyaga, a vasalógyémánt mérete és a kenőanyag.



11. ábra

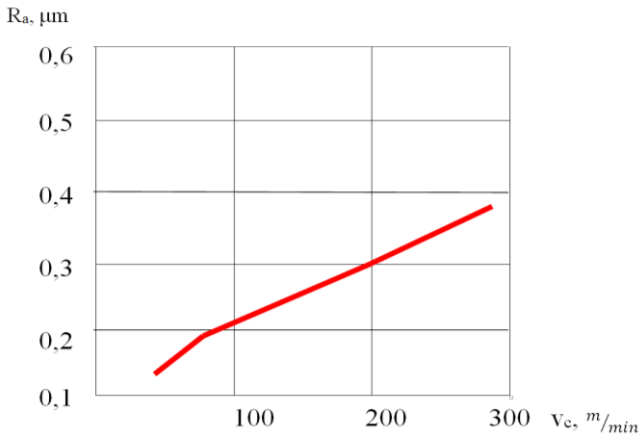
A befolyásoló paraméterek [17]

A szakirodalomban már vannak vizsgálati eredmények bizonyos hőkezeltségű (keménységű) munkadarabok vasalására, különböző technológiai paraméterek alkalmazása

esetén. Ezekből ízelítőként néhány fontos (martenzites acél megmunkálása során kapott) eredmény bemutatása következik.

A vasalási sebesség hatása

Az R_a felületi érdesség és a v_c vasalási sebesség közötti kapcsolatot a 12. ábra mutatja.



12. ábra

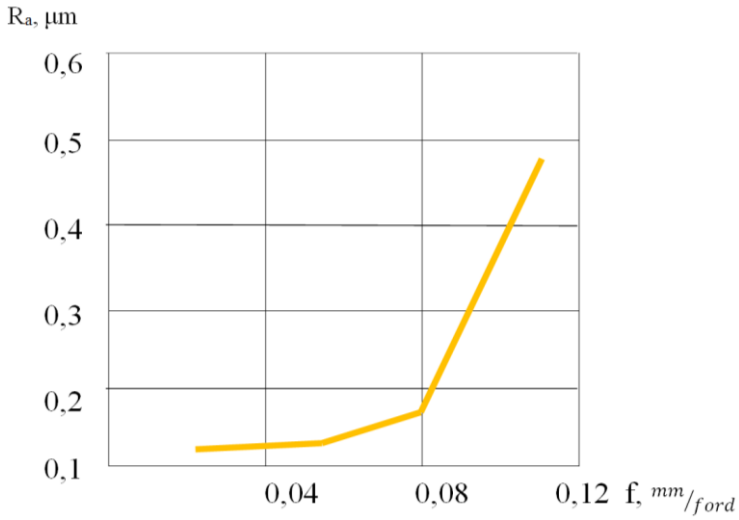
A vasalási sebesség hatása [1]

A görbe emelkedését az is befolyásolta, hogy a vasalási zónában a sebesség növekedésével a hőmérséklet is növekszik. Ez csökkenti a mozgásból adódó nyírási ellenállást és a diszlokációk növekedését a fémben, a rugalmas deformáció pedig könnyebben és nagyobb mértékben növekszik. Ebből következik, hogy a mikroszkopikus árkok, kiemelkedések a munkadarab felületén nagymértékben kiegyenlítődnek, vagyis a sebesség növelésével csökken a felületi érdesség értéke [10].

A vasalási előtolás hatása

Az előtolás (f) felületérdességre gyakorolt hatása a 13. ábrán figyelhető meg.

Az ábrán látható, hogy a felületi érdesség nem romlik számottevően az előtolás növekedésének függvényében, amíg az el nem ér egy Ra_{min} értéket. Ezután az érdesség értéke rohamosan növekszik az előtolás növelésével [1].



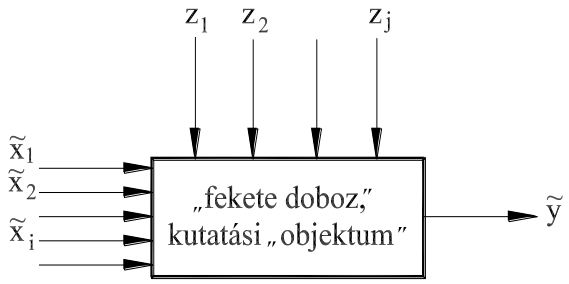
13. ábra

Az előtolás hatása [1]

3. FAKTORIÁLIS KÍSÉRLETTERVEZÉS

3.1.1. A karakterisztikus együtthatók módszere

Egy kísérlet leírására az ábrán látható vázlat felhasználható.



14. ábra

A kísérlettervezés alapmodellje [6]

$\tilde{y}$ - a fekete doboz kimenete (függő változó)

$\tilde{x}_i$ - a fekete doboz bemenete, a befolyásoló tényezők vagy jellemzők vagy faktorok (vagy független változó)

z_j - a fekete doboz zavaró tényezői

Megjegyzés: a fekete doboznak több kimenete is lehet, de mi csak egyet tüntettünk fel.

A kísérlet célja az $\tilde{y}$ függő változó és az $\tilde{x}_i$ független változó közötti függvénykapcsolat meghatározása.

Az $\tilde{y} = \varphi(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, ..., \tilde{x}_i, ...\tilde{x}_f)$ függvényt válaszfüggvénynek nevezik.

A kísérletekben mindegyik független változó (faktor) több értéket vehet fel. Ezeket az értékeket szinteknek nevezzük.

A lehetséges egymástól független kísérleti beállítások száma:

$$n=p^f \tag{2}$$

ahol:

p - szintek száma

f - faktorok száma

Elterjedt az a gyakorlat, hogy az egyik faktor értékét szintenként változtatva, a többit állandó értéken tartva mérik a függő változót. Így az összes elvégzendő kísérletek száma igen nagy lehet [5].

Például egy forgácsolószerszám élettartamának meghatározásánál, ha 5 függő változót és 5 független változót veszünk figyelembe, $n=5^5$ kísérletet (mérést) kell elvégezni, kiértékelni. Ha minden kísérleti beállítást háromszor megismétlünk, akkor a kísérleteink száma $\Sigma n=9375$ (~tízezer). Így az eredmények kiértékelése nehéz.

Aktív kísérletben az összes vizsgálandó faktort csak két, esetleg három szinten állítják be és előre meghatározott módon variálják azok értékeit. A függő változó értékeit (a mérési adatok) matematikai statisztikai módszerekkel történő feldolgozása útján határozzák meg. Az ilyen kísérlettervezést faktoriális kísérlettervezésnek nevezzük. A faktoriális kísérlettervezés felhasználható olyan aktív kísérletek tervezéséhez, melynek célja:

empirikus függvények meghatározása

optimális feltételek (szélső értékek) keresése

Jelen esetben a módszert az empirikus függvény meghatározásához alkalmazzuk.

3.2. A faktoriális kísérlettervezés empirikus függvények meghatározása

Jelölje a faktorokat természetes mértékben: $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, ..., \tilde{x}_i, ... \tilde{x}_f$ a függő változót pedig az

$$\tilde{y} = \varphi(\tilde{x}_i) \tag{3}$$

függvényt.

a) Az (3) ismeretlen, több változós függvényt polinommal approximáljuk. A válaszfüggvényt helyettesítő és azt kielégítően közelítő polinomot természetes mértékben a következő formában keressük:

$$\tilde{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{f} \beta_i \tilde{x}_i + \sum_{i<j}^{*} \beta_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j + \sum_{i=1}^{f} \beta_{ii} \tilde{x}_i^{\,2} + \dots \tag{4}$$

ahol:

f - faktorok száma

$x_i \cdot x_j$ pl. $x_1 \cdot x_2$ vagy (x_1x_2 és x_1x_3 és x_2x_3), ezért nem lehet paraméteresen megadni a második összefüggés felső korlátját.

A közelítésre legegyszerűbb a polinomot felhasználni, mert minél alacsonyabb fokú a polinom, annál kevesebb az ismeretlen, így a meghatározandó együtthatók száma és a szükséges kísérleti beállítások száma is.

b) A továbbiakban minden faktornak kijelöljük azt a tartományát, amelyen belül változtatása reális $\tilde{x}_{ia} \le \tilde{x}_i \le \tilde{x}_{if}$. Ennek az intervallumnak a közepe lesz az alapszint (nullaszint): $\tilde{x}_{i0} = \frac{1}{2}(\tilde{x}_{ia} + \tilde{x}_{if})$.

c) Az alapszintek megválasztása után megválasztjuk a $\Delta\underline{\tilde{X}}_i$ variációs intervallumot. Egy faktor variációs intervallumának azt a számot nevezzük, amelyet az alapszinthez hozzáadva a faktor felső szintjét, az alapszintből levonva az alsó szintjét kapjuk meg. $\Delta\tilde{x}_i = \frac{1}{2}(\tilde{x}_{if} + \tilde{x}_{ia})$. A kísérleti feltételek felírását és a kísérleti adatok feldolgozását egyszerűsíthetjük úgy, hogy a felső szintnek a +1, az alsó szintnek a –1, és az alapszintnek a ∅-t feleltetjük meg.

Folytonos értékkészletű faktorok esetén ez megtehető az

$$x_i = \left(\frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{\Delta\tilde{x}_i} \right) \tag{5}$$

transzformáció alkalmazásával.

A felül jelzés nélküli x_i értékek a faktorok transzformált értékei

d) Ezzel a transzformált értékekkel a (4) közelítő polinom a következő alakú lesz:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{f} b_i x_i + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{f} b_{ii} x_i^{\,2} + \ldots \tag{6}$$

ahol $\underline{b}_0$, $\underline{b}_i$, $\underline{b}_{ii}$ együtthatók a (4) polinom értékmérői $b_i \rightarrow ß_i$, $b_{ij} \rightarrow ß_{ij}$, $b_{ii} \rightarrow ß_{ii}$, $b_0 \rightarrow \left(\beta_0 + \sum_i \beta_{iii} + \ldots \right)$ $\underline{y}$ pedig az $\underline{\tilde{y}}$ függő változó értékmérője.

e) Az (6) polinom $\underline{b}$ együtthatóinak meghatározása az x_i faktorok különböző értékeinek beállítása mellett elvégzett kísérletek eredményeinek felhasználásával történik.

A kísérleteket előre elékészített kísérlet terv alapján célszerű elvégezni. A kísérlet terv az $\underline{x}_i$ faktor kombinációk táblázatban rögzített formája $\underline{\underline{X}}=[x_{ki}]$,

ahol:

n - a beállított kísérletek (6) össz száma

k=1, 2, …, n; i=1, 2, …, f

x_{ki}=(+1V-1), de x_{ko}=+1

f) A kísérlet terv alapján elvégezzük a kísérleteket véletlenszerűen választott, randomizált sorrendben.

Ha minden kísérleti beállítást m-szer ismételünk meg, akkor a faktor kombinációkhoz tartozó mérési eredmény:

$$\underline{\underline{Y}}=[y_{kl}]_{mm},\ l=1, 2, \ldots, m \qquad (7)$$

A mérési eredmények átlagértékei pedig

$$\overline{\underline{\underline{Y}}} = \left[\overline{y_k}\right]_n, \text{ ahol } \overline{y_k} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m} y_{kl}$$

(8)

g) A mérési eredmények átlagértékeinek ismeretében a polinom együtthatóinak meghatározása az n számú normál egyenlet megoldásával történik:

$\underline{\underline{B}}\cdot\underline{\underline{X}}=\underline{\underline{Y}}$ $/\underline{\underline{X}}^T$

$\underline{\underline{B}}\cdot\underline{\underline{X}}^T\cdot\underline{\underline{X}}=\underline{\underline{X}}^T\cdot\underline{\underline{Y}}$

$$\underline{\underline{B}}=(\underline{\underline{X}}^T\cdot\underline{\underline{X}})^{-1}\cdot\underline{\underline{X}}^T\cdot\underline{\underline{Y}}=\frac{\text{adj}\left(\underline{\underline{X}}^T\cdot\underline{\underline{X}}\right)}{\left|\left(\underline{\underline{X}}^T\cdot\underline{\underline{X}}\right)\right|}\cdot\underline{\underline{X}}^T\cdot\underline{\underline{Y}}$$

ahol:

$\underline{\underline{X}}^T$ az $\underline{\underline{X}}$ mátrix transzponáltja

A műveletek elvégzése után megkapjuk a polinom együtthatóit

$$\underline{\underline{B}} = \left[b_i\right]_n = \left[\frac{\sum_{k=1}^{n} x_{ki}\,\overline{y}_k}{\sum_{k=1}^{n} x_{ki}^{\,2}}\right]_n \qquad (9)$$

Mivel x_{ki}=(+1V-1) ezért x_{ki}^2=1 és $\sum_{k=1}^{n} x_{ki}^{\,2} = n$

Így az (6) polinom együtthatói a következők lesznek:

$$b_0 = \frac{\sum_{k=1}^{n} \bar{y}_k}{n}, \quad b_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} x_{ki} \bar{y}_k}{n}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n} x_{ki} x_{kj} \bar{y}_k}{n} \tag{10}$$

h) Statisztikai hipotézis vizsgálatokkal igazolni kell, hogy

a kísérletek megismételhetősége

az együtthatók értékeinek egyértelműsége

a választott polinom adekvát volta

a megkívánt (általában 95%-os) megbízhatósági szinten teljesül-e

Ezekhez a vizsgálatokhoz először a válaszfüggvény függő változójának szórás négyzetét számítjuk ki:

$$s^2(y) = \frac{\sum_{k=1}^{n} s_k^{\,2}}{n}, \qquad \text{ahol} \quad s_k^{\,2} = \frac{\sum_{l=1}^{m} \left(y_{kl} - \bar{y}\right)^2}{m-1}$$

$s^2(y)$ ismeretében a kísérletek megismételhetőségét a Cochran kritériummal ellenőrizzük.

$$G = \frac{\left(s_k^{\,2}\right)\max}{\sum_{k=1}^{n} s_k^{\,2}} \tag{11}$$

Ha a $\underline{G} < \underline{G}_{tábl}^{(0,05;\ ni/m-1)}$ teljesül, akkor a kísérleti beállítások megismétlésének száma elegendő.

Az együtthatók egyértelműségét a Student kritériummal ellenőrizzük.

$$t_i = \frac{|b_i|}{\sqrt{\frac{s^2(y)}{n}}} \tag{12}$$

Ha $t_i > t_{tábl}^{(0,05;\ njm-1)}$ teljesül, akkor az együttható egyértelmű, ha nem teljesül, az együttható értékét nullával tesszük egyenlővé ($b_i=0$), mert a szórás nagyságrendjébe esik.

A modell adekvát voltát a Fischer kritériummal ellenőrizzük.

$$F = \frac{s^2 ad}{s^2(y)}, \text{ ahol } s^2_{ad} = \frac{1}{n-f-1} \sum_{k=1}^{n} (\bar{y}_k - y_k)^2 \tag{13}$$

ahol:

y_2 a $\underline{k}$ kísérleti beállítás faktor kombinációjához tartozó (5) polinom számított értéke.

Ha az $\underline{F}<F_{tábl}^{(0,05;\ n-f-1;\ n)}$ teljesül, akkor a meghatározott polinom adekvát ellenőrző esetben nem.

Ha a polinom nem bizonyul adekvátnak, akkor a faktorok variációs intervallumának csökkentésével vagy magasabb fokú polinom választásával tehetjük azzá. Természetesen ez új kísérlettervet és kísérletsorozatot igényel [5], [6].

A Taguchi módszer hatékony, aktív kísérlettervezési módszer. A Taguchi módszer használata sok irodalomban megtalálható a gyémántvasalás kutatásában is, így a [8] és [17] irodalmakban is.

Dolgozatomban én is a Taguchi-féle teljes faktoriális kísérlettervet alkalmazom. A vizsgálat célja azon függvénykapcsolat meghatározása volt, hogy hogyan függ a mért 3D-s felületérdességi paraméterekből alkotott felület javulási viszonyszám a vasalás technológiai paramétereitől különböző viszkozitású kenőanyagok esetén.

4. KÍSÉRLETI MUNKA

4.1. Kísérleti körülmények

4.1.1. A vasalandó munkadarab jellemzői

A vasalandó munkadarab anyagminősége és keménysége széles tartományban változhat. Vizsgálatunk tárgya C45 jelű edzetlen acél volt, melynek vegyi összetételét az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat

Vegyi összetétel (térfogat %)

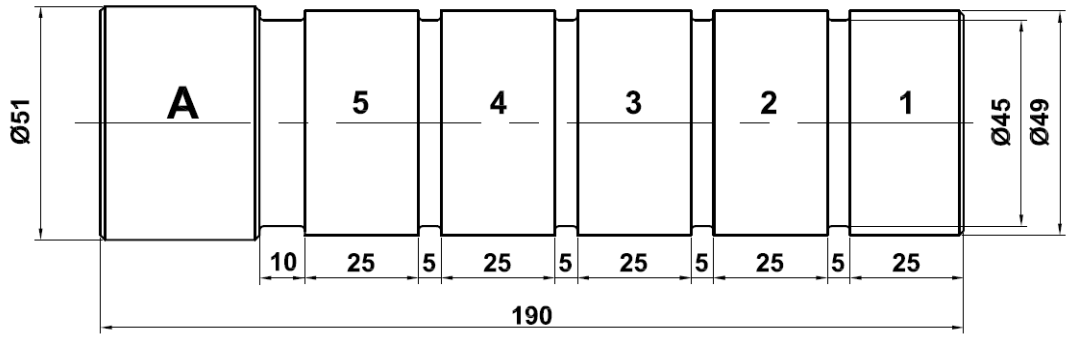
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co	Egyéb
0,45	0,3	0,7	-	-	-	-	-	-	-/S=0,03

A kedvező mechanikai tulajdonságokkal rendelkező (2. táblázat) nemesíthető szerkezeti acél anyagválasztását az indokolta, hogy közepes igénybevételű, kopásnak kitett alkatrészeket készítenek főleg belőle.

2. táblázat

Mechanikai tulajdonságok

Tulajdonságok	Érték	Mértéke.
Rugalmassági modulus	$2{,}1*10^{11}$	N/m^2
Poisson's szám	0,28	N/A
Nyírási modulus	$7{,}9*10^{10}$	N/m^2
Sűrűség	7800	kg/m^3
Húzószilárdság	$7{,}5*10^{8}$	N/m^2
Folyáshatár	$7{,}5*10^{8}$	N/m^2
Hővezető-képesség	14	W/(mK)
Fajhő	440	J/(kgK)



15. ábra

A próbadarab geometriai méretei

4.1.2. A megmunkáláshoz alkalmazott szerszámgép

A vasalási műveleteket a Gyártástudományi Intézet műhelyébe telepített OPTIMUM (OPTIturn L-Series 440) típusú síkágyas CNC esztergagépen végeztük el.

16. ábra

Opti L-440 típusú síkágyas OPTIMUM CNC esztergagép

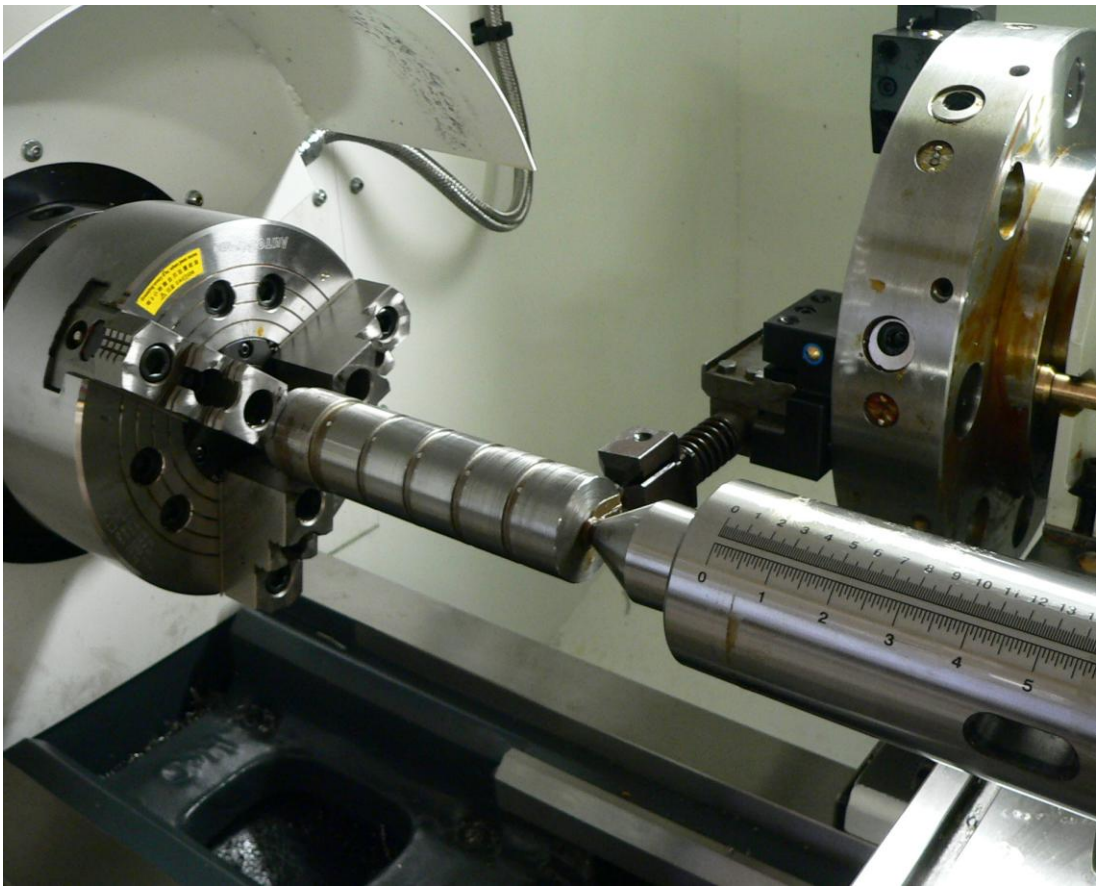
4.1.3. A vasalószerszám

A megmunkálás során szférikus felületű (10. ábra), R = 3,5 mm sugarú PCD szerszámot alkalmaztunk. Ezen szerszámtípus alkalmazásának nagy előnye, hogy nagyobb stabilitást kölcsönöz a vasalási rendszernek [10].

Ahogy az a 9. ábrán is látható, a szerszám két részből áll, az első rész egy bázis rész, mely befogható a CNC eszterga szerszámbefogójába, míg a másik rész a vasaló dolgozórész befogására szolgál.

A beépített rugó fontos szerepe, hogy az alkalmazott erőt (a munkadarab tengelyére merőleges erőt) létrehozza a vasalás folyamata alatt. A rugó által létrehozott vasalóerőt mérőórával, erőmérővel kalibráltam. Vasalás során az erőbeállítás így precízen megvalósítható volt.

.

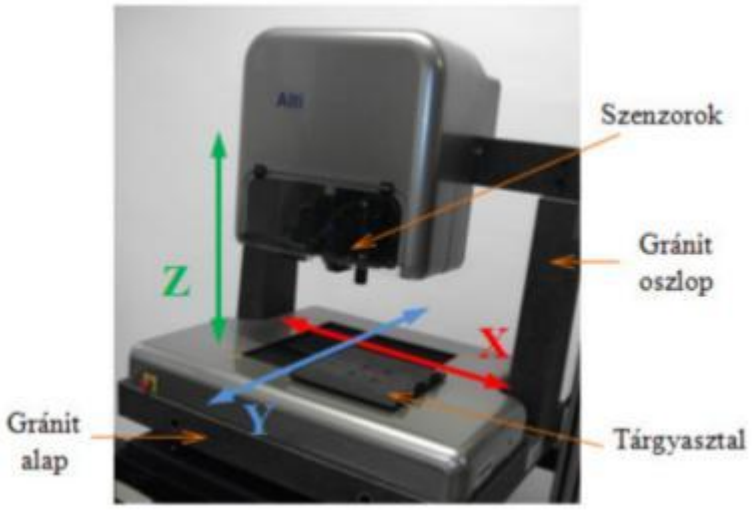


17. ábra

A megmunkálást végző szerszám

4.1.4. A felületi érdesség mérése

A próbadarabok felületi érdességének 3D-s mérését a Gyártástudományi Intézetben található AltiSurf 520 típusú 3D-s felületi érdességmérő-gépen végeztük el.



18. ábra

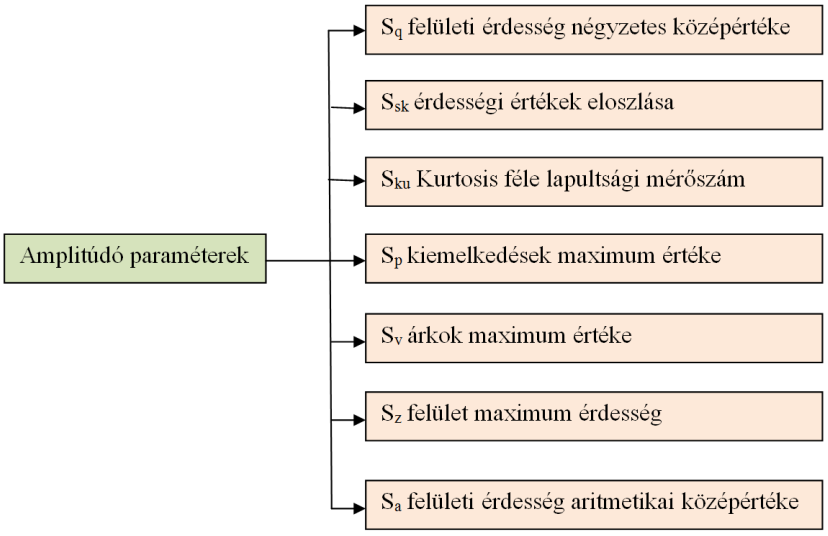
Az AltiSurf 520 mérőgép [12]

A gép alkalmazásának előnye, hogy a szoftver segítségével nem csak egy adott mérést végezhetünk el, hanem azokat egy beállításban egymás után is, azaz előre beprogramozhatunk egy mérési folyamatot, mint az abban szereplő lépések egymásutániságát. Ez azt jelenti, hogy egymás után több mérést definiálhatunk, illetve a mérések között tengelymozgásokat állíthatunk be előre, párbeszédablakokat, ciklusokat vagy ugrásokat definiálhatunk [12].
A konkrét méréseket az optikai mérőfejjel (2. szenzor) végeztük.

4.2. A kísérlet végrehajtása

Ahhoz, hogy kiértékeljük, hogy milyen hatása van a vasalási paramétereknek néhány hatékonysági jellemzőre, jelen esetben a felületi érdesség javulási tényezőjére, a Taguchi-féle teljes kísérlettervezéssel megtervezett kísérlettervet hajtjuk végre.

A 3D-s felületi érdességet jellemző paramétereket az ISO 25178 szabvány [18] öt nagy csoportba sorolja, ezek egyike az amplitúdó paraméter. Az ISO 25178 szabvány [18] szerint a 19. ábrán látható amplitúdó paramétereket 7 jellemző alkotja, melyek betűjelét és megnevezését is tartalmazza az ábra.



19. ábra

Amplitúdó-paraméterek

A 19. ábra utolsó felületi érdességi paramétere a felület középsíktól való eltérésének számtani középértéke az S_a.

Számítása [16]:

$$S_a = -\frac{1}{M \cdot N} \sum_{J=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \left| \eta(x_i, x_j) \right| \tag{14}$$

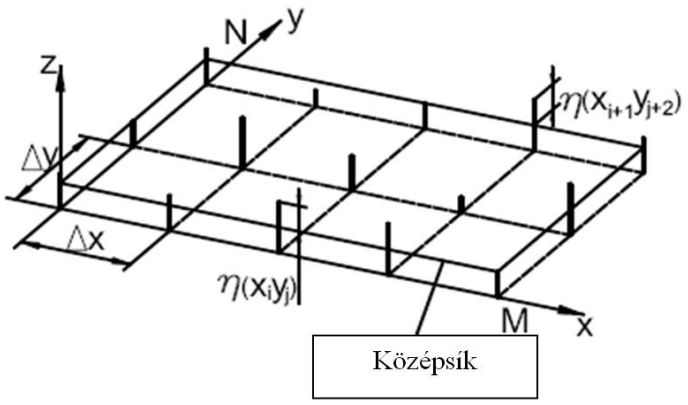
ahol:

M – az x tengelyirányú mintavételi pontok száma

N – az egymással párhuzamos letapogatási vonalak, vagyis az y tengely irányába eső mintavételi pontok száma

$\eta(x_i,y_j)$ – a j-dik sor i-dik pontjának, mint felületi pontnak a középsíktól mért távolsága

Lényege: a mintavételi felület középsíktól számított eltéréseinek abszolútértékeinek számtani középértéke. Matematikailag az $\eta(x_i,y_j)$ középsík körüli szórását fejezi ki (20. ábra) [14], [16].

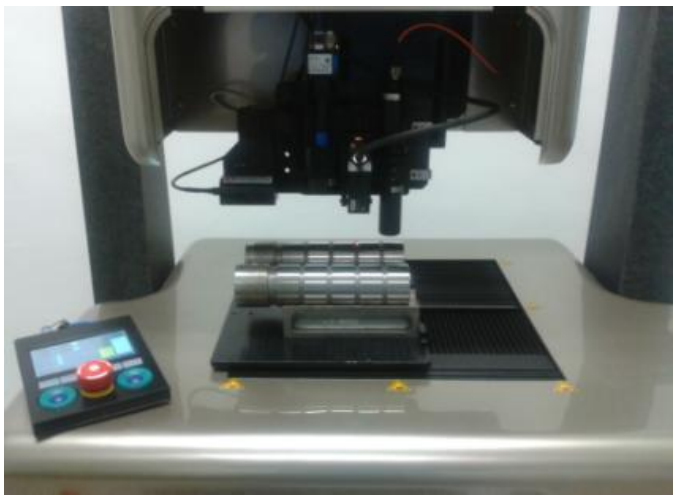


20. ábra

A fő dimenziók 3D-s kiértékeléskor

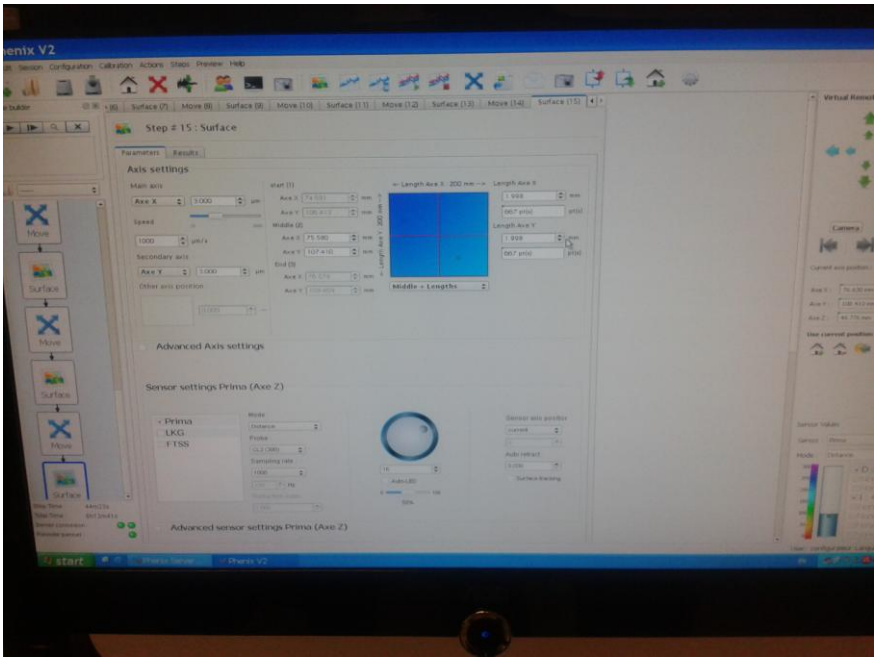
A kísérlet során két féle kinematikai viszkozitású kenőanyagot alkalmaztunk, egy 70 mm^2/s és egy 220 mm^2/s viszkozitásút, melyeket a továbbiakban Olaj1-nek, illetve Olaj2-nek jelölünk. A vasalási erő, előtolás és vasalási sebesség értékeit szintén két különböző szintre állítottunk be.

A vasalás előtti és vasalás utáni felületi érdesség mérését a már említett, AltiSurf 520 típusú 3D-s mérőgépen végeztük el. A 21. ábra egy mérés közbeni állapotot szemléltet.



21. ábra

A mérési folyamat

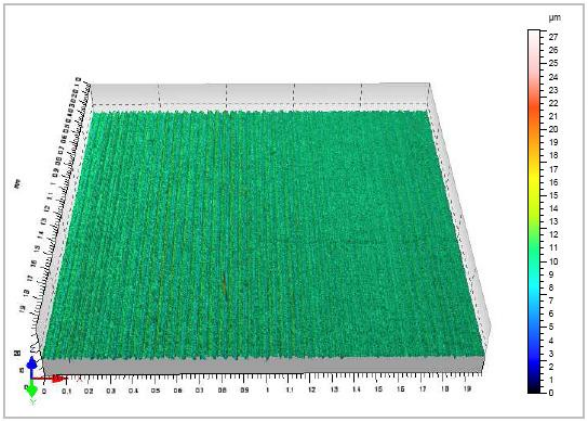


22. ábra

A mérés beállítása

A felület teljes jellemzéséhez topográfiai vizsgálatokat is végeztünk a próbadarab (15. ábra) meghatározott részein. A mérési értékek kiértékeléséhez az érdességmérő berendezés saját szoftverét (PhoeNix) használtuk. Az optikai szenzorral készített topográfiai felvétel jól mutatja a jellegzetes megmunkálási nyomokat, valamint a felület magasság irányú érdességváltozását és azok számszerűsíthető jellemzőit is szolgáltatja [14].

Ezen felvételek közül a hármas számmal jelölt próbadarab-rész egyik topográfiai képét és kiértékelésének eredményét mutatom be a 23. ábrán.



ISO 25178			
Height Parameters			
Sq	0.6527	µm	Root mean square height
Ssk	-0.3319		Skewness
Sku	6.5437		Kurtosis
Sp	17.3732	µm	Maximum peak height
Sv	10.2240	µm	Maximum pit height
Sz	27.5972	µm	Maximum height
Sa	0.4898	µm	Arithmetic mean height
Functional Parameters			
Smr	0.0002	%	Areal material ratio
Smc	0.8125	µm	Inverse areal material ratio

23. ábra

Vasalt érdességi 3D-s topográfia

Az analízis alá vont összesen 16 topográfia esetében a működési tulajdonságokat leginkább meghatározó amplitúdó paramétereket határoztuk meg és hasonlítottuk össze. A kísérletterv mátrixa a dimenziótlan rendszerben a 3. táblázatban van összefoglalva.

3. táblázat

A kísérletterv transzformált paraméterei

Sorszám	Transzformált paraméterek		
	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Ahol:

x_1 – sebesség

x_2 – előtolás

x_3 – vasalóerő értékeivel kapcsolatos

A (-1) érték jelöli a faktor alsó szintjét, míg a (+1) érték a felső szintjét.

A felületi érdesség javulási arányát az alábbi képlettel számítottuk ki:

$$\rho_{Sa} = \frac{Sa_u}{Sa_e} x100\% \qquad (15)$$

ahol:

ρ_{Sa} Az Sa paraméter javulási száma, egy dimenziótlan viszonyszám, mely jellemzi a megmunkálás hatására bekövetkező felületváltozást

Sa_e Vasalás előtti Sa paraméter

Sa_u Vasalás utáni Sa paraméter

Ha ρ_{Sa} értéke 1-nél kisebb, akkor az S_a felületérdességi paraméter javul a vasalás következtében.

Így a két különböző olaj és paraméterek szerinti alakulás az alábbi módon figyelhető meg.

5. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

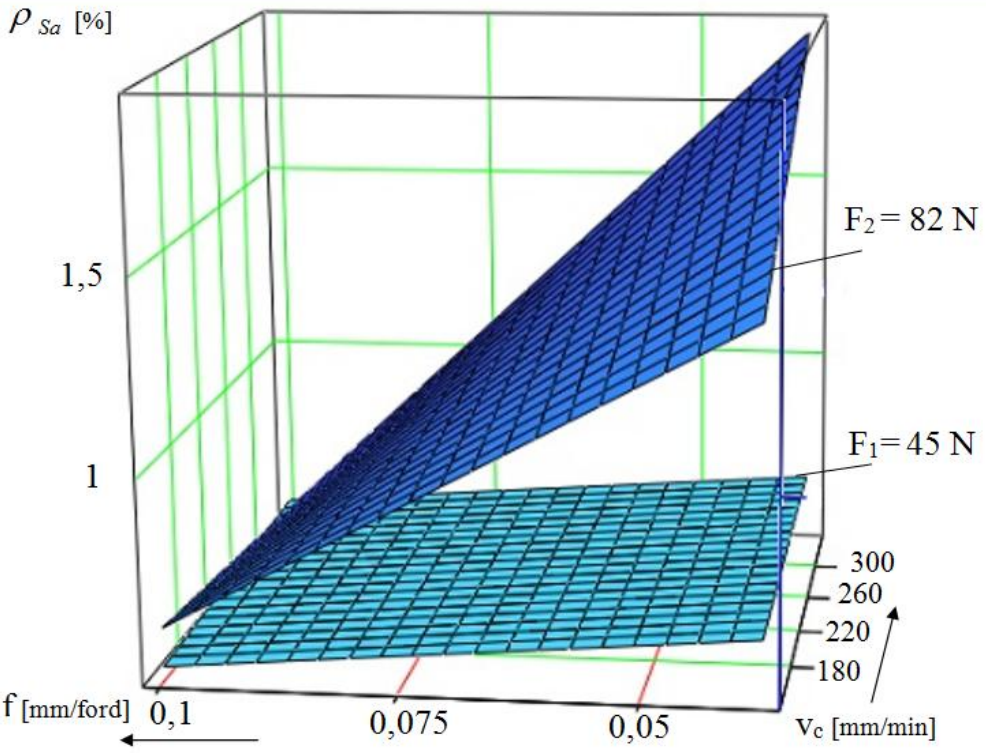
A mért kísérleti adatokból kiszámított ρ_{Sa} paraméterekből empirikus képletek alkothatók a faktoriális kísérlettervezés módszerének alkalmazásával. A számításokat a MathCAD program segítségével végeztük. A (16) képlet a v=70 mm^2/s kinematikai viszkozitású Olaj1 esetén vizsgált ρ_{Sa} felületi érdességjavulási paraméterre vonatkozik, míg a (17) egyenlet a v=220 mm^2/s kinematikai viszkozitású Olaj2-re.

4. táblázat

Olaj 1 (v=70 mm^2/s) alkalmazása esetén kapott értékek

v m/min	**f** mm/ford	**F** N	**Sa**		**ρ**
			Vasalás előtt Sa_e	**Vasalás után** Sa_u	
180	***0,05***	***45***	**0,3745**	**0,2373**	0,63
277	***0,05***	***45***		**0,2428**	0,65
180	***0,10***	***45***		**0,1917**	0,51
277	***0,10***	***45***		**0,2039**	0,54
180	***0,05***	***82***	**0,3652**	**0,5148**	1,41
277	***0,05***	***82***		**0,6941**	1,90
180	***0,10***	***82***		**0,2235**	0,61
277	***0,10***	***82***		**0,1909**	0,52

A (16) és (17) egyenletek szemléltetése a 24. és 25. ábrákon látszik.



24. ábra

Kísérleti eredmény Olaj1 (v=70 mm^2/s) használata esetén

$$\rho_{Olaj,1} = k_0^{Olaj,1} + k_1^{Olaj,1} v + k_2^{Olaj,1} f + k_3^{Olaj,1} F + k_{12}^{Olaj,1} v \cdot f + k_{23}^{Olaj,1} v \cdot F + k_{23}^{Olaj,1} f \cdot F + k_{123}^{Olaj,1} v \cdot f \cdot F \quad (16)$$

ahol:

$k_0^{Olaj,1} = -636.879$ $k_1^{Olaj,1} = 2.898$ $k_2^{Olaj,1} = 1.005 \text{x} 10^4$ $k_3^{Olaj,1} = 17.664$,

$k_{12}^{Olaj,1} = -40.291$ $k_{13}^{Olaj,1} = -0.077$ $k_{23}^{Olaj,1} = -254.005$ $k_{123}^{Olaj,1} = 1.031$.

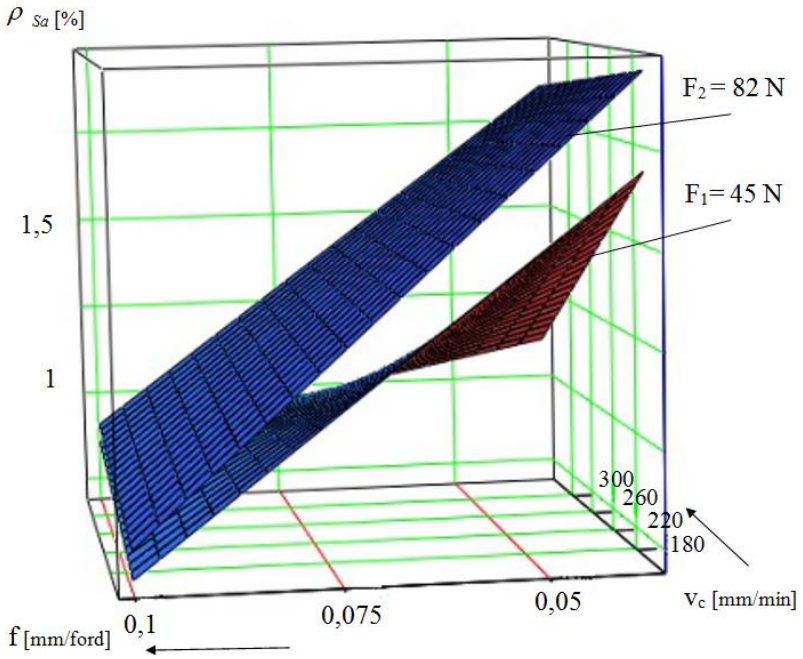
A 220 mm^2/s viszkozitású folyadék használata során kapott ρ_{Sa} értékek pedig az alábbiak.

5. táblázat

Olaj 2 (v=220 mm^2/s) alkalmazása esetén kapott értékek

v m/min	**f** mm/ford	**F** N	**Sa**		**ρ**
			Vasalás előtt Sa_e	**Vasalás után** Sa_u	
180	***0,05***	***45***	**0,3603**	**0,4898**	1,36
277	***0,05***	***45***		**0,3193**	0,89
180	***0,10***	***45***		**0,2085**	0,58
277	***0,10***	***45***		**0,2489**	0,69
180	***0,05***	***82***	**0,3733**	**0,5841**	1,56
277	***0,05***	***82***		**0,5510**	1,48
180	***0,10***	***82***		**0,2393**	0,64
277	***0,10***	***82***		**0,2725**	0,73

Az eredményeket itt is a MathCAD 2001 Professional programmal ábrázoltuk.



25. ábra

Kísérleti eredmény Olaj2 (v=220 mm^2/s) használata esetén

$$\rho_{Olaj,2} = k_0^{Olaj,2} + k_1^{Olaj,2} v + k_2^{Olaj,2} f + k_3^{Olaj,2} F + k_{12}^{Olaj,2} v \cdot f + k_{23}^{Olaj,2} v \cdot F + k_{23}^{Olaj,2} f \cdot F + \\ + k_{123}^{Olaj,2} v \cdot f \cdot F \quad (17)$$

ahol:

$k_0^{Olaj,2} = -636.879$ $k_1^{Olaj,2} = 2.898$ $k_2^{Olaj,2} = 1.005 \text{x} 10^4$ $k_3^{Olaj,2} = 17.664$,

$k_{12}^{Olaj,2} = -40.291$ $k_{13}^{Olaj,2} = -0.077$ $k_{23}^{Olaj,2} = -254.005$ $k_{123}^{Olaj,2} = 1.031$.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat bemutatta két különböző olaj alkalmazásával megvalósított külső hengeres felület gyémántvasalási kísérleteit, különböző technológiai paraméterek esetén. A felületi érdesség javulására meghatároztam egy viszonyszámot (ρ_{Sa}) mely a vasalás előtti és utáni paraméterek hányadosából képeztem. A Taguchi-féle teljes kísérlettervezés módszertanának használatával, vasalási kísérleteket végeztem a szférikus felületű vasalószerszámmal nem hőkezelt hengeres próbadarab felületén. Eredményeimet 3D-s diagramokban szemléltettem és a következő megállapításokat teszem:

- A vizsgált paraméterek közül a vasalóerő hatása a legdominánsabb a ρ_{Sa} felületi érdesség javulási jellemzőre.
- A vizsgált paramétertartományon belül a két különböző viszkozitású olajjal végzett vasalási kísérletsorozat esetén a nagyobb (f = 0,10 mm/ford) előtolás esetén volt tapasztalható a nagyobb ρ_{Sa} felületi érdesség javulás.
- A legalacsonyabb ρ_{Sa} értéket (felületi érdesség javulási aránya) vagyis a legkedvezőbb felületi érdességet eredményező paraméterek az alábbi paraméterek esetén adódtak:

F = 82 N

v_c = 277 m/min

f = 0,10 mm/ford

ν=70 mm^2/s

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1] Bálint Lajos, Gribovszki László, (1975). *A gépgyártástechnológia alapjai,* Miskolc, p:418-442

[2] Dudás Illés, (2001). *Gépgyártástechnológia II.,* Miskolc, p:118-139

[3] Gál Gaszton, Kiss Antal, Sárvári József, Tisza Miklós, (2008). Képlékeny hidegalakítás. Tankönyvkiadó, Budapest, p:315

[4] Tisza Miklós, Balogh András, Schäffer József, (2007). *Mechanikai technológiák.* Miskolc, p:73-74

[5] Genichi Taguchi, *System of Emperimetal Design*, New York, p:531

[6] Fridrik László (1989), *Válogatott fejezetek a gépgyártástechnológiai kísérletek tervezése témaköréből,* Budapest, p:109

[7] Luca L, Neagu-Ventzel S, Marinescu I, (2005). *Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels.*Elsevier Precision Engineering 29 (2005) p:253-256

[8] T.A. El-Taweel, M.H. El-Axir, (2009). *Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique.*International Journel Advertising of Manufacture Technology (2009) 41: 301-310

[9] Luo H, Liu J, Wang L, Zhong Q, (2006) *Investigation of the burnishing force during the burnishing process with a cylindrical surfaced tool.* International Journel Advertising of Manufacture Technology (2005) 25: 454-459

[10] YU Xinbo, WANG Lijiang, (1999). *Effect of Various Parameters on the Surface Roughness of an Aluminum Alloy Burnished with a Spherical Surfaced Polycrystalline Diamond Tool.* International Journel of Machine Tools & Manufacture 39(1999) 459-469

[11] S.´Swirad, (2010). *The surface texture analysis after sliding burnishing with cylindrical elements.* Elsevier Wear (2011) p:576-581

[12] Molnár Viktor, (2012). *A 3D-s mérés az AltiSurf 520 típusú mérőgépen, Oktatási segédlet*. Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék, Miskolc, p:34

[13] Fazekas Lajos, (2011). *Gépjavítás IV., Oktatási segédlet,* p:11-16

[14] Horváth Sándor, (2008). *A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése, a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata és elemzése (Doktori értekezés),* Budapest, p:117

[15] Líska Katalin, Kodácsy János, Líska János, (2012). *Mikrogeometriai tulajdonságok vizsgálata keményesztergálás és gyémántvasalás után,* Kolozsvár, p:231-234

[16] Kovács K. – Palásti Kovács B.: *Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése háromdimenziós paraméterekkel.I. A háromdimenziós topográfiai paraméterek áttekintése,* Gépgyártástechnológia, (1999), p:31-38

[17] Varga Gyula.: *Effects of Technological Parameters on the Surface Texture of Burnished Surfaces*, Key Engineering Materials, Volume 581: Precision Machining VII, pp.: 403-408, 2013, ISSN 1013-9826

[18] ISO 25178 part 2 (2012) Geometrical product specification (GPS) - surface texture: areal - part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization