

## GYÉMÁNTVASALT MUNKADARABOK FELÜLETI ÉRDESSÉGÉNEK VIZSGÁLATA FAKTORIÁLIS KÍSÉRLETTERVEZÉS ALKALMAZÁSÁVAL

**Smolnicki Szilárd** 

PhD-hallgató, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet  
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [smolniszili99@gmail.com](mailto:smolniszili99@gmail.com)

**Varga Gyula** 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet  
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [gyula.varga@uni-miskolc.hu](mailto:gyula.varga@uni-miskolc.hu)

### Absztrakt

*A megmunkálási folyamatokban, különösen a környezettudatosság szempontjából fontos figyelembe venni a nagy energiaigényű megmunkálási módszerek kihívásait: ennek a tanulmánynak az a célja, hogy megvizsgálja ezeket a kérdéseket az esztergálás és gyémántvasalás során.*

*Kutatásunkat az energiahatékonyság társadalmi-gazdasági viszonyainak feltárásával és elemzésével kezdtük. A következő szakaszban a vizsgált próbadarab méreteit és anyagminőségét mutatjuk be, melyeken különböző vizsgálatokat végeztünk. Részleteztük az esztergálás és a gyémántvasalás során alkalmazott technológiai paramétereket. Összehasonlítjuk az esztergált és a gyémántvasalt felületek érdességét, majd azonosítjuk a javulási tényezőket a különböző technológiai adatok alapján a gyémántvasalt felületekre. A faktoriális kísérlettervezés segítségével javaslatokat teszünk az ideális technológiai paraméterek kiválasztására, a legjobb érdességjavulás tervezhetőségére és prognosztizálására.*

**Kulcsszavak:** gyémántvasalás, faktoriális kísérlettervezés, felületi érdesség

### Abstract

*It is important to consider the challenges of energy-intensive machining methods in machining processes, particularly from an environmental perspective: the aim of this study is to examine these issues in the turning and diamond-ironing process. We began our research by exploring and analysing the socio-economic context of energy efficiency. In the next section, we present the dimensions and material quality of the test specimens on which we have performed various tests. The technological parameters used in the turning and diamond burnishing processes are detailed. We compare the roughness of the turned and diamond-burnished surfaces and then identify the improvement factors based on the different technological parameters for the diamond-burnished surfaces. Using factorial design of experiments, we propose recommendations for the selection of ideal technological parameters, designability and prediction of the best roughness improvement.*

**Keywords:** diamond burnishing, factorial experiment design, surface roughness

## **1. Az energiahatékonyság kérdései**

### ***1.1. Társadalmi és gazdasági viszonyok***

Napjainkban a globális piacon meghatározó Lean gyártást a gyártó vállalatok alkalmazzák a versenyelőnyük növelésére. Ez az előny tovább növelhető, ha a gépipari megmunkáló folyamataik energiahatékonyságát is megvizsgálják (Kovács, 2012). A kutatók megállapítása szerint a gépalkatrészek tartóssága és a megbízhatósága többek között a gyártási folyamat eredményétől és a kialakított felületi struktúráktól függ (Kundrák et al., 2019; Sztankovics, 2023a).

Az emberi társadalom folyamatos fejlődése, a növekvő jólét egyre közelebb visz minket a különféle globális környezeti problémák sürgetőbb kezeléséhez. Ezek megoldásához általában olyan komplex tervekre van szükség, amelyek hosszú távú, fenntartható megoldást tudnak kínálni a jövőnk szempontjából. A fenntarthatóság nagyban függ a fogyasztás és a termelés arányától, valamint attól, hogy ez milyen teherrel jár a bolygónk számára.

A komplex tervek kialakításához részleteiben kell ismerni a problémát, fontos tehát a mikroszintű döntéseket összhangba hozni a makroszintű követelményekkel (Michelsen, 2007). Sajnos gyakran előfordulnak olyan érdekellentétek, melyek a nagyobb értékteremtés kontra gazdaságosabb, környezetkímélőbb gyártás között húzódnak (Organisation for Economic Co-operation and Development, 1998). Sokszor egy-egy új technológia, beruházás túl magas ára riasztja el a vállalatot a befektetéstől, még ha az új berendezés környezetbarátabb működést is garantálhatna.

Az említett fejlődés szempontjából egy ipari vállalat esetén gondolhatunk a termelékenység növelésére, az energiaszükséglet csökkentésére, továbbá ezek hatékonyságának javítására. Termelési szempontból ugyanis a termelékenység egy abszolút fogalom, a kibocsátások és a ráfordítások arányán alapul (Winter, 2016), míg a hatékonyság relatív, hiszen akár a termelékenység hatékonyságáról is beszélhetünk. Ha tehát egy folyamat hatékonyságán szeretnénk javítani, azt megtehetjük az előállított érték termelékenységének növelésével, a környezeti hatás intenzitásának csökkentésével vagy a termelékenység növelésével és az intenzitás csökkentésével egyszerre (Koskela és Vehmas, 2012).

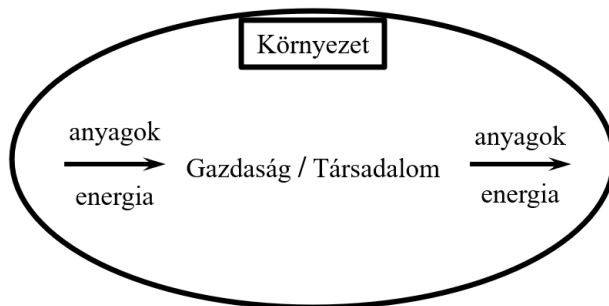
### ***1.2. Folyamatparaméterek hasznossága***

A fenntartható fejlődéshez olyan komplex tervekre van szükség, amelyben az egyes folyamatok részleteiben hordozzák magukban ezt a szemléletet. Az egyes folyamatokat befolyásoló tényezők nevezhetők folyamatparamétereknek is, ezek olyan adatok, melyek alapjaiban határozzák meg egy folyamat végtermékének minőségét, hatékonyságát, illetve károsanyag-kibocsátását.

A legtöbb folyamat ugyanis dinamikus rendszer: a folyamatparaméterek változtatása különböző kimeneteket – és ezáltal környezeti hatásokat is – eredményez (Li et al., 2012). A cél tehát az, hogy a folyamatparamétereket egyenként, valamint egymásra gyakorolt hatásait is vizsgálva olyan kombinációk kerüljenek kialakításra, melyek a legmegfelelőbb kimeneti értékekkel rendelkeztek. Ehhez nagy segítséget tud nyújtani a faktoriális kísérlettervezés módszere.

### ***1.3. Az energiahatékonyság megvalósítása***

Az energiahatékonyság célja az, hogy adott mennyiségű energiával minél nagyobb mennyiségben és/vagy minél jobb minőségben lehessen gyártani. Ahogy az *1. ábrán* (Allenby, 1999) is látható, a gazdaság és a társadalom legfőbb motorja az anyag- és energiaforgalom, amely összeköttetésben van a környezettel.



**1. ábra.** Az anyag- és energiaáramlás (Allenby, 1999)

Minden rendszer jellemezhető energiahatékonyság szempontjából azáltal, hogy mennyi nyersanyagot igényel bemenetként, valamint, hogy mennyi energiát igényel ahhoz, hogy a nyersanyagból javakat és szolgáltatásokat nyújtson kimenetként (Bleischwitz és Hennicke, 2004).

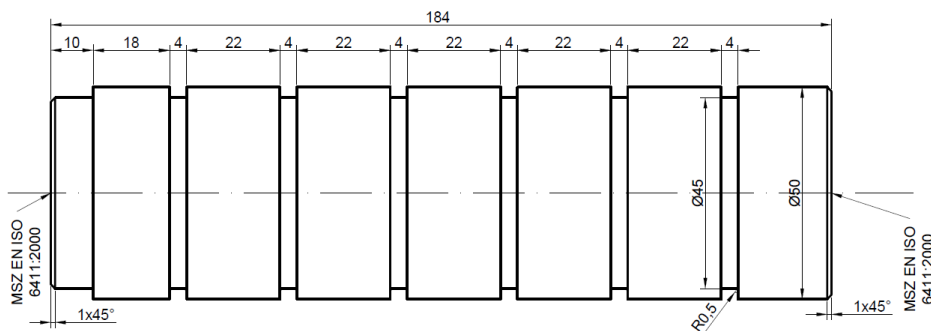
A kérdés tehát az, hogy az energiafogyasztás csökkentése milyen hatással van a folyamat minőségére, veszélyezteti-e annak alapvető előírásait, valamint, hogy milyen kapcsolat van a folyamatparaméterek és a környezeti hatások között (Li et al., 2012). Mindezek figyelembevételével kompromisszumok köthetők, megtalálva azt a folyamatparaméter-kombinációt, mellyel a folyamat egységesen lesz megfelelő minőségű és energiahatékony is. Ez pedig már összefoglalóan ökohatékony folyamatnak is tekinthető.

A kutatás célja a gyémántvasalás technológiai paraméterkombinációinak vizsgálata, illetve a paraméterek változtatásának hatására bekövetkező felületminőség javulásának/romlásának elemzése, figyelembe véve a vasalási sebesség és a vasalóerő növelése okozta energianövekményt az energiahatékonyági elvek mentén.

## 2. Kísérleti módszerek és feltételek

### 2.1. A próbadarab jellemzői

Az elméleti áttekintés után rátérünk a kísérletek ismertetéséhez, melyekhez egy speciális, erre a célra tervezett tengely alakú alkatrészt munkáltunk meg, melynek műszaki rajzát a 2. ábra szemlélteti. A darabon hat olyan hengeres felület lett kialakítva, ahol méréseket lehet végezni, gyártása pedig a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének műhelyében található szerszámgépeken történt meg. Összesen négy darab készült el belőle.



**2. ábra.** A próbadarab műszaki rajza

A megmunkálások alapanyagául az 1.4307 jelölésű (további jelölések: X2CrNi18- 9/304L/S30403) ausztenites szövetszerkezetű rozsdamentes króm-nikkel acélötvözet szolgált, amely jó korrózióálló tulajdonságai mellett a hidegalakítást, illetve a hegesztést is jól viseli. Előnyös szennyeződésgátló hatása, az oxidációval szembeni ellenállóképessége, valamint könnyű tisztíthatósága miatt gyakran alkalmazzák élelmiszer-feldolgozó berendezések (sörfőzés, tejfeldolgozás, borkészítés), konyhai felszerelések és készülékek és vegyipari berendezések (konténerek, hőcserélők) gyártására. Kémiai összetételét az 1. táblázat foglalja össze (1.4307 acél adatlapja, 2024).

Az ötvözet folyáshatára  $R_{p0,2} \geq 210 \text{ MPa}$ ; szakítószilárdsága  $R_m = 520 \dots 700 \text{ MPa}$ , míg szakadási nyúlása  $A \geq 45\%$ . A sűrűsége  $\rho = 7,9 \text{ kg/dm}^3$ , keménysége pedig  $160 \dots 190 \text{ HB}$ .

### 1. táblázat

Az 1.4307 jelölésű acélötvözet kémiai összetétele (20 °C-on) – DIN 10088-1:2005  
(1.4307 acél adatlapja, 2024)

| Elem | Fe        | C     | Si | Mn | P     | S     | N     | Cr        | Ni     |
|------|-----------|-------|----|----|-------|-------|-------|-----------|--------|
| %    | 66,8–71,3 | ≤0,03 | 1  | 2  | 0,045 | 0,015 | ≤0,11 | 17,5–19,5 | 8–10,5 |

## 2.2. Az esztergálás jellemzői

A megmunkálási sorrend: a darabok méretre fűrészelése, az alkatrész bal oldalán található központfurat és a befogásra alkalmas átmérő kialakítása EU-400-01 típusjelű esztergagépen, a  $d = \varnothing 50 \text{ mm}$  méretű hengeres felületek hosszesztergálása, majd a beszúrások kialakítása a munkadarab jobb végétől kezdődően.

Az esztergálás technológiai paraméterei, a forgácsolási sebesség ( $v_c$ ) és az előtolás ( $f$ ):

$$v_c = 1,3875 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 83,25 \frac{\text{m}}{\text{min}}; f = 0,05 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$$

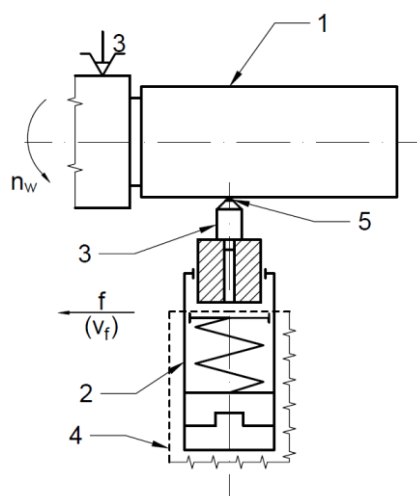
Összességében így 24 db, ugyanolyan körülmények között esztergált felület került kialakításra.

## 2.3. A gyémántvasalás jellemzői

Az esztergálás után a próbadarabok felületi érdességét megmértük. Így a vasalás utáni érdességmérésekkel összevetve a vasalás okozta felületi érdességjavulási tényezők meghatározhatók. Ezek részleteiben a 3. fejezetben kerülnek bemutatásra.

A gyémántvasalás ugyanezen EU-400-01 típusjelű esztergagépbe befogott vasalószerszámmal történt. A vasalószerszám dolgozó része egyszemcsés gyémánt, a megmunkálás körülményeit sematikusán a 3. ábra (Varga et al., 2023) szemlélteti, ahol 1-es a munkadarabot, 2-es a vasalószerszámot, 3-as a vasalóbetétet, 4-es szerszámbefogót, 5-ös pedig a gyémántcsúcsot jelöli.

A felületek vasalása során a felületi érdesség csökkenését és a felületi réteg szilárdítását a megmunkálendő anyagnál jóval nagyobb keménységű gyémántszerszám és a munkadarab felülete közötti csúszási súrlódás eredményezi (Ferencsik, 2023; Sztankovics, 2023b).



**3. ábra.** A gyémántvasalás sematikus ábrája (Varga et al., 2023)

A gyémántvasalás technológiai adatai minden felület esetén különbözőek voltak, melyek a fordulatszám, az előtolás és a vasalószerszám által kifejtett erő kombinációjából alakultak ki. Ezen forgácsolási paraméterek változtatására van lehetőség a megmunkálás során. Ezen kombinációkat a 2. táblázatban foglaltuk össze. A vasalóerő mértéke közvetlenül beállítható az esztergagépen a rugóerő változtatásával, iránya pedig passzív irányú a forgácsolási erőket tekintve, illetve normál irányú, ha a súrlódási viszonyokat vizsgáljuk. A megmunkálás teljesítményének számításához lehetőség van ezt az erőt átszámítani, felhasználva a súrlódási együtthatót a súrlódóerő összefüggésében, ekkor ezen számított erő már egyirányú lesz a súrlódóerővel, illetve a tangenciális erővel. A táblázat kiegészült továbbá a vasalási sebességgel – (1) jelű képlet.

$$v_v = d \cdot \pi \cdot n \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

**2. táblázat**

A gyémántvasalás technológiai adatai

| Sorszám | $f \left[ \frac{mm}{ford} \right]$ | $v_v \left[ \frac{m}{s} \right]$ | $F [N]$ |
|---------|------------------------------------|----------------------------------|---------|
| 1       | 0,05                               | 0,69                             | 120     |
| 2       | 0,05                               | 0,69                             | 20      |
| 3       | 0,1                                | 0,69                             | 120     |
| 4       | 0,1                                | 0,69                             | 20      |
| 5       | 0,05                               | 0,98                             | 120     |
| 6       | 0,05                               | 0,98                             | 20      |
| 7       | 0,1                                | 0,98                             | 120     |
| 8       | 0,1                                | 0,98                             | 20      |

## 2.4. A felületi érdesség mérése

A felületminőség fogalma magában foglalja a megmunkált felület alakeltéréseit, érdességét, hullámosságát (perfor.hu/erdesseg, 2025). A következőkben a főbb 2D-s és 3D-s érdességi mérőszámok kerülnek bemutatásra, hogy aztán bizonyos megfontolások alapján össze tudjuk vetni az egyes jellemzőket. Ezeket mikrométerben adjuk meg.

Az átlagos érdesség az egyik legáltalánosabban használt felületi érdességi mérőszám, egy meghatározott alaphosszon egyenlő távolságokban meghatározzák a kiemelkedések, illetve a bemélyedések középvonaltól mért távolságát, majd pedig az eredmények abszolút értékének veszik a számtani közepét. Középvonálnak az a vonal tekinthető, amely alatt és felett a kiemelkedések és bemélyedések területének összege egyenlő. Az átlagos érdesség számítása a (2) jelű képlet alapján történhet, melyben  $L_r$  a mérési hossz (ISO 21920-2:2021). A képletben szereplő  $z(x)$  a felület profiljának magasságfüggvénye a felületprofil ( $x$  irány) mentén.

$$R_a = \frac{1}{L_r} \cdot \int_0^{L_r} |z(x)| dx \quad (2)$$

Az egyenetlenségmagasság meghatározása során a mintavételezési hosszönként vett (melyekből általában 5 db van) legmagasabb csúcs és legmélyebb völgy közti magasságkülönbségek számtani átlagát kell venni. Az egyenetlenségmagasság számítása a (3) jelű képlet alapján történt (perfor.hu/erdesseg, 2025). A mért felület felosztásra kerül – jelen esetben – 5 egyenlő részre, majd ezen részekben belül történik egyesével a legmagasabb csúcs és a legmélyebb völgy magasságkülönbségének meghatározása. Ezek az  $R_{zi}$  értékek, melyek számtani átlagát szükséges venni.

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad (3)$$

A maximális egyenetlenség származtatása a teljes mérési szakaszon található legmagasabb csúcs, valamint legmélyebb árok magasságkülönbségeként adódik (AltiSurf 520 érdességmérő adatlapja, 2024).

A négyzetes középérték a profileltérések négyzetes középértékeként számítható, a (4) jelű képlet segítségével (ISO 21920-2:2021).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L_r} \cdot \int_0^{L_r} z^2(x) dx} \quad (4)$$

Az érdességi mérőszámok definícióit, képleteit összehasonlítva megállapítható, hogy az egyes paraméterek eltérő elvekre és célokra használhatók fel. Az átlagos érdesség ( $R_a$ ) homogén szerkezetű anyagok megmunkálásakor általában jól jellemzi a 2D-s felület érdességi viszonyait. Ha változik az átlagos érdesség, akkor abból a gyártási folyamat megváltozására következtethetünk, mint például a szerszámkopás vagy a rezgések megjelenése. Ez a mérőszám azonban nem tesz különbséget a profil csúcsai és völgyei között, hiszen mint láthattuk, az eredmények abszolút értékével történt az átlagolás. Ez különösen a nagy szemcséket tartalmazó anyagok esetén lehet problémás, hiszen egy-egy nagyobb kiemelkedés vagy bemélyedés jelentős torzítást vihet a felület értékelésébe (Szalóki et al., 2016).

Mindez azt jelenti, hogy két, azonos átlagos érdességgel rendelkező felület között akár igen jelentős működés közbeni eltérések lehetnek. Ekkor érdemes más érdességi mérőszámokat is vizsgálni, hiszen az említett nagyobb bemélyedések és kiemelkedések vizsgálatára az egyenetlenségmagasság ( $R_z$ ) tökéletesen funkcionál. Ha pedig még inkább ezekre a csúcsokra és árkokra vagyunk kíváncsiak, akkor a maximális egyenetlenség ( $R_t$ ) is hasznos lehet.

A felületi érdesség aritmetikai középértéke háromdimenziósan bővíti az  $R_a$  profilparamétert. Az egyik legszélesebb körben használt 3D-s érdességi paraméter, mivel stabil eredményeket biztosít, melyeket nem befolyásolják a karcolások, szennyeződések és a mérési zaj (ISO 25178-2:2021). Számítását az (5) jelű képlet szemlélteti.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (5)$$

A felületi érdesség négyzetes középértéke háromdimenziósan bővíti az  $R_q$  profilparamétert. Szintén gyakran használt jellemző, mivel jó statisztikát generál és stabil eredményeket, miközben szintén nem befolyásolják a karcok, szennyeződések (ISO 25178-2:2021). Számítását a (6) jelű képlet szemlélteti.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |z^2(x, y)| dx dy} \quad (6)$$

A felületi érdesség maximális értéke háromdimenziósan bővíti az  $R_z$  profilparamétert. Értéke a maximális csúcsmagasság, valamint a maximális völgymélység összegével egyezik meg. Használata már kevésbé jelentős, hiszen nagyságát befolyásolhatják a karcolások, szennyeződések, melyeket ugyanakkor a kiértékelés során figyelembe lehet venni (Szalóki et al., 2016).

A tízpontmagasság ( $S_{10z}$ ) a 2D-s egyenetlenségmagassághoz ( $R_z$ ) hasonló jellemzőkkel bír. Nagyságának megállapításához az öt legnagyobb magassággal rendelkező csúcs átlagértékéhez kell hozzáadni az öt legnagyobb mélységgel rendelkező gödör átlagértékét (ISO 25178-2:2021).

A felületi érdesség mérőszámainak mérése AltiSurf 520 típusú érdességmérő berendezéssel történt, amely a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének mérőlaboratóriumában található. A mérőgép három, egymásra merőleges x-y-z motorizált egyenáramú tengelyek mentén képes mozogni, tengelyenként 200 mm-en. Maximális sebessége 40 mm/sec, 0,1  $\mu$ m-es lépéstávolságban (AltiSurf 520 érdességmérő adatlapja, 2024).

A felületi topográfia részletes elemzését a mérőgéphez tartozó AltiMap szoftver segítségével végeztük el. A gép több érzékelője közül az érintésmentes interferometrikus háromszögelt lézert alkalmaztuk.

## 2.5. A javulási tényezők számítása

A javulási tényezők segítségével olyan paramétereit keressük a gyémántvasalásnak, amikor amellet, hogy az energiahatékonyság szempontjából megfelelő volt a megmunkálás, az esztergálást követően a legnagyobb javulást sikerült elérni a felület minőségét illetően gyémántvasalással.

Az ehhez szükséges javulási tényezőt a (7) jelű képlet segítségével számítjuk ki, ez egy százalékos érték, amely megadja, hogy mennyit javult a felületminőség a gyémántvasalásnak köszönhetően. Erre azért van szükség, mert az esztergálás során eltérő minőségű felületek adódnak, melyek kiindulópontjai a gyémántvasalásnak. A formula egy általánosító képlet, a benne szereplő „X” a 2D-s felületi érdességek esetén használatos „R”, illetve a 3D-s esetben használt „S” betűket helyettesíti, míg az „y” a különböző mérőszám-típusok alsó indexeit általánosítja. Az „I” az angol „improvement”, „javulás” szóra utal.

$$IX_y = \frac{X_{y;esztergált} - X_{y;vasalt}}{X_{y;esztergált}} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

### 3. Érdességi mérőszámok vizsgálata teljes faktoriális kísérlettervezés alkalmazásával

A meglévő adatok alapján végezett teljes faktoriális kísérlettervezés (Montgomery, 2004) segítségével alkotunk tapasztalati képleteket matematikai módszerekkel, melyekhez a MathCad programot alkalmaztuk.

Esetünkben a faktorok száma azon technológiai paraméterek számával egyezik meg, melyek értékeit változtattuk a megmunkálás során. Ilyen volt az előtolás, a vasalási sebesség, valamint a vasalóerő. Minden paraméterhez két értéket rendelünk, így a szintek száma kettő lesz. Ezekre a későbbiekben minimum-, illetve maximumértékeként hivatkozunk.

Ezek alapján a független beállítások száma az alábbiak szerint alakul:

- faktorok száma:  $f = 3$ ; szintek száma:  $p = 2$
- elvégzendő kísérletek száma:  $n = p^f = 2^3 = 8$

Ez a nyolc beállítás megfelel a 2. táblázatban bemutatott technológiai paraméterkombinációknak.

Minden esetben a (8) jelű képlet alakjában keressük a megoldásokat, a képletben szereplő  $k_0$ ;  $k_1$ ;  $k_2$ ;  $k_3$ ;  $k_{12}$ ;  $k_{13}$ ;  $k_{23}$ ;  $k_{123}$  a kiértékelés regressziós együtthatói, melyek számítását (Montgomery, 2004) alapján végeztük, míg az „X” a 2D-s felületi érdességek esetén használatos „R”, illetve a 3D-s esetben használt „S” betűket helyettesíti, továbbá az „y” a különböző mérőszám típusok alsó indexeit általánosítja:

$$(I)X_y = k_0 + k_1 \cdot f + k_2 \cdot F + k_3 \cdot v_v + k_{12} \cdot f \cdot F + k_{13} \cdot f \cdot v_v + k_{23} \cdot F \cdot v_v + k_{123} \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (8)$$

#### 3.1. Az érdességi paraméterek vizsgálata

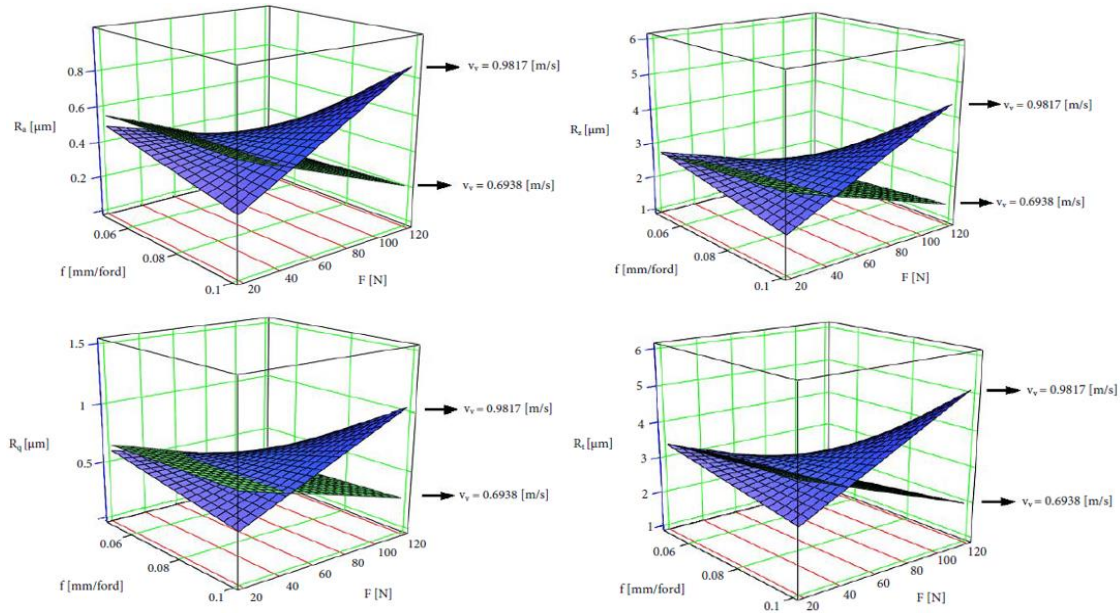
Először a gyémántvasalás során mért felületi érdességi mérőszámokra végeztük el a faktoriális kísérlettervezést. A mérési eredményeket a 3. táblázatban foglaltuk össze.

3. táblázat

A gyémántvasalás mérési eredményei

| Sorszám | $R_a$  | $R_q$  | $R_z$  | $R_t$     |
|---------|--------|--------|--------|-----------|
| 1       | 0,1613 | 0,2047 | 1,0840 | 1,4252    |
| 2       | 0,5536 | 0,6534 | 2,6881 | 3,3997    |
| 3       | 0,2097 | 0,2715 | 1,4667 | 1,9745    |
| 4       | 0,5796 | 0,6990 | 3,0775 | 3,7813    |
| 5       | 0,2148 | 0,2614 | 1,2592 | 1,7121    |
| 6       | 0,4915 | 0,6050 | 2,7448 | 3,3662    |
| 7       | 0,3081 | 0,3865 | 1,9648 | 2,6216    |
| 8       | 0,8648 | 1,0369 | 4,3843 | 5,0996    |
| Sorszám | $S_a$  | $S_q$  | $S_z$  | $S_{10z}$ |
| 1       | 0,1918 | 0,2465 | 2,5665 | 1,7513    |
| 2       | 0,5779 | 0,6953 | 4,7680 | 3,1592    |
| 3       | 0,2534 | 0,3262 | 2,9837 | 2,5693    |
| 4       | 0,6135 | 0,7502 | 5,1680 | 2,9274    |
| 5       | 0,2152 | 0,2940 | 2,8711 | 1,7068    |
| 6       | 0,5285 | 0,6698 | 5,3015 | 3,0461    |
| 7       | 0,3805 | 0,5016 | 4,2046 | 2,2032    |
| 8       | 0,9707 | 1,1840 | 7,2883 | 4,2552    |

A 2D-s felületi érdesség paraméterekre számított képleteket a (9)–(12) jelű egyenletek, valamint a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra. Kísérleti eredmények gyémántvasálás során – 2D

$$R_a = -0,08 + 18,341 \cdot f + 0,013 \cdot F + 0,995 \cdot v_v - 0,386 \cdot f \cdot F - 25,815 \cdot f \cdot v_v - 0,024 \cdot F \cdot v_v + 0,563 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (9)$$

$$R_q = -0,236 + 22,933 \cdot f + 0,016 \cdot F + 1,352 \cdot v_v - 0,465 \cdot f \cdot F - 31,862 \cdot f \cdot v_v - 0,03 \cdot F \cdot v_v + 0,676 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (10)$$

$$R_z = -2,165 + 101,884 \cdot f + 0,075 \cdot F + 6,894 \cdot v_v - 1,887 \cdot f \cdot F - 135,586 \cdot f \cdot v_v - 0,132 \cdot F \cdot v_v + 2,717 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (11)$$

$$R_t = -0,943 + 99,456 \cdot f + 0,066 \cdot F + 6,327 \cdot v_v - 1,877 \cdot f \cdot F - 133,316 \cdot f \cdot v_v - 0,127 \cdot F \cdot v_v + 2,754 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (12)$$

A négy 2D-s felületi érdesség paraméter hasonló viselkedést mutatott, így érdemes egységesen vizsgálni őket az ismétlések elkerülése végett. Minimális vasalási sebesség és tetszőleges vasalóerő mellett az előtolás csökkentése az  $R_a$  és az  $R_q$  értéken szinte nem változtatott, miközben az  $R_z$  illetve  $R_t$  értékeket csökkentette, tehát kiugró értékeket a lassú előtoló sebességgel minimalizálni lehet. Ugyanakkor szintén minimális vasalási sebesség és tetszőleges előtolás mellett a vasalóerő növelése csökkentette a felületi érdesség paramétereket. Maximális vasalási sebesség esetén és maximális előtolás mellett a vasalóerő növelése rontott, míg minimális előtolás mellett javított a felületi érdesség mérőszámokon. Az ideális paraméterkombináció azonban az alábbiak szerint alakul a 2D-s felületi érdesség mérőszámok faktoriális kísérlettervezése alapján:

$$f = 0,05 \frac{mm}{fordulat}; v_v = 0,6938 \frac{m}{s}; F = 120 N$$

Ezen adatok az energiahatékonysági szempontokat figyelembe véve kompromisszumképes értékek, hiszen a megmunkálás teljesítményigénye szempontjából alapvetően is kedvezőbb kisebb vasalási sebesség jobb felületminőséget eredményez, miközben a nagyobb vasalóerő növeli a teljesítményt, rontva az energiahatékonyságon. A felületminőség „kárára”, a kedvezőbb energiahatékonyság céljából ugyan-

akkor érdemes lehet megfontolni a maximális vasalási sebesség és előtolás alkalmazását minimális vasalóerő mellett, hiszen ezen megmunkálás felületi érdesség mérőszámai ugyan elmaradtak az előbb említett paraméterkombináció felületi érdesség értékeitől, de kevesebb energiát fogyasztanak. A kérdés az, hogy mik a felületminőségre vonatkozó igények.

A 2D-s felület érdesség mérőszámok után vizsgáljuk meg a 3D-s felületi érdesség paramétereit is, a számított képleteket a (13)–(16) jelű egyenletek, valamint az 5. ábra szemlélteti.

$$S_a = -0,087 + 17,916 \cdot f + 0,015 \cdot F + 1,025 \cdot v_v - 0,418 \cdot f \cdot F - 24,946 \cdot f \cdot v_v - 0,028 \cdot F \cdot v_v + 0,61 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (13)$$

$$S_q = -0,204 + 21,713 \cdot f + 0,018 \cdot F + 1,354 \cdot v_v - 0,493 \cdot f \cdot F - 29,856 \cdot f \cdot v_v - 0,033 \cdot F \cdot v_v + 0,718 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (14)$$

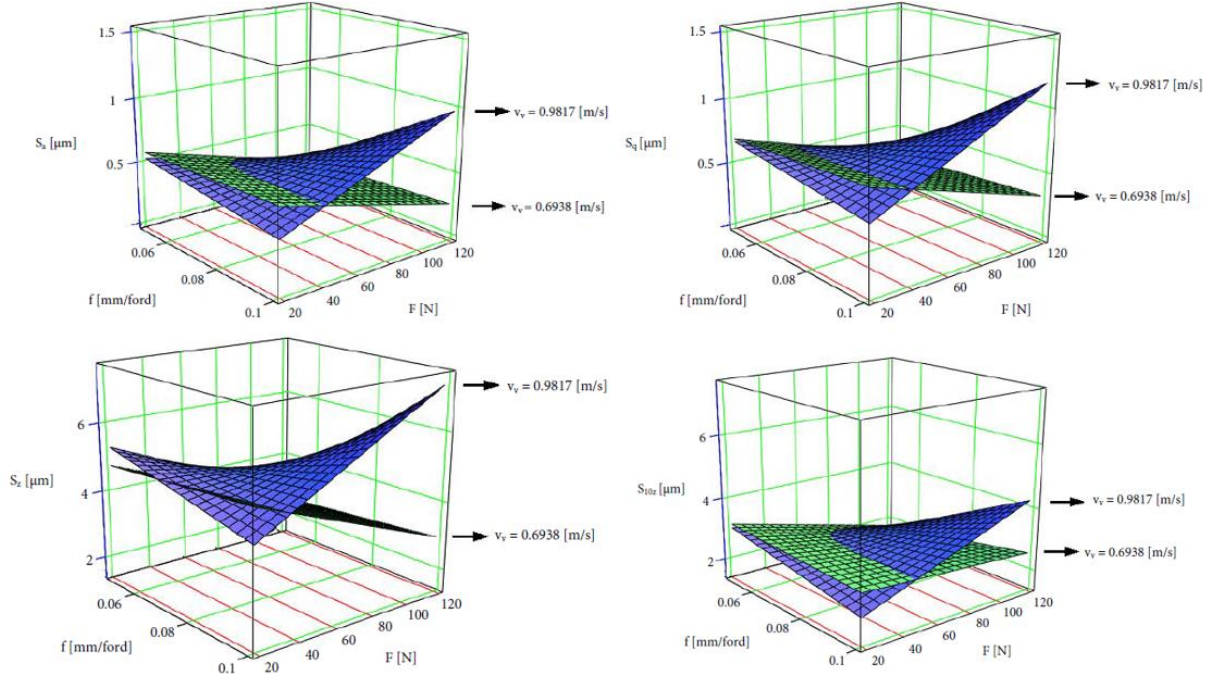
$$S_z = -2,841 + 133,065 \cdot f + 0,116 \cdot F + 11,03 \cdot v_v - 2,646 \cdot f \cdot F - 180,36 \cdot f \cdot v_v - 0,199 \cdot F \cdot v_v + 3,819 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (15)$$

$$S_{10z} = 1,587 + 43,189 \cdot f + 0,03 \cdot F + 3,309 \cdot v_v - 0,91 \cdot f \cdot F - 74,9 \cdot f \cdot v_v - 0,079 \cdot F \cdot v_v + 1,627 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (16)$$

A 3D-s felületi érdesség mérőszámok is hasonló trendeket mutattak egymáshoz képest. Minimális vasalósebesség mellett csökkent a felületi érdesség a vasalóerő növelésével, gyakorlatilag függetlenül az előtolás mértékétől, miközben a maximális vasalási sebesség alkalmazása rosszabb felületminőséget eredményezett azonos előtolás és vasalóerő mellett (kivéve a legkisebb vasalóerő-értékeket). Az ideális paraméterkombináció tehát a 3D-s felületi érdesség mérőszámok alapján:

$$f = 0,05 \frac{mm}{fordulat}; v_v = 0,6938 \frac{m}{s}; F = 120 N$$

Az energiahatékonysági elveket figyelembe véve itt is érdemes lehet megfontolni ezek helyett a nagyobb vasalási sebesség alkalmazását kis vasalóerő mellett, amely csökkenti a megmunkálás teljesítményigényét.



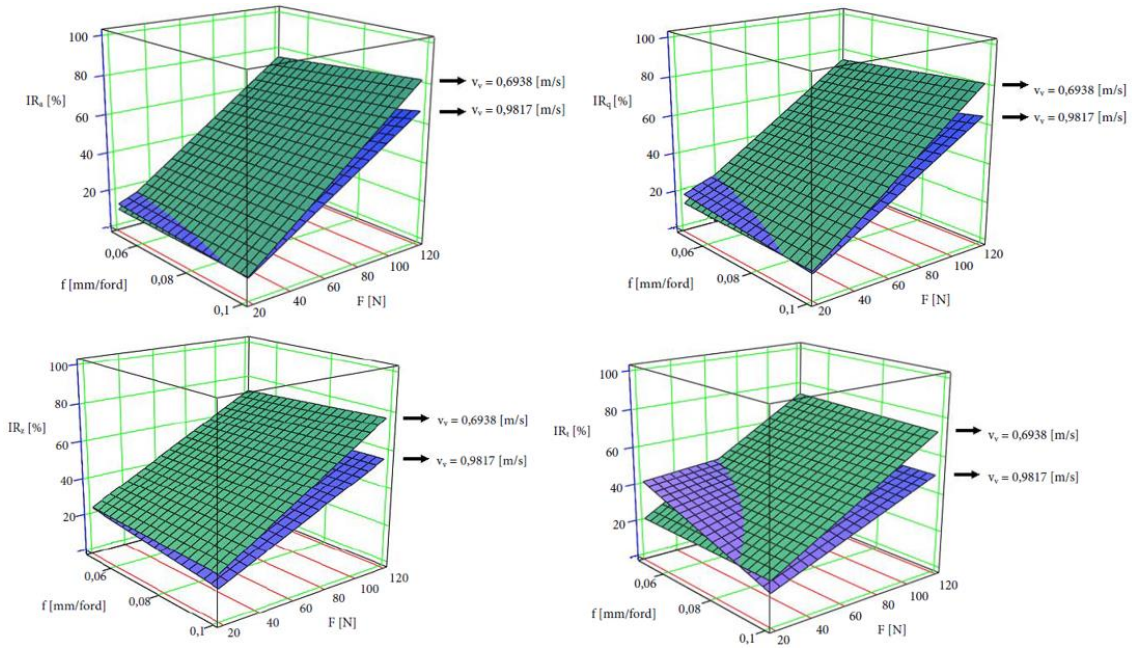
5. ábra. Kísérleti eredmények gyémántvasalás során – 3D

### 3.2. Az érdességi paraméterek javulási tényezőinek vizsgálata

A gyémántvasalás felületi érdesség mérőszámainak faktoriális kísérlettervezése után a javulási tényezőkre is elvégeztük a kísérlettervezést. A gyémántvasalás utáni javulási tényezők 2D-s felületi érdesség paraméterekre számított értékeit a (17)–(20) jelű egyenletek, valamint a 6. ábra, míg a 3D-s felületi érdesség paraméterekre számított értékeit a (21)–(24) jelű egyenletek, valamint a 7. ábra szemlélteti.

A 2D-s felületi érdesség mérőszámok javulási tényezői szintén hasonlóan viselkedtek az egyes technológiai paraméterek változtatásának hatására, így érdemes őket együttesen értékelni. Megállapítható, hogy a legnagyobb javulási értékeket a minimális vasalási sebességgel értük el – ez kedvező az energiahatékonyság szempontjából –, a legnagyobb vasalóerő mellett; miközben az előtolás növelésével – a maximális egyenetlenséget kivéve – még nagyobb javulás volt elérhető; a vasalóerő csökkentése azonban csökkentette a javulás mértékét. Az ajánlott technológiai paraméterkombináció tehát a 2D-s felületi érdesség mérőszámok javulási tényezői alapján:

$$f = 0,1 \frac{\text{mm}}{\text{fordulat}}; v_v = 0,6938 \frac{\text{m}}{\text{s}}; F = 120 \text{ N}$$



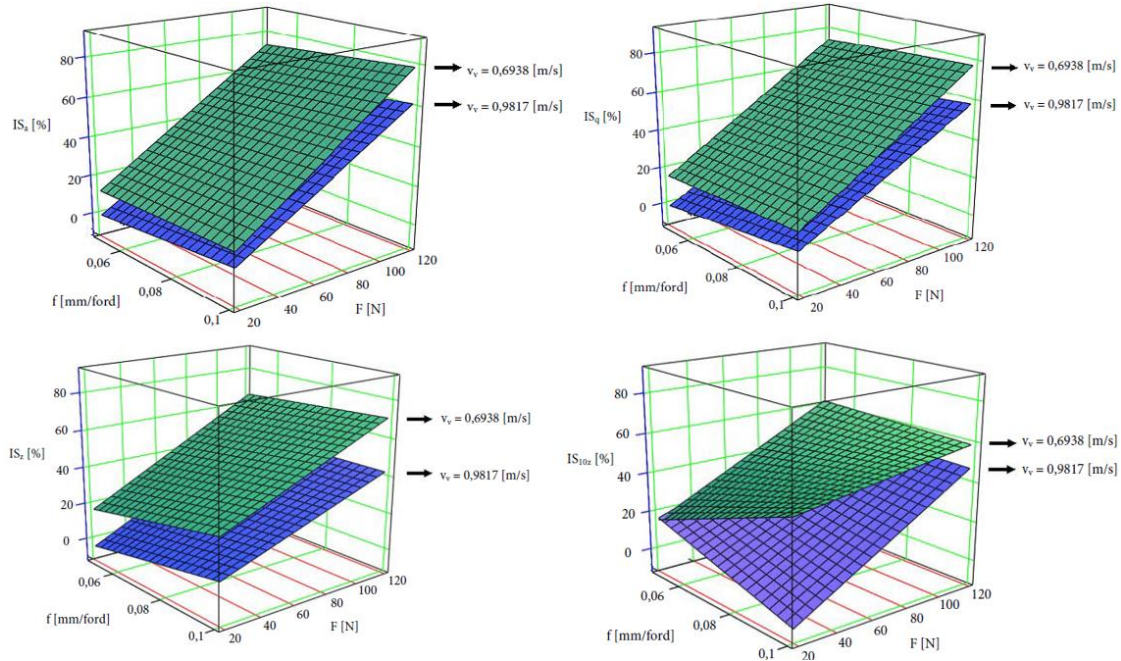
6. ábra. A javulási tényező értékei gyémántvasalás után – 2D

$$IR_a = 5,255 - 136,515 \cdot f - 0,039 \cdot F - 7,835 \cdot v_v + 2,365 \cdot f \cdot F + 187,946 \cdot f \cdot v_v + 0,077 \cdot F \cdot v_v - 2,977 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (17)$$

$$IR_q = 4,499 - 120,249 \cdot f - 0,031 \cdot F - 6,672 \cdot v_v + 2,124 \cdot f \cdot F + 165,285 \cdot f \cdot v_v + 0,067 \cdot F \cdot v_v - 2,687 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (18)$$

$$IR_z = 3,081 - 78,276 \cdot f - 0,014 \cdot F - 4,35 \cdot v_v + 1,454 \cdot f \cdot F + 106,851 \cdot f \cdot v_v + 0,043 \cdot F \cdot v_v - 1,876 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (19)$$

$$IR_t = -1,317 - 22,6 \cdot f + 0,063 \cdot F + 1,486 \cdot v_v + 0,394 \cdot f \cdot F + 33,539 \cdot f \cdot v_v + 0,05 \cdot F \cdot v_v - 0,628 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (20)$$



7. ábra. A javulási tényező értékei gyémántvasalás után – 3D

$$IS_a = 5,057 - 114,898 \cdot f - 0,041 \cdot F - 7,575 \cdot v_v + 1,987 \cdot f \cdot F + 160,463 \cdot f \cdot v_v + 0,081 \cdot F \cdot v_v - 2,575 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (21)$$

$$IS_q = 4,123 - 96,198 \cdot f - 0,011 \cdot F - 6,329 \cdot v_v + 1,542 \cdot f \cdot F + 136,192 \cdot f \cdot v_v + 0,045 \cdot F \cdot v_v - 2,043 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (22)$$

$$IS_z = 1,817 - 36,229 \cdot f - 3,85 \cdot 10^{-3} \cdot F - 3,13 \cdot v_v + 0,856 \cdot f \cdot F + 58,511 \cdot f \cdot v_v + 0,026 \cdot F \cdot v_v - 1,155 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (23)$$

$$IS_{10z} = -0,726 + 5,505 \cdot f + 0,016 \cdot F - 0,284 \cdot v_v + 0,269 \cdot f \cdot F + 15,66 \cdot f \cdot v_v + 9,257 \cdot 10^{-3} \cdot F \cdot v_v - 0,63 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (24)$$

A 3D-s felületi érdesség mérőszámainak javulási tényezőit vizsgálva megállapítható, hogy a minimális vasalási sebesség alkalmazása eredményezett kedvezőbb javulási értékeket a maximálissal szemben. Ebben az esetben a nagyobb vasalóerők voltak képesek nagyobb javulást elérni, szintén a maximális előtolási értékek mellett. Ebből kifolyólag az ajánlott legkedvezőbb paraméterkombináció megegyezik a 2D-s esetben alkalmazottal, amely az energiahatékonyság szempontjából is egy kompromisszumos választás:

$$f = 0,1 \frac{mm}{fordulat}; v_v = 0,6938 \frac{m}{s}; F = 120 N$$

#### 4. Összefoglalás

Kutatásunkat az energiahatékonyság társadalmi-gazdasági viszonyainak feltárásával és elemzésével kezdtük, majd bemutattuk a kísérletek során használt próbadarab méreteit, anyagminőségét, melyen a vizsgálatokat végeztük. Ezt követően az esztergálás, illetve a gyémántvasalás technológiai jellemzőinek bemutatását készítettük el. A javulási tényezőket szintén ebben a fejezetben számítottuk ki.

A cikk további részeiben a kísérleti eredmények ismertetése következett, a faktoriális kísérlettervezés segítségével ajánlásokat tettünk a technológiai paraméterek ideális megválasztására: ideális paraméterkombinációit kerestük a gyémántvasalásnak a felületi érdesség mérőszámok vizsgálatával.

A javulási tényezőket is figyelembe véve megállapítottuk, hogy a felületminőség és az energiahatékonyság szempontjából a minimális előtolás és vasalási sebesség mellett alkalmazott maximális vasalóerő alkalmazása az ideális választás. Ha nem célkitűzés a legjobb felületminőség elérése, akkor – tovább javítva az energiahatékonyságot – alkalmazható a maximális vasalási sebesség, minimális vasalóerő mellett.

## Irodalom

- [1] Kovács, G. (2012). Productivity improvement by lean manufacturing philosophy. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice*, 6 (1), 9–16.
- [2] Kundrák, J., Nagy, A., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E. (2019). Investigation of surface roughness on face milled parts with round insert in planes parallel to the feed at various cutting speeds. *Rezanie I Instrumenty v Tekhnologicheskikh Sistemah*, 91, 87–96.  
<https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.91.09>
- [3] Sztankovics, I. (2023). Preliminary study on the function-defining 3D surface roughness parameters in tangential turning. *International Journal of Integrated Engineering*, 15 (7), 72–81.  
<https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.07.007>
- [4] Michelsen, O. (2007). Eco-efficiency in redesigned extended supply chains; furniture as an example. In: Huppel, G., Ishikawa, M. (eds.). *Quantified Eco-Efficiency. Eco-Efficiency in Industry and Science*. Vol. 22. Dordrecht: Springer. [https://doi.org/10.1007/1-4020-5399-1\\_6](https://doi.org/10.1007/1-4020-5399-1_6)
- [5] Organisation for Economic Co-operation and Development. Eco-efficiency. Pages 83, 1998.
- [6] Winter, M. (2016). *Eco-efficiency of Grinding Processes and Systems*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25205-6>
- [7] Koskela, M., Vehmas, J. (2012). Defining eco-efficiency: A case study on the finnish forest industry. *Business Strategy and the Environment*, 21, 546–566.
- [8] Li, W., Winter, M., Kara, S., Herrmann, C. (2012). Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 61, 59–62.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.029>
- [9] Allenby, B. R. (1999). *Industrial Ecology – Policy Framework and Implementation*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [10] Bleischwitz, R., Hennicke, P. (2004). *Eco-efficiency, regulation and sustainable business: Towards a governance structure for sustainable development*. Eco-Efficiency, Regulation and Sustainable Business: Towards a Governance Structure for Sustainable Development. 1–228.  
<https://doi.org/10.4337/9781845420574>
- [11] *1.4307 acél adatlapja*. <https://www.inoxservice.hu/upload/inline/adatlapok/durvalemezek/1.4307%20-%20ADATLAP.pdf>, (letöltve: 2024. 04. 15.).
- [12] Varga, G., Smolnicki, S., Babič, M., Caesarendra, W. (2023). Energy efficiency analysis when grinding and diamond burnishing of components. In: M. Gençyılmaz, Güneş, Durakbasa, Numan M. (eds.). *Towards Industry 5.0. Selected Papers from ISPR2022*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 378–396. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24457-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24457-5_30)
- [13] Ferencsik, V. (2023). Analytical analysis of the theoretical surface roughness in the case of burnishing of cylindrical workpiece. *Rezanie i Instrument v Tehnologicheskikh Sistemakh / Cutting and Tool in Technological Systems*, 99, 101–109. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2023.99.05>

- [14] Sztankovics, I. (2023). Roughness improvement of turned surfaces by diamond burnishing. In: Sztankovics I. (szerk.). „*Fiatalok a Tudományért*” tudományos rendezvény: Válogatott publikációk. Miskolc-Egyetemváros: Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet, 107–112.
- [15] *A felületminőség definíciói*. [https://perfor.hu/erdesseg\\_67](https://perfor.hu/erdesseg_67), (letöltve: 2025. 03. 12.).
- [16] ISO 21920-2:2021. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile*. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2021.
- [17] Szalóki, I., Sipos, S., Viharos, Zs. J. (2016). Szintaktikus fémhabok marással megmunkált felületi struktúrájának elemzése. In *Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki (IESB 2016)*. Óbudai Egyetem, Budapest, pp. 1-21. ISBN 978-615-5460-95-1
- [18] ISO 25178-2:2021; *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal* – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2021.
- [19] *Az AltiSurf 520 érdességmérő adatlapja*. [https://www.altimet.fr/?page\\_id=236&lang=en](https://www.altimet.fr/?page_id=236&lang=en), (letöltve: 2024. 04. 15.).
- [20] Montgomery, D. C. (2004). *Design and Analysis of Experiments*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.