

A VASALÁSTECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK HATÁSA A ROZSDAMENTES ACÉL PRÓBADARABOK FELÜLETI ÉRDESSÉGÉRE ÉS KEMÉNYSÉGÉRE

Varga Gyula 

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

Absztrakt

A befejező megmunkálási műveletek között a vasalás egy gazdaságos, kis környezetterhelésű eljárás. Speciális esetekben a köszörülés helyettesíthető vasalással, sokkal kisebb környezeti terhelés mellett ugyanazt az érdességet hozva létre. A vizsgálat célja a vasalási folyamat technológiai paramétereinek a felületi érdességre és keménységre gyakorolt hatásának meghatározása volt. A vasalási kísérleteket X5CrNi18-10 rozsdamentes acél próbatesteken végeztük. A kísérleti vizsgálatok során alkalmazott vasalási paraméterek a vasalási sebesség, előtolás és az erő voltak. A kísérletek megvalósítása a teljes faktoriális kísérlettervezési módszer alkalmazásával történtek. A mért eredmények kiértékelése után megállapítható volt, hogy vasalás hatására a Vickers-keménység a vasalás előtti HV: 330 – 370 értékről HV: 380-490 értékre nőtt, míg az érdesség Ra: 0,39-1,24 μm értékről 0,16-0,32 μm értékre csökkent. A 2D és 3D felületi érdesség paramétereiket AltiSurf 520 3D-s kromatikus érdesség mérő berendezésen vasalás előtt és után megmértük és kiértékeljük. Egy speciális javulási-arány képlet került megalkotásra vasalási eljárás hatékonyságának értékelésére a keménység és az érdesség vonatkozásában.

Kulcsszavak: csúszó súrlódásos vasalás, rozsdamentes acél, felületi érdesség, keménység, felszíni réteg

Abstract

Among the finishing machining operations, burnishing is an economical process with a low environmental impact. In special cases, grinding can be replaced by burnishing, creating the same roughness with a much lower environmental load. The purpose of the study was to determine the effect of the technological parameters of the burnishing process on the surface roughness and hardness. The hardening experiments were performed on X5CrNi18-10 stainless steel specimens. The burnishing parameters used during the experimental examinations were burnishing speed, feed, and force. The experiments were carried out using the full factorial experimental design method.

After the evaluation of the measured results, it was determined that due to burnishing, from the pre-burnishing value of the Vickers hardness HV: 330-370 increased to HV: 380-490, while the roughness Ra reduced from 0,39-1,24 μm to 0,16-0,32 μm . The 2D and 3D surface roughness parameters were measured and evaluated on an AltiSurf 520 3D chromatic roughness measuring device before and after burnishing. A special improvement-ratio formula was developed to evaluate the effectiveness of the burnishing process in terms of hardness and roughness.

Keywords: sliding friction burnishing, stainless steel, surface roughness, hardness, surface layer

1. Bevezetés

A feldolgozóipar egyik fő fenntarthatósági problémája az energiafogyasztás csökkentése (Kovács, 2020). A minimális energiafogyasztás mellett a fenntartható gyártási koncepció széleskörű alkalmazásával a termékminőség javítására is törekednek a gyémántvasalás alkalmazásával. A vasalás egy forgács nélküli befejező megmunkálási művelet, amely kiváló felületi minőséget eredményez. A különböző gépek, berendezések energiafogyasztása is nagy mértékben függ azok felületi érdességétől (Kundrák et al., 2019; Drégelyi-Kiss et al., 2013). A nagy igénybevételű és kopásálló belső hengeres felületek befejező megmunkálásához rövid és hosszú löketű dörzsköszörülés (hónolás) alkalmazása ajánlott (Szabó, 2018).

A minimális kenés (MQL) mellett végzett megmunkáló műveletek a környezetvédelmi szempontok figyelembevételével a műveletet végző személy egészségét nem veszélyeztetik (Vereshchaka et al., 2011; Vereshchaka et al., 2013). Sachin és kollégái a 17-4 PH nemesíthető rozsdamentes acél gyémántvasalását különböző kis környezetterhelésű technikák esetén vizsgálták. Sachin és társai tanulmányukban (Sachin et al., 2018) arról számoltak be, hogy a 17-4 PH rozsdamentes acél kriogén környezetben végzett gyémántvasalásakor a technológiai paraméterek változásának milyen a hatása. Gyémántvasalás során a felület hűtését folyékony nitrogén (LN₂) alkalmazásával valósították meg. A vizsgált technológiai paraméterek a vasalási sebesség, az előtolás és a vasaló erő voltak. A gyémánt vasalási kísérleteket a Taguchi L₉ ortogonális kísérlettervezés alkalmazásával valósították meg. A szignifikáns paramétereket és az egyes paraméterek optimális szintjét varianciaanalízis (ANOVA) és főhatás-diagramok segítségével határozták meg. A kriogén gyémánt vasalás a mikrostruktúra módosulásához és az anyag felszín alatti keménységének javulásához vezetett. A minimális kenés (MQL) alkalmazásával megvalósított gyémántvasalás eredményeit a (Sachin et al., 2019_A) tanulmány tartalmazza. Sachin és társai MQL környezetben végzett vasalásakor azt vizsgálták, hogy a technológiai paraméterek változásának milyen hatása van a felületi integritás jellemzőire, azaz a felületi érdességre, a felület topográfijára, a felületi keménységre, a maradó feszültségre és a munkadarab felületi réteg alatti keménységre. Célul tűzték ki és megvalósították, hogy vasalás után a minimális felületi érdesség 0,05 µm és a maximális felületi keménység legalább HV: 405 legyen. Másik tanulmányukban Sachin és társai (Sachin et al., 2019_B) a 17-4 PH rozsdamentes acél száraz környezetben végzett gyémántvasalásával foglalkoztak a többváltozós optimalizálás alkalmazásával. Taguchi féle kísérlettervezési módszer (TGRA) használatával egyidejűleg szándékozták a vasalt felület felületi érdességét minimalizálni és a felületi keménységét maximalizálni. E vizsgálataiknál céljuk annak meghatározása volt, hogy a felületi érdességet és a felületi keménységet hogyan befolyásolják a vasalási paraméterek, azaz a sebesség, az előtolás és a vasaló erő változásai. A megfelelő paraméter kombinációk (vasalási sebesség $v=73$ m/perc, az előtolás $f=0,048$ mm/ford és a vasalóerő $F=150$ N) alkalmazása esetén kapott legjobb eredményeik: Ra 0,13 µm and H 392 HV. A gyémánt vasalási folyamat hatására a felületi érdesség és a felületi keménység is javult.

Dyl tanulmányában (Dyl, 2017) azt vizsgálta, hogy a vasalási paramétereknek milyen hatása van az X2CrNiMo17-12-2 jelű rozsdamentes acél felületi réteg keménységére és érdességére. A gyakorlatban a vasalás a gépkatrészek gyártásakor és felújítása során alkalmazható a köszörülés helyett. A külső hengeres felületek (pl. centrifugál szivattyúk tengervízzel érintkező csapjai) befejező megmunkálása megvalósítható vasalással. Ezért a vasalás a köszörülés helyett javasolható.

Shiou és társai (Shiou et al., 2017) rozsdamentes acélok finom befejező megmunkálását vizsgálták új vasalószerszám alkalmazásakor. A kutatásuk célja egy új, CNC esztergagéppel integrált erőcellát tartalmazó golyós vasalószerszám kifejlesztése volt, amely javítja a finoman esztergált AISI420

anyagminőségnek megfelelő rozsdamentes acél felületi érdességét és keménységét. A munkadarab hengeres részének golyós vasalási folyamatparamétereit Taguchi L18 mátrixú kísérlettervezéssel, ANOVA analízissel és validálási vizsgálatokkal határozták meg. A kísérleti eredmények alapján a technológiai paramétereinek megfelelő kombinációja a következő: 650 N vasalóerő, 0,05 mm/ford előtolás, 25 m/perc vasalási sebesség. A kísérletnél alkalmazott további paraméterek: 1/20 olaj/víz koncentrációjú emulzió, továbbá vasalási járatszám 3 volt. A vasalás előtti próbatest felületi érdessége Ra 1,1 μm -ról Ra 0,025 μm -re volt javítható vasalás hatására, míg a felület keménysége HRC 51-ről átlagosan HRC 52,5-re volt növelhető a megfelelő technológiai paraméterek alkalmazásával.

Az egyik leggyakrabban használt króm-nikkel acél az AISI 316Ti, mely acél forgácsolással történő megmunkálása nem egyszerű feladat. A felület befejező csúszó súrlódásos vasalással való megmunkálása viszont megoldható. Maximov és kollégái (Maximov et al., 2018) célul tűzték ki annak vizsgálatát, hogy a csúszó súrlódásos vasalás technológiai paramétereinek változása milyen változást okoz a vasalt felület minőségében. Maximov és kollégái ezt kísérleti és FEM vizsgálatokkal határozták meg AISI 316Ti ausztenites rozsdamentes acéلبól készült munkadarabok vasalásakor. Vizsgált paraméterek a vasalt minták felületi érdessége, mikro-keménysége, maradó feszültsége, kifáradási szilárdsága és kopásállósága voltak. Csatolt termikus feszültség FEM analízissel határozták meg a csúszó súrlódásos vasalási folyamatban generált hőmérsékletnek milyen hatása van a maradó feszültség változására. A felületi integritás fő jellemzőire kapott kísérleti eredmények azt bizonyítják, hogy a csúszó-súrlódásos vasalási eljárás sikeresen alkalmazható forgásszimmetrikus króm-nikkel anyagminőségű acél alkatrészek megmunkálására.

A jó felületi integritású és nagy kifáradási élettartamot lehetővé tevő Inconel 718 megmunkálása nehezen forgácsolható tulajdonságai miatt kihívást jelent a repülőgépiparban. Hua és társai tanulmányukban (Hua et al., 2019) a kombinált befejező esztergálás és a kis képlékenységű vasalás kombinációját javasolták a megmunkált Inconel 718 felületi integritásának (például a felület topográfiájának) és kifáradási határának javítására. Vizsgálták a megmunkált Inconel 718 érdességét, mikrokeménységét, fázisváltozását és fő maradófeszültségét a befejező esztergálás és a kis képlékenységű vasalási eljárások kombinációja esetén. Végül feltárták, hogy hogyan hat a felületi integritás változása az Inconel 718 jelű acél kifáradási határára. A kifáradási élettartam 82,4%-kal volt javítható a befejező esztergálás és a kis képlékenységű vasalási eljárások kombinációjával a befejező esztergálási eljáráshoz képest.

Korzynski és társai (Korzynski et al., 2018) kutatásainak tárgya arra a kérdésre való válasz keresése volt, hogy a szelepszárak egyensúlyi felületi rétegének előállítására érdekében csúszó súrlódásos gyémánt vasalás alkalmazható-e. Vizsgálatuk eredménye szerint, a vasalás utáni felületi textúra jobban hasonlított az egyensúlyi felületi textúrához mint a szalagköszörüléssel kezelt szelepszárak, és a szelepszár megmunkálásának befejező műveleteként javasolták a csúszó súrlódásos gyémánt vasalás alkalmazását.

Łabanowski és Ossowska tanulmányának (Łabanowski és Ossowska, 2006) célja a vasalás használhatóságának vizsgálata a duplex rozsdamentes acél feszültségkorróziós repedésállóságának javítása céljából. Kimutatták, hogy a vasalás alkalmazása növeli az acél korrózióállóságát, továbbá azt is, hogy jelentősen javíthatja az agresszív közeggel érintkező vegyi berendezésekben lévő részek feszültségkorrózióállóságát.

Molnár és Sztankovics cikkükben a keményesztergált felületek tribológiai tulajdonságait elemezi 2D és 3D felületi érdesség paraméterek alapján. A vizsgálatuk célja a felületek funkcionalitása szempontjából releváns érdesség-paraméterek összegzése és ezek alkalmazására vonatkozó kísérleti eredmények összegyűjtése volt. Noha elemzéseik keményesztergálásra vonatkoznak (Molnár és

Sztankovics, 2021), az érdességvizsgálatra vonatkozó vizsgálati tevékenységük a gyémántvasalás vizsgálata esetén is adaptálható.

Varga és társai a C45 anyagminőségű acél vasalásokor megvalósítható 3D-s felületi érdességi paraméter (Sq - eltérések mértani átlaga) javulásokat vizsgálták (Varga et al., 2015). Megállapították, hogy $F=45$ N értékű vasalóerő esetén a 45 m/perc vasalási sebesség esetén az előtolás növekedésének hatása 12,57 %, míg 82 m/perc vasalási sebesség alkalmazásakor csak 11,62 %. A csúszó súrlódásos gyémántvasalás alkalmas additív gyártással készített Ti6Al4V munkadarabok felületi érdességének (Varga et al., 2022_A), felületi keménységének (Dezső et al., 2022) és hengeres alkatrészek esetén az alakhelyességének (Varga et al., 2022_B) javítására. A felületminőség javítása fontos kiegészítő lépése az additív gyártási technológiáknak is. Dezső és Kósa kimutatta, hogy a felületi érdesség additív gyártás esetén irányfüggő lehet (Dezső és Kósa, 2012).

Ferencsik és Gál tanulmánya (Ferencsik és Gál, 2021_A) a csúszó súrlódásos gyémántvasalásnál beállítandó technológiai paraméterek (vasalóerő, előtolás, sebesség) és az átlagos felületi érdesség kapcsolatát vizsgálja DEFORM-2D szoftver alkalmazásával gyengén ötvözött alumínium anyagminőség esetén. Megállapították, hogy az átlagos felületi érdesség szimulált számszerű értékei jó közelítést mutatnak a gyakorlati kísérlet eredményeivel. Eltérésük 5,35 %, tehát a modell alkalmas a vasalás további jellemzői változásának elemzésére (Ferencsik és Gál, 2021_B).

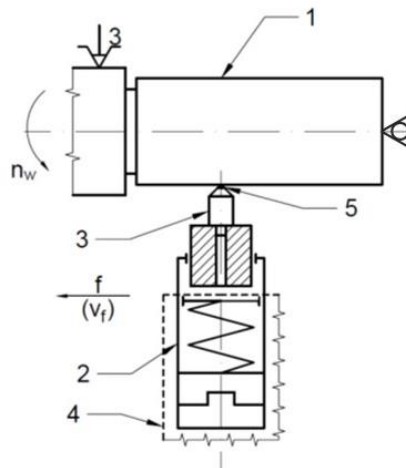
Tesfom és társai kísérleti vizsgálatának célja volt, hogy megvizsgálják milyen hatása van a vasalási paraméterek változtatásának a felületi érdességre C45 jelű acélötvözet síkfelületének vasalásokor (Tesfom et al., 2022). A Taguchi féle kísérlettervezési módszert alkalmazták, és a vasalástechnológiai paramétereknek a vasalóerőt, az előtolás és a vasalási járatszámot választották. A síkfelületek vasalás előtti előkészítése homlokmarással történt azonos technológiai paraméterek alkalmazásával. A vasalási eljárás előtt és után és a próbadarabok felületi érdességét megmérték. Vizsgálatuk eredményeként megállapították, hogy javult a felületi érdesség értéke, amikor az alkalmazott vizsgálati tartományokon belül a nagyobb vasalóerőt, kisebb előtolási sebességet és a nagyobb járatszámot alkalmazták.

E tanulmányban bemutatott vizsgálat célja, hogy meghatározza az X5CrNi18-10 anyagminőségű próbatestek vasalásokor alkalmazott technológiai paramétereknek milyen hatása van a 2D-s felületi érdességi paraméterekre és keménységre. A teljes faktoriális kísérlettervezési módszer alkalmazásával megvalósított kísérletek kiértékelésekor empirikus függvények megalkotása történt. Egy speciális dimenzió nélküli javulási arány tényező segíti vasalási folyamat hatékonyságának jobb kiértékelését a keménység és az érdesség viszonylatában.

2. A csúszó súrlódásos gyémánt vasalás alkalmazása külső hengeres felületeken

A hidegen képlékeny megmunkáló eljárások közé tartozik a vasalás, melyet külső hengeres felületek befejező megmunkálására is alkalmaznak. Az eljárásnak számos előnye van, melyek közé tartoznak: csökkenti a felületi érdességet, növeli a mikrokeménységet, miközben nyomó maradófeszültséget okoz, javítja az alakhelyességet és környezetbarát, mert nem igényel nagy mennyiségű hűtő- és kenőanyagot (Maheshwari és Gawande, 2017; Konefal et al., 2013; Maximov et al., 2015).

Az 1. ábrán látható a gyémánt vasalási mechanizmus, melynél meghatározott paraméterekkel és meghatározott erővel mozgatott gömb végű gyémánt szerszám érintkezve egyenesvonalú egyenletes mozgást a munkadarab forgástengelyével párhuzamosan, a forgó mozgást végző munkadarab felületén.



1. ábra. A gyémánt vasalás kinematikai vázlatja
(1 - munkadarab, 2 - vasalószerszám, 3 - vasalóbetét, 4 - szerszámbefogó, 5 - gyémántcsúcs),
 f – előtolás, v_f – előtoló sebesség, n_w – munkadarab fordulatszám

3. Kísérleti körülmények

3.1. Anyag, próbadarab

A kísérlet tárgya vegyipar, az olajipar és az élelmiszeripar berendezéseiben gyakran felhasznált X5CrNi18-10 jelű ausztenites króm-nikkel rozsdamentes acél volt. Jellemző rá a magas korrózióállóság, könnyű alakíthatóság. Vegyi összetételét az 1. táblázat (metalcor.de), mechanikai tulajdonságait a (metalcor.de) 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Az X5CrNi18-10 jelű ausztenites króm-nikkel rozsdamentes acél vegyi összetétele (wt.%)
(metalcor.de)

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	N %
≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,015	17,5-19,5	8,00-10,5	≤ 0,11

2. táblázat. Az X5CrNi18-10 jelű ausztenites króm-nikkel rozsdamentes acél mechanikai tulajdonságai
20 °C (metalcor.de)

Keménység HB 30	0,2% Folyáshatár Rp	Szakítószilárdság Rm	Nyúlás A5	Rugalmassági modulusz
≤ HB	≥ N/mm ²	N/mm ²	≥ %	kN/mm ²
215	190	500-700	45/35	200

Az X5CrNi18-10 rozsdamentes acél fizikai tulajdonságai 20°C-on a következők voltak (Ferencsik és Gál, 2021_A): Sűrűség 7,9 g/cm³, Fajlagos hőkapacitás 500 J/kg K, Hővezetőképesség 15 W/m K, Elektromos ellenállás 0,73 Ωmm²/m.

A vasalási kísérletekhez felhasznált próbadarabok geometriai méretei: 5 egymás mellett lévő Ø49,48 mm átmérőjű, 26 mm hosszú hengeres felület volt. A próbadarab vasalás előtti finomesztergálásának megmunkálási paraméterei: forgácsoló sebesség $v_c=90$ m/min, előtolás $f=0,05$ mm/ford és a fogásmélység $a_c=0,05$ mm voltak. A felületi érdesség adatai a későbbi táblázatokban találhatóak.

3.2. Kutatási módszertan, mérések

Jelen kísérletsorozathoz három faktor hatását vizsgálta történt meg, mindegyik faktor 2-2 szinten a teljes faktoriális kísérlettervezés (Taguchi, 1984; Fridrik, 1987; Montgomery, 2009) szerint volt változtatva. A módszer előnye, hogy empirikus függvénykapcsolat írható fel az input (független) paraméterek és az output (függő) változó között. A független változókat faktoroknak nevezzük. A faktorok különböző beállított értékeit szinteknek nevezzük.

A vasalási kísérleteket (2. ábra) a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetében található, felújított, kellően merev EU-400/01 típusú SZIM esztergán végeztük. A vasalószerszám anyaga PCD volt és sugara $R=3,5$ mm. A SAE 15W-40 típusú kenőanyag kézi adagolása $Q_o = 5 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-6}$ m³ mennyiségben történt.



2. ábra. A gyémánt vasalás megvalósítása

A vasalási paraméterváltozatok kísérlettervezési mátrixa a 3. táblázatban található.

A paraméterek számértékeinek felvétele a korábbi elméleti és gyakorlati kutatómunkáink eredményei alapján történt.

3. táblázat. Vasalási paraméterváltozatok

	Vasalási paraméterek			Dimenzió nélküli paraméterek		
	v [m/min]	f [mm/ford]	F [N]	x ₁	x ₂	x ₃
1	41,17	0,0125	10	-1	-1	-1
2	58,26	0,0125	10	+1	-1	-1
3	41,17	0,0500	10	-1	+1	-1
4	58,26	0,0500	10	+1	+1	-1
5	41,17	0,0125	40	-1	-1	+1
6	58,26	0,0125	40	+1	-1	+1
7	41,17	0,0500	40	-1	+1	+1
8	58,26	0,0500	40	+1	+1	+1

3.2.1. Felületi érdesség mérése

A felületi profil, a felületi topográfiaja elemzése fontos információkat szolgáltat a különböző megmunkálási folyamatok felületi integritására vonatkozóan (Narojczyk et al., 2018). A felületi érdesség mérése AltiSurf®520 típusú 3D-s felületi érdességmérő berendezéssel történt. Megmérésre került az X5CrNi18-10 rozsdamentes acél vasalásakor a különböző technológiai paraméter változatokhoz tartozó felületek 2D és 3D érdességei paramétereit, azonban jelen tanulmányban két 2D felületi érdesség-paraméter, konkrétan a számtani átlagmagasság (Ra) és a profil maximális magassága (Rz) vizsgálatának bemutatása következik. A felületi érdesség paraméterek meghatározásai az ISO 21920-2:2021 nemzetközi szabványban találhatóak. A felületi érdesség mérések minden vasalási paraméterváltozatnál 3 helyen történtek, melyek átlagolásra kerültek.

Vizsgálataink során a mért jellemzők változásának szemléletesebbé tételéhez dimenzió nélküli viszonyszámokat hoztunk létre, melyet az alábbi képletek szemléltetnek:

$$IRx = \frac{Rx_e - Rx_v}{Rx_e} \quad (1)$$

ha x=a, akkor Ra-ról van szó; ha x=z, akkor Rz-ről.
ahol:

IRa - Az Ra jellemző dimenzió nélküli javulási viszonyszáma

IRz - Az Rz jellemző dimenzió nélküli javulási viszonyszáma

Ra_e - Az esztergálás utáni Ra jellemző értéke, μm

Ra_v - A vasalás utáni Ra jellemző értéke, μm

Rz_e - Az esztergálás utáni Rz jellemző értéke, μm

Rz_v - A vasalás utáni Rz jellemző értéke, μm

Az IRa és IRz esetén minél nagyobb pozitív szám a javulási viszonyszám értéke, annál nagyobb mértékű a vasalás következtében keletkező javulás.

3.2.2. Felületi mikro-keménység mérése

A próbatestek felületi mikro-keménységének mérése három egymástól 120°-ban lévő pontban történt a Miskolci Egyetem Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében található Wilson

Instruments Tukon 2100B Vickers keménységmérő berendezéssel. Mérési elve, hogy a mérés során egy 136°-os gyémántgúlát nyomnak meghatározott erővel a mérendő felületre. A kiértékeléshez megméri a lenyomat átlóit CCD kamera segítségével, és a kettő átlagából kiszámítják a lenyomat felületét a készülék saját szoftvere segítségével (Dezső és Kósa, 2012).

A vizsgálat során a keménység változásának szemléletesebbé tételéhez dimenzió nélküli viszonyszámok megalkotása történt itt is, mely kiszámítására az az alábbi képletek szolgálnak:

$$\rho_{HV} = \frac{HV_{02,v}}{HV_{02,e}} \quad (2)$$

$$IHV_{02, \%} = (\rho_{HV} - 1) \cdot 100, \% \quad (3)$$

ahol:

ρ_{HV} - A vizsgálati jellemző (keménység) dimenziótlan javulási viszonyszáma

$HV_{02,v}$ - A vasalás utáni keménység,

$HV_{02,e}$ - Esztergálás utáni keménység,

$IHV_{02, \%}$ - A javulási viszonyszám változásának százalékos értéke, %

Minél nagyobb a viszonyszám értéke, annál nagyobb mértékű javulás, vagyis annál nagyobb keménységnövekedés tapasztalható a vasalás következtében.

3.3. Mérési eredmények

3.3.1. A felületi érdesség mérési eredményei

A felületi érdesség mérési eredményeit és a számított javulási viszonyszámokat az Ra esetére a 4. táblázat, Rz esetére az 5. táblázat tartalmazza.

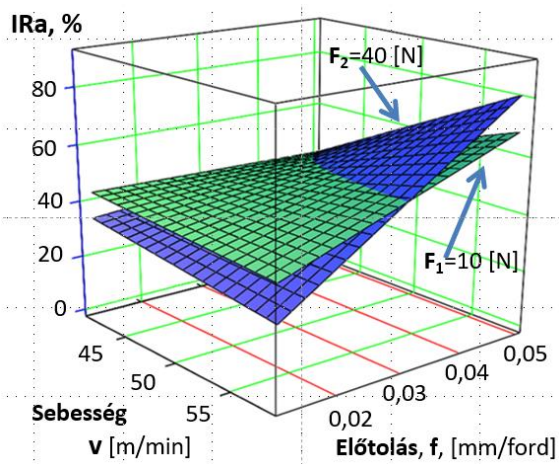
4. táblázat. A számtani átlagmagasság javulási viszonyszáma (IRa)

	Vasalási paraméterek			Vasalás előtt	Vasalás után	Az Ra javulási viszonyszám
	v, m/min	f, mm/ford	F, N	Ra _e , μm	Ra _v , μm	IRa, %
1	41,17	0,0125	10	0,448	0,170	62,054
2	58,26	0,0125	10	0,452	0,161	64,381
3	41,17	0,0500	10	0,439	0,255	41,913
4	58,26	0,0500	10	0,414	0,234	43,478
5	41,17	0,0125	40	0,460	0,304	33,913
6	58,26	0,0125	40	0,426	0,319	25,117
7	41,17	0,0500	40	0,393	0,229	41,730
8	58,26	0,0500	40	1,237	0,238	80,760

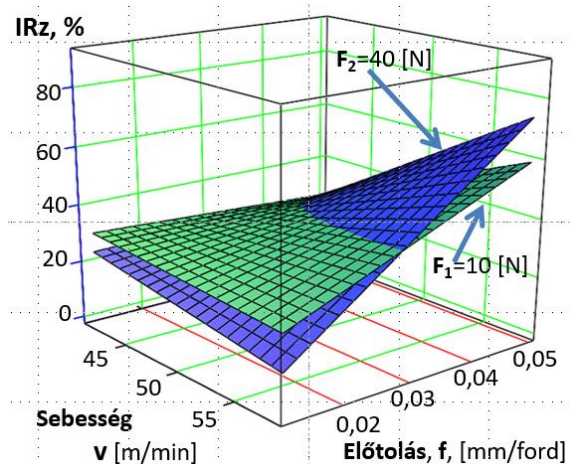
5. táblázat. A profil maximális magasság javulási viszonyyszáma (IRz)

	Vasalási paraméterek			Vasalás előtt	Vasalás után	Az Rz javulási viszonyyszám
	v, m/min	f, mm/ford	F, N	Rz _e , μm	Rz _v , μm	IRz, %
1	41,17	0,0125	10	2,403	1,357	43,529
2	58,26	0,0125	10	2,380	1,197	49,706
3	41,17	0,0500	10	2,380	1,760	26,050
4	58,26	0,0500	10	2,257	1,593	29,420
5	41,17	0,0125	40	2,637	2,017	23,512
6	58,26	0,0125	40	2,463	2,160	12,302
7	41,17	0,0500	40	2,320	1,720	25,862
8	58,26	0,0500	40	6,727	1,763	73,792

A MathCAD 15 programmal meghatározott empirikus képletek (4-5) szemléltetése a 3-4. ábrán látható.



3. ábra. Az IRa javulási viszonyyszám változása



4. ábra. Az IRz javulási viszonyyszám változása

$$IRa = 53,0986 + 0,684 \cdot v + 303,813 \cdot f + 0,945 \cdot F - 26,460 \cdot v \cdot f - 0,53 \cdot v \cdot F - 79,195 \cdot f \cdot F + 2,527 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (4)$$

$$IRz = 10,5518 + 1,158 \cdot v + 864,505 \cdot f + 2,167 \cdot F - 36,599 \cdot v \cdot f - 0,074 \cdot v \cdot F - 115,028 \cdot f \cdot F + 3,222 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (5)$$

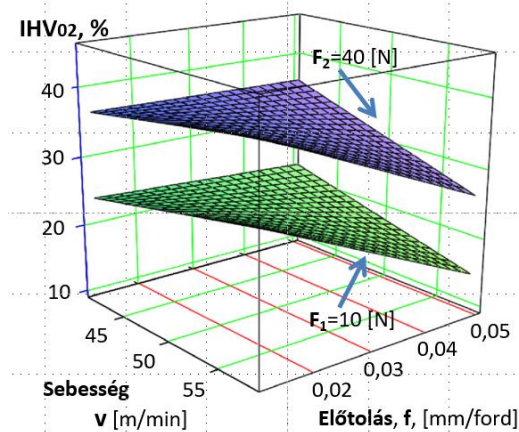
3.3.2. A felületi mikrokeménység mérési eredményei

A felületi mikrokeménység mérési eredményeit és a számított javulási viszonyyszámokat a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. A profil maximális magasság javulási viszonyozsáma (IR_z)

	Vasalási paraméterek			Vasalás előtt	Vasalás után	Az HV ₀₂ javulási viszonyozsáma
	v, m/min	f, mm/ford	F, N	HV _{02, e}	HV _{02, v}	IHV _{02, %}
1	41,17	0,0125	10	346,33	429,67	24,064
2	58,26	0,0125	10	324,00	419,67	29,528
3	41,17	0,0500	10	332,33	406,67	22,369
4	58,26	0,0500	10	338,00	388,00	14,793
5	41,17	0,0125	40	344,33	470,00	36,497
6	58,26	0,0125	40	347,33	488,00	40,500
7	41,17	0,0500	40	335,00	455,67	36,021
8	58,26	0,0500	40	365,00	461,00	26,301

A MathCAD 15 programmal meghatározott empirikus képlet (6) szemléltetése az 5. ábrán látható.

**5. ábra.** Az IHV_{0,2} javulási viszonyozsáma változása

$$IHV_{02} = -4,0064 + 0,598 \cdot v + 767,160 \cdot f + 0,500 \cdot F - 19,993 \cdot v \cdot f - 2,406 \cdot 10^{-3} \cdot v \cdot F + 2,541 \cdot f \cdot F - 0,035 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (6)$$

4. Összefoglalás, következtetések

A tanulmány az X5CrNi18-10 rozsdamentes acél csúszó súrlódásos gyémánt vasalással kapcsolatos kísérleti vizsgálatainak eredményeit mutatja be. A vizsgált kísérleti paraméterek a vasalási sebesség, előtolás és erő voltak. Feladat volt annak meghatározása, hogy ezek a paraméterek hogyan hatnak a felületi érdességre és a mikrokeménységre. A kísérletezéshez a teljes faktoriális kísérlettervezés módszere volt alkalmazva. Az eredmények szemléletesebbé tételéhez megalkotásra került több dimenzió nélküli viszonyozsámat, majd az empirikus képlet definiálását követően a számszerű értékeket 3D-s diagramok formájában is bemutattuk. Ha csak a felületi érdesség javulást vizsgálnánk, akkor a 8.

paraméter változat lenne a leghatékonyabb, viszont, ha csak a keménységjavulást, akkor a 6. paraméterváltozat. Mivel az érdességjavulási viszonyszámok és a keménységjavulási viszonyszámok dimenzió nélküliek, így összeadásuk után mindkét javulás figyelembe vehető (7. táblázat).

7. táblázat. A leghatékonyabb paraméterváltozat kiválasztása

	Vasalási paraméterek			Dimenzió nélküli számok		
	v, m/min	f, mm/ford	F, N	IRa, %	IHV ₀₂ , %	Σ, %
1	41,17	0,0125	10	62,054	24,064	86,118
2	58,26	0,0125	10	64,381	29,528	93,909
3	41,17	0,0500	10	41,913	22,369	64,282
4	58,26	0,0500	10	43,478	14,793	58,271
5	41,17	0,0125	40	33,913	36,497	70,410
6	58,26	0,0125	40	25,117	40,500	65,617
7	41,17	0,0500	40	41,730	36,021	77,751
8	58,26	0,0500	40	80,760	26,301	107,061

A 7. táblázat alapján a 8. paraméterváltozat kiválasztása ajánlott.

5. Köszönetnyilvánítás

Az NKFI-125117 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K_17 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalom

- [1] Kovács, Gy. (2020). *Lean értékorientált folyamatfejlesztés*. Miskolc, Miskolci Egyetemi Kiadó, 123 p., ISBN: 9786155626494.
- [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] Drégelyi-Kiss, Á, Czifra, Á, Palásti-Kovács, B. (2013). Comparison of capability calculations of surface roughness measurement in automotive industry. In S. Adamczak (Ed.) *Proceedings of the ISMQC 2013* (pp. 1-8). ID 201.
- [4] Szabó, O. (2018). Application and modelling of polygon joints torque transmissions in the power transmission of electro mobiles. *IoP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 448(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012054>
- [5] Vereshchaka, A. S., Vereshchaka, A. A., Kirillov, A. (2011). Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. *Key Engineering Materials*, 496, 67–74. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.496.67>
- [6] Vereschaka, A. A., Vereschaka, A. S., Grigoriev, S. N., Kirillov, A. K., Khaustova, O. U. (2013). Development and research of environmentally friendly dry technological machining system with compensation of physical function of cutting fluids. *Procedia CIRP*, 7, 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.053>

- [7] Sachin, B., Narendranath, S. and Chakradhar, D. (2019_A). Sustainable diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel for enhanced surface integrity and product performance by using a novel modified tool. *Mater. Res. Express*, 6, 046501. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf900>
- [8] Sachin, B., Narendranath, S., Chakradhar, D. (2019_B). Analysis of surface hardness and surface roughness in diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel. *IoP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 577, 012075. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012075>
- [9] Sachin, B., Narendranath, S., Chakradhar, D. (2018). Experimental evaluation of diamond burnishing for sustainable manufacturing. *Mater. Res. Express*, 5, 106514. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadb0a>
- [10] Dyl, T. (2017). The influence of burnishing parameters on the hardness and roughness on the surface layer stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 82(2), 63–69. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.2356>
- [11] Shiou, F.-J., Huang, S.-J., Shih, A. J., Zhu, J. and Yoshino, M. (2017). Fine surface finish of a hardened stainless steel using a new burnishing tool. *Procedia Manufacturing*, 10, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.048>
- [12] Maximov, J. T., Duncheva, G. V., Anchev, A. P. et al. (2018). Effect of slide burnishing method on the surface integrity of AISI 316Ti chromium–nickel steel. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 40, 194. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1135-3>
- [13] Hua, Y., Liu, Z., Wang, B., Hou, X. (2019). Surface modification through combination of finish turning with low plasticity burnishing and its effect on fatigue performance for Inconel 718. *Surface and Coatings Technology*, 375, 508–517. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.057>
- [14] Korzynski, M., Dudek, K., Kruczek, B., Kocurek, P. (2018). Equilibrium surface texture of valve stems and burnishing method to obtain it. *Tribology International*, 124, 195–199. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.014>
- [15] Łabanowski, J., Ossowska, A. (2006). Influence of burnishing on stress corrosion cracking susceptibility of duplex steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 19(1), 46–52.
- [16] Molnár, V., Sztankovics, I. (2021). Analysis of roughness parameters determining tribological properties in hard turned surfaces. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 49(2), 77–84. <https://doi.org/10.33927/hjic-2021-26>
- [17] Varga, G., Szigeti, F. and Dezsó, G. (2015). Examination of surface roughness of burnished workpieces. *Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology*, 29, 94.
- [18] Varga, G., Dezső, G. and Szigeti, F. (2022_A). Surface roughness improvement by sliding friction burnishing of parts produced by selective laser melting of Ti6Al4V titanium alloy. *Machines*, 10(5), 5. <https://doi.org/10.3390/machines10050400>
- [19] Dezső, G., Szigeti, F. and Varga, G. (2022). Surface hardness modification of selective laser melted Ti6Al4V parts by sliding friction diamond burnishing. *Period. Polytech. Mech. Eng.*, 67(1), 59–69. <https://doi.org/10.3311/PPme.21124>
- [20] Varga, G., Dezső, G. and Szigeti, F. (2022_B). Shape accuracy improvement of selective laser melted Ti6Al4V cylindrical parts by sliding friction diamond burnishing. *Machines*, 10(10), 949. <https://doi.org/10.3390/machines10100949>
- [21] Dezső, G., Kósa, P. (2012). Roughness of plane faces produced by additive manufacturing. *International Journal of Engineering*, 10(2), 181–184.

- [22] Ferencsik, V., Gál, V. (2021_A). A felületvasalási eljárás vizsgálata végeeselemes módszerrel. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 11(4), 96–101. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.11>
- [23] Ferencsik, V., Gál, V. (2021_B). A vasalóerő átlagos felületi érdességre gyakorolt hatásának vizsgálata. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 11(4), 139–143. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.17>
- [24] Tesfom, F., Pásztor, I., Felhő, Cs. (2022). Flat diamond sliding burnishing surface roughness investigation. *Multidiszciplináris tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 12(3), 186–195. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.3.17>
- [25] Maheshwari, A. S., Gawande, R. R. (2017). The role of burnishing process in manufacturing industry - A state-of-the-art survey. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(6), 50–60.
- [26] Konefal, K., Korzynski, M., Byczkowska, Z., Korzynska, K. (2013). Improved corrosion resistance of stainless steel X6CrNiMoTi17-12-2 by slide diamond burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(11), 1997–2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.021>
- [27] Maximov, J. T., Anchev, A. P. and Duncheva G. V. (2015). Modeling of the friction in the tool workpiece system in diamond burnishing process. *Coupled Systems Mechanics*, 4(4), 279–295. <https://doi.org/10.12989/csm.2015.4.4.279>
- [28] <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/5/> (2020.05.17)
- [29] Taguchi, G. (1984). *System of Experiment Design*. p. 143. UNIPUB, Kraus International Publications, White Plains.
- [30] Fridrik, L. (1993). *Válogatott fejezetek a gépgyártás-technológiai kísérletek tervezése témaköréből*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- [31] Montgomery, C. (2009). *Design and Analysis of Experiments*. 7th edn. International Student Version, Arizona State University.
- [32] Narojczyk, J., Morozow, D., Narojczyk, J. W., Rucki, M. (2018). Ion implantation of the tool's rake face for machining of the Ti-6Al-4 V alloy. *J. Manuf. Process*. Part A 34, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.017>