

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



KÜLSŐ HENGERES FELÜLETEK GYÉMÁNT SZERSZÁMMAL
VÉGZETT VASALÁSI ELJÁRÁSÁNAK VIZSGÁLATA

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:
Ferencsik Viktória
okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK
TÉMATERÜLET
GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMACSOPORT

Doktori Iskola Vezető:
Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport Vezető:
Dr. Maros Zsolt
egyetemi docens

Témavezető:
Dr. Varga Gyula
egyetemi docens

Miskolc
2025

VÉDÉSI BIZOTTSÁG

Elnök:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár
Miskolci Egyetem

Titkár:

Dr. Sztankovics István
egyetemi docens
Miskolci Egyetem

Tagok:

Dr. Németh István
egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Dr. Kovács Zsolt Ferenc
egyetemi docens
Neumann János Egyetem

Dr. Lukács Zsolt
egyetemi docens
Miskolci Egyetem

Hivatalos bírálók:

Dr. Kodácsy János
Professor Emeritus
Neumann János Egyetem

Dr. Szalay Tibor
c. egyetemi tanár
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

TARTALOMJEGYZÉK

Tézisfüzetben alkalmazott jelölések.....	4
1 Bevezetés.....	5
1.1. Előzmények.....	5
1.2. Az értekezés célkitűzései	8
2 A kutatási feladat megoldása.....	10
2.1. Az analitikai vizsgálatok megvalósítása	10
2.2. A vasalási kísérletek körülményei	11
2.3. A felületi érdesség és a maradó feszültség mérése	12
3 Új tudományos eredmények, tézisek és a hasznosítás lehetőségei	13
3.1. Tézisek	13
3.2. A hasznosítás és továbbfejlesztés lehetőségei	15
Az értekezés témájában megjelent jelentősebb publikációk	16
Irodalomjegyzék.....	17

TÉZISFÜZETBEN ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK

c	– keményedési együttható [-]
F	– terhelőerő/vasalóerő [N]
f	– vasalási előtolás [mm/ford]
HV	– Vickers keménység
i	– járatszám [-]
m	– alakváltozási sebesség kitevője [-]
n	– keményedési kitevő [-]
n_{mdb}	– munkadarab fordulatszáma [1/min]
PCD	– polycrystalline diamond (mesterséges gyémánt)
R_a	– átlagos felületi érdesség [μm]
R_t	– maximális érdességmagasság [μm]
R_z	– átlagos egyenetlenség-magasság [μm]
R_l	– vasalószerszám elméleti sugara [mm]
v	– vasalási sebesség [m/min]
y	– kezdeti folyási feszültség [MPa]
δ	– vasalószerszám elméleti bemélyedésének mélysége [mm]
λ	– röntgensugárzás hullámhossza [m]
ν	– kinematikai viszkozitás [mm^2/s]

1 BEVEZETÉS

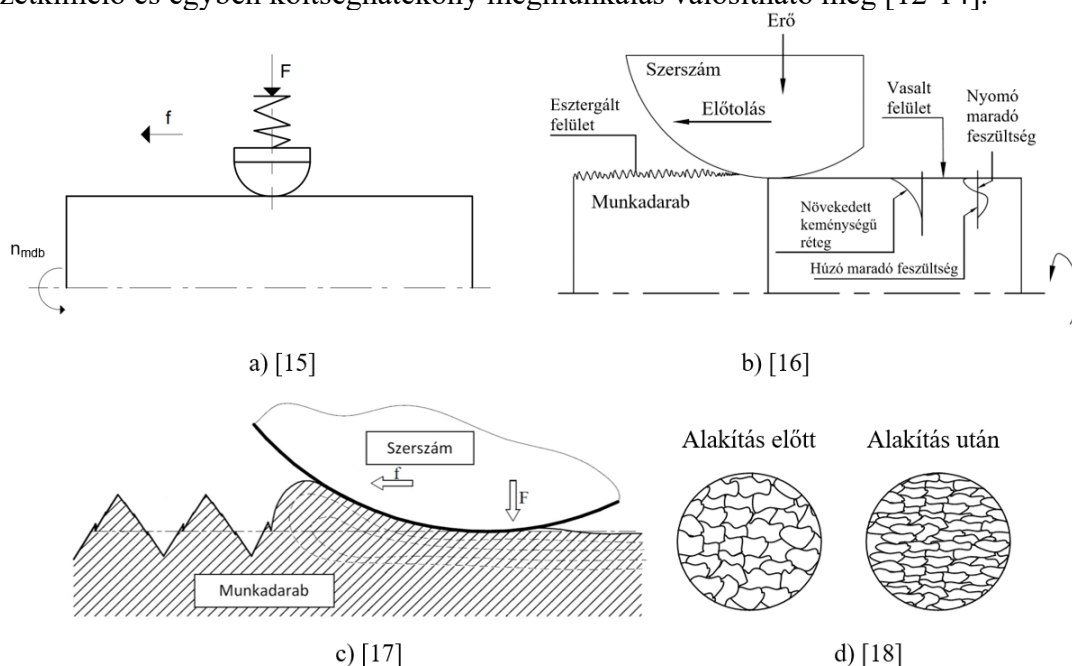
Az első fejezetben bemutatom a gyémántszerszámos felületvasalás élettartamnövelő hideg képlékenyalakító eljárások között elfoglalt helyét. Az előzetes átfogó szakirodalmi elemzés alapján, meghatározom tudományos értekezésem tárgyát és kijelölöm az elérendő célkitűzéseket.

1.1. Előzmények

Az egyes alkatrészek tervezett élettartamának biztosításában a tervezés és üzemeltetés mellett fontos szerepet játszik a gyártási mód, illetve annak paramétereinek helyes meghatározása, mivel a felületelemek tulajdonságai, integritása szignifikánsan befolyásolja a rendszer funkcionális viselkedését. Ebből következik, hogy a működő, terhelés alatt álló felületek minőségének kardinális jelentősége van az élettartam szempontjából [1, 2]. A hideg képlékenyalakító eljárásokkal kedvezően módosítható a forgácsolt felületek geometriája, csökkentve a felületi egyenetlenségeket és növelve az élettartamot [1, 3, 4]; e technológiák közé tartozik a felületvasalás is.

A mérnöki gyakorlatban már évtizedek óta hatékonyan alkalmazzák, alapvetően vasúti kocsik tengelyeinek, illetve autóipari főtengelyek megmunkálására fejlesztették ki, majd felhasználási köre egyre kiterjedtebbé vált. Előszeretettel applikálják hidraulikai és egyéb munkahengerek, dugattyúk, csapágyfészek, perselyek, csapok befejező megmunkálásaként [3, 5, 6]. Alkalmazási területéhez pedig általánosságban hozzátartozik az autóipari, légi- és űrhajózási ipar [7-9], de számos példa létezik az egészségügyben való felhasználására is [10, 11].

Külső hengeres felületek vasalásakor a szerszám és a munkadarab statikus érintkezése során létrejövő csúszási súrlódáskor végbemenő kölcsönhatás eredményeként következik be a képlékeny alakváltozás. A megmunkálás során nem keletkezik forgács, sem szikra vagy por, ráadásul hűtő-kenő folyadék igénye is minimális, sőt esetenként elhagyható, így környezetkímélő és egyben költséghatékony megmunkálás valósítható meg [12-14].



1. ábra. A felületvasalás során zajló folyamatok

Az 1.a) ábrán látható, ahogy a szerszámba beépített rugó létrehozza a szükséges, a munkadarab anyagának folyási határát meghaladó nyomóerőt, majd a szerszám f előtolással a munkadarab forgástengelyével párhuzamos irányban egyenes vonalúan mozog a forgó mozgást végző munkadarab felületén. Ahogy Dzionk és társai [17, 19] is ismertetik, az eljárás során lezajló folyamatok több szakaszra bonthatóak: a kezdeti szakaszban a szerszám, nyomást gyakorolva a felületi egyenetlenségek csúcsaira, képlékeny deformációt idéz elő, mely által megváltozik a szabálytalanságok szerkezete, alakjuk és magasságuk csökken (1. b) ábra). A második fázisban - a megnövekedett nyomás által - a deformált anyag a szerszám érintkezési pontjában lévő szabad terek irányába mozdul el (1. c) ábra), vagyis az érdesség csúcsok belapulnak a mélyedésekbe. Az utolsó szakaszban a szemcsék oly módon deformálódnak képlékenyen, hogy hosszukás alakot vesznek fel (1. d) ábra). Látható, hogy az alakítás előtt közel egyenlő térfogatúak a szemcsék, azonban az alakítás irányában egyre inkább nyújtottakká válnak és az anyag anizotróppá válik az alakítási textúra következményeként.

Alapvetően széles a vasalással megmunkálható anyagminőségek tartománya, kezdve az alumínium és ötvözetektől [2, 7], a bronzon [6, 20] és acélon, illetve azok ötvözeit [5, 9, 12, 13, 17, 19] át, egészen az olyan speciális anyagokig, mint pl.: bio-lebomló MgCa ötvözet [10], kovácsolt titánötvözet [11], Inconel 718 [21] vagy akár a nagy molekulatömegű polietilén [22].

Annak ellenére, hogy a felületvasalási technológiát az amerikai General Electric fejlesztette ki [23], ipari szintű felhasználása az egykori Szovjetunióban terjedt el, ezáltal megkövetelve a téma tudományos szintű megközelítését is. Több száz publikáció született mind a vasalt felületek integritásával, mind az eljárás fizikai folyamatainak (illetve a szintetikus gyémántok előállításának) tanulmányozásával kapcsolatban. A megismert és feldolgozott hazai, nemzetközi szakirodalmak jelentős mértékben hozzájárultak saját kutatómunkám irányvonalának meghatározásához, különös tekintettel a felületi érdesség, feszültségi állapot és a megmunkálási paraméterek közötti összefüggések feltárása tekintetében.

Számos kutatócsoport végzett részletes vizsgálatokat különböző alumíniumötvözeteken alkalmazott vasalási eljárások hatásmechanizmusának feltérképezésére, kísérleti és numerikus módszerekkel egyaránt. Posdzich és társai [24] a vasalási erő, előtolás és sebesség felületi érdességre gyakorolt hatását vizsgálták, továbbá végesselemben módszerrel a feszültségi állapot változását is. A numerikus és kísérleti eredmények alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a vasalást megelőző felületi integritási jellemzők (felületi érdesség és feszültségi állapot) nem befolyásolják nagy mértékben a vasalási eljárás hatását.

Basak és kutatótársai [25] a járműgyártásban is gyakran alkalmazott 5083 Al-Mg jelű anyagminőséget vizsgálták a felületi érdesség, keménység és szakítószilárdság tekintetében. A mért értékek alapján egyértelműen azt a következtetést vonták le, hogy az előtolás növelése negatívan befolyásolja a vizsgálat alá vont jellemzőket, míg a fordulatszám hatását elhanyagolhatónak állapították meg.

Rodriguez és munkatársai [26] már hőkezelt, T3 és T4 hőkezeltségi állapotú 2050 jelű dörzshegesztett alumínium ötvözetben végeztek vizsgálatokat, a hegesztési varraton és annak környezetében. A dörzshegesztés okozta kedvezőtlen mechanikai tulajdonságok (keménység, szakító szilárdság) a vasalási folyamat alkalmazásával előnyösen módosultak, illetve igazolták a vasalás kedvező hatását két felületi topográfiai jellemzőre is. Sanchez Egea és társai [27] ugyancsak ezen az anyagminőségen végeztek vasalási kísérleteket, viszont azt kiegészítették szimulációs vizsgálatokkal, melyek eredményei alapján egységesen azt fogalmazták meg, hogy a vasalóerő befolyásolja leginkább a nyomó maradó feszültség keletkezését, azonban nagyobb érték esetén az kedvezőtlen mértékben módosítja a felületi érdességet az ötvözet alacsony keménysége miatt.

Kluz és szerzőtársai [28] szintén dörzshegesztett darabokon alkalmazták a vasalási eljárást, de már nagyobb keménységgel rendelkező EN AW-2024-T3 anyagminőségen. Különböző paraméterbeállításokat alkalmazva, nagymértékű javulást sikerült előidézniük a mikro-

keményység, felületi érdesség és nyomó maradó feszültség szempontjából is. Ezzel megegyező anyagminőségen Amini és társai [29] a kísérleti vizsgálataikat szimulációs elemzéssel is bővítették ANSYS program alkalmazásával. A keménységen és felületi érdességen túl, egyedi módon a szakadási nyúlás változását is megvizsgálták. Ez utóbbival kapcsolatban a vasalás szintén pozitív, de csekély mértékű változást generált. Továbbá, megállapításokat tettek a maradó feszültségre vonatkozóan is, annak ellenére, hogy izotrópikus keményedési modellt alkalmaztak a szimuláció megalkotása során.

Schubnell és Farajian [30] pedig úgyszintén egyedülálló példaként, többek között a fáradási szilárdság hatását is elemezték dörzshegesztett EN AW-5083 anyag esetén, összevetve a mélyhengerlés és felületvasalás hatásait. Az érdesség és fáradási szilárdság tekintetében csekély különbség mutatkozott a két képlékenyalakító eljárás között, viszont a keménység szempontjából a vasalás, míg a maradó feszültség tekintetében a hengerlés bizonyult kedvezőbbnek, utóbbival egymással szembenálló megállapításokat fogalmaztak meg.

Huuki és társai [31] úgyszintén rendhagyó esetként - a felületi érdességen és keménységen túl - megvizsgálták EN AW-6082-T6 jelű alumínium ötvözetet is a vasalási eljárás köralakhelyességre gyakorolt hatását. A kísérlet megvalósítása során azonban csak egyféle paraméterbeállítást alkalmaztak, mely az alumínium esetében megmagyarázhatatlanul nagy szórást mutatott.

Randjelovic és kutatótársainak [32] munkája pedig amiatt sajátos, mert annak érdekében, hogy bizonyítsák, a vasalást megelőző felület minőségének nincs hatása a kialakuló felületi érdességre, a marás kinematikai modelljét vették alapul végeselemes vizsgálataikhoz. A kísérleti és szimulációs eredmények is igazolták, hogy az az optimális, ha a vasalószerszám behatolási mélysége megegyezik a vasalandó felület érdességét jellemző R_p (profil maximális csúcsmagassága) értékkel.

Sharma és Kapoor [33] Taguchi-féle kísérlettervezési módszer és varianciaelemzés alkalmazásával tervezték meg, illetve egészítették ki Al7075 jelű alumíniumon végzett gyakorlati kísérleti vasalási munkájukat, melynek során szokatlan paraméterkombinációként a sebesség, előtolás és járatszám felületi érdességre, valamint keménységre gyakorolt hatását vizsgálták. Az eredmények elemzése alapján arra az ugyancsak nem jellemző következtetésre jutottak, hogy az előtolásnak nincs jelentősége a felület minőségének változásában, így annak növelésével még csökkenthető is a megmunkálási idő.

Travieso-Rodriguez és társai [34] is kísérlettervezési módszerrel közelítették meg a vasalás okozta keménység és feszültségállapot változás vizsgálatát A92017 anyagú konvex munkadarabok esetén. Kutatómunkájuk Travieso-Rodriguez, Dessein és Gonzales-Rajas [35] vizsgálatain alapul, melynek során a szóban forgó anyagminőséget konkáv felületkialakítás esetén is megmunkálták a felületi érdesség változásának vizsgálata tekintetében. Mindkét geometriai kialakítás esetén a görbületi sugár befolyásolta leginkább a kialakuló felületi minőséget, valamint a nagyobb mértékű előtolás bizonyult kedvezőbbnek.

Amdouni és kutatótársai [36] kizárólag a vasalási irány vizsgálatát, illetve a szerszámmozgatás optimális stratégiájának meghatározását tűzték ki célul a 2017A-T451 alumíniumötvözet síkfelületének vasalása során. Vizsgálatuk a felületi érdességre és keménységre fókuszált. Kísérleteikhez krómozott, 100Cr6 jelű csapágyacélból készült szerszámot alkalmaztak, miközben a többi vasalási paramétert állandó értéken tartották; ezek közül a behatolási mélységet diszkrét értéként kezelték.

Stöckmann és Putz [37] síkfelületen végeselemes szimulációk segítségével elemezték az alumíniumötvözet vasalásának hatásait, melyet kísérletekkel igazoltak. Kutatásuk alapfeltevése az volt, hogy a kiindulási felület minősége nem befolyásolja a vasalás hatékonyságát. Az általuk kidolgozott modell a kísérleti eredményekhez viszonyítva 0,53-3,8 μm közötti átlagos eltérést (2-23%-os relatív eltérést) mutatott az átlagos felületi érdességre vonatkozóan.

Akárcsak az értekezésben szereplő nagyszámú feldolgozott publikáció, a példaként kiemelt tanulmányok megállapításai is, nem csupán a téma kijelölésében játszottak szerepet, hanem rávilágítottak bizonyos ellentmondásokra és kutatási hiányterületekre. Kutatómunkám ezek feltárására, tisztázására és tudományos kiegészítésére törekszik.

1.2. Az értekezés célkitűzései

Az értekezés elsődleges célja a gyémántszerszámos felületvasalás hatékonyságának vizsgálata és növelése, valamint az elméleti felületi érdességre gyakorolt hatásának elemzése meglévő mechanikai modellek alapján. A vizsgálatok során figyelembe veszem és igazodom a befejező megmunkálásokkal szemben támasztott egyre szigorúbb követelményekhez.

Az eljárást végeसेlemes módszerrel is tanulmányozom, amelyet több, faktoriális kísérlettervezés alapján végzett kísérletsorozattal egészítek ki gyengén ötvözt alumínium anyagminőségen. A disszertáció céljai közé tartozik empirikus összefüggések feltárása a felületi minőséget jellemző különböző mérőszámok és a technológia megvalósítása során beállított paraméterek között.

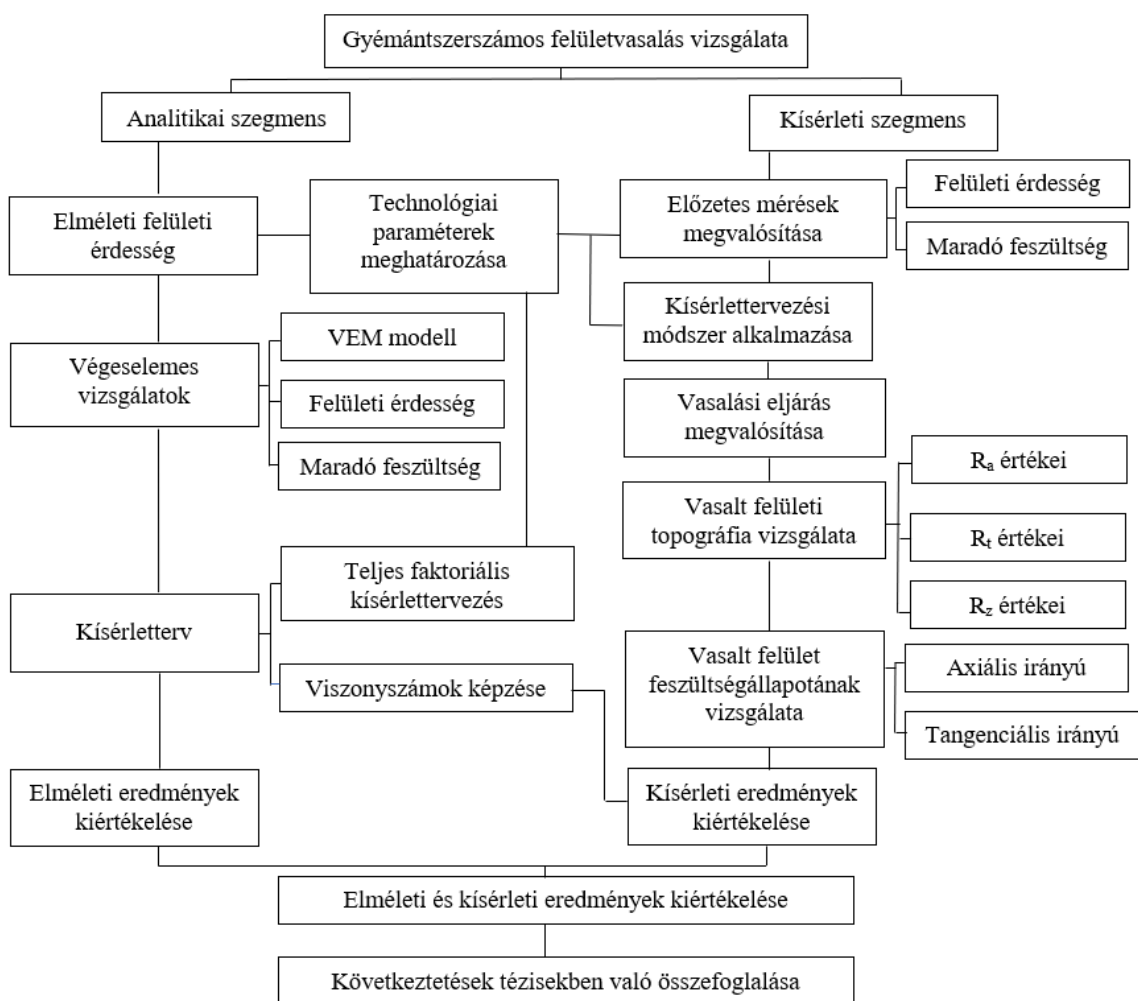
További célkitűzésem egy olyan továbbfejlesztett elméleti modell és végeसेlemes modell kidolgozása, amely a gömb végű vasalószerszámmal végzett megmunkálás során előálló felületi érdesség előrejelzését teszi lehetővé, ezáltal támogatva az eljárás optimalizálását az adott anyagminőségre vonatkozóan.

PhD dolgozatomban bemutatom a kutatómunka kezdeti tevékenységeitől az egyes elért eredményeket, az új tudományos konklúziókat pedig tézisekben fogalmazom meg az alábbi lépések megvalósításának megfelelően:

- A gömb végű vasalószerszámmal végzett vasalási folyamat elméleti vizsgálata, meglévő mechanikai modellek felhasználásával egy, a külső hengeres felület megmunkálására alkalmas relevánsabb modell kidolgozása céljából.
- A vasalást jellemző technológiai paraméterek és a felületi érdesség, továbbá maradó feszültség kapcsolatának végeसेlemes módszerrel történő vizsgálata.
- Az eljárás felületi érdességre és feszültségi állapotra gyakorolt hatásának kísérleti úton történő vizsgálata.
- A gyémántszerszámos vasalás technológiai paramétereinek hatásvizsgálata és optimalizálása külső hengeres felületen, a vizsgált felületminőségi jellemzők szempontjából. A legnagyobb hatással bíró technológiai paraméter(ek) azonosítása, összefüggések feltárása, valamint az esetleges eltérések okainak magyarázata.
- Az eredmények, a szimulációs vizsgálatok és a kutatómunka során szerzett tapasztalatok alapján egy - a mérnöki gyakorlatban is helytálló - analitikus modell megalkotása.

A megalkotott modell hozzájárulhat a vasalás hatékonyságának növeléséhez, ezáltal akár a vizsgált anyag felhasználhatósági körének bővítéséhez környezetkímélő módon.

A gyémántszerszámos felületvasalás vizsgálatának lépéseit, azok menetét és főbb meghatározó elemeit a 2. ábra tartalmazza.



2. ábra. A vizsgálat menetének bemutatása

2 A KUTATÁSI FELADAT MEGOLDÁSA

A felületvasalás elméleti alapjai, továbbá az eljárás hatékonyságára és a vasalt felület minőségére vonatkozó szakirodalmi elemzés alapján, meghatároztam tudományos értekezésem tárgyát, kijelöltem az elérendő célkitűzéseket. A továbbiakban megállapítom az elméleti kutatómunka módszerét, a vizsgálandó jellemzőket, ezen vizsgálatok elvégzésének menetét, valamint a gyakorlati kísérleti munka feltételeit.

2.1. Az analitikai vizsgálatok megvalósítása

Figyelembe véve a felületvasalás jellegzetességeit és az irodalmi áttekintés során tapasztalt trendeket, az eljárást analitikus modelleken keresztül vizsgálom meg, melyet kiegészíték végeeselemes vizsgálatokkal, továbbá a gyakorlatban megvalósított kísérletekkel. Az elméleti vizsgálatok során röviden elemzem és összehasonlítom a már meglévő felületvasalást jellemző mechanikai modelleket, ami alapul szolgál mind a további analitikai vizsgálatok irányvonalához, mind a kísérleti vizsgálati rész teljesítéséhez.

Meglévő modellek és saját analitikus következtetések mentén megalkottam az elméleti maximális érdességmagasság (R_t) számítására szolgáló egyik kulcselem, a benyomódási mélység (δ) képletét, melyet mechanikai-paramétereken alapuló összefüggéssel írtam le. Majd, annak érdekében, hogy biztosítsam a valóságos technológiai feltételeket hűbben tükröző, nagyobb prediktív értékű becslést, egy többváltozós lineáris regresszió során a vasalási sebességet (v) is bevontam a korrekciós modellbe, mint kiegészítő prediktort.

A kutatást a teljes faktoriális kísérlettervezés módszerére alapozom, amely lehetővé teszi a kulcsfontosságú paraméterek statisztikai alapú hatásvizsgálatát. Az eljárást elsődlegesen befolyásoló faktorok (vasalási paraméterek) kiválasztása, azok szintjeinek és a vizsgálati tartomány nagyságának meghatározása, valamint az illeszthető matematikai modell definiálása után kerül sor magának a kísérletnek a végrehajtására, az előállított kísérleti mátrix szerint. Ezt követi az adatfeldolgozás és az adatok kiértékelése, melyre többféle módszer is alkalmazható, például egyszerű hatásvizsgálat, varianciaanalízis vagy közelítő függvények meghatározása. Ezen túlmenően, mivel a kísérleti előzmények és az irodalmi hivatkozások is alátámasztják, hogy a felületvasalás esetén egy adott faktor válaszváltozóra gyakorolt hatása függ a többi faktor beállítási szintjétől, valamint az a feltétel is teljesül, hogy a vizsgált tényezők kvantitatív jellegűek, ezek hatása grafikusán is értelmezhető. Ehhez nyújt lehetőséget a legkisebb négyzetek módszerével előállított válaszfelület-elemzés, vagyis a regressziós függvény térbeli ábrázolása. Ez nemcsak az adott kísérleti térben történő optimumkeresést teszi lehetővé, hanem az azon kívül optimális irányok kijelölését is [38, 39].

Az elméleti vizsgálati szegmenshez tartozóan, létrehoztam egy valós geometriai viszonyokat és anyagjellemzőket figyelembe vevő végeeselemes modellt, amellyel numerikusan vizsgáltam az alakváltozási folyamatokat és a kialakuló felületminőséget. A disszertációban a technológia végeeselemes modelljét DEFORM kóddal szimuláltam kétdimenziós vizsgálati térben, mivel az jelentősen költség- és időhatékonyabb, mint annak 3D-s változata, illetve a modell geometriai jellemzőinek módosítása is egyszerűbben kivitelezhető. A szimulációk segítségével virtuális prototípusok által biztosítom az anyagválasztás, a megmunkálási paraméterek, a szerszámjellemzők stb. racionális tervezését.

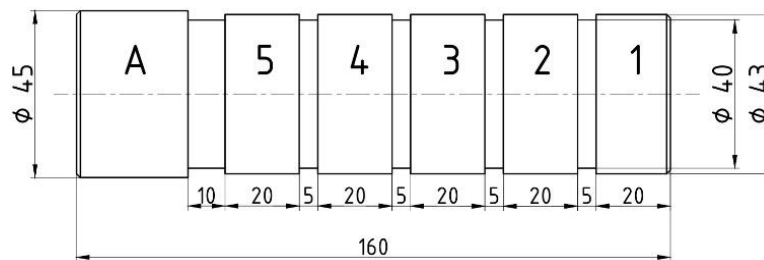
2.2. A vasalási kísérletek körülményei

A felületi érdesség és feszültségállapot vizsgálatára és elemzésére vasalási kísérleteket valósítottam meg. A megmunkálási és mérési folyamatokat részben a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének gép- és eszközparkjával, részben a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet közreműködésével valósítottam meg.

A vasalási eljáráshoz kapcsolódó kísérletek Optimum OptiTurn L440 típusú CNC esztergagépen valósultak meg, mely eszterga nagy pontosságú Siemens vezérléssel és megfelelő merevséggel rendelkezik, szerszámbe fogója alkalmas a választott vasalószerszám rögzítésére. A megmunkálás során szférikus felületűre csiszolt, 7 mm átmérővel rendelkező Cogsdill gyártmányú PCD anyagú szerszámot alkalmaztam. A kívánt vasalóerőt a szerszámtestbe épített rugó biztosítja, melynek előfeszítettségét, vagyis a rugókarakterisztikát, Kistler 9257A piezoelektromos erőmérővel való előzetes mérés alapján határoztam meg.

Az eljárás nem igényel nagy mennyiségű hűtő-kenőfolyadékot, minden esetben minimális kenést alkalmaztam Ciks gyártmányú, $v = 70 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematikai viszkozitású szánkenő olajjal.

A tengelyszerű munkadarabok geometriai kialakítása során szempont volt a későbbiekben ismertetett teljes faktoriális kísérlettervezés jellege. A 3. ábrának megfelelően, azok több szelvényrészletből állnak, megmunkálásuk egységesen $f_{1e} = 0,2 \text{ mm/ford}$, majd $f_{2e} = 0,15 \text{ mm/ford}$ értékű simító esztergálással történt.



3. ábra. A munkadarab geometriájának vázlata

Gyengén ötvözött, ~160 HV keménységű EN AW-2011 alumínium anyagminőséget választottam a vizsgálatok tárgyának, mivel e típus mechanikai tulajdonságai - az ötvözőelemek csekély jelenléte mellett - elsősorban a megmunkálás módján keresztül befolyásolhatók. Ez lehetőséget biztosít arra, hogy a felületvasalás révén javítható legyen az anyag élettartama és felületi minősége további ötvözőelemek vagy hőkezelési eljárások alkalmazása nélkül. E megközelítés nemcsak a gyártási folyamat egyszerűsítését, hanem a környezetterhelés csökkentését is szolgálja, miközben fenntartható módon növeli a gyengén ötvözött alumínium felhasználhatóságát. Továbbá, az alumínium megmunkálhatóságának pontos ismerete egyre fontosabb manapság, hiszen ezt az anyagminőséget - és annak különböző ötvözetét - számos iparág széles körben alkalmazza. Különösen fontos ez a repülőgépiparban, az autópiparban, az elektronikai iparban, valamint az építőiparban, ahol az anyag kedvező szilárdság-tömeg aránya, jó korrózióállósága és újrahasznosíthatósága kiemelt szempont. A felületminőségre vonatkozó technológiai elvárások azonban egyre szigorúbbak, ezért elengedhetetlenné vált az alumíniumötvözetek viselkedésének részletes, paraméterekre lebontott vizsgálata a befejező megmunkálások tekintetében. Állításaimat nagyszámú általam feldolgozott szakirodalom támasztja alá, ahogy azt az értekezés 1.2.3.3. fejezetpontjában részleteztem.

Tekintetbe véve a kapcsolódó kutatómunkákban leírtakat, a kísérletek során a vasalóerő, előtolás, sebesség és járatszám hatását vizsgálom, azok számszerű értékeinek meghatározása pedig az áttanulmányozott szakirodalmak eredményein, továbbá előkísérletek tanulságain alapulnak, igazodva a vizsgált anyagminőség mechanikai tulajdonságaihoz és az alkalmazott teljes faktoriális kísérlettervezéshez.

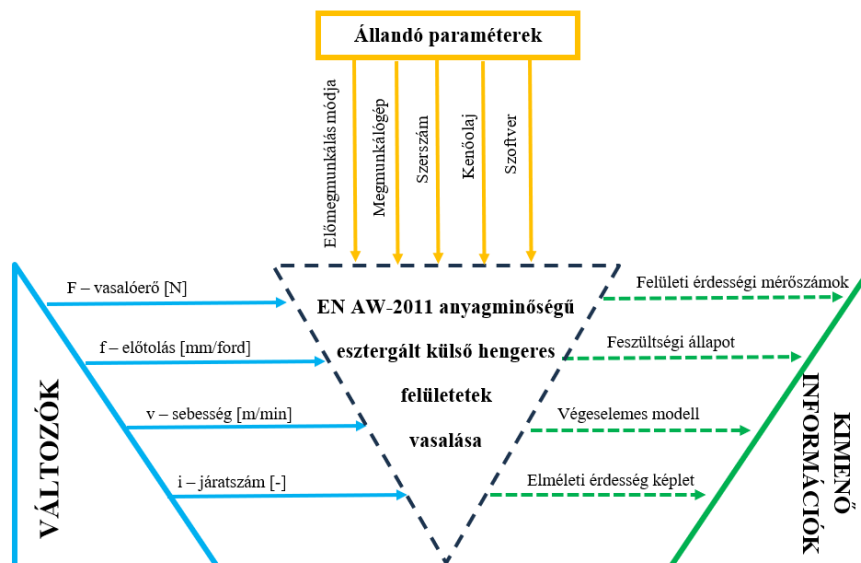
2.3. A felületi érdesség és a maradó feszültség mérése

Az összehasonlító elemzés megvalósításához mérési vizsgálatokat végeztem az előesztergált és a felületvasalt munkadarabok több pontján mind a felületi érdesség, mind a maradó feszültség tekintetében.

A megmunkált felületek érdességi vizsgálatát és annak kiértékelését AltiSurf®520 gyártmányú érdességmérő gépen végeztem el. Minden szelvényrészleten három, egymáshoz képest 120°-ban elforgatott alkotó mentén történt mérés MG140 nagyítóval ellátott CL2 jelű konfokális kromatikus szenzorral, melynek érzékenysége 0,012 μm és mintavételi gyakorisága 1000 Hz. A szabványnak [40] megfelelően a megelőző műveletben alkalmazott előtolás alapján 4 mm kiértékelési hossz került beállításra. Mivel a mért felületen az alaki eltérést a névleges alaknak megfelelően kell eltávolítani, a kiértékeléshez $\lambda = 0,8$ mm levágási hosszt és Gauss-szűrőt is alkalmaztam. Figyelembe véve az ipari alkalmazhatóságot és az elméleti, valamint szimulált értékekkel való összevethetőséget, a mért érdességi paraméterek közül az átlagos érdesség (R_a), az átlagos egyenetlenség-magasság (R_z) és a maximális érdesség-magasság (R_t) értékeit vizsgálom. Az értékelés során az egyes szelvények mentén háromszor elvégzett mérések számtani átlagát használom fel az elemzéshez. Továbbá, felhasználom azokat az elméleti felületi érdesség meghatározásánál és a véges elemes modell megalkotása során is.

A feszültségi állapot mérésének roncsolásmentes vizsgálatát röntgendiffrakciós eljárás alkalmazásával hajtottam végre, amely a röntgensugárzás hullámtermészetét hasznosítja az anyag belső feszültségállapotának feltérképezésére [41]. A méréseket Stresstech Xstress 3000 G3R típusú röntgendiffrakciós mérőberendezéssel végeztem el négy ponton 90°-os elforgatással tangenciális és axiális irányban is MSZ EN 21432:2019 [42] szabvány szerint. Az adatok rögzítése és feldolgozása a gyártó által fejlesztett XTronic szoftverrel valósult meg, ezáltal kvantitatív eredményt szolgáltatva a vizsgált felületek maradó feszültségére vonatkozóan.

A 4. ábra a kísérleti rendszer logikai felépítését szemlélteti, kiemelve a változó paraméterek, állandó tényezők és kimeneti információk közötti összefüggéseket. A vasalóerő, előtolás, sebesség és járatszám hatását a felületi érdességi jellemzők és a feszültségi állapot alakulásán keresztül vizsgáltam. A mért eredmények nemcsak a felületminőség értékelésére szolgálnak, hanem alapot nyújtanak a végeselemes szimulációkhoz, segítenek a felületi érdességre vonatkozó prediktív modell megalkotásában, finomhangolásában. Az elméleti és gyakorlati vizsgálatok együttesen támogatják a megmunkálási paraméterek optimalizálását és ezáltal hozzájárulnak az anyagtulajdonságok ipari alkalmazhatóságának javításához.



4. ábra. A kísérletterv sematikus ábrázolása

3 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK ÉS A HASZNOSÍTÁS LEHETŐSÉGEI

A gyémántszerszámos felületvasalás kiemelkedő technológia a nagy pontosságú és hosszú élettartammal rendelkező alkatrészek fenntartható gyártása esetében. Kutatómunkám nemvas fém megmunkálására vonatkozóan olyan kérdésekre válaszol, amelyeket korábban nem tárgyaltak vagy nem vizsgáltak kellő mélységben a célkitűzésekben megfogalmazottak szerint.

3.1. Tézisek

- T1. A vizsgált anyagminőségre specifikus empirikus összefüggéseket határoztam meg a technológiai adatok és a megmunkálás hatékonysága között, melyhez a teljes faktoriális kísérlettervezés módszerét alkalmaztam. Megállapítottam, hogy a felületi érdesség vonatkozásában a vasalóerő, előtolás és sebesség elsődleges hatást gyakorolnak a felületi érdességre, míg a járatszám növelése nem eredményez arányos javulást, bizonyos paraméterkombinációk esetén instabil viselkedést eredményez, mely rontsolja a munkadarabfelületet. A mérési eredmények alapján kijelentettem, hogy a felületi érdesség javításának szempontjából a járatszám növelése nem indokolt, sem technológiai, sem gazdasági megfontolásból [S1, S8]. *(Vizsgálati feltételek: EN AW-2011 anyagminőség, $R_1 = 3,5$ mm PCD szerszám, $F = 10-20$ N, $f = 0,001-0,005$ mm/ford, $v = 15-30$ m/min, $i = 1-3$; vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_z , R_t)*
- T2. Létrehoztam egy olyan anyagspecifikus, valós felületi érdességen alapuló végeeselemes modellt, amely a gyémántszerszámos felületvasalás során fellépő alakváltozási folyamatok és kialakuló érdességi jellemzők numerikus vizsgálatára alkalmas. A modell megbízhatóságát alátámasztja, hogy annak prediktív pontossága megfelelően érzékeny a technológiai paraméterekre, stabil technológia körülmények esetén a mért és szimulált átlagos felületi érdesség értékek közötti eltérés jellemzően 5% alatti marad. A tendenciahelyes előrejelzés és a paraméterérzékenység alapján megállapítottam, hogy a modell alkalmas a felületminőség ipari célú becslésére, technológiai optimalizálására, valamint további, nagy pontosságot igénylő anyag- és eljárás kutatások alapjául is szolgálhat [S5, S7, S10, S11]. *(Az anyagmodell együtthatói: $c = 191,454$, $n = 0,10571$, $m = 1,02487$, $y = 87,194$; vizsgálati tartomány: $F = 10-20$ N, $f = 0,001-0,005$ mm/ford, $v = 15-30$ m/min, $i = 1-3$; vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_t)*
- T3. A felületvasalási folyamat kontaktmechanikai vizsgálata alapján, a gömbvégű szerszám és a külső hengeres felület érintkezési sajátosságait figyelembe véve, kidolgoztam egy új modellváltozatot az elméleti maximális érdességmagasság előrejelzésére. A modell alapját képező analitikai képletbe beépítettem a kontaktfelület helyes geometriai leírását, továbbá az alkalmazott megmunkálási paraméterek közül nemcsak a vasalóerő és az előtolás, hanem a vasalási sebesség is szerepet kapott. Utóbbi hatását többszörös lineáris regresszióval jellemeztem, amely

lehetővé tette a képlet prediktív képességének javítását. A képletkorrekció révén olyan analitikai modellt hoztam létre, amely pontosabban tükrözi a valós technológiai feltételeket és támogatja az optimalizált paraméterválasztást [S12]. *(Vizsgálati feltételek: külső hengeres felület és gömb szerszám érintkezése; vizsgálati tartomány: $F = 10-20\text{ N}$, $f = 0,001-0,005\text{ mm/ford}$, $v = 15-30\text{ m/min}$, $i = 1-3$; vizsgált érdességi paraméter: R_t)*

- T4. Kísérleti úton igazoltam, hogy csúszó súrlódásos vasalás hatására külső hengeres felületen tangenciális és axiális irányban is nagymértékű nyomó maradó feszültségi állapot alakul ki, melynek nagyságát a technológiai paraméterek interakciós hatások révén befolyásolják. A tangenciális irányú maradó feszültség intenzitását elsősorban a járatszám és az előtolás kombinációja határozza meg, együttes növelésük mérsékli a feszültséginverziót. Axiális irányban a sebesség is közvetlen hatást gyakorol, annak növelése szintén gyengíti az inverziós hatást [S2-S4, S6, S9]. *(Vizsgálati feltételek: EN AW-2011 anyagminőség, $R_l = 3,5\text{ mm PCD}$ szerszám, $F = 10-20\text{ N}$, $f = 0,001-0,005\text{ mm/ford}$, $v = 15-30\text{ m/min}$, $i = 1-3$; vizsgált irányok: tangenciális, axiális.)*
- T5. Kísérleti úton, válaszfelület elemzéssel igazoltam, hogy a deformációs energia átadása és a maradó feszültségek kialakulása során nemlineáris kölcsönhatások figyelhetők meg, különösen az előtolás és a járatszám, valamint a sebesség és a vasalóerő együttes hatásában. Ennek következtében a maradó nyomófeszültség optimalizálása kizárólag többparaméteres modellalkotással lehetséges. A feszültségállapotra és felületi érdességre vonatkozó paraméterkombinációk összevetése alapján megállapítottam, hogy a felületminőség komplex javításához kompromisszumos technológiai paraméterválasztás szükséges [S8, S9]. *(Vizsgálati feltételek: EN AW-2011 anyagminőség, $R_l = 3,5\text{ mm PCD}$ szerszám, $F = 10-20\text{ N}$, $f = 0,001-0,005\text{ mm/ford}$, $v = 15-30\text{ m/min}$, $i = 1-3$; vizsgált irányok: tangenciális, axiális; vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_t)*
- T6. Igazoltam, hogy a gyémántszerszámos felületvasalás során kialakuló axiális irányú maradó feszültség mélységi eloszlása numerikus úton előre jelezhető egy, a valós anyagjellemzőkön és egyszerűsített geometriai viszonyokon alapuló végeselemes modellel. A numerikus szimulációk és a röntgendiffrakciós mérések összehasonlító elemzése alapján kimutattam, hogy a szimulációs modell szisztematikusan alacsonyabb nyomófeszültségértékeket prognosztizál, ugyanakkor információval szolgál a mélységi feszültséglefutás mértékéről. Megállapítottam, hogy a végeselemes modell alkalmas a maradó feszültségek mélységi eloszlásának és homogenitásának értékelésére, így alkalmazható a fáradási szempontból kritikus rétegek integritásának előrejelzésére [S11]. *(Az anyagmodell együtthatói: $c = 191, 454$, $n = 0,10571$, $m = 1,02487$, $y = 87,194$; vizsgálati tartomány: $F = 10-20\text{ N}$, $f = 0,001-0,005\text{ mm/ford}$, $i = 1-3$; vizsgált irány: axiális.)*

3.2. A hasznosítás és továbbfejlesztés lehetőségei

A gyémántszerszámos felületvasalás alkalmazásával kapcsolatos kutatási eredményeim több szempontból is hasznosíthatóak a nagy pontosságot és kedvező felületi állapotot igénylő ipari területeken. Alátámasztottam, hogy a vizsgált eljárás alkalmas nemvas ötvözet felületének finommegmunkálására, ahol cél a kifáradással szembeni ellenállás növelése, valamint a felületi érdesség csökkentése. A disszertációban bemutatott modell- és kísérleteredmények lehetőséget teremtenek a felületvasalás prediktív alkalmazására a járműipari, repülőgépipari, orvostechikai és precíziós gépgyártási alkatrészek esetében, különösen ott, ahol a hagyományos forgácsolási eljárásokkal nem, vagy csak költségesen biztosítható a kívánt felületminőség. Továbbá, tengelyek esetében a jobb maradó feszültségprofil és kisebb érdesség hozzájárul a rezgés- és zajcsökkentéshez is.

Az elméleti modell és végelelemes szimuláció segítségével előre meghatározhatóak a kívánt felületi jellemzők, így az eljárás paraméteroptimalizálása révén nemcsak a gyártási költség csökkenthető, hanem a selejtarány is mérsékelhető. A maradó feszültség eloszlásának előrejelzése lehetővé teszi az olyan fáradáskritikus alkatrészek megbízható tervezését, mint például tengelyek, mechanikus karok, nyomástartó elemek, vagy vékonyfalú profilok.

A végelelemes modell és az analitikai képlet által nyújtott előrejelzési lehetőségek más anyagminőségekre is egyszerűen adaptálhatók az adott rugalmas tulajdonságok, anyagmodell együtthatók módosításával. Ennek köszönhetően a fejlesztett elméleti és numerikus eszközrendszer általánosabb érvényű felhasználásra is alkalmas, ipari integrációja pedig nem igényel mélyreható modellátalakítást.

A továbblépés egyik ígéretes iránya a maradó feszültségi állapot elméleti leírásának mélyítése lehet, olyan képlet kidolgozásával, amely a megmunkálási paraméterek és az anyag mechanikai jellemzői alapján képes a maximális vagy karakterisztikus nyomófeszültségek becslésére. Ezzel a szimulációs és mérés technikai vizsgálatok mellett egy harmadik, analitikus pillér is kiépíthető lenne.

Összességében megállapítom, hogy a gyémántszerszámos felületvasalás megfelelő technológiai paraméterezéssel és a dolgozatban bemutatott modellek felhasználásával egyaránt alkalmazható a hagyományos és korszerű gyártástechnológiai környezetekben. A kutatás során kidolgozott módszertani és modellalkotási eljárások hozzájárulnak a felületminőség-vezérelt megmunkálási stratégiák kialakításához.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT JELENTŐSEBB PUBLIKÁCIÓK

- [S1] G. Varga and V. Ferencsik, "Analysis of Surface Topography of Diamond Burnished Aluminium Alloy Components," *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 12, pp. 143-154, 2017.
- [S2] G. Varga and V. Ferencsik, "Examination of Residual Stresses on Diamond Burnished Cylindrical Surfaces," *Rezanie I Instrument V Tekhnologiceskikh Sistemakh*, vol. 87, no. 1, pp. 18-27, 2017.
- [S3] G. Varga and V. Ferencsik, "Investigation of the Influence of Different Burnishing Parameters on Shape Correctness and Residual Stresses," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 448, pp. 1-8, 2018.
- [S4] V. Ferencsik and G. Varga, "Gyémántszerszámos Vasalás Okozta Feszültségállapot-változás Vizsgálata Röntgendiffrakciós Módszerrel," *Gépgyártás*, vol. 58, no. 1-2, pp. 33-39, 2019.
- [S5] V. Ferencsik and V. Gál, "FE Investigation of Surface Burnishing Technology," *Rezanie I Instrument V Tekhnologiceskikh Sistemakh*, vol. 93, pp. 3-8, 2020.
- [S6] V. Ferencsik and G. Varga, "Examination of Surface State-Change on Diamond Burnished Aluminium Components," *Proceedings of the International Symposium for Production Research*, vol. 47, pp. 535-544, 2020.
- [S7] V. Ferencsik and V. Gál, "A Vasalóerő Átlagos Felületi Érdességre Gyakorolt Hatásának Vizsgálata," *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, vol. 11, no. 4, pp. 139-143, 2021.
- [S8] V. Ferencsik and G. Varga, "The Influence of Diamond Burnishing Process Parameters on Surface Roughness of Low-Alloyed Aluminium Workpieces," *Machines*, vol. 10, no. 7, pp. 1-11, 2022. (IF: 2,6)
- [S9] G. Varga and V. Ferencsik, "Investigation of the Effect of Surface Burnishing on Stress Condition and Hardening Phenomena," *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, vol. 29, no. 4, pp. 1247-1253, 2022. (IF: 0,9)
- [S10] V. Ferencsik "Modelling of the Impact of Burnishing Force on Average Surface Roughness" *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, vol. 13, no. 3, pp. 106-113, 2023.
- [S11] V. Ferencsik "FEM Investigation of the Roughness and Residual Stress of Diamond Burnished Surface" *Journal of Experimental and Theoretical Analysis*, vol. 2, no. 4, pp. 80-90, 2024.
- [S12] V. Ferencsik "Az Elméleti Érdesség Analitikus Elemzése Külső Hengeres Felület Vasalása Esetén," *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, vol. 14, no. 4, pp. 229-238, 2024.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] L. Gribovszki, Gépipari megmunkálások, Budapest: Tankönyvkiadó Vállalat, 1977.
- [2] A. Nestler and A. Schubert, "Roller burnishing of particle reinforced aluminium matrix composites," *Metals*, vol. 8., no. 95, pp. 1-9, 2018.
- [3] L. Bálint and L. Gribovszki, A gépgyártástechnológia alapjai, Miskolc-Egyetemváros: Miskolci Egyetemi Kiadó, 1975.
- [4] M.R. Stalin John, N. Banerjee, K. Shrivastava and B.K. Vinayagam, "Optimization of roller burnishing process on EN-9 grade alloy steel using response surface methodology," *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, pp. 3089-3101, 2017.
- [5] T. Dyl, "The burnishing process of the stainless steel in aspect of the reduction roughness and surface hardening," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 24, no. 3, pp. 63-69, 2017.
- [6] A. Abodena, "Optimization of surface roughness of brass by burnishing," *The International Journal of Engineering and Information Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 90-96, 2019.
- [7] H. Luo, J. Liu, L. Wang and Q. Zhong, "The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness," *International Journal of Manufacturing Technology*, vol. 28, pp. 707-713, 2006.
- [8] X. Wang, L. Zhu, Z. Zhou, G. Liu, E. Liu, Z. Zeng and X. Wu, "Tribological properties of WC-reinforced Ni-based coatings under different lubricating conditions," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 24, no. 7, pp. 1-10, 2015.
- [9] J.A. Travieso-Rodriguez, G. Gomez-Gras, G. Dessein, F. Carrillo, J. Alexis, J. Jorba-Peiro and N. Aubazac, "Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens," *International Journal of Manufacturing Technology*, pp. 1-9, 2015.
- [10] M. Salahshoor and Y.B. Guo, "Surface integrity of biodegradable Magnesium-Calcium orthopedic implant by burnishing," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 4, pp. 1888-1904, 2011.
- [11] S. Summers, E. Nigh, K. Sabeh and R. Robinson, "Clinical and radiographic outcomes of total hip replacement with a 3-part metaphyseal osseointegrated titanium alloy stem enhanced with low plasticity burnishing: a mean 5-year follow-up study," *Arthroplasty Today*, vol. 5, pp. 352-357, 2019.
- [12] A. Skoczylas and K. Zaleski, "Selected properties of the surface layer of C45 steel parts subjected to laser cutting and ball burnishing," *Materials*, vol. 13, pp. 1-19, 2020.
- [13] A. Saldana-Robles, H. Plascencia-Mora, E. Aguilera-Gomez, A. Saldana-Robles, A. Marquez-Herrera and J.A. Diosdado-De la Pena, "Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel," *Surface & Coatings Technology*, vol. 339, pp. 191-198, 2018.
- [14] P. Balland, L. Tabourot, F. Degre and V. Moreau, "An investigation of roller burnishing through finite element simulation and experiments," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 65, pp. 29-36, 2013.
- [15] M. Korzynski, "Modeling and experimental validation of the force-surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, pp. 1956-1964, 2007.

- [16] A. Akkurt, "Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel," *JMEPEG*, vol. 20, pp. 960-968, 2011.
- [17] S. Dzionk, B. Scibiorski and W. Przybylski, "Surface texture analysis of hardened shafts after ceramic ball burnishing," *Materials*, vol. 12, no. 204, pp. 1-15, 2019.
- [18] M. Voith, "A képlékenyalakítás elmélete," Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998.
- [19] S. Dzionk, W. Przybylski and B. Scibiorski, "The possibilities of improving the fatigue durability of the ship propeller shaft by burnishing process," *Machines*, vol. 8, no. 63, pp. 1-17, 2020.
- [20] P. Kumara, V. Vijendra Bhat and G.K. Purohit, "Effect of ball burnishing medium on the surface characteristics of free machining brass," *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 110-116, 2020.
- [21] A. Sequera, C.H. Fu, Y.B. Guo, and X.T. Wei, "Surface integrity of inconel 718 by ball burnishing," *JMEPEG*, vol. 23, pp. 3347-3353, 2014.
- [22] T. Li, M. Uddin and G. Stevens, "Effect of ball burnishing on surface roughness, wettability, mechanical integrity and antifouling resistance of UHMWPE," *Surface & Coatings Technology*, vol. 476, pp. 1-11, 2024.
- [23] J.T. Maximov, G.V. Duncheva, A.P. Anchev and M. D. Ichkova, "Slide burnishing—review and prospects," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, pp. 785-801, 2019.
- [24] M. Posdlich, R. Stöckmann, F. Morczinek and M. Putz, "Investigation of a plain ball burnishing process on differently machined aluminium EN AW 2007 surfaces," *MATEC Web of Conferences*, vol. 190, pp. 1-7, 2018.
- [25] H. Basak, M.T. Ozkan and I. Toktas, "Experimental research and ANN modelling on the impact of the ball burnishing process on the mechanical properties of 5083 Al-Mg material," *Kovove Mater.*, vol. 57, pp. 61-74, 2019.
- [26] A. Rodriguez, A. Calleja, L.N. Lopez de Lacalle, O. Perieira, H. Gonzalez, G. Urbikain and J. Laye, "Burnishing of FSW aluminium Al-Cu-Li components," *Metals*, vol. 9, no. 260, pp. 1-16, 2019.
- [27] A.J. Sánchez Egea, A. Rodríguez, D. Celentan, A. Calleja and L.N. Lopez de Lacalle, "Joining metrics enhancement when combining FSW and ball-burnishing in a 2050 aluminium alloy," *Surface & Coatings*, pp. 1-9, 2019.
- [28] R. Kluz, M. Bucior, A. Dzierwa, K. Antosz, W. Bochnowski and K. Ochal, "Effect of diamond burnishing on the properties of FSW joints of EN AW-2024 aluminium alloy," *Applies Sciences*, vol. 13, no. 1305, pp. 1-19, 2023.
- [29] C. Amini, R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez, h. Mousavi, J. Lluma-Fuentes, M.D. Zandi and S. Hassanifard, "Ball burnishing of friction stir welded aluminium alloy 2024-T3: experimental and numerical studies," *Metals*, vol. 12, no. 1422, pp. 1-21, 2022.
- [30] J. Schubnell and M. Farajian, "Fatigue improvement of aluminium welds by means of deep rolling and diamond burnishing," *Welding in the World*, vol. 66, pp. 699-708, 2022.
- [31] J. Huuki, M. Hornborg and J. Juntunen, "Influence of Ultrasonic Burnishing Technique on Surface Quality and Change in the Dimensions of Metal Shafts," *Hindawi Publishing Corporation: Journal of Engineering*, pp. 1-8, 2014.
- [32] M.R. Stalin-John, P. Suresh, D. Raguraman and B.K. Vinayagam, "Surface characteristics of low plasticity burnishing for different materials using lathe," *Arab J. Sci. Eng.*, vol. 39, pp. 3209-3216, 2014.
- [33] J. Sharma and J. Kapoor, "To investigate the effect of burnishing parameters on the surface finish and surface hardness of aluminium 7075 cylinder liners," *IJAMR*, vol. 9, no. 2, pp. 43-47, 2017.

- [34] J.A. Travieso-Rodríguez, H. González-Rojas, G. Gomez-Graz, "Ball-burnishing process influence on hardness and residual stresses of aluminium A92017," *OATAO*, vol.10, pp. 1-5, 2013.
- [35] J.A. Travieso-Rodríguez, G. Dessein and H.A. Gonzales-Rojas, "Improving the surface finish of concave and convex surfaces using a ball burnishing process," *OATAO*, pp. 1494-1502, 2011.
- [36] H. Amdouni, H. Bouzaïene, A. Montagne, A. Van Gorp, Th. Coorevits, M. Nasri and A. Iost, "Experimental study of a six new ball-burnishing strategies effects on the Al-alloy flat surfaces integrity enhancement," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, pp. 2271-2282, 2017.
- [37] R. Stöckmann and M. Putz, "Modelling of surface formation mechanism during burnishing of aluminium," *17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, vol. 82, pp. 450-454, 2019.
- [38] F. Finszter, P. Aradi, A. Czmerk, Z. Németh, K. Wenzel Gerőfy and A. Halmai, *Járműipari tesztelés és jóváhagyás*, Budapest: BME MOGI, 2014.
- [39] Z.C. Johanyák, *Bevezetés a kísérletmódszertanba*, Kecskemét: Kecskeméti Főiskola, 2002.
- [40] ISO4288:1996, *Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: Profile*, 1996.
- [41] D.W. Lee and S.S. Cho, "Comparison of X-Ray residual stress measurements of rolled steels," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 12, no. 6, pp. 1001-1008, 2011.
- [42] MSZ EN 21432:2019, *Roncsolásmentes vizsgálatok. A maradó feszültség elemzésének röntgensugaras diffrakciós vizsgálati módszere; Non-destructive Testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction*