

Biológiailag inspirált, önélező forgácsolási technológia fejlesztése és numerikus vizsgálata

Design and numerical analysis of a bio-inspired cutting technology

SEPRŐS Szilárd¹, Dr. GEIER Norbert¹

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék,
1111. Budapest, Műegyetem rkp. 3., T épület 4. em., Tel.: 06/1-463-3176, Fax: 06/1-463-3176,
E-mail: info@manuf.bme.hu, Honlap: <http://manuf.bme.hu>

Abstract

Nature has inspired many different technical solutions, making it an area of research that is becoming increasingly relevant. In nature, the teeth and claws of certain organisms act as self-sharpening mechanisms, and this research aims to develop and analyse self-sharpening technology inspired by these mechanisms. The investigated self-edging mechanisms were simulated numerically in ANSYS LS-Dyna software. The results of the research have brought us closer to a concept of a self-sharpening technology that is worth testing as a prototype because of its potential.

Keywords: bio-inspired, tool wear, orthogonal cutting, self-sharpening, numerical simulation

Kivonat

A természet sok esetben inspirált már különböző műszaki megoldásokat, ennek köszönhetően egy egyre népszerűbb kutatási terület. A természetben bizonyos élőlények fogazata, karmai önélező mechanizmusokként működnek, a kutatás célja az ilyen mechanizmusok által inspirált önélező technológia fejlesztése és elemzése. A vizsgált önélező mechanizmusok numerikus szimulációkkal lettek imitálva az ANSYS LS-Dyna szoftverben. A kutatás eredményei alapján közelebb kerültünk egy olyan önélező technológiai koncepcióhoz, melyet már érdemes lehet prototípusként tesztelni, annak potenciálja miatt.

Kulcsszavak: biológiailag inspirált, szerszámkopás, ortogonális forgácsolás, önélezés, numerikus szimuláció

1. BEVEZETÉS

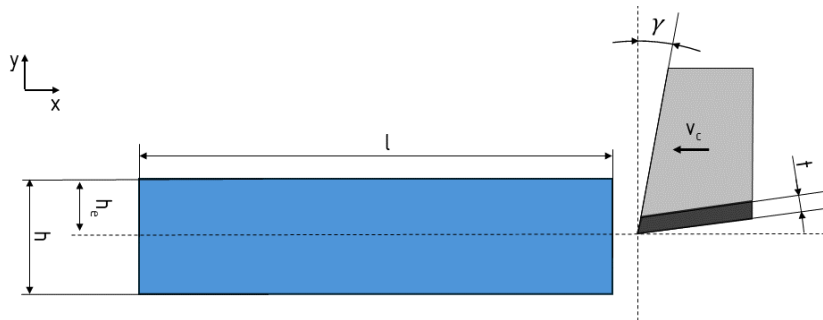
A gyártási folyamatoknak napjainkban egyre több fenntarthatósági, környezetvédelmi és zöld szempontoknak kell megfelelniük, emiatt elengedhetetlen a törekvés az innovációkra és az új technológiák bevezetésére [1]. A biológia egy hatalmas és sokszínű tárháza a valamilyen formában működő megoldásoknak, így a biológiai inspirációk műszaki kihívásokban való alkalmazása egy nagy potenciállal rendelkező kutatási terület. Ezen nagy potenciál és a téma alapvető fontossága miatt az utóbbi években egy jelentősen növekvő kutatási terület lett a biológiai transzformáció témája, mellyel kapcsolatban számos európai és nemzetközi felhívás jelenik meg, ösztönözve a kutatókat a biológia és a gyártástudományok ötvöztetésére [2]. A gyártástudományok biológiai transzformációját van, ahol az Ipar 4.0 egyik új irányzatának tartják, mivel jelentős lépésekkel járulhat hozzá a fenntarthatóbb gyártáshoz, megváltoztatja az ember és a biológiai rendszerek szerepét a gyártási folyamatban, valamint javíthat a hatékonyságon és a gazdaságosságon is [3]. A biológiai transzformációnak jellemzően három módszerét szokták megkülönböztetni: **i)** a biológiai interakciót, **ii)** a biológiai integrációt és **iii)** a biológiai inspirációt [4]. Kutatásunk során a biológiai inspirációval foglalkoztunk, melynél a természeti fenoménok megismerése, tanulmányozása és a műszaki életbe való adaptálása áthidal a műszaki területek és a biológia között, ezen folyamatok ráadásul két tudományág közötti kapcsolat kiépítését és szimultán fejlesztését érhetik el.

A gyártási folyamatok során a szerszámok kopása jelentősen befolyásolhatja a gyártott termékek minőségét és a termelékenységét is. A természetben is hasonló folyamat figyelhető meg, ahol a kopó funkcionális komponensek szignifikáns hatással vannak az élő szervezetek élettartamára. A természet viszont – a fenntarthatóság jegyeit követve – egy folytonos mechanizmust dolgozott ki, hogy a kopásnak kitett részek, mint a fogak, a karmok minél hosszabb ideig funkcionálisan működni tudjanak. Ez a

kidolgozott megoldás az önélező mechanizmus, mely során a vágó, forgácsoló komponens (fog, karom) speciális anyagi és geometriai felépítéssel rendelkezik [5]. A fogak esetén egy keményebb hátfelületi és egy lágyabb homlokfelületi anyag párosítással elérhető a felületek eltérő sebességű kopása, valamint a két réteg eltérő növekedési idejével manipulálni is lehet a kopó rétegek egymáshoz való viszonyát. Erre az önélező mechanizmusra példaként hozható fel a természetből valamennyi rácsáló, a nyulak és különösen a hódok fogazata [6]. A kutatás során a célunk egy ilyen természetben működő önélező mechanizmus alapján inspirált önélező szerszám tervezése és numerikus szimulációkkal való elemzése volt. A tervezett szerszám esetén meghatároztuk a szignifikánsnak tűnő paramétereket és ezek közül kettő esetén meg is vizsgáltuk azok hatását. A szerszám tervezése során egy olyan konstrukció alkotása volt a cél, mely esetén az önélező mechanizmus miatt nőhet a hasznos éltartam, javulhat a forgácsolási folyamat hatékonysága, fenntarthatósága és gazdaságossága.

2. A SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET ÉS PARAMÉTEREK

A kutatás során ortogonális forgácsolási folyamat lett numerikus módon vizsgálva, ez a forgácsolási típus ugyanis tartalmazza a célul kitűzött folyamat geometriai vizsgálatához szükséges és szignifikáns tényezőket. A munkadarab geometriája SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) hálófüggetlen numerikus módszerrel lett megadva. Az így definiált munkadarab az X-Y síkon $l = 4$ mm hosszúsággal és $h = 1$ mm magassággal rendelkezik. A szerszám testmodellként lett definiálva, geometriájának egy 2 mm magas négyszög lett meghatározva, úgy, hogy a szerszám legalsó pontja a munkadarab tetejétől 0,5 mm-re alacsonyabban lett elhelyezve, ez megegyezik az h_c elméleti forgácsvastagság értékével. Az élsugárnak $r_{\beta 0} = 5$ μm értékre lett beállítva, ortogonális hátszögnek $\alpha_0 = 5^\circ$. A szerszám γ_0 ortogonális homlokszöge, valamint a t bevonat vastagság szimulációs paraméterként változott a különböző kísérleti beállításoknál. Az SPH felhő és a szerszám vastagsága (z-irányú kiterjedése) is 0,01 milliméter volt. A szerszám változó paraméterei, valamint a munkadarab geometriája a **1. ábrán** látható. A megadott elemek Z irányú transláció és X,Y,Z tengelyek körüli rotációs elmozdulásai le lettek kötve. A munkadarab esetén az alsó negyed X és Y irányú translációs mozgása le lett kötve, a fenti rész (a forgácsolási tartomány) X és Y irányú mozgása viszont szabad volt, hogy a forgácsképződést szimulálni lehessen. A merev szerszám és az ahhoz rögzített bevonat X irányú translációs mozgásra volt képes, ebben az esetben az elemek sebessége adta meg a forgácsoló sebességet, mely $v_c = 60$ m/min értékre lett beállítva. A szimulációk során a szerszámalakzat a forgácsolási sebességet szinte azonnal felvette (még a munkadarabbal való kontakt előtt) és azt végig konstans módon tartotta.



1. ábra: A szimulációban megadott geometria paraméterei

A munkadarab esetén az SPH elemek használata miatt nem volt szükség a munkadarab hálózására. A megadott SPH elemek $r_{SPH} = 0,05$ milliméter nagyságúra lettek beállítva. A szerszám testmodellje 4 csomópontos elemekkel lett behálózva, 0,01 milliméteres elemméretet alkalmazva. A szerszám hálózásánál két elemhalmaz lett létrehozva, egy a szerszámalapnak, egy pedig a szerszám hátfelületi bevonatrétének. A szimuláció során Johnson-Cook anyagmodellel dolgoztunk, mely hatékonyan modellezi le a dinamikus folyamatokat, valamint igen elterjedt az ehhez hasonló forgácsolási szimulációk esetén. A munkadarab anyaga így módon leírható a szimuláció során, a beállított értékek a **1. táblázatban** láthatóak.

A kopás modellezéséhez az Archard kopási törvényén alapuló, viszonylag kisebb számítási igényű és egyszerűbb kopási modellt alkalmaztunk [7]. A modell a kontaktfelületeken történő kopási mélységet adja meg a kontaktfelületi nyomás, a relatív csúszási sebesség, a felületek keménysége és az idő függvényében.

A végeselemes szimulációk során használt mechanikai és termikus számításokhoz szükség van az alkalmazott anyagok fizikai tulajdonságaira. Az **1. táblázatban** szerepelnek a munkadarab anyagi jellemzői

is, melyek szükségesek a használt mechanikai anyagmodellhez, valamint a termikus folyamatokhoz. A munkadarab anyagának a 42CrMo4 acélt választottam, ugyanis felhasználása széleskörű és jellemzően forgácsolással munkálják meg, valamint több tudományos munkában meghatározták a Johnson-Cook paramétereit, melyek a különböző munkákban hasonló adatokat eredményeztek.

1. táblázat: A munkadarab modellezéséhez felhasznált paraméterek

42CrMo4 acél tulajdonságai [8]			
ρ - Sűrűség [kg/m ³]	7820	$D1$ [-]	1,5
G - Nyírási modulus [GPa]	80	$D2$ [-]	3,44
E - Young-modulus [GPa]	210	$D3$ [-]	-2,12
μ - Poisson-tényező [-]	0,3	$D4$ [-]	0,002
A - Kezdeti folyáshatár [MPa]	595	$D5$ [-]	0,1
B - Szilárdsági érték [MPa]	580	T_m - Olvadáspont [K]	1793
n - Szilárdsági kitevő [-]	0,133	c_p - Fajhő [J/(kg*K)]	642
c - Alakváltozási kitevő [-]	0,023	λ - Hővezetési tényező [W/(mK)]	47
m - Termikus lágyulás kitevője [-]	1,03		

A szimulációkhoz egy szerszámtest anyagot, valamint egy bevonat anyagot alkalmaztunk. A szerszámtestek anyagának HSS M2, míg a bevonat anyagnak TiN lett választva, általános felhasználhatósága és a PVD eljárással viszonylag vastag előállítható bevonati réteg miatt. A két anyaghoz felhasznált szimulációs paraméterek a **2. táblázatban** találhatók.

2. táblázat: A szerszám és a bevonat modellezéséhez alkalmazott paraméterek

	HSS M2	TiN [9]
ρ - Sűrűség [kg/m ³]	8150	5222
E - Young-modulus [MPa]	210	600
μ - Poisson-tényező [-]	0.29	0.3
c_p - Fajhő [J/(kg*K)]	440	227
λ - Hővezetési tényező [W/(mK)]	24	19
H_v - Vickers keménység [MPa]	600	2100

3. KÍSÉRLETTERV ÉS KIÉRÉTKELÉSI MÓDSZEREK

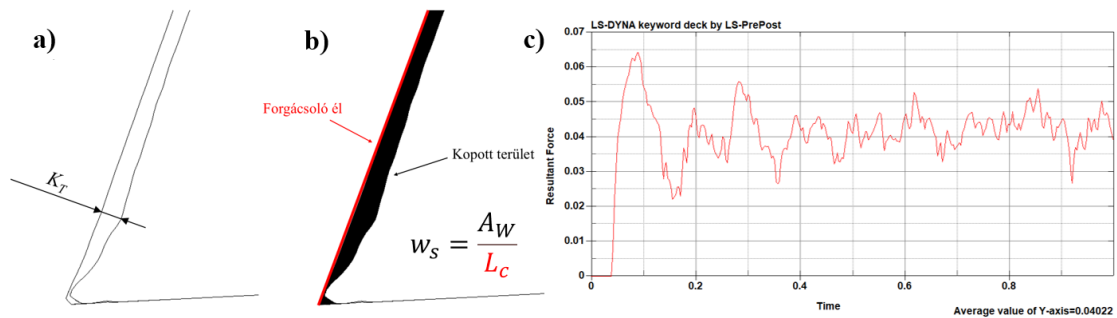
A szimulációs kísérletek első részében a tervezett, csak egyik felületén bevont szerszámot vizsgáltuk egy bevonat nélküli és egy teljesen bevont szerszámhoz képest. A további kísérletek során változtatva lettek a geometriai tulajdonságai a tervezett szerszámnak. A vizsgálatok során így két folytonos faktor lett alkalmazva. A folytonos faktoroknak a t hátfelületi bevonat vastagsága és a γ_0 ortogonális homlokszög lettek kiválasztva. A faktorokat 3-3 szinten ($\gamma_0 = 10^\circ$; 20° és 30° , valamint $t = 0,01$ mm; $0,02$ mm és $0,03$ mm) alkalmaztuk.

A szimulációk során a folyamat során fellépő forgácsolási erő, valamint a szerszámok kopása lett vizsgálva. A forgácsolási erőket a szimulációs szoftverből kinyert forgácsolási erő-idő görbék átlagával jellemeztük. A különböző kopási állapotok az LS-DYNA szoftverben lettek beállítva, megadva az adott forgácsolási úthosszhoz tartozó ismétlési számot, majd ezután a szoftver által kirajzolt kopott szerszám geometriáját ki lehetett exportálni. A szerszámok kopását két módon jellemeztük, az egyik a kopás K_T maximális mélysége volt, ezt az LS-DYNA szoftver automatikusan kiszámolta az eredeti felületre merőleges irányban, ahogyan az a **2. ábra a)** részén is látható. A szerszám kopását továbbá a fajlagos kopással jellemeztük, erre az elkopott rész területét és a homlokfelületi szerszámél hosszának hányadosát alkalmaztuk, ez a **2. ábra b)** részén látható. Az elkopott rész területét az eredeti és az elkopott szerszámgeometria profilja közötti terület határozta meg. A két kontúr közötti területet leosztottuk a forgácsoló él vizsgált hosszával, mely így kiegyensúlyozta az eltérő homlokszögek miatti különböző forgácsoló élhosszokat a vizsgált tartományon, ezt mutatja a **1. számú egyenlet**.

$$w_s = \frac{A_W}{L_c} \quad (1)$$

Ahol: w_s = Fajlagos kopás (mm)
 A_W = A kopott terület (mm²)
 L_c = A forgácsoló él hossza a vizsgált szakaszon (mm)

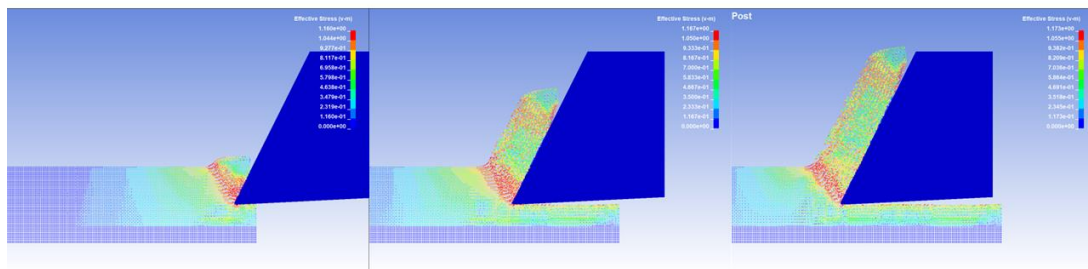
A kapott forgácsolási erő, kopási mélység és fajlagos kopás értékeket a Minitab statisztikai szoftverben lettek kiértékelve.



2. ábra: A numerikus szimuláció kimeneti értékei az a) kopási mélység b) fajlagos kopás és c) forgácsolási erő értékek voltak

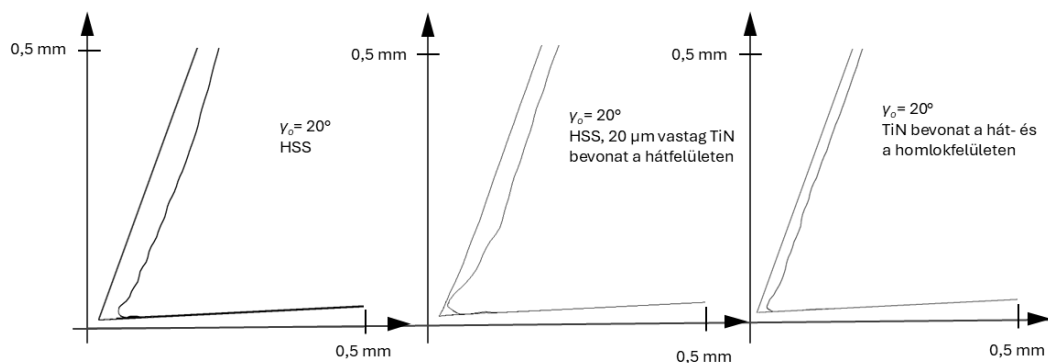
4. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE ÉS ÉRTELMEZÉSE

A szimuláció során előállított ortogonális forgácsolási folyamat a **3. ábrán** látható. Az ábrán feltüntetett feszültségek jól mutatják az elsődleges nyírási zónát, valamint a forgácsban ébredő feszültségek mértékét.



3. ábra: Az ortogonális forgácsolás szimulációja Ansys LS.Dyna szoftverben

A kísérletek első részében a biológiailag inspirált szerszám koncepció működőképessége lett vizsgálva, tehát, hogy csak a hátfelületén bevonattal ellátott szerszám hát- és homlokfelülete egymáshoz képest kedvező mértékben kopik, ezzel javítva a lokális forgácsolási feltételeket a nyírási zónák közelében. Ehhez először egy bevonat nélküli HSS forgácsoló szerszám, egy hátfelületén TiN bevonattal rendelkező HSS szerszámtest és egy homlok- és hátfelületén is TiN bevonattal ellátott szerszám vizsgálatára került sor.



4. ábra: Az eredeti és a kopott szerszámkontúrok különböző bevonatolások esetén

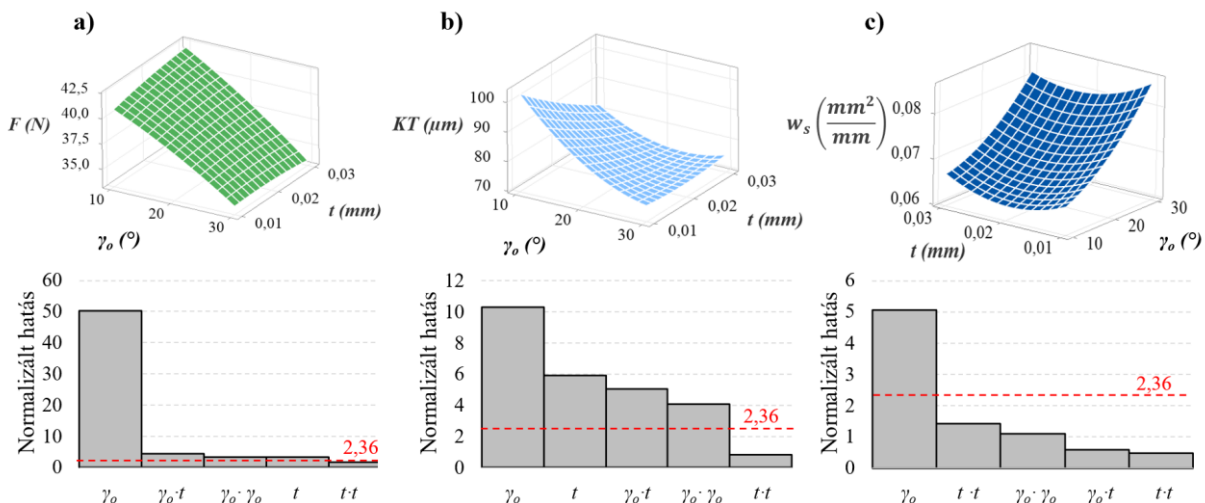
Ahogy arra számítani lehetett, a bevonat nélküli HSS szerszám kopásának mértéke a legnagyobb azonos forgácsolási úthossz során. A TiN bevonattal mindkét felületén ellátott szerszám kopásának mértéke a legkisebb, a kontúrja pedig egészen hasonlít a HSS szerszám alakjára. A tervezett szerszám, melyet csak a hátfelületén rendelkezik bevonattal a másik két szerszámtól valamelyest eltérő kopási kontúrral rendelkezik. Megfigyelhető, hogy a homlokfelületi kopása nem annyira egyenes, mint a másik két esetben, valamint az élsugara is kevésbé távolodik el az eredeti pozíciótól. A kopott kontúrokon a maximális kopási mélység,

valamint a fajlagos kopás értékek lettek kielemezve. Ezen adatok alapján varianciaanalízissel lett megállapítva a beállított tényezők hatásának szignifikanciája. A varianciaanalízis vizsgálat eredményei a **3. táblázatban** láthatóak.

3. táblázat: Az anyagi összetétel hatásának varianciaanalízis vizsgálata

Faktor	Szint	Paraméter	F-érték	P-érték
Anyagi összetétel	3	KT – kopás mélység	25,4	0,001
Anyagi összetétel	3	w_s – fajlagos kopás	78,9	0,000

A varianciaanalízis vizsgálat alapján mind a kopás mélységére, mind fajlagos kopásra szignifikáns hatása van a szerszám anyagi összetételének. A tervezett szerszám kopásának az eredményei alátámasztják, hogy a HSS szerszámnál kisebb fajlagos kopással rendelkezik, de egy teljesen bevont szerszámnál nagyobb mélységben kopik meg a szerszám homlokszögfelülete. Ezen két eredmény együttes jelenléte megmutatja, hogy a tervezett szerszám kopott homlokszög felületi kontúrja valószínűleg nem egy egyenessel közelíthető, hanem valamilyen tagoltsággal rendelkezik, ez pedig hozzájárulhat ahhoz, hogy főként az elsődleges és másodlagos nyírási zónákban kedvezőbb szögértékekkel rendelkezzen a forgácsoló geometria, javítva a forgácsolási erőszükségletet és a forgácsképződési folyamatokat. A tervezett szerszámkonceptió kopása során kedvező szerszámgeometria alakult ki, a kopási folyamatban megjelenik az önélező mechanizmus. Ezen eredmények alapján részletesebben vizsgáltuk meg a csak a hátfelületükön bevont koncepciókat és értékeltük a bevonati vastagság, valamint a beállított homlokszögek hatását a kopási folyamatok és a forgácsoló erő szempontjából. A szimulációs kísérletek eredménye az **5. ábrán** láthatóak a kiértékelési értékek, azaz a forgácsolási erő, a kopási mélység, valamint a fajlagos kopás szerint. Az ábrán láthatóak a kísérleti eredmények alapján kirajzolt felületi diagramok, valamint a kimeneti értékekhez tartozó Pareto-diagramok, melyek a hatások mértékét mutatják. Mindhárom vizsgált érték esetén már a felületi diagramról leolvasható, hogy az ortogonális homlokszög változtatása nagyobb hatással van a forgácsolási és kopási eredményekre, mint a bevonat vastagsága. Az ortogonális homlokszög növelésével csökken a forgácsolási erő és a kopás mélysége is, ugyanakkor a fajlagos kopás értéke megnő. A Pareto-diagramok alapján szintén ez látszik, hogy az ortogonális homlokszög hatása lényegesen nagyobb mértékű, mint a bevonati vastagság, vagy a különböző kombinációk hatása.



5. ábra: Felület- és Pareto-diagramok a) a forgácsolási erő b) a kopási mélység és c) a fajlagos kopás esetén

A hatások szignifikanciájának számszerű és egyértelmű megállapítása miatt varianciaanalízis vizsgálatot hajtottunk végre 95%-os szignifikanciaszinten, ennek eredményei az **4. táblázatban** láthatóak. Az eredmények alapján mindhárom kimeneti paraméter esetén csak a homlokszög hatása szignifikáns ($P < 0,05$). A bevonati vastagság vizsgálata esetén magas P-értékeket lehet megfigyelni, így ezen változó hatását nem lehet szignifikánsnak nevezni.

4. táblázat: A homlokszög és a bevonati vastagság hatásának varianciaanalízis vizsgálata

Faktor	Szint	Paraméter	F-érték	P-érték
Homlokszög	3	Forgácsolási erő (N)	318,15	0,000
Bevonat vastagság	3	Forgácsolási erő (N)	0,04	0,958
Homlokszög	3	KT – kopás mélység	9,33	0,005

Bevonat vastagság	3	KT – kopás mélység	1,35	0,302
Homlokszög	3	w_s -fajlagos kopás	15,05	0,001
Bevonat vastagság	3	w_s -fajlagos kopás	0,6	0,566

A szimulációs kísérletekkel így a tervezett szerszámkoncepció működőképességét és a homlokszög szignifikáns hatását lehetett kimutatni. Az ortogonális homlokszög növelése csökkentette a forgácsolási erőt és a kopási mélységet, ez a homlokszögtől függő forgácsolási erőkomponensek megváltozására vezethető vissza, mely során a súrlódási erőkomponens megnőtt, ezáltal eredményezve a szerszám nagyobb szakaszán megjelenő koptató hatást és ezzel a fajlagos kopási érték megnövekedését.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ezen kutatás során egy természet által inspirált önélező szerszámkoncepció tervezése és numerikus elemzése volt a cél egy hatékonyabb forgácsolási eljárás kidolgozásának érdekében. A természeti inspirációt a hódok szemfoga adta, mely esetén a keményebb hátfelületi réteg és a lágyabb homlokfelületi réteg eltérő mértékű kopása és növekedése biztosítani tudja a fogazat éles kialakítását. Ezen mechanizmusból kiindulva koncepciókat alkottunk és azokat numerikusan vizsgáltuk ANSYS LS-Dyna nevű szoftverben. A tervezett szerszámkoncepciót ortogonális forgácsolási kísérletek során vizsgáltuk. Első esetben a biológiailag inspirált szerszámot egy bevonat nélküli és egy teljes felületén bevont szerszámmal hasonlítottuk össze. A kopott szerszámkontúrok, a fajlagos kopási értékek és a kopási mélység értékek alapján a tervezett szerszám más kopási jelleget mutatott, az önélező mechanizmus megfigyelhető volt. Ezen szimulációs kísérlet alapján elemeztük a szerszámokat a forgácsolási erő, a kopási mélység és a fajlagos kopás szerint az ortogonális homlokszög és a bevonati vastagság változtatásával. A varianciaanalízis alapján az ortogonális homlokszög szignifikáns hatást gyakorolt a kimeneti értékekre, míg a bevonat vastagsága nem volt szignifikáns hatással azokra. A kutatás során sikerült tervezni és numerikus módon vizsgálni egy olyan szerszámkoncepciót, mely adott körülmények között képes lehet önélezésre. Ezen szerszám kivitelezhetőségének részletes elemzése, prototípusának legyártása és tesztelése a kutatás egy újabb fejezete lesz.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051, a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott EKÖP-24-4-II-BME-157 és TKP-9-8/PALY-2021 számú támogatásnak köszönhetően valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] G. Byrne, D. Dimitrov, L. Monostori, R. Teti, F. van Houten, és R. Wertheim, „Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, köt. 21, o. 1–32, máj. 2018, doi: 10.1016/j.cirpj.2018.03.003.
- [2] „English”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: <https://www.biointelligentmanufacturing.com/en.html>
- [3] K. Wegener és mtsai., „Biologicalisation in manufacturing – Current state and future trends”, *CIRP Annals*, köt. 72, sz. 2, o. 781–807, jan. 2023, doi: 10.1016/j.cirp.2023.05.005.
- [4] R. Mieke és mtsai., „The biological transformation of industrial manufacturing – Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry”, *Journal of Manufacturing Systems*, köt. 54, o. 50–61, jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.11.006.
- [5] A. Malshe, K. Rajurkar, A. Samant, H. N. Hansen, S. Bapat, és W. Jiang, „Bio-inspired functional surfaces for advanced applications”, *CIRP Annals*, köt. 62, sz. 2, o. 607–628, jan. 2013, doi: 10.1016/j.cirp.2013.05.008.
- [6] M. A. Meyers, A. Y. M. Lin, Y. S. Lin, E. A. Olevsky, és S. Georgalis, „The cutting edge: Sharp biological materials”, *JOM*, köt. 60, sz. 3, o. 19–24, márc. 2008, doi: 10.1007/s11837-008-0027-x.
- [7] J. F. Archard, W. Hirst, és T. E. Allibone, „The wear of metals under unlubricated conditions”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, köt. 236, sz. 1206, o. 397–410, jan. 1997, doi: 10.1098/rspa.1956.0144.
- [8] O. Pantalé, J.-L. Bacaria, O. Dalverny, R. Rakotomalala, és S. Caperaa, „2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, köt. 193, sz. 39, o. 4383–4399, okt. 2004, doi: 10.1016/j.cma.2003.12.062.
- [9] „Titanium Carbonitride (TiCN) PVD Coating”. Elérés: 2024. november 8. [Online]. Elérhető: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=5ffb257a8cc74b69a140046a34b5d61c>