BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK

SEPRŐS SZILÁRD

TDK DOLGOZAT

Biológiailag inspirált, önélező forgácsolási technológia fejlesztése és numerikus vizsgálata

Konzulens:
Dr. Geier Norbert
Adjunktus

Budapest, 2024

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Seprős Szilárd* (Y5B2PJ), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2024.11.10.

Seprős Szilárd

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás iv
Jelölések jegyzéke v
1. A gyártástudományok biológiai transzformációja 1
1.1. A biológiai transzformáció módjai és jövőképe a gyártásban 2
1.2. Biológiai inspiráció 5
1.2.1. Biológiailag inspirált önélezés 10
2. Célkitűzések 12
3. A szimulációs környezet és paraméterek definiálása 13
3.1. Szimulációs környezet ortogonális forgácsolási technológiához 13
3.2. Kísérletterv 18
3.3. A munkadarab és a szerszám anyagi tulajdonságai 19
3.4. A szimuláció során mért adatok és azok kiértékelése 20
4. Eredmények ismertetése és értelmezése 22
4.1. Kopási folyamatok különböző anyagi összetételnél 22
4.2. A homlokszög és a bevonat vastagságának hatása a forgácsolási erőre és a szerszámkopásra 24
4.3. Kitekintés 31
5. Összefoglalás 32
6.Felhasznált források 34

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm Dr. Geier Norbert adjunktusnak a szakmai iránymutatását, a kutatás során nyújtott támogatását, valamint azt, hogy megismertetett ezen újszerű és kihívásokkal teli témakörrel.

Az EKÖP-24-1-BME-173 számú projekthez tartozó ezen TDK dolgozat a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztése és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az EKÖP-24-1 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Ez a kutatás az USA és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00050 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
F	Forgácsolási erő	N
h	Munkadarab magasság	mm
h_e	Elméleti forgácsvastagság	mm
K_T	Kopás mélysége	mm
l	Munkadarab hossza	mm
l_c	Forgácsoló él hossza	mm
r_β	Élsugár	mm
t	Bevonat vastagsága	mm
W_s	Fajlagos kopás	mm

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α_o	ortogonális hátszög	°
γ_o	ortogonális homlokszög	°

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
c	forgácsoló (cutting)
e	elméleti
o	ortogonális
s	fajlagos (specific)

1. A GYÁRTÁSTUDOMÁNYOK BIOLÓGIAI TRANSZFORMÁCIÓJA

A gyártási folyamatok célja, hogy a kiinduló nyersanyagokból az előírt igényeknek megfelelő késztermékeket hozzunk létre, mindezt minél hatékonyabb, gazdaságosabb, precízebb, fenntarthatóbb, zöldebb módon. Utóbbi szempontok ráadásul egyre gyarapodnak és egyre szűkebb korlátok közé helyezik a valamennyi szempontból megfelelő gyártási folyamatokat. A gyártástudományoknak napjainkban főleg fenntarthatósági, környezetvédelmi és digitalizálási szempontból számos kihívással néznek szembe, emiatt elengedhetetlen a törekvés az innovációkra és az új technológiák bevezetésére.

A természet már a kezdetektől fogva inspirációt és integrációs lehetőségeket adott a műszaki megoldásokhoz, mivel az evolúció folyamata az évmilliók során számos kihívást és optimalizálást oldott meg [1]. A biológiai tudományágak nagymértékű fejlődése egyre nagyobb mértékben tárja fel a minket körülvevő természetet, az abban rejlő információkat, jelenségeket és törvényszerűségeket. 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, ugyanakkor az alapos és elegendő biológiai háttér információ, valamint a műszaki tudás kreatív ötvözése elengedhetetlen hozzá. A biológiai megoldásokat számos alkalommal alkalmazták vagy adaptálták már, azonban ezeket az inspirációkat sokszor nem lehet még műszakilag kivitelezni vagy más módszerek alkalmazásával hatékonyabban lehet elérni a kívánt célt [2]. Mivel a természetről szerzett információk napról napra gyarapodnak, így könnyen elképzelhető, hogy sok inspiráció forrást még nem is ismerünk vagy még nem értjük az alapját képező biológiai folyamatot. További előnyét képezi a biológiai inspirációk használatának, hogy jellemzően magukban hordozzák a fenntarthatóság jegyeit is, mely a mai technológiák egyik legfontosabb tervezési szempontjának számít.

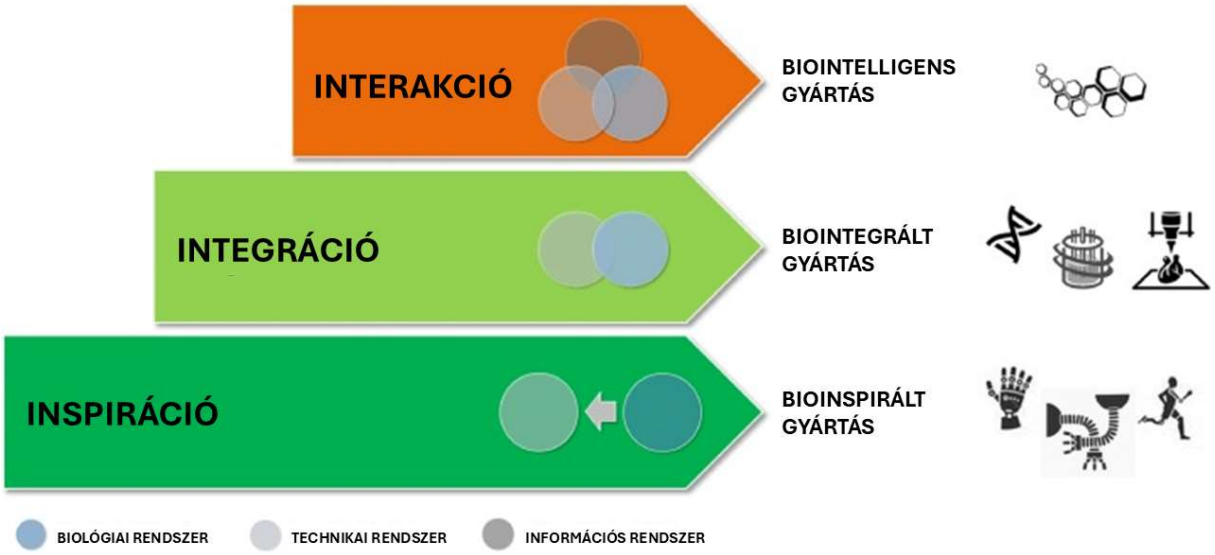
Ezen okok miatt, látva a téma fontosságát és a benne rejlő nagy potenciált az utóbbi években egy jelentősen növekvő kutatási terület lett a biológiai transzformáció témája, továbbá számos európai és nemzetközi felhívás jelenik meg, ösztönözve a kutatókat a biológia és a gyártástudományok ötvözésére. A biointelligens gyártás európai hangadója a ManuFuture európai gyártási platform, mely 2020-as évi kezdéssel elindította a ,,Biointelligent Manufacturing" alprogramját, melyben célként kitűzte a biointelligens gyártáshoz tartozó kutatások és innovációk támogatását [3]. Az Európai Unió ezen a területen egy Horizon Europe tender kiírásával 25.000.000 euró összértékben támogatta a kutatási terület növekedését 2023 és 2024 szeptembere között [4]. A nemzetközi színtéren további – jellemzően pár éve alapított – intézmények és egyesületek találhatóak, melyek a biológia és a műszaki területek ötvözésével foglalkoznak.

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 [5].

1.1. A biológiai transzformáció módjai és jövőképe a gyártásban

Byrne és társai a biológiai transzformációt a gyártástudományban az alábbi szerint határozták meg: „ A biológiai és bioinspirált törvényszerűségek, anyagok, funkciók, szerkezetek és erőforrások alkalmazása és integrálása az intelligens és fenntartható gyártási technológiákban és rendszerekben, a lehető legnagyobb mértékben kihasználva azokat”[6].

Miehe és társai szerint a biológiai transzformáció során három különböző fejlődési módot különböztethetünk meg, ezek a módok az **1-1. ábrán** láthatóak [7]. Az első a biológiai inspiráció, mely az evolúciós biológiai jelenségeket felhasználja, hogy abból közvetett módon technikai eszközöket lehessen létrehozni. A második mód, a biológiai integráció, mely során valamely biológiai jelenség a gyártási rendszerben hatékonyan felhasználható, beépíthető. A harmadik mód a biológiai interakció, mely során az integrált biológiai rendszerek átfogó kölcsönhatásban vannak a technikai és információs rendszerekkel, ezzel egy új és önálló termelési struktúrát, úgynevezett biointelligens gyártórendszert alkotnak. A biológiai interakció során kulcsfontosságú a biológiai és műszaki alkotóelemek közötti – lehetőleg valós idejű – információcsere, ez a tulajdonság szorosan fűződik a digitális gyártás megoldásaihoz. Ott ugyanis nagy hangsúly van a valós idejű információcserén, melyet az öntanuló irányítást és digitális ikert alkalmazó rendszerek fel tudnak használni a gyártórendszer optimalizálására és annak önálló irányítására. Ezen biológiai transzformáció hosszú távú célja, hogy a régi, „élettelen” gyártórendszerek helyét átvegyék az „élő gyártórendszerek”, melyek képesek az öntanulásra, a kommunikációra, a kognitív viselkedésre, valamint felelnek a saját rendszereik összeállításáért és karbantartásáért [8].



1-1. ábra: A gyártástudományok biológiai transzformációjának szintjei [7]

A biológiai transzformáció hordereje és egyben egyik legnagyobb kihívása a biológiai és gyártástudományi területek összeegyeztetése. Mindkét tudományterület igazán széles, sokfelé kiterjedt terület és egyáltalán nem magától értetődő, hogy hol van ezeknek közös megoldási és alkalmazási területe. Ugyanakkor a két terület közötti kapcsolat megtalálása szerencsére kétirányból is megközelíthető [9]. Az egyik eset, amikor egy természeti jelenség megfigyeléséből születik egy ötlet, mely műszaki megoldáshoz vezethet. A másik opció, amikor egy létező technológiai problémára keresünk megoldást, és ehhez a természet által létrehozott megoldásokat kutatjuk fel és hozzuk összefüggésbe az eredetileg fennálló problémával.

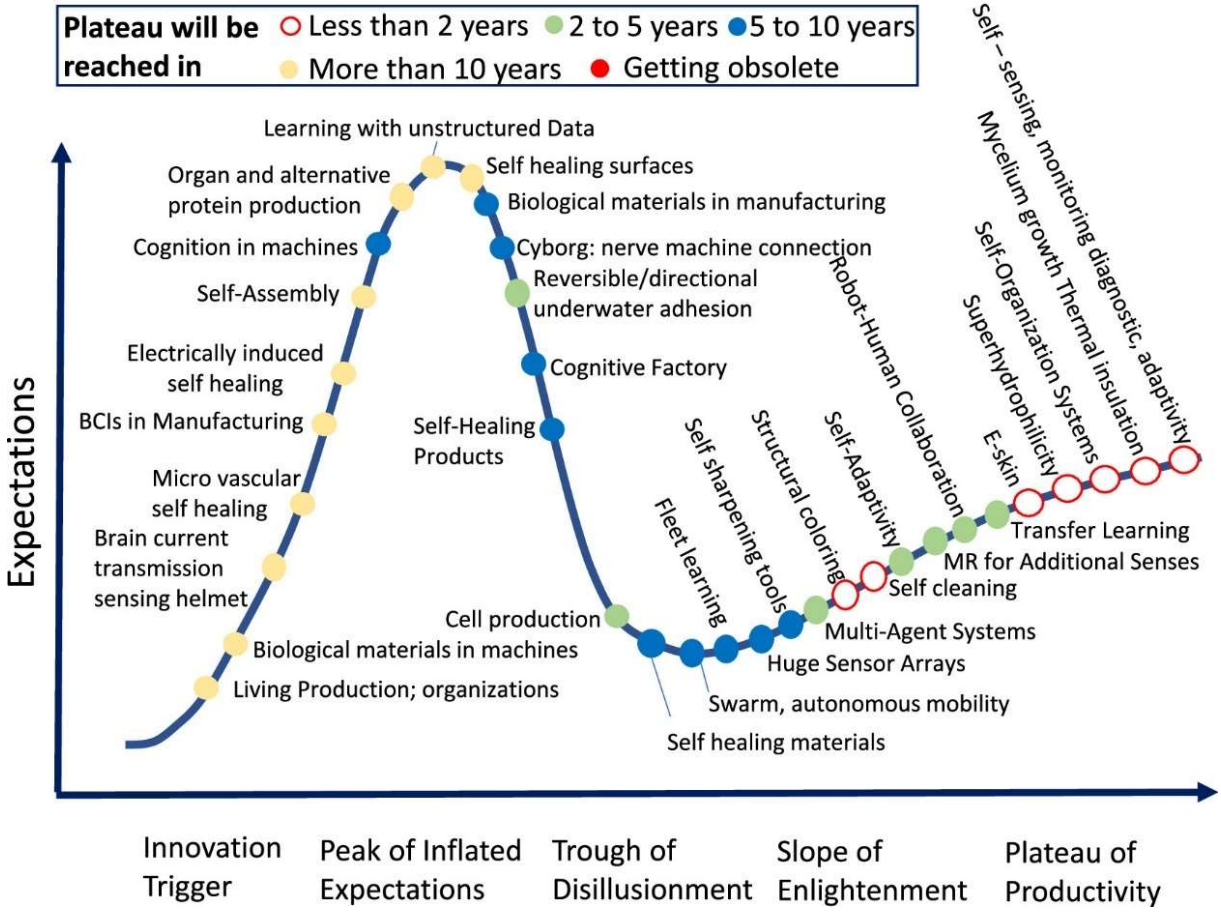
A gyártásban a biológiai transzformációtól, mint újszerű ipari innovációs ágazattól számos új megoldást várnak az elkövetkező években. A szakirodalmi előrelátások szerint az alábbi területeken várható a biológiai transzformáció jelentős hatása [6]:

- Kémiai és anyagtudományi fejlesztések
- Bioanyagok előállítása és beépítése
- Klasszikus gyártási folyamatok manipulálása és újszerű, biológiailag inspirált gyártási folyamatok kialakítása
- Biológiailag inspirált eszközök (gyártóberendezések és -szerszámok, robotok, mérőberendezések) kifejlesztése
- A termelésszervezés átgondolása biológiai inspiráció alapján

Dolgozatom során a biológiai inspirációval foglalkozom kiemelten, ahol talán a legjobban érződik, hogy két igen széles tartományú tudományterület között kell megtalálnunk azokat a probléma-megoldás párokat, melyek alapján új műszaki innovációk születhetnek. Ezen nagymértékű információk feldolgozására és összekötésére a kutatók igyekeznek felderíteni mind az információszerzéshez szükséges forrásokat és a feldolgozásukhoz szükséges módszereket, osztályozási módokat [10]. Az egyik legkézenfekvőbb forrás az AskNature online adatbázis, mely könnyen elérhető és kulcsszavak, kifejezések alapján szűkíthető az általunk specifikált területekre. Az AskNature online adatbázis összefoglalja és rendszerezi a természetbeli megoldásokat, működésének célja a kutatók, tervezők ösztönzése arra, hogy tanulmányozzák a természetben talált megoldásokat, majd alkalmazzák azokat különféle területeken. A könyvekből és szakirodalomból való információszerzés több kutatási energiát igényel, ugyanakkor részletesebb tájékoztatást adhat bizonyos természeti jelenségekről. Amennyiben a természeti inspiráció adott lehet egy műszaki probléma megoldásában, akkor érdemes lehet kikérni biológus szakértő véleményét, aki jobb meglátásba tudja helyezni a természeti jelenséget és segíthet azt egy műszaki megoldássá transzformálni.

A biológiai transzformációval foglalkozó kutatások nem elhanyagolható célja az is, hogy naprakészen kövesse és összegezze az emberiség igényei alapján gerjesztett trendeket, mint például a fenntarthatóság, a káros környezetei hatások csökkentése, az autonómia növelése, az ipari termelés javítása. Ezen trendek követése és az aktuális problémákra nyújtható megoldások lehetőségének tekintetében a biológiai transzformáció okkal tekinthető az Ipar 4.0 egyik területének [5]. Az Ipar 4.0 fejlesztései és a gyártás

biológiai transzformációja között szoros kapcsolatok találhatóak, például a kiber-fizikai gyártórendszerek a biointelligens gyártórendszerek megvalósulási alapját jelenthetik. Byrne és társai összefoglalták az aktuális kutatásokat és koncepciókat a biológiai transzformációval kapcsolatban, az adathalmazukat rendszerezték és trendbecslést adtak a várható fejlődésre és a megvalósíthatóságra [6]. Ezt a trendbecslést egy „hype-ciklussal" adták meg, ez az ábra egy 2023-as publikációban frissítve lett, itt összefoglalták azt is, hogy az eredeti 2018-as becsléshez képest mi történt a valóságban [5]. A gyártás biológiai transzformációjára vonatkozó, 2023-ban publikált „hype-ciklus" az **1-2. ábrán** látható.



1-2. ábra: A gyártás biológia átalakulásához kapcsolódó innovációk, az elvárásaik és becsült megvalósulási idejük alapján

Az ábrán látható néhány fejlesztés már megvalósult bizonyos formákban, mint például az öntisztítás, a strukturális színezés, illetve számos koncepció haladt sokat előre az ipari alkalmazás felé, például az önszerveződő rendszerek. A kollaboratív robotok már igen előrehaladott fázisban vannak, az ipari tesztelés szintjét már bőven elérték. Számos koncepció ugyanakkor még egészen távolinak tűnik, így jól láthatóak a rövid-, közép- és hosszútávú perspektívák és elvárások. A rövid és középtávon megvalósítható fejlesztések leginkább a biológiai inspiráción alapulnak, ugyanis ezen innovációk

egy sokkal szélesebb tudástárból jöhetnek létre és képesek önállóan is hasznosulni, míg a biológiai interakciónál szükség van a komplexitásra, tehát a biológiai, műszaki és információs technológiák összehangolt és hatékony működésére[1].

1.2. Biológiai inspiráció

A biológiai szerkezetek, mechanizmusok, folyamatok, anyagok vizsgálatok korábban is számos inspirációt adtak a műszaki megoldásokhoz, ugyanakkor ezen inspirációk egyáltalán nem lettek még kiaknázva, sőt, a rendelkezésre álló megismert természeti jelenségek száma napról napra növekszik. 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. Ezen okok miatt kiemelten vizsgálom a biológiai inspirációt a gyártástudományok biológiai transzformációjának témakörén belül. Ebben a fejezetben ismertetem az aktuális fejlesztéseket, melyek a természet megoldásait használták fel az adott problémákhoz.

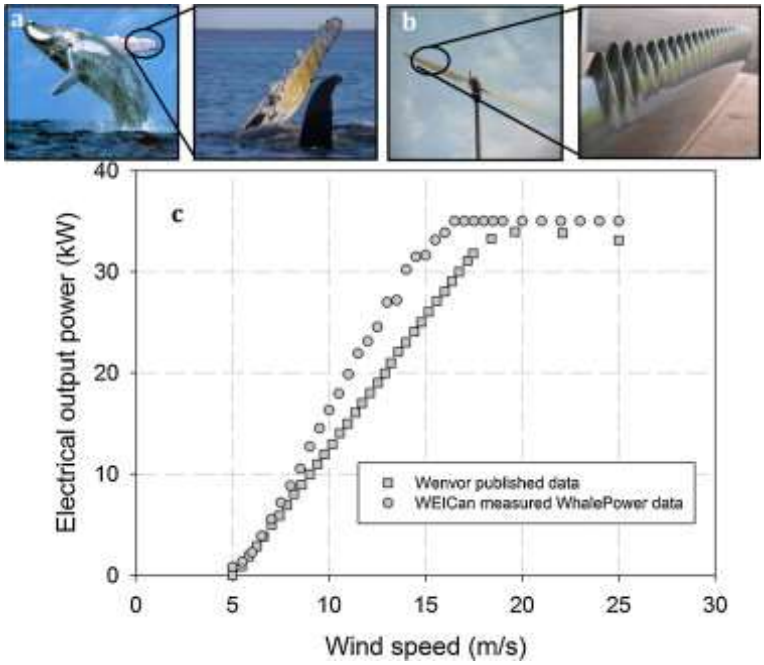
Az önérzékelés a gyártórendszerek egyik alapvető funkciója, mely a környezetből és gyártórendszerből kinyerhető adatok és információk rögzítésére szolgál, melyek vonatkoznak a gépekre, a termékekre, azok minőségére vagy a szerszámokra [11]. A gyártóegységek egyre összetettebbek lesznek, az önérzékelés pedig ezzel arányosan megköveteli a lehető legtöbb adat és információ kinyerését, valamint azt is, hogy adott érzékelők képesek legyenek a szomszédos érzékelők szokatlan értékeit észlelni, az ilyformán jelentkező hibákat kiszűrni önmaguktól. Az önérzékelés területén a biológiai inspiráció leginkább a szenzorok területén mutatkozik meg. A bionika egyik alcsoportja például olyan optikai komponensekkel foglalkozik, melyek a fény szabályozására használt biológiai rendszereket mintáznak le élő optikai rendszerekké [12]. A természetben találhatóak olyan növények, melyek a környezetük megváltozásának hatására képesek állapotuk gyors megváltoztatására érzékeny mechanikai és fotoreceptoraik miatt [13]. A Mimosa Pudica növény levelei is egy ilyen érzékeny szerkezetet alkotnak, melyek mechanikai inger hatásásra összecsukódnak, fotoreceptorai által pedig a nappali-éjszakai (kinyílt-összecsukott) állapotait szabályozza [14]. A növény működése és érzékelése alapján olyan haptikus szenzorokból és aktuátorokból álló rendszert alkottak meg, mely az emberi érintés szimulálására és elemzésére képes [15]. Ezen technológia az emberi érintkezés egy újabb megvalósítását hozta előtérbe, melyet az orvostechnikában fel lehet használni, de a biointelligens gyártórendszerekben is fontos szerepet kaphat a kollaboratív robotok terén, valamint amiatt a koncepció miatt is, miszerint az ember a biointelligens gyártórendszernek nem csak tervezője, megvalósítója, üzemeltetője, hanem szerves része lesz.

Az öngyógyítás és önjavítás kihívásai kapcsán a természet számos ihletet adott már az általa alkotott anyagok, mechanizmusok és struktúrák mentén is. Az egyik legkézenfekvőbb ilyen biológiai megoldás az emberi immunrendszer, az ez alapján megalkotott „mérnöki immunrendszer" (EIS) célja, hogy javítsa a rendszer stabilitását, ellenálló képességét, automatikus irányítást alkalmazzon zavaró hatások esetén [16]. Az öngyógyítás folyamata több megközelítésből is alkalmazva lett az anyagi és kémiai tulajdonságok mentén, a cementeknél a repedések mentén megvalósított öngyógyuló folyamatokat a kagylók héjának gyógyulásáról mintázták [17]. Létrehoztak öngyógyuló polimereket is a természetes sebek gyógyulása alapján, melyek befektetett energia (hő vagy fény) hatására képesek mechanikai sérüléseik javítására [18], [19]. Továbbá az élőlények csontjait alapul vevő biomimetikus anyagoknál is tudtak megfigyelni öngyógyító mechanizmust [20].

A lótuszlevél felülete a különleges mikroszkopikus struktúrája és felső, vékony viasz réteg miatt szuperhidrofób tulajdonságokkal rendelkezik [21]. A levélfelületen ezen tulajdonságok miatt a ráeső vízcseppek szinte gömb alakúak maradnak és szabad mozgásra képesek a felületen. A vízcseppek mozgásuk során felveszik a levélen lévő szennyeződéseket, ezzel tisztítva a felületet. Ezt az öntisztító effektust alkalmazzák öntisztító felületek [22] és textíliák [23] fejlesztésénél, melyek képesek ellenállni a víznek és folyamatos felülettisztulásra képesek, ezzel csökkentve a karbantartási és tisztítási igényeket.

A biológiai inspiráció megjelenik a gyártási struktúrák kigondolásánál is. Az állati rajok működése és kommunikációja több területen is inspirációt nyújt, ilyen például az az elképzelés, mely során autonóm, mobilis megmunkálóegységekkel és azok hatékony kommunikációjával akarják elérni a termelés nagyobb mértékű rugalmasságát [24]. A kommunikáció nem csak a gyártásban, hanem valamennyi műszaki területen kulcsfontosságú szempont, így ezen terület fejlesztése biológiai inspirációk által egy több irányból gerjesztett folyamat. A kommunikációs és a kognitív jellemzők fejlődésére a természetből már számos jelenség adaptálva lett műszaki megoldásokba. Az agyi kommunikáció és az idegrendszer az alapja a mesterséges neuronhálózaton létrehozásának, ez pedig napjaink talán legjobban felkapott és leginkább kutatott témáihoz vezetett, a gépi tanuláshoz és a mesterséges intelligenciához. Az emberek nyelvi mechanizmusait elemezve, pedig olyan algoritmusok fejleszthetőek, melyek segítik az idegen nyelvek tanulását, valamint a nyelvi programok betanítását. A hangyák és a méhek kollektív viselkedése olyan algoritmusok létrehozását inspirálta, melyek segíthetik a gépek, robotok közötti koordinációt, valamint a hálózati forgalomkezelést. Ezen terület igen felkapott része az úgynevezett *Swarm robotics*, melynek célja több robot kollektív együttműködése adott feladat vagy feladatok során [25]. A robotok együttműködésének kifejlesztéséhez a kutatók számos állati csoport viselkedését tanulmányozták, például a méhrajokat, a hangyákat, illetve különböző hal és madár rajokat is. A robotok megfelelő együttműködésének számos feltétele van, ilyen tulajdonságok a tudatosság, az autonómia, a rugalmasság, az önszerveződés és a bővíthetőség.

A biológiailag inspirált tervezés a műszaki tevékenységek egész körére kiterjed, ezek közül néhány közvetett módon van kapcsolatban a gyártástudományokkal. Az energiaipar szoros összeköttetésben van a gyártástudományokkal, az energiaipari alkatrészek speciális gyártási igényei megkövetelik a gyártási technológiák fejlődését a speciális kialakításokhoz, különleges anyagokhoz és a nagy pontossághoz. Egy lényeges energiaipari fejlesztés volt, ahol a szélturbina lapátjainak felépítését a púpos bálna uszonyának struktúrája alapján gondolták át. Fish és társai a púpos bálna uszonyán lévő dudorokat tanulmányozták, majd alkalmazták szélturbina lapátokon [26]. A dudorokkal ellátott szélturbina lapátokon a felhajtóerő megnövekedett, a légáramlás iránya kedvezőbb lett, a működési szög növelhető lett és turbina teljesítménye jelentősen megnőtt [27]. Az inspirációt, a tervezett lapátot, valamint annak eredményeit az **1-3. ábra** mutatja.



1-3. ábra: A púpos bálnák uszonya által ihletett szélturbina lapát, és annak eredményei [26]

A természetben megszokott, hogy bizonyos rovarok, pókok és gyíkok különösebb erőfeszítés nélkül képesek függőleges falakon vagy akár fejjel lefelé is mászni, ezen élőlények közül a legnagyobb testtömeggel rendelkező állat pedig a gekkó [28]. A gekkók talpát körülbelül 500000 kertainszőr fedi, ezeknek a szőröknek a végén pedig több száz darab néhány tized mikrométer vastagságú spatula van. Amikor a spatulák érintkezésbe lépnek a felülettel a van der Waals kötések miatt akkora tapadási erő lép fel, hogy az állat testsúlyának többszörösét is meg tudja tartani. Ebből a jelenségből inspirálódva hozták létre a gecko tape-t, mely a gekkó talpának felépítését imitálja poliimid szálakkal [29]. Ezen koncepciót többször is sikeresen megvalósították különböző anyagú szőrökkel és különböző gyártási technológiákkal [30], [31], [32]. A gekkók talpának elvét felhasználó rögzítési struktúrák a tapadási erőn kívül még két másik

fontos tulajdonsággal rendelkeznek, az egyik a tapadás oldhatósága, a másik pedig a tapadó felülettel arányos tapadási erő.

Az eddigi példák alapján látható, hogy a biológiai inspiráció egy releváns és a műszaki területekbe egyre jobban beleépülő fejlesztési folyamat. A természeti megoldások feltérképezése, a transzformáció kigondolása, majd megvalósítása viszont nagyon különböző minden egyes ilyen kutatásnál a felhasznált idő, energia és erőforrások szempontjából. Ennek szemléltetése szempontjából egy olyan táblázatot hoztam létre, mely a gyártás különböző területeivel összeköthető természeti megoldásokat a feldolgozottságuk alapján szemlélteti. Az **1-1. táblázatban** így láthatóak gyártási felhasználáshoz köthető természeti jelenségek a felhasználásuk tekintetében. A biológiai megoldásokhoz feltüntettem feldolgozottságuk szintjét, a koncepció szintje azt mutatja, hogy akadémiai/ipari fejlesztések során koncepciókat alkottak és kezdetleges kísérleteket elvégeztek már az adott jelenség vizsgálata során. Az ipari alkalmazás oszlopban azokat a megoldásokat jelöltem, melyet hasznos módon ipari termékként, tartalomként tudtak megvalósítani. A táblázatban szerepelő koncepció és ipari alkalmazás nélküli természeti megoldások azokat a területeket szemléltetik, melyek összeköthetőek valamelyik gyártástechnológiai kihívással. Ezen területek még nagyon kezdetlegesek, így kutatási szempontból mindenképp kihívással teli, izgalmas témákat lehet felfedezni.

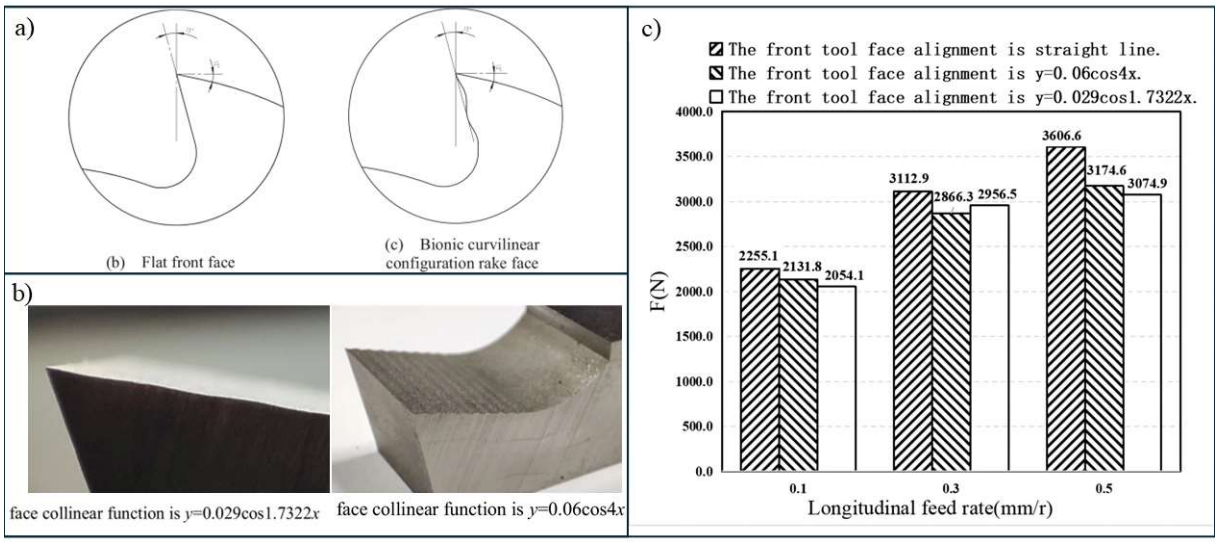
1-1. táblázat: Biológiai inspirációk és felhasználásuk a gyártásban

Kihívások a gyártásban	Biológiai inspiráció és felhasználása		
	Biológiai megoldás	Koncepció műszaki megoldáshoz	Ipari alkalmazás
Munkadarab, szerszám geometriája és felépítése	Nagy sáskarák végtagjának merev és rugalmas tulajdonságai	x [33]	
	Puhatestűek héjszerkezete által inspirált nehezen vágható anyag	x	x[34]
	Glycera kompozitanyag előállítása [35]		
Magas hőmérséklet	Sphincterochilidae csiga házának strukturális kialakítása hővezetés szempontjából [36]		
Kopás kezelés	Hód szemfogának önélezése	x [37]	
	Homoki boa rétegelt bőre az abrazív kopás ellen [38]		
Tapadás, rögzítés	Gekkó talpának kialakítása	x	x [31]
	Remora hal tapadófelületének kialakítása	x [39]	
	Polip szívókorongjának nyúlványai és képességük az apró dolgok megfogásásra [40]		
Érzékelés	Denevér fülének érzékelése	x	x [41]
	Pókháló mechanikai érzékelése és jelek szűrése [42]		
	Elefánthal elektromos jelérzékelése és jelszűrése [43]		
Kommunikáció	Hangya és méhrajok szervezettsége	x	x [25]
	Baktérium mikrokolóniák önszervező-dése [44]		
Robotika	Kígyók inspirálta robotmozgás	x [45]	x [46]
	Elefántormány inspirálta robotkar	x [47]	
Öntisztítás	Lótuszlevél öntisztító felülete	x [21]	

A fentebb felsorolt típusokon és példákon kívül még számos megoldás és koncepció megtalálható. Egy típust ugyanakkor szeretnék még megemlíteni, melyet kutatásom fő témájának választottam, a biológiailag inspirált önélezést, a következő alfejezetben az ezen területről szerzett inspirációkat és megoldásokat ismertetem.

1.2.1. BIOLÓGIAILAG INSPIRÁLT ÖNÉLEZÉS

A gyártási folyamatok során a szerszámok kopása jelentősen befolyásolhatja a gyártott termékek minőségét és a termelékenységet 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 [48]. 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 szinte az összes rágcsáló, a nyulak és a hódok fogazata [49]. Néhány kutatás során már foglalkoztak ezen ötlet adaptálásával, ezeknél a kutatásoknál jellemzően a hódok fogainak önélezése adta az inspirációt. Lei és munkatársai a hódok fogazatának görbületét vizsgálták a forgácsolási hatékonyság javításának céljából [37]. Kutatásuk során a hódok metszőfogát figyelték meg és matematikai formában írták le a homlokfelületi fogprofil görbéjét. A metszőfog profilja alapján terveztek egy egyedi forgácsoló geometriával rendelkező marószerszámot, melyet numerikus és kísérleti utón is vizsgáltak. Az általuk alkotott marószerszám koncepciója az **1-4. ábra a)** részén látható. A numerikus vizsgálatok alapján két szerszámot készítettek el a forgácsolási kísérletekhez, ezek az **1-4. ábra b)** részén láthatóak, a harmadik vizsgált szerszám egy hagyományos, egyenes homlokfelülettel rendelkező marószerszám volt.



1-4. ábra: a) A hód foga alapján elképzelt görbe homlokfelületű szerszámkoncepció b) a két különböző görbülettel rendelkező, megvalósított szerszámok c) a megvalósított szerszámok hatékonysága a forgácsolási erő eredmények alapján [37]

A forgácsolási kísérletek eredményei azt mutatták, hogy a görbe profillal leírt homlokfelületű marószerszámok esetén a fellépő forgácsolási erő jellemzően kisebb volt, mint a hagyományos marószerszám esetén. A forgácsolási kísérlet eredményei a **1-4. ábra c)** részén láthatóak. A biológiai inspiráció ebben a kutatásban így egy hatékony műszaki megoldás létrehozásához vezetett és egyben rávilágított egy újabb, a természet által optimalizált részletre. Rechenberger és társai egy másik megközelítésből inspirálódtak a hódok metszőfogának tulajdonságaiból, ugyanis a fog hát- és homlokfelületét alkotó különböző anyagok hatásait vizsgálták [50]. Céljuk egy olyan biomimetikus forgácsoló szerszám megalkotása volt, mely képes az önélezésre. Az általuk tervezett szerszámok homlokfelületét egy lágyabb szerszámacél, míg a hátfelületét keményebb bevonatok alkották. Egy ilyen felépítés során a hátfelület kopása sokkal kisebb mértékű, mint a homlokfelületé, ezzel a kopás oly módon kontrollálható, hogy a szerszám a forgácsolás során viszonylag állandó forgácsolási körülményeket tud biztosítani forgácsoló geometriájának kedvezőbb jellegű megváltozása miatt. A kísérletek során megalkotott önélező szerszámokkal elérték, hogy a forgácsoló energia csökkent, a forgácsolási folyamat jellemzői viszonylag állandóak voltak a forgácsolási idő során, valamint a teljes kopási arány csökkent.

Belátható az is, hogy itt lényeges eltérés tapasztalható a természeti jelenség és a műszaki forgácsolás között, ahol a szerszámok nem növekednek, valamint a kopási folyamatok lényegesen nagyobb mértékben és gyorsabban zajlanak le.

Ehhez hasonló elven vizsgálták és alkalmazták a tengeri sünök fogazatának önélezését, mely a fogazatot felépítő lamellák precíz felépítésén, összeköttetésén és azok elcsúszásán alapszik [51]. Ráadásul a tengeri sünök önélező mechanizmusa közelebb is áll a forgácsolás kihívásaihoz, lévén, hogy a tengeri sünök már jellemzően kemény, kőzetszerű anyagokat aprítanak fogazatukkal [52]. A cápák fogazatának tanulmányozásánál is megfigyelték a fogak önélezését, valamint a fogak recézett kialakítását, melyek kedvezőbbé teszik a fogak használatát, ezeket a megoldásokat szintén felhasználták önélező technológia fejlesztéséhez[53]. A biológiai kutatások egyre alaposabban tárják fel az állati fogazatok titkait, ebbe természetesen beletartoznak az őrlőfogak is. Evans és munkatársai az emlősök fogazatának geometriai kialakítását vizsgálták, és megállapították az evolúciós folyamatok optimalizálását az emlősök életmódjától függően [54].

2. CÉLKITŰZÉSEK

A kutatásom során két fő célt tűztem ki, az első ezek közül a gyártástudományok biológiai transzformációjával foglalkozó kutatások megismerése és az alapján a biológiai inspirációk, és azok forrásának részleges felkutatása. További célom volt ezen a területen a biológiai inspiráció által alkotott koncepciók összegyűjtése és módszerezes kategorizálása, mely alapján jobban átláthatóvá válik, hogy a biológiai inspirációk melyik gyártástudományi területeken jelennek meg, illetve melyik területeken vannak potenciális fejlesztési lehetőségek.

Kutatásom másik fő célja kifejezetten egy biológia által létrehozott megoldás műszaki életbe történő beépítésének vizsgálata volt. Ez a biológiai megoldás az önélező mechanizmus, melynek inspirációját a rágcsálók, hódok fogazatának önélező kopása adja. Ezt a mechanizmust elsősorban szimulációs körülmények között tervezem megvalósítani, mivel ezt a jelenséget egyből fizikai kísérletekkel vizsgálni időigényes és költséges is lehet. A jelenség ortogonális forgácsolási szimuláció során tervezem vizsgálni. A szimulációk során egy önélező fog felépítését tervezem alapul venni, amely egy vékonyabb, de lassabban kopó hátfelülettel és egy vastagabb, de gyorsabban kopó homlokfelülettel rendelkezik. A kísérlet során a két folytonos paramétert használok, ez a homlokszög és a hátfelületi bevonatréteg vastagsága lesz, ezek értékeit az iparban használt értékek és a biológiai megoldásokban létező értékek alapján határozom meg. A szimulációs kísérletek során a folyamat közben fellépő erőket és a forgácsoló geometria változását figyelem meg kimeneti értékekként. A kimeneti értékek kiértékelésével célom meghatározni a beállított paraméterek hatását a forgácsoló folyamatra és ez alapján megállapítani a biológiailag inspirált technológia felhasználhatóságát és korlátait.

3. A SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET ÉS PARAMÉTEREK DEFINIÁLÁSA

3.1. Szimulációs környezet ortogonális forgácsolási technológiához

Egy numerikus szimuláció előállítása során a célunk egy a valóságot minél jobban leképező rendszer létrehozása meghatározott időbeli és számítási igény szerinti keretek között. Egy igazán pontos és alapos szimulációnak a lefutása hetekbe, akár hónapokbais telhet a legerősebb számítógépeken, így a szimulációk lefutási idejét, komplexitását csökkenthetjük, amennyiben a hibahatárokat a kitűzött cél eléréséhez igazítva szabjuk meg. Pontos és valósághű numerikus megoldásokhoz a szimulációt struktúráltan kell felépíteni, mindenképpen figyelembe kell venni a szignifikánsan befolyásoló tényezőket és modelleket, valamint meg kell határozni a számunkra szükséges kimeneti adatokat és az azokhoz szükséges számítási eszközöket. A folyamathoz tartozó kevésbé szignifikáns tényezők összegyűjtése és felhasználásuk mérlegelése szintén szükséges egy pontos numerikus vizsgálat elkészítéséhez. Egy végeselemes szimuláció létrehozásánál általánosan ezeket a tagokat kell definiálni:

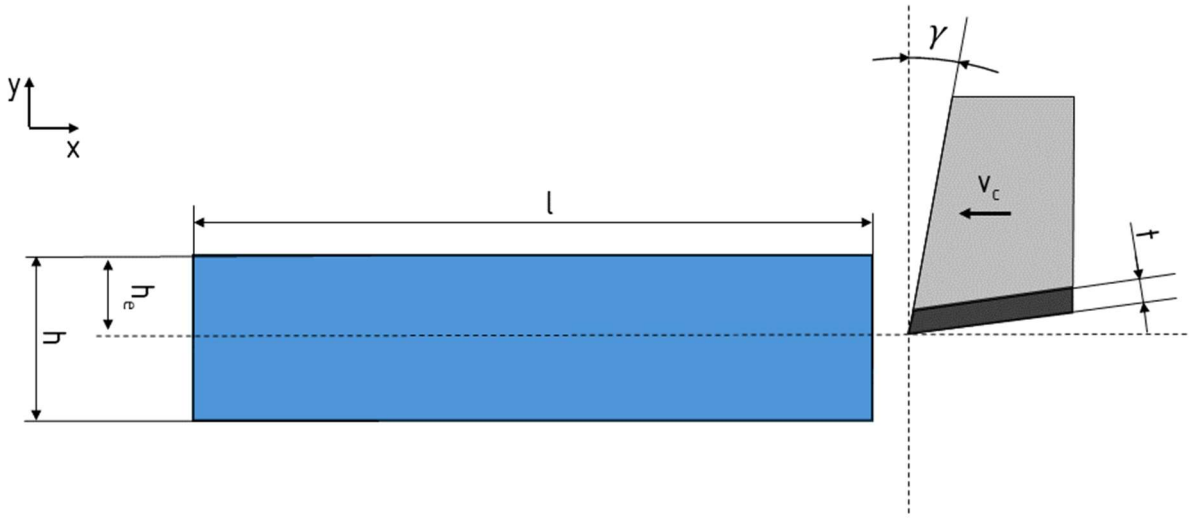
- A rendszer geometriai modellje
- Diszkretizáció – hálózás
- Anyagtulajdonságok
- Terhelések, mozgások
- Kényszerek és kapcsolatok
- Numerikus módszer
- Kimeneti adatok meghatározása

A jó megoldásokhoz így alaposan ismerni kell a fenti, beállítandó jellemzőket, ehhez szükség van a kellő paraméterek szakirodalomból, szabványokból való felkutatására vagy akár előzetes mérések (geometria, anyagi tulajdonságok, fellépő erők) elvégzésére és kiértékelésére. A továbbiakban ismertetem a szimulációs környezetben használt paraméterek közül az alkalmazott modelleket, valamint a hálózási módszert, a kiválasztott anyagokat és jellemzőiket egy másik alfejezetben ismertetem.

A kutatás során ortogonális forgácsolási folyamatokat vizsgáltam numerikusan, ugyanis ez a forgácsolási típus tartalmazza a célul kitűzött folyamat geometriai vizsgálatához szükséges és szignifikáns tényezőket. Az ortogonális forgácsolás esetén a forgácsoló él és a forgácsoló mozgás merőleges egymásra, ez esetben így i) egyszerűbb erőeloszlást ii) egyszerűbb hőeloszlást iii) egyszerűbb geometriai modellt biztosít, mint más, komplexebb forgácsolási folyamatok.

A szimulációs környezet felépítését a geometria alakzatok megadásával kezdtem. A munkadarab geometriáját SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) hálófüggetlen numerikus módszerrel adtam meg. Ezt a módszer jellemzően nagy elmozdulások és/vagy nagy erőhatások szimulációjára fejlesztették ki, kezdetben jellemzően áramlástani és csillagászati számításokra használtak. Az SPH módszer esetén ugyanakkor rájöttek, hogy sokkal több területen rájöttek, így például több esetben használták már

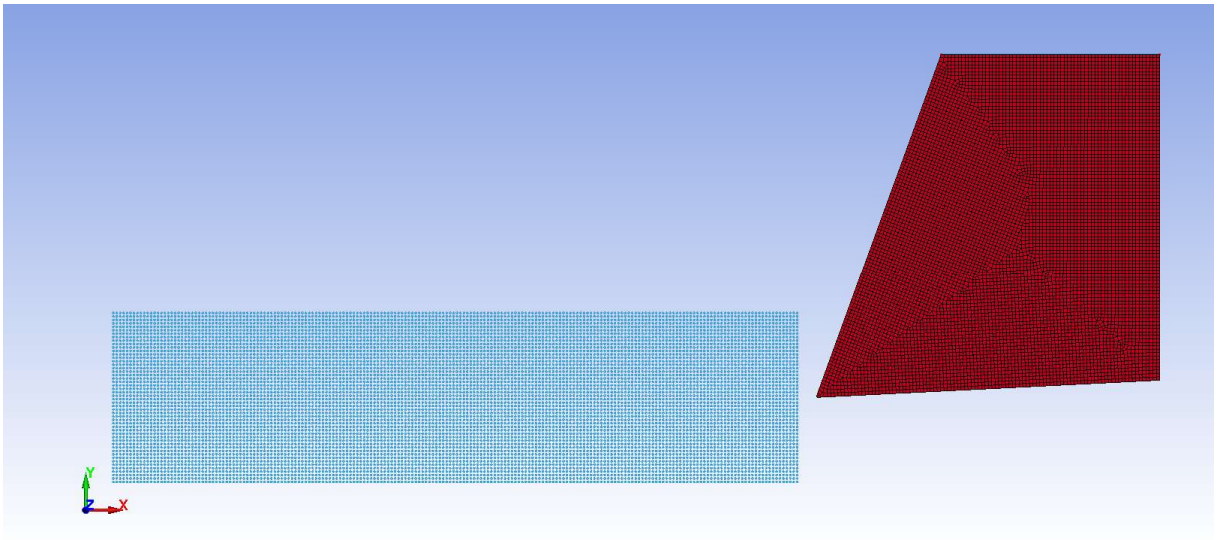
egészen pontos fémforgácsolási szimulációknál [55]. Az SPH háló megadása során rögzítenünk kell az SPH felhő befoglaló méreteit, valamint azt, hogy mekkora sugarú SPH elemekkel dolgozunk. Az elemek az általunk megadott mechanikai és termikus tulajdonságokkal rendelkeznek. Az elemek térbeli elhelyezkedése, sebessége a szimuláció mindegyik lépésében ismertek, a fizikai tulajdonságaik pedig a szomszédos elemek tulajdonságai alapján kerülnek kiszámításra az általunk megadott anyagi és számítási modellek alapján [56]. Az elemek egymáshoz képesti elmozdulása nem korlátozott, így a munkadarab jelentős deformációnak, törésnek lehet kitéve a szimuláció futásának megakadása nélkül. A szerszámot testmodellként adtam meg, a szimulációk során viszont csak az elemek X-Y síkban lévő topológiáját vettem figyelembe. Mind az SPH felhő, mind a szerszám vastagságát (z-irányú kiterjedését) 0,01 milliméternek adtam meg. A munkadarab X-Y síkon megadott méretét egy l= 4 mm hosszú és h= 1 mm magas téglalapként határoztam meg. A szerszám geometriájának meghatározása során egy 2 mm magas négyszöget határoztam meg, a szerszám legalsó pontja a munkadarab tetejétől 0,5 mm-re alacsonyabban lett elhelyezve, ez megegyezik az h_e elméleti forgácsvastagság értékével. Az élsugárnak $r_{\beta o}$= 5 μm értéket állítottam be, valamint α_o= 5°-os ortogonális hátszöget alkalmaztam. A szerszám γ_o ortogonális homlokszöge, valamint a t bevonat vastagság szimulációs paraméterként változott a különböző kísérleti beállításoknál. A szerszám változó paraméterei, valamint a munkadarab geometriája a **3-1. ábrán** látható.



3-1. ábra: A szimulációban megadott geometria paraméterei

A végeselemes szimulációk alapvető lépése az általunk meghatározott geometriák véges elemekre való felosztása, azaz hálózása. 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 testmodelljét 4 csomópontos elemekkel hálóztam be, 0,01 milliméteres elemmérettel. A szerszám hálózásánál két elemhalmaz lett létrehozva, egy a szerszámalapnak, egy pedig a szerszám hátfelületi bevonatrétegének. Az munkadarab SPH elemhalmazából és a szerszám behálózott geometriájából álló összeállítás a **3-2. ábrán** látható.



3-2. ábra: A szimulációs környezet hálózás után

A fizikai változók és más fizikai mennyiségek között az anyagmodell teremt kapcsolatot, mely matematikai formában írja le az anyagnak a rá ható terhelésekre adott válaszát, ennek megfelelő kiválasztása így kulcsfontosságú egy pontos szimuláció létrehozásához [57]. A szimuláció szempontjából a munkadarabot valamilyen anyagmodellel kell leírnom, olyan módon, hogy a forgácsolt anyag csomópontjai el tudjanak válni egymástól, reprezentálni tudják az anyag elválását. A mechanikai anyagvizsgálatokhoz számos anyagmodellt hoztak már létre, így a használt modell kiválasztásánál körül kellett járni, hogy milyen modellezési paraméterek és jellemzők szükségesek egy ortogonális forgácsolás szimulálásához. A modell kiválasztásánál ezek voltak a legfontosabb szempontok: i) alkalmazhatóság fémmegmunkálásnál (nagy sebességű képlékeny alakítás és jelentősebb dinamikus terhelés) ii) sebesség és hőmérséklet figyelembevétele a modellben iii) széles terhelési és hőmérsékleti tartomány. Ezeknek a feltételeknek az alábbi modellek megfelelnek: Johnson-Cook modell [58], Zerilli-Armstrong modell [59], Follansbe-Kocks modell [60]. A három modell közül a Johnson-Cook modellt választottam, mivel egyenletének viszonylag egyszerű alakja van, ugyanakkor hatékonyan modellezi le a dinamikus folyamatokat, valamint széleskörű használat mellett számos sikeres alkalmazásáról találni forrást. A Johnson-Cook modell továbbá nagy beépítettséggel rendelkezik a végeselem módszeres szoftverekben, mint az általam is használt LS-DYNA programban.

A Johnson-Cook modell az alábbi **1.számú egyenlettel** írja le az anyagi viselkedést mechanikai vizsgálatnál:

$$k_f = \left(A + B\varepsilon_{eq}^{n}\right)\left(1 + C \cdot ln\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^{m}\right) \quad (1)$$

Ahol: k_f: alakítási szilárdság (MPa)
A: kezdeti folyáshatár (MPa)
B: szilárdulási konstans (-)
ε_{eq}: egyenértékű alakváltozás (-)
n: szilárdulási tényező (-)
C: alakváltozási konstans (-)
$\dot{\varepsilon}_{eq}$: egyenértékű alakváltozási sebesség (s^{-1})
$\dot{\varepsilon}_0$: alakváltozási sebesség (s^{-1})
T_m: Olvadási hőmérséklet (K)
T_r: Referencia hőmérséklet (K)
T: Pillanatnyi hőmérséklet (K)
m: Termikus lágyulás kitevője (-)

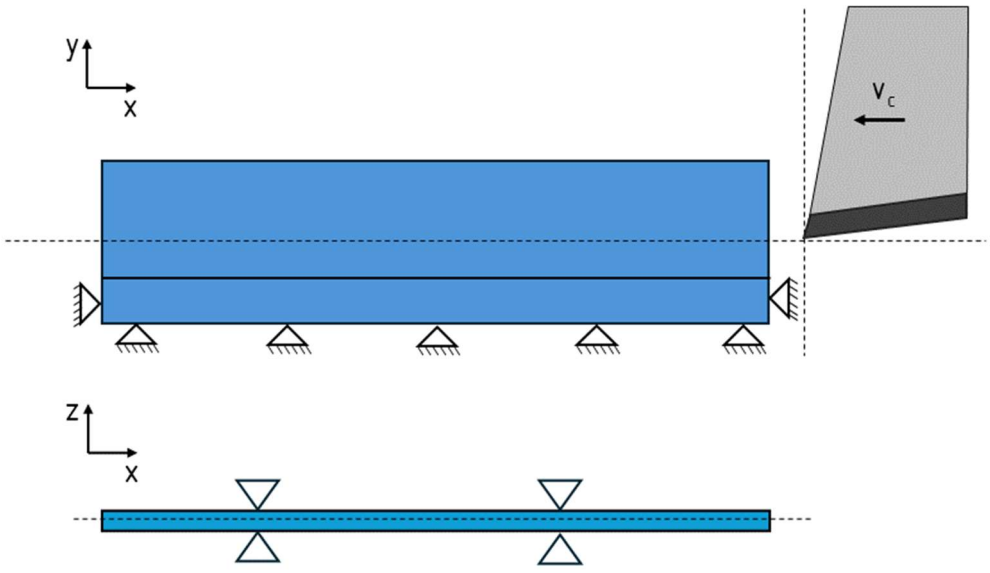
A munkadarab anyaga ily módon leírható a szimuláció során, a beállított értékek a **3-2. táblázatban** láthatóak. A szerszám modellszintű leírásakor figyelembe kell venni, hogy azt ebben az esetben merev testként lehet modellezni. A szimulációk során a szerszám forgácsoló felületein fellépő anyagi deformációt akarom megfigyelni. A végeselemes szimulációval a kopást mechanikus és termikus módon befolyásoló tényezőket veszem figyelembe, tehát az oxidációs és diffúziós kopási formákat nem vizsgálom, melyek numerikus vizsgálatához lényegesen komplexebb szimuláció lenne szükséges. A kopás modellezéséhez az LS-Dyna szoftverbe beépített kopási modellt használom, mely Archard kopási törvényén alapul [61]. A kopási modell kiválasztásánál a modell bonyolultsága és számítási igénye kulcsfontosságú volt, így ezesetben egy egyszerűbb, relatív kisebb számítású igényű modellt alkalmaztam. A modell a kontaktfelületeken történő kopási mélységet adja meg a kontaktfelületi nyomás, a relatív csúszási sebesség, a felületek keménysége és az idő függvényében. A beállított kopásmodellt a **2.számú egyenlet** írja le.

$$\frac{dw}{dt} = k \cdot \frac{p \cdot \dot{d}}{H} \quad (2)$$

Ahol: w: Kopás mélysége (mm)
t: idő (s)
k: konstans (-)
p: kontaktfelületi nyomás (-)
$\dot{d}$: relatív csúszási sebesség (m/s)
H: Felületi keménység (-)

A modell beállítása során megadható, hogy a *k* konstans érték a kontaktfelületi nyomás, valamint a relatív csúszási sebesség függvényében változzon, valamint a kontaktfelületek keménységének változása is beállítható a csomóponti hőmérsékletek függvényében. A kopás mértékét befolyásoló tényezőket a szimuláció az első futtatás során lemérte, majd ezen adatok alapján és a megadott ismétlés számmal kiszámolta a szerszámkontúr változását. A szakirodalomban több kísérlet is foglalkozik kopási modellek előállításával numerikus megoldásokhoz, kutatásom kivitelezéséhez megfelelőnek találtam ezt a modellt, a kutatás jövőbeli folytatásában viszont egy részletesebb, specifikáltabb kopásmodell tanulmányozása, átvétele és beépítése pontosabb eredményeket adhat.

Az ortogonális forgácsolást dinamikus szimulációval lehet vizsgálni, ebben az esetben meg kell határozni a rendszert alkotó részek szabadságfokait és lekötéseit, valamint a mozgó részek sebességét. Ebben a kutatásban a munkadarab nem mozog, valamint a forgácsolástól ,,távol" eső elemei merevnek tekinthetőek, ezért az alsó részén az elemek összes szabadságfokát lekötöttem a munkadarab stabilitásának érdekében. A munkadarab szempontjából biztosítani kellett még, hogy az alapgeometriára merőleges irányban (z tengely mentén) ne tudjon elmozdulni, ezt a munkadarab összes elemére alkalmazni kellett. A munkadarab forgácsolási tartományban lévő elemei így X és Y irányú transzlációs mozgásra képesek. A munkadarab szabadságfokainak lekötése a **3-3. ábrán** látható. A szerszám mozgásának meghatározása során első lépésként a szerszám és a szerszámbevonat elemhalmazait kényszereztem egymáshoz, hogy a szimuláció során egyetlen merev alakzatként viselkedjenek. A két elemhalmaznak így külön-külön megtudtam adni mechanikai és termikus tulajdonságaikat, melyek a **3-3. táblázatban** találhatóak, ugyanakkor a mozgások szempontjából egy alakzatként tudtam kezelni. Ennek az alakzatnak a mozgását lekorlátoztam csak X-irányú transzlációs mozgásra, lekötve az Y és Z irányú transzlációs, valamint mindhárom rotációs szabadságfokot.



3-3. ábra: A munkadarab szabadságfok lekötései a szimuláció során

A mozgó elemhalmaz sebessége ebben az esetben az ortogonális forgácsolási sebesség. A végeselemes szimulációkban beállított forgácsolási sebességnek (X irányú sebességnek) v_c = 60 m/min értéket állítottam be. A szimulációk során a szerszámalakzat a forgácsolási sebességet szinte azonnal felveszi (még a munkadarabbal való kontakt előtt) és azt végig konstans módon tartja.

A szimuláció során a lényeges hőtani változások is figyelembe lettek véve, a használt modell a tranziens termikus folyamatokat képezte le, izotrop hővezetési tényezőt alkalmazva. A tranziens szimulációk a következőket kellett beállítani: a tranziens analízis időintervallumait és lépésközeinek nagyságát, a nemlinearitási szabályozókat, valamint a kezdeti feltételeket. A termikus szimulációhoz az anyagok hővezetési tényezőjére, sűrűségére és fajhőjére van szükség az anyagjellemzők közül. A hőtani változások ebben a dolgozatban csak az általuk befolyásolt paraméterek miatt lettek beépítve, külön kimenetként, mint szimulációs eredmény, nem foglalkozom ezekkel az adatokkal. A szimuláció számítási fázisában így együttes strukturális és termikus megoldót használtam.

3.2. Kísérletterv

A kísérletek megtervezése során a célom az volt, hogy meghatározott számú szimulációk alapján meg tudjam állapítani a különböző összetételű és geometriájú szerszámok forgácsolási képességeinek egymáshoz való viszonyát.

Az önélező mechanizmus vizsgálatához az anyagi és a geometriai paraméterek hatását figyeltem meg. Anyagi szempontból elsősorban azt vizsgáltam, hogy miként alakulnak a kopási folyamatok egy bevonat nélküli, egy csak a hátfelületén bevonatolt, valamint egy teljesen bevont szerszám esetén. Geometriai szempontból a homlokszög hatásának megfigyelésést terveztem, ezt folytonos faktorként kezelve három szinten állítottam be. A geometria hatásának megfigyelése abból a szempontból is fontos volt, hogy jobban belátható legyen az anyagi hatások mértéke a geometriai hatásokhoz képest. A hatások mértékét varianciaanalízis használatával terveztem megállapítani. A kísérletterv ezen része a technológia igazolására szolgált, míg soron következő részében annak alaposabb vizsgálatát végeztem el a bevonati rétegek változtatásával.

A további kísérletek során két faktor alkalmazását terveztem, ezek alapján pedig a Central Composite Face-Centered kísérletterv alkalmazása mellett döntöttem. A vizsgálatok során eszerint két folytonos faktort használtam. A folytonos faktoroknak a hátfelületi bevonat vastagsága és az ortogonális homlokszög lettek kiválasztva. A kiválasztott faktorokat 3-3 szinten vizsgáltam. A folytonos faktorok értékkészletét az iparban használt általános értékek, valamint a biológiából átvett inspirációk halmazainak összehasonlításával és összeegyeztetésével határoztam meg. A szimulációk lefutása egymástól teljesen független folyamat, így a kísérleti sorrend meghatározása, valamint a szintek randomizálása nem volt szükséges. A faktorokat és a meghatározott szinteket tartalmazó kísérleti mátrix a **3-1. táblázatban** látható.

3-1. táblázat: A kísérletterv során alkalmazott értékek

Sorszám	γ (°)	t (mm)
1	10	0,01
2	10	0,02
3	10	0,03
4	20	0,01
5	20	0,02
6	20	0,03
7	30	0,01
8	30	0,02
9	30	0,03

3.3. A munkadarab és a szerszám anyagi tulajdonságai

A végeselemes szimulációk során használt mechanikai és termikus számításokhoz szükség van az alkalmazott anyagok fizikai tulajdonságaira. Az **3-2. táblázatban** szerepelnek a munkadarab anyagi jellemzői, 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.

3-2. táblázat: A munkadarab anyagtulajdonságai

42CrMo4 acél tulajdonságai [62]			
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 - Kezdetei 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 szimulációk során a szerszám-szerszámbevonat párost többféle anyagkombinációból lehetett összerakni, ezen anyagok értékeit az **3-3. táblázatban** lehet látni. A feltüntetett értékeket a mechanikai és termikus számításokhoz, valamint a kopás modellezéséhez volt szükséges megadni. A szimulációkhoz egy szerszámtest anyagot, vala-

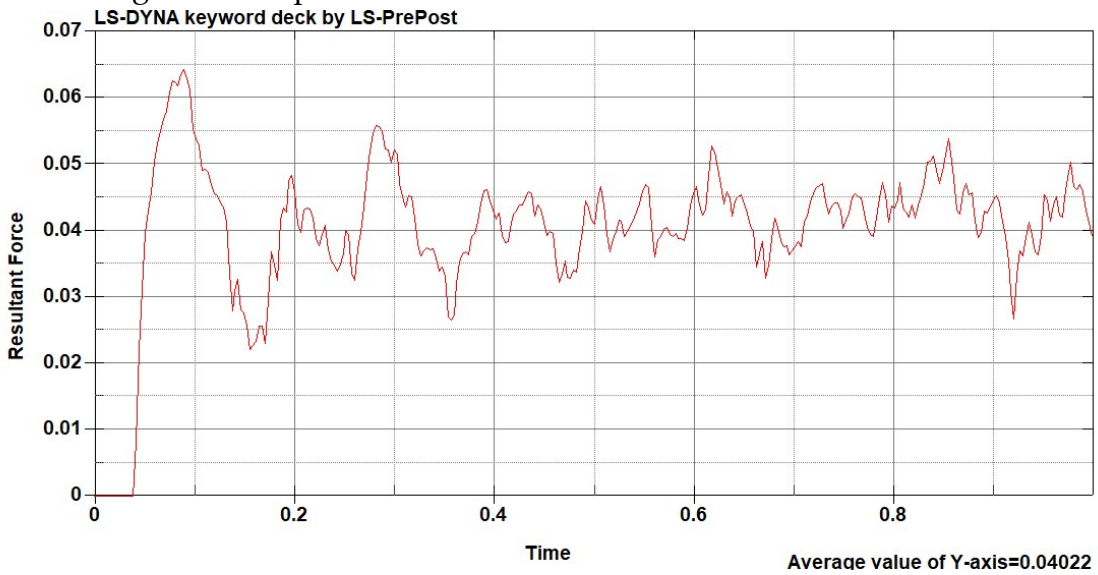
mint egy bevonat anyagot választottam. A szerszámtestek anyagának az iparban jellemzően használt gyorsacél anyagot választottam. A szerszámbevonat választásánál figyelembe vettem, hogy az adott bevonattal akár pár tíz mikron vastagságú réteget fel lehessen vinni a szerszámokra, valamint azt, hogy a jellemző PVD (fizikai gőzfázisú leválasztású) bevonatok közül általánosan kopásállót válasszak, a kopási folyamatok eredményesebb szemléltetése miatt. A meghatározott szempontok alapján a TiN bevonatot választottam ki a szimulációkhoz.

3-3. táblázat: A szerszám és a bevonat anyagtulajdonságai

	HSS M2	TiN [63]
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

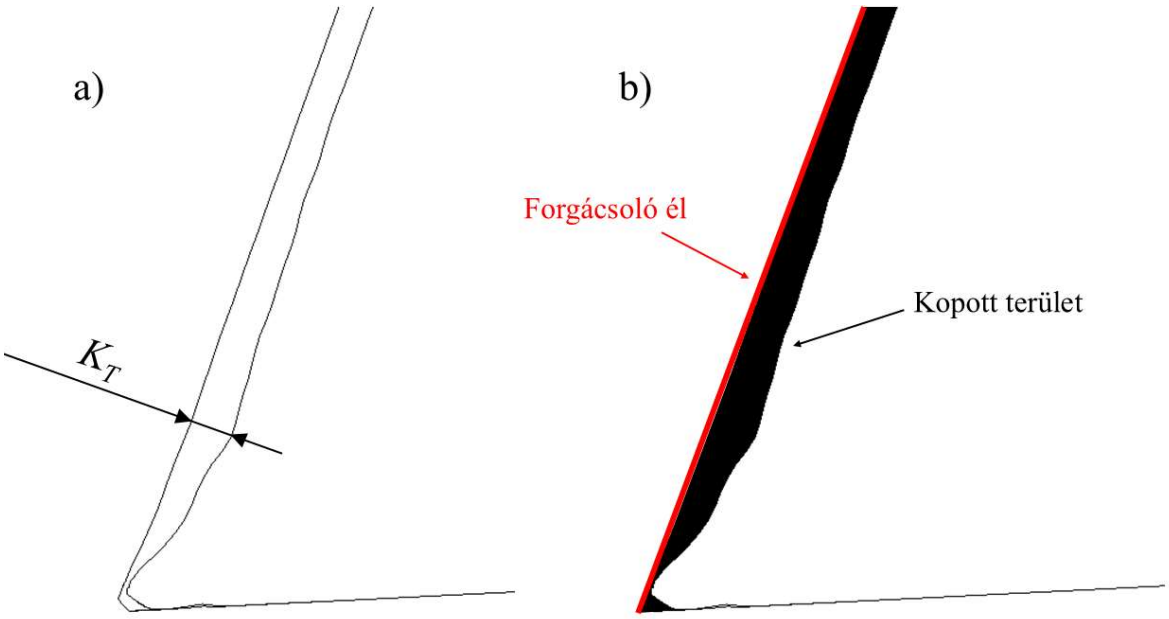
3.4. A szimuláció során mért adatok és azok kiértékelése

A szimulációk során a folyamat során fellépő forgácsolási erőket, valamint a szerszámok kopását vizsgáltam. Az LS-DYNA szoftverben az adatbázis beállításnál kiválasztható opcióként megkaphatóak a fellépő erő adatai. Ezeket a szoftver ábrázolni is tudja az időpontokhoz tartozó erőértékek szerint. Mivel a kapott erő-idő grafikon meglehetősen zavart, így az adott folyamatokat az erő-idő görbék átlagával jellemzem. Egy ilyen erő-idő grafikon képe látható az **3-4. ábrán**.



3-4. ábra: A szimulációs erőértékek a forgácsolási idő során

A szerszámok kopása során több állapotot is figyelembe vettem a forgácsolási úthossz alapján. A különböző kopási állapotokat – a kezdeti állapottól a végsőig – együtt ábrázoltam, szemléltetve így a folyamatot. A különböző kopási állapotokat az LS-DYNA szoftverben állítottam be, megadva az adott forgácsolási úthosszhoz tartozó ismétlési számot, majd a kapott geometriát kiexportáltam. A szerszámok kopását két módon jellemeztem, az egyik a kopás K_T maximális mélysége volt, ezt az LS-DYNA szoftver automatikusan kiszámolta az eredeti felületre merőleges irányban, ahogyan az a **3-5. ábra a)** részén is látható.



3-5. ábra: a) A kopási mélység szemléltetése b) a fajlagos kopáshoz szükséges jellemzők

A szerszám kopását továbbá a fajlagos kopással jellemeztem, erre az elkopott rész területét és a homlokfelületi szerszámél hosszának hányadosát alkalmaztam. Az elkopott rész területét úgy kaptam meg. hogy az eredeti és az elkopott szerszámgeometriát egymásra illesztettem és így meghatározhatóvá vált az új és kopott profil közötti terület, mint az az **3-5. ábra b)** részén is látható. A két kontúr közötti területet leosztottam a forgácsoló él vizsgált hosszával, mely így kiegyensúlyozta az eltérő homlokszögek miatti különböző forgácsoló él hosszokat a vizsgált tartományon, ezt mutatja a **3. számú egyenlet**.

$$w_s = \frac{A_W}{L_c} \tag{3}$$

Ahol: W_s= Fajlagos kopás (mm)

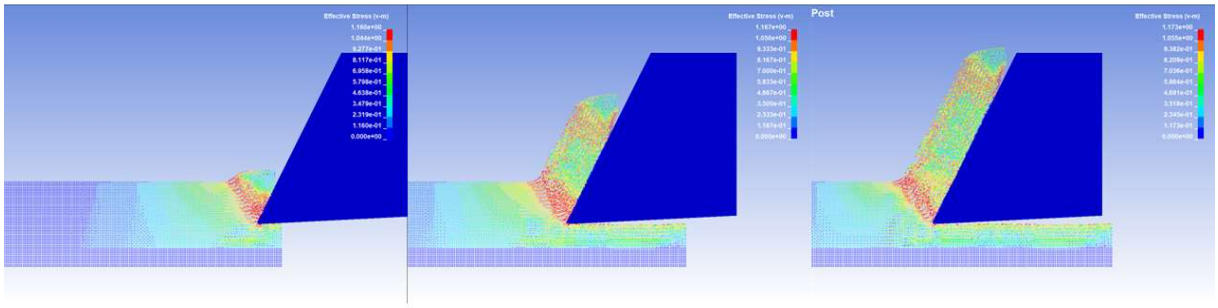
A_W = A kopott terület (mm²)

L_c = A forgácsoló él hossza a vizsgált szakaszon (mm)

A kapott forgácsolási erő, kopási mélység és fajlagos kopás értékeket a Minitab statisztikai szoftverben értékeltem ki. A kapott eredmények alapján megállapítottam a homlokszög és a bevonat vastagság faktorok hatásának szignifikanciáját, valamint létrehoztam a faktorok hatásának bemutatását illusztráló grafikonokat és táblázatokat.

4. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE ÉS ÉRTELMEZÉSE

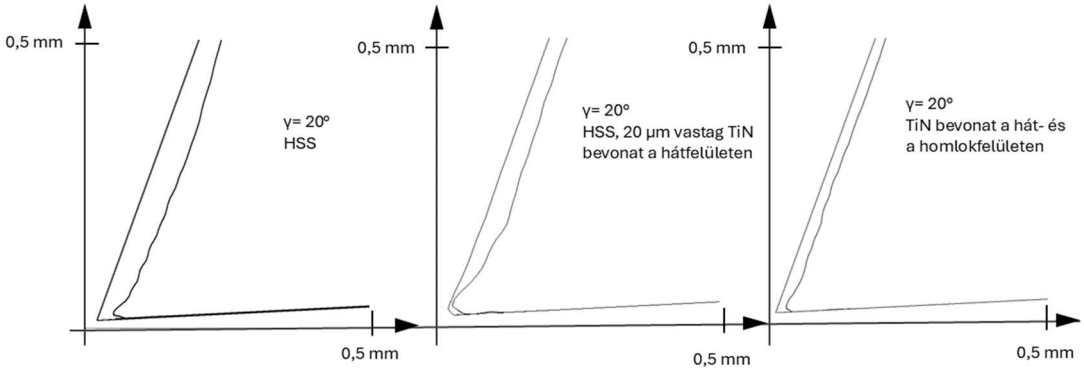
A szimuláció során előállított ortogonális forgácsolási folyamat a **4-1. ábrán** látható. A munkadarabon keletkező feszültségeket és hatásokat nem elemeztem ki, csupán a folyamat közelítő helyességét állapítottam meg, hogy a kopási eredményeket ne egy hibás módon működő szimulációból emeljem ki.



4-1. ábra: A szimulációs ortogonális forgácsolási folyamat

4.1. Kopási folyamatok különböző anyagi összetételnél

A kísérletek első részében a biológiai inspiráció által létrehozott koncepció 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. A három szerszám kopási folyamata a **4-2. ábrán** látható, amin ábrázolva van az eredeti szerszámkontúr és az 1000 méter forgácsolás utáni kopott szerszámkontúr.



4-2. ábra: Az eredeti és a kopott szerszámkontúrok különböző szerszámanyagoknál

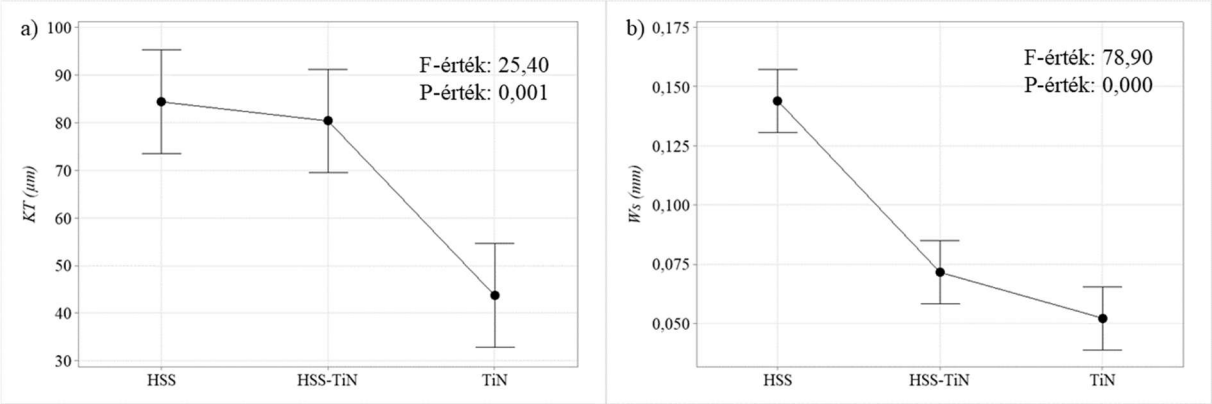
Ahogyan arra számítani lehetett, a bevonat nélküli HSS szerszám kopásának mértéke a legnagyobb azonos forgácsolási úthossz során. A TiN bevonattal mindkét felületén ellátott szerszám kopásának mértéke a legkisebb, a kontúrja pedig egészen ha-

sonlít 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 egészen megmarad az eredeti kontúr környékén, a bevonat rétegvastagságának magasságában. A kopott kontúrokon megfigyeltem a maximális kopási mélységet, valamint a fajlagos kopást. Ezen adatok alapján varianciaanalízissel megállapítottam a beállított tényezők hatását. A varianciaanalízis eredményei a **4-1. táblázatban** láthatóak.

4-1. táblázat: A varianciaanalízis eredményei különböző anyagi összetétel esetén

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

A varianciaanalízis alapján mind a kopás mélységére, mind fajlagos kopásra szignifikáns hatása van a szerszám anyagi összetételének. Az eredmények konfidencia intervallumos ábrázolását a **4-3. ábra** mutatja, itt látható, hogy a vizsgált szerszámkoncepció eredményei a kopási mélység tekintetében a HSS szerszámhoz, míg a fajlagos kopás során inkább a TiN bevonattal teljesen ellátott szerszámhoz állnak közelebb.



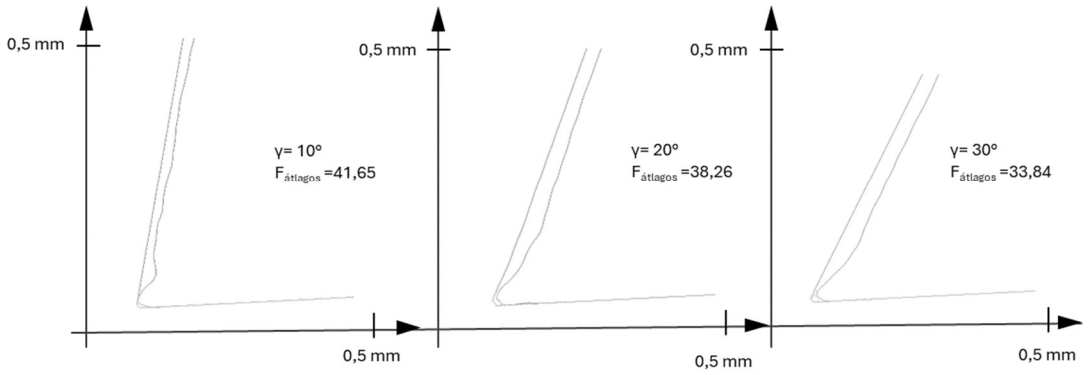
4-3. ábra: A konfidencia intervallumok különböző anyagi összetételnél a) kopási mélység b) fajlagos kopás esetén

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 homlokfelülete. Ezen két eredmény együttes jelenléte megmutatja, hogy a tervezett szerszám kopott homlokfelületi 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 erőszükségleten és a forgácsképződési folyamatokon. A tervezett szerszámkoncepció kopása során kedvező szerszámgeometria alakult ki, így a kopási folyamat önélezőnek tekinthető. Ezen eredmények alapján részletesebben vizsgáltam meg a

csak a hátfelületükön bevont koncepciókat és értékeltem a bevonati vastagság, valamint a beállított homlokszögek hatását a kopási folyamatok és a forgácsoló erő szempontjából. A továbbiakban a különböző homlokszögű és bevonati vastagságú szerszámokhoz tartozó eredményeket mutatom be.

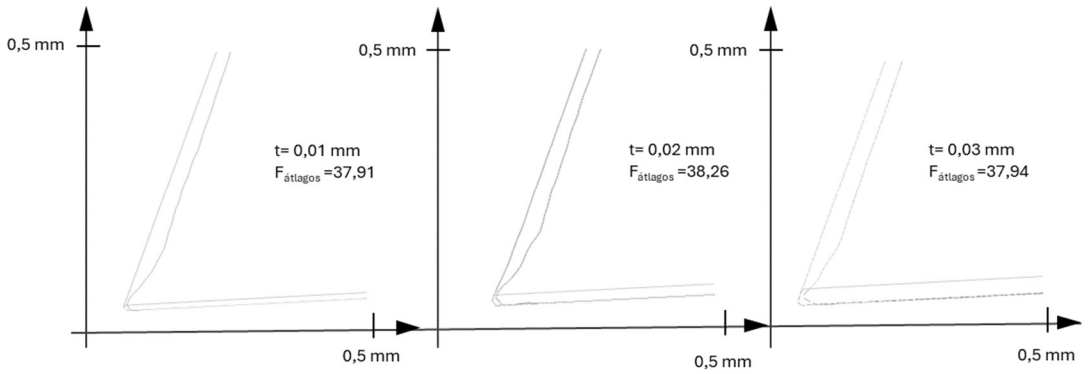
4.2. A homlokszög és a bevonat vastagságának hatása a forgácsolási erőre és a szerszámkopásra

A kopási kontúrok különböző homlokszögeknél a **4-4. ábrán** láthatóak – 0,02 milliméteres bevonati vastagság esetén – ahol megfigyelhető, hogy a homlokfelületi kopás jellemzően nagyobb értéket vesz fel a nagyobb homlokszögek esetén, ahogyan ez előzetesen várható volt. Ugyanakkor a feltüntetett forgácsolási értékeknél látható, hogy a forgácsolási erő nagyobb homlokszögek esetén jellemzően kisebb.



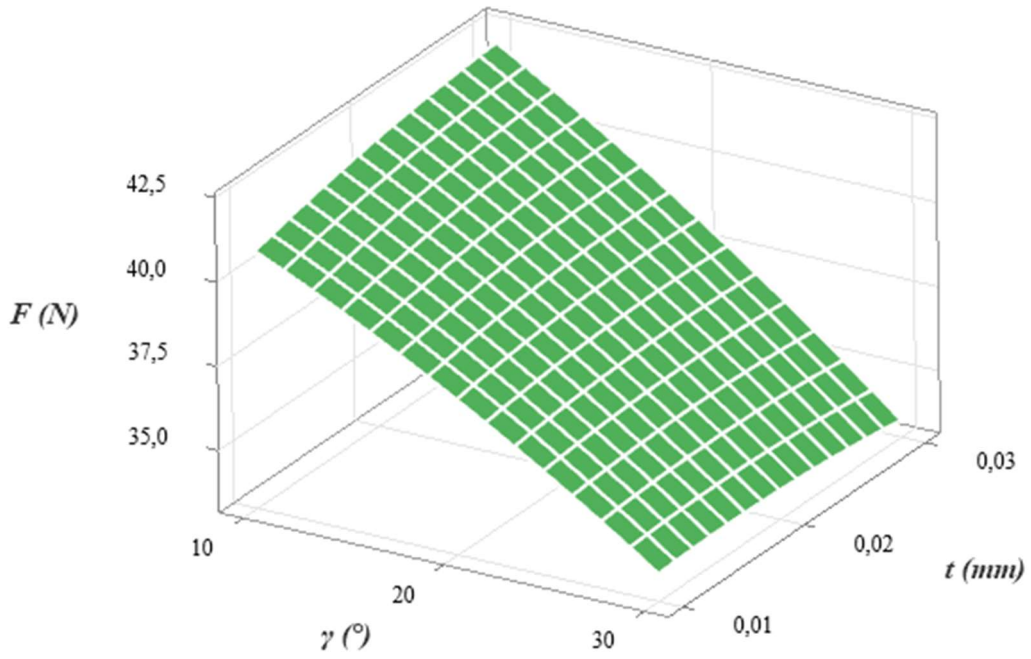
4-4. ábra: Az eredeti és kopott szerszámkontúrok különböző homlokszögek esetén

A kopási kontúrok különböző bevonati vastagságoknál a **4-5. ábrán** láthatóak $\gamma = 20°$ homlokszög esetén, ahol a homlokfelületi kopás jellemzően hasonló jelleget mutat mindhárom szerszámnál. A feltüntetett forgácsolási értékek is egészen közeliek egymáshoz, így feltételezhető, hogy ebben a tartományban a bevonati vastagságok nem nyújtanak szignifikáns hatást a szimulációs eredmények alapján.



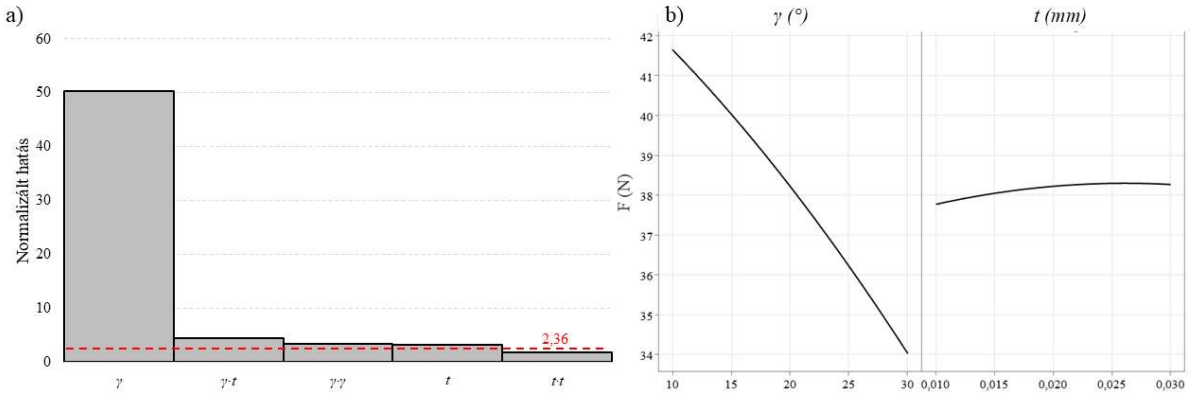
4-5. ábra: Az eredeti és kopott szerszámkontúrok különböző bevonat vastagság esetén

A szimulációs eredményeket először a forgácsolási erő alapján értékelem ki, ennek eredményei a **4-6. ábrán** láthatóak, melyen megfigyelhető, hogy a homlokszög hatása erőteljesebbnek tűnik, mint a bevonati vastagság hatása. Ahogyan arra számítani lehetett, ebben az esetben is a nagyobb homlokszög esetén kaptam a kisebb forgácsolási erőket a szimulációk során.



4-6. ábra: A felületi ábra a forgácsolási erő eredményei alapján

A faktorok hatásainak mértékét Pareto-diagramon és főhatás-diagramon ábrázoltam, melyek az **4-7. ábrán** láthatóak. Mindkét grafikon alapján elmondható, hogy a homlokszög hatása lényegesen szignifikánsabb, mint a bevonat vastagságának hatása. A Pareto-diagram alapján a homlokszög normalizált hatása jelentősen nagyobb a többinél, a második és harmadik legerősebb hatást így homlokszög kombinált hatásai teszik ki. A legkisebb normalizált hatást a bevonat vastagsága és annak kombinációja jelenti.



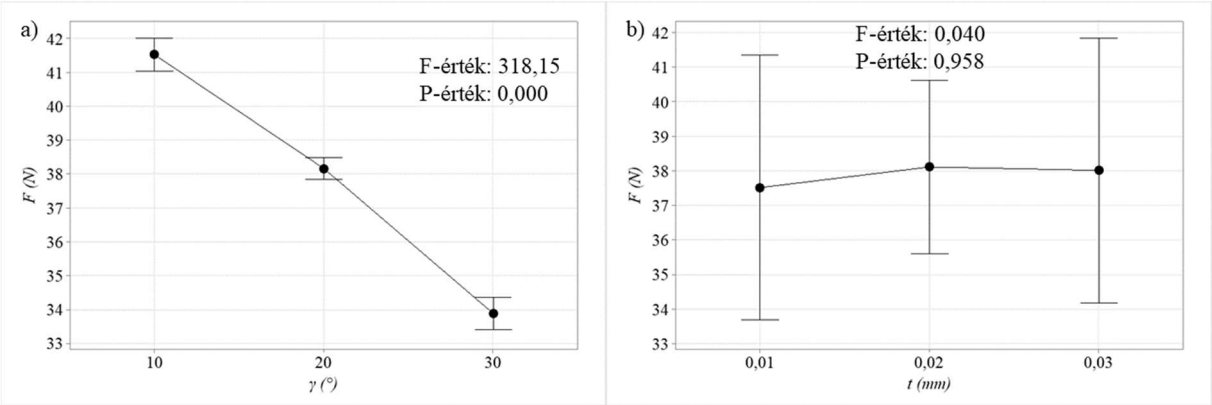
4-7. ábra: A forgácsolási erő eredményekhez tartozó a) Pareto-diagram és b) főhatás-diagram

A hatások szignifikanciájának megállapítására varianciaanalízist végeztem el 95%-os valószínűségi szinten, ennek eredményei a **4-2. táblázatban** láthatóak.

4-2. táblázat: A varianciaanalízis eredményei a forgácsolási erő esetén

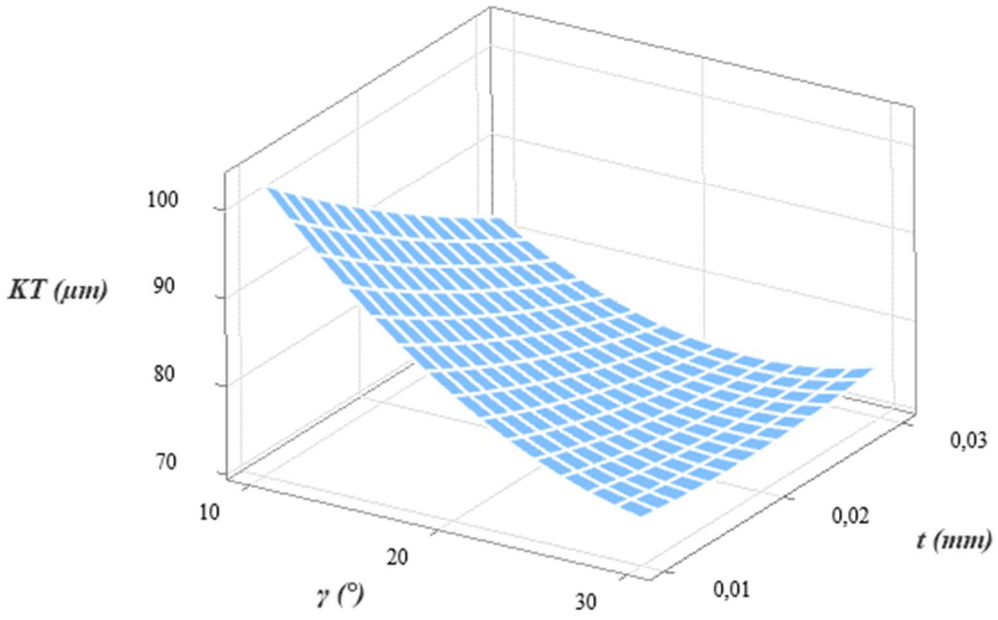
Faktor	Szint	Paraméter	F-érték	P-érték
Homlokszög	3	Forgácsolási erő (N)	318,15	0,000
Bevonat vastagság	3	Forgácsolási erő (N)	0,04	0,958

A varianciaanalízis vizsgálat eredménye kimutatja, hogy a homlokszög hatása szignifikáns hatással van a szimulációk során mért forgácsolási erőre, ahogyan erre számítani lehetett. A bevonat vastagságának nincs szignifikáns hatása a forgácsolási erőre. A **4-8. ábrán** láthatóak a varianciaanalízis vizsgálathoz tartozó a konfidencia intervallumok a varianciaanalízis F és P értékeivel feltüntetve.



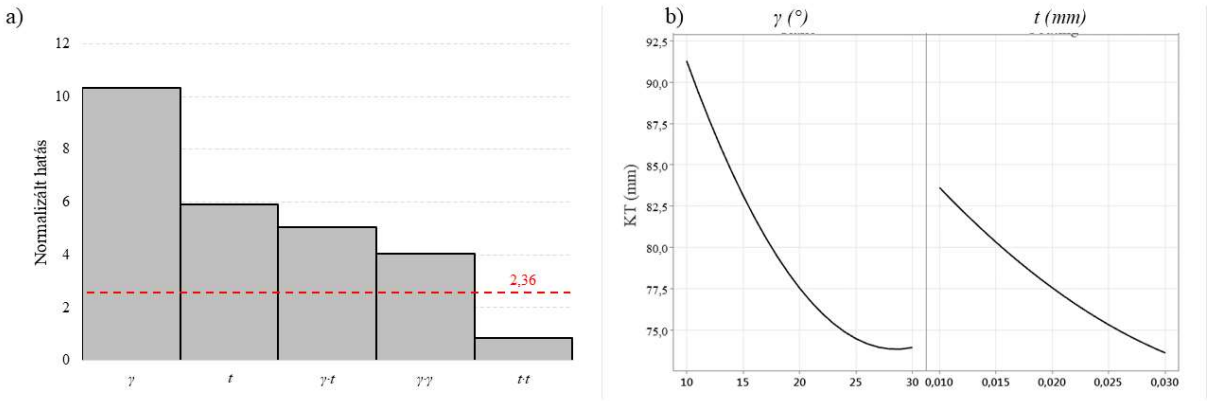
4-8. ábra: A konfidencia intervallumok forgácsolási erő esetén a) különböző homlokszögeknél b) különböző bevonat vastagságoknál

A kopási mélység kiértékelésének eredményei a **4-9. ábrán** láthatóak. Az ábra jellege alapján forgácsolási erő kiértékeléséhez képest a kopási mélységre nagyobb hatást gyakorol a bevonati vastagság, a homlokszög hatása itt is lényegesen jelentősebbnek tűnik ugyanakkor.



4-9. ábra: A felületi ábra a kopási mélység eredményei alapján

A faktorok hatásainak mértékét Pareto-diagramon és főhatás-diagramon ábrázoltam, melyek az **4-10. ábrán** láthatóak. A grafikon alapján elmondható, hogy a homlokszög hatása a kopási mélység szempontjából is szignifikánsabb hatást gyakorol, mint a bevonat vastagságának, de nem annyira kiugró módon, mint a forgácsolási erő során. A Pareto-diagram alapján a homlokszög normalizált hatása ebben az esetben is nagyobb a többinél, a második legerősebb hatást a bevonat vastagsága jelenti. A kombinált hatások közül a homlokszög-bevonat vastagság kombinációnak a legnagyobb a normalizált hatása. A főhatás diagram alapján mindkét faktor esetén az mondható el, hogy minél nagyobb szintet vizsgálunk, annál kisebb lesz a kopási mélység értéke.



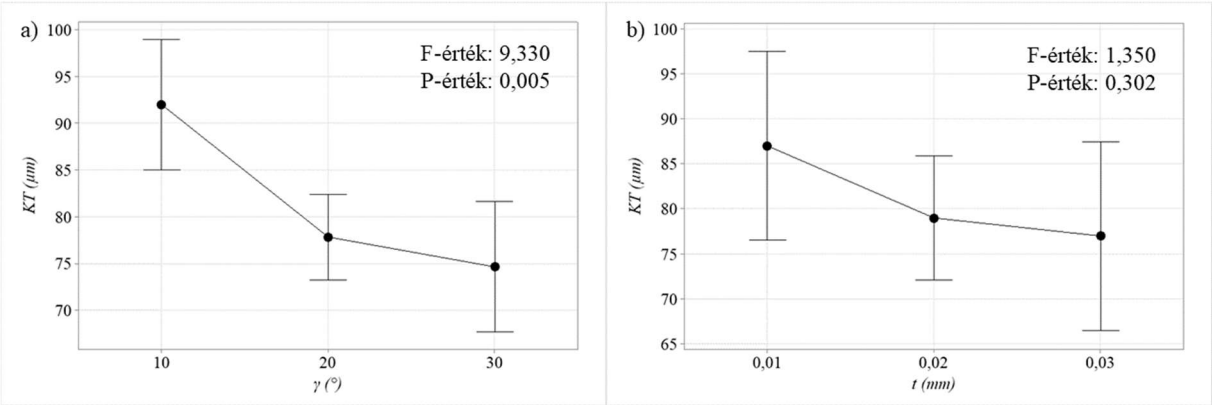
4-10. ábra: A kopási mélység eredményekhez tartozó a) Pareto-diagram és b) főhatás-diagram

A hatások szignifikanciájának megállapítására varianciaanalízist végeztem el 95%-os valószínűségi szinten, ennek eredményei a **4-3. táblázatban** láthatóak.

4-3. táblázat: A varianciaanalízis eredményei a kopási mélység esetén

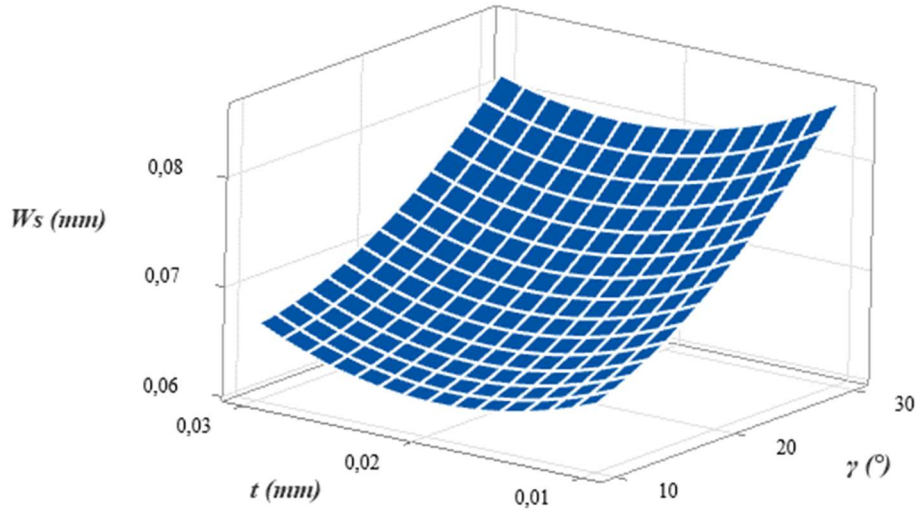
Faktor	Szint	Paraméter	F-érték	P-érték
Homlokszög	3	KT – kopás mélység	9,33	0,005
Bevonat vastagság	3	KT – kopás mélység	1,35	0,302

A varianciaanalízis vizsgálat eredménye kimutatja, hogy a homlokszög hatása szignifikáns hatással van a szimulációk során mért forgácsolási erőre, ahogyan erre számítani lehetett. A bevonat vastagságának nincs szignifikáns hatása a forgácsolási erőre. A **4-11. ábrán** láthatóak a varianciaanalízis vizsgálathoz tartozó a konfidencia intervallumok a varianciaanalízis F és P értékeivel feltüntetve.



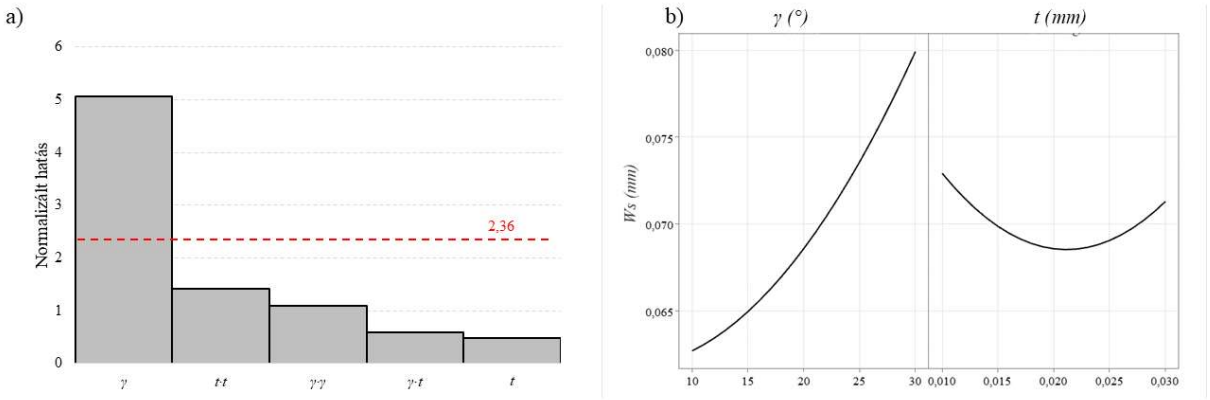
4-11. ábra: A konfidencia intervallumok a kopási mélység esetén a) különböző homlokszögeknél b) különböző bevonat vastagságoknál

A fajlagos kopás kiértékelésének eredményei a **4-12.** ábrán láthatóak. Az ábra alapján a homlokszög jelentős hatása ismételten szembetűnő, a bevonati vastagság pedig egy különös parabolikus jellegű alakot ad a felületnek. Az ábra alapján a bevonati vastagság középső szintjén tapasztalhatóak a legkisebb fajlagos kopási értékek. Ez a jelenség szerintem valamilyen szimulációs beállítási kapcsolat (például az SPH elemek méretének és a szerszám hálózási méretének kapcsolata) miatt lehetséges. Ennek további vizsgálata abban az esetben lenne igazán releváns, amennyiben a bevonat vastagsága szignifikáns hatást gyakorol a fajlagos kopásra. Az ábrán ugyanakkor észrevehető, hogy a kopási mélység kiértékeléséhez képest a fajlagos kopásra kisebb hatást gyakorol a bevonati vastagság, így hatása feltételezhetően nem lesz szignifikáns.



4-12. ábra: A felületi ábra a fajlagos kopás eredményei alapján

A faktorok hatásainak mértékét Pareto-diagramon és főhatás-diagramon ábrázoltam, melyek az **4-13. ábrán** láthatóak. A grafikon alapján elmondható, hogy a homlokszög hatása a fajlagos szempontjából is szignifikánsabb hatást gyakorol, mint a bevonat vastagságának hatása, valamivel kiugróbb módon, mint a kopási mélység során. A Pareto-diagram alapján a homlokszög normalizált hatása ebben az esetben is nagyobb a többinél, a második legnagyobb normalizált hatást a bevonat vastagságának kombinált hatása jelenti. A másik két kombinált hatásnak van a harmadik és negyedik normalizált hatása. A legkisebb normalizált hatás a bevonat vastagságához tartozik. A főhatás diagram alapján a homlokszög az mondható el, hogy minél nagyobb szintet vizsgálunk, annál nagyobb lesz a fajlagos kopás mértéke. A főhatás diagram megmutatja azt a már korábban említett parabolikus alakot, melyet a fajlagos kopás eredményei alapján lehet kirajzolni a bevonati vastagság vizsgálata során.



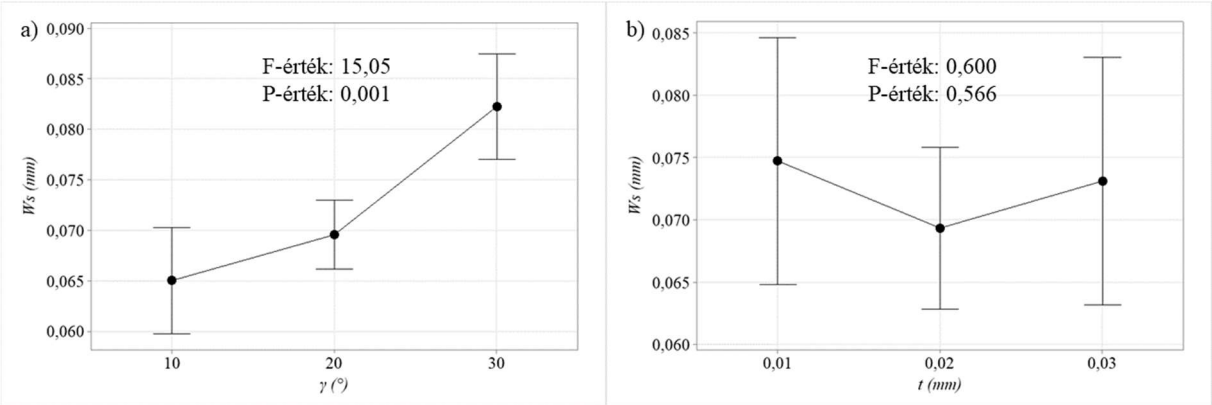
4-13. ábra: A fajlagos kopási eredményekhez tartozó a) Pareto-diagram és b) főhatás-diagram

A hatások szignifikanciájának megállapítására varianciaanalízist végeztem el 95%-os valószínűségi szinten, ennek eredményei a **4-4. táblázatban** láthatóak.

4-4. táblázat: A varianciaanalízis eredményei a fajlagos kopás esetén

Faktor	Szint	Paraméter	F-érték	P-érték
Homlokszög	3	Ws-fajlagos kopás	15,05	0,001
Bevonat vastagság	3	Ws-fajlagos kopás	0,6	0,566

A varianciaanalízis vizsgálat eredménye kimutatja, hogy a homlokszög hatása szignifikáns hatással van a szimulációk során mért forgácsolási erőre, ahogyan erre számítani lehetett. A bevonat vastagságának nincs szignifikáns hatása a forgácsolási erőre. A **4-14.** ábrán láthatóak a varianciaanalízis vizsgálathoz tartozó a konfidencia intervallumok a varianciaanalízis F és P értékeivel feltüntetve.



4-14. ábra: A konfidencia intervallumok a fajlagos kopás esetén a) különböző homlokszögeknél b) különböző bevonat vastagságoknál

A bevonati vastagság a kopási mélység és a fajlagos kopás szempontjából sem gyakorolt szignifikáns hatást az alkalmazott szintek során. Az előzetes kísérlet alapján a szerszámkoncepció működőképes lehet, ugyanakkor a bevonat vastagságát nagyobb különbségű szinteken lenne érdemes vizsgálni, hogy szignifikáns hatásokat lehessen megállapítani. A bevonati vastagság növelésével az élővilágban tapasztalt zománc rétegek vastagságok értékeit lehetne megközelíteni, melyek 5-10x akkorák, mint az ezen kutatásban alkalmazott értékek.

A kísérletek során általánosan tapasztalható volt, hogy a homlokszög növelése kisebb forgácsolási erőt és nagyobb kopott területet eredményezett. A nagyobb homlokszög kisebb nyírási szöget eredményez, emiatt kisebb nyíróerő szükséges az anyag szétválasztásához. Ebben az esetben viszont megnő a szerszám homloklapján ható súrlódó erő, mely a mechanikai kopás mértékét megnöveli.

4.3. Kitekintés

Az eredmények értékelése során megjegyzendő, hogy ezek szimulációs eredmények, ezek validálása, fizikai kísérletekkel való alátámasztása szükségszerű, hogy a valóságot pontosan leképező rendszernek lehessen tekinteni a kutatás során létrehozott szimulációs környezetet.

A szimulációs eredmények ugyanakkor teljesen megalapozzák, hogy milyen validációs kísérleteket lenne érdemes elvégezni. A különböző anyagi összetételekhez tartozó 3 beállítást érdemes lenne tesztelni, ugyanis itt kiderülne, hogy a tervezett szerszám használata során tényleg létrejön-e az önélezés jelensége. A homlokszög vastagságának jellemző hatása fel lett tárva a kutatás során, továbbiakban ennek optimalizálása lehet célszerű a forgácsolási erő és valamelyik kopási jellemző alapján. A szerszámbevonat vastagságának a beállított szinteken nem volt szignifikáns hatása, ezt érdemes lehet még nagyobb bevonat vastagság értékeknél is vizsgálni, ugyanakkor ebben az esetben figyelembe kell venni a megvalósíthatóságát is a rétegek vastagságának.

A szimulációk során a homlokszög hatása olyan volt, mint ahogyan az a valós forgácsolási körülmények között is tapasztalható, ez minimális megerősítést adott a szimulációs beállítások helyességére. További ilyen megerősítési jellemző volt a forgácsképződés a szimuláció során, melynek jellege olyan volt, melyet valós forgácsolási körülmények között is tapasztalni lehet.

A kísérletek és azok eredményei alapján számos fejlesztési és kutatási ötlet fogalmazódott meg bennem, hogy a témával való további haladás és fejlődés biztosítható legyen.

A legalapvetőbb opció a validációs tesztek megtervezése és kivitelezése, melyek alapján felül lehetne bírálni a szimulációs eredményeket és azok helyességét. Az eredmények alapján fejleszteni lehetne a szimulációs környezetet, valamint a felhasznált kopási modellt is és a hozzá tartozó paramétereket.

Egy másik lehetséges fejlesztési opció az Abaqus Simulia szoftver használata, melyet jellemzően több alkalommal használtak fel szerszámkopás vizsgáló szimulációs kísérletekre. Ebben az esetben feltehetően már pontosított és validált kopásmodelleket lehetne alkalmazni, illetve érdemes lenne összedolgozni ezen a szakterületen dolgozó kutatókkal, növelve a hazai vagy nemzetközi tudományos együttműködést.

A kollektív fejlesztési javaslat pedig az, hogy még jobban el lehetne mélyülni a gyártástudományok biológiai transzformációjának témájában, és ezáltal elemezni új koncepciókat, természeti megoldásokat.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ezen kutatásomnak két fő céllal indultam neki, az első cél az volt, hogy egy átfogó képet adjak át a gyártástudományok biológiai transzformációjáról és főként annak egyik módszertani eleméről, a biológiai inspirációról. A biológiai inspiráció ismertetése során táblázatos módon összegyűjtöttem különböző természeti megoldásokat, melyek gyártási területen fellelhető kihívásokra adhatnak valamilyen megoldást. Ezen természeti megoldásokat felhasználásuk alapján is kategorizáltam, attól függően, hogy még csak elméleti szinten dolgozták ki a koncepciót, esetleg már történtek megvalósulási folyamatok koncepció szinten vagy akár már az ipari felhasználásig, vagy annak kapujáig eljutott a biológiai inspiráció műszaki életbe való adaptálása. Ezen összegyűjtött táblázat alapján látható az is, hogy hasonló jellegű műszaki kihívásoknál egyszerre vannak jelen kecsegtető, de csak elméleti szinten kidolgozott természeti megoldások, valamint olyanok is, melyek már az ipari alkalmazás szintjét is elérték. A kutatásom második célja az egyik konkrét természeti megoldáshoz tartozik, a hódok és rágcsálók szemfogának önélező mechanizmusához, melyet alaposabban vizsgáltam a kutatásom során.

A hódok szemfogának önélezése azon alapszik, hogy a szemfog hátfelületét egy keményebb, így lassabban kopó zománcréteg borítja, tehát a forgácsoló, vágó folyamatok során a homlokfelület kopása gyorsabb. A két felület eltérő kopása egy olyan mechanizmust idéz elő, melyben a szemfog lokális ékszöge csökken, ez pedig javít a forgácsolási folyamatokon, a forgácsolási erőszükségleten. Habár a hódok esetén a lágyabb dentinréteg növekedése miatt ,,visszaáll" az eredeti geometria, a kutatók elkezdték vizsgálni ezen jelenség műszaki tudományokba való beillesztését.

Ezen kutatás során ezt a kopási koncepciót numerikus módon vizsgáltam az LS-Dyna nevű szoftverben. A szimuláció során egy ortogonális forgácsolási kísérletet vizsgáltam 42CrMo4 munkadarabbal, melynek Johnson-Cook anyagmodellt választottam. A szerszámtest anyaga HSS M2 volt, míg a bevonati rétegnek TiN PVD bevonatot választottam. Első körben a csak a hátfelületén bevont szerszám kopási tulajdonságait figyeltem meg a bevonata nélküli és a mindkét felületén bevont szerszámmal szemben. A tervezett szerszám eredményei azt mutatták, hogy kevésbé kopik, mint a bevonat nélküli szerszám, valamint a homlokfelületi kopásformája eltér a másik két szerszámétól. A tervezett szerszám homlokfelületi kopása egy szegmentált homlokfelületet eredményezett, mely jelentős befolyással lehet a nyírási zónákra és ezáltal a forgácsolási és forgácsképződési folyamatokra. Mivel a szerszámbevonat vastagság feletti részen a kopott szerszám élesebb geometriával rendelkezett, mint a homlokfelület további részein, ezért a szimulációs eredmények alapján az önélező mechanizmus megfigyelhető volt. A szerszámok kopási értékein varianciaanalízis vizsgálatot végezve megállapítottam, hogy a szerszámok anyagi összetételének szignifikáns hatása van a kopási mélységre és a fajlagos kopásra is.

Ezen eredmények alapján vizsgáltam a szerszám bevonatának vastagságának, és a homlokszögnek a hatását. Ezen két faktor szintjeit a természetben megtalálható értékek és az iparban szokásos értékek összehasonlítása alapján határoztam meg. A kísérletek során a forgácsolási erő, a kopási mélység és a fajlagos kopás értékeket elemeztem ki. A faktorok hatásának szignifikanciáját varianciaanalízis vizsgálattal állapítottam meg, ennek eredményei alapján a homlokszög minden esetben szignifikáns hatást gyakorolt a kimeneti adatokra, a szerszám bevonatának vastagságának hatása viszont egyik esetben sem volt szignifikáns. A szerszámbevonat vastagságának szintjeinek újbóli meghatározása így szükségszerű lehet.

Kutatásom eredménye bővíti a biológiai inspirációk alapján alkotott műszaki koncepciókhoz tartozó ismereteket, valamint népszerűsítheti ezt az újszerű és innovációkkal teli kutatási-fejlesztési irányvonalat, a gyártástudományok biológiai transzformációját.

6.FELHASZNÁLT FORRÁSOK

[1] T. Bergs *és mtsai.*, „Application cases of biological transformation in manufacturing technology", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, köt. 31, o. 68–77, nov. 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.09.010.

[2] S. Harst, M. Früchtl, és R. Neugebauer, „Biological Transformation of Manufacturing – From a Vision to Industrial Transfer – Interim Evaluation from the Perspective of Applied Research", *Procedia CIRP*, köt. 107, o. 925–930, jan. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.086.

[3] „Our Vision", A Manu*FUTURE* sub-platform. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://www.biointelligentmanufacturing.com/en/our-vision.html

[4] „EU Funding & Tenders Portal". Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-cl4-2024-twin-transition-01-01

[5] K. Wegener *és mtsai.*, „Biologicalisation in manufacturing – Current state and future trends", *CIRP Ann.*, köt. 72, sz. 2, o. 781–807, jan. 2023, doi: 10.1016/j.cirp.2023.05.005.

[6] G. Byrne, D. Dimitrov, L. Monostori, R. Teti, F. van Houten, és R. Wertheim, „Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, köt. 21, o. 1–32, máj. 2018, doi: 10.1016/j.cirpj.2018.03.003.

[7] R. Miehe *és mtsai.*, „The biological transformation of industrial manufacturing – Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry", *J. Manuf. Syst.*, köt. 54, o. 50–61, jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.11.006.

[8] L. Monostori és J. Váncza, „Towards living manufacturing systems", *Procedia CIRP*, köt. 93, o. 323–328, jan. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.150.

[9] M. Willocx, A. Ayali, és J. R. Duflou, „Reprint of: Where and how to find bio-inspiration?: A comparison of search approaches for bio-inspired design", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, köt. 34, o. 171–177, aug. 2021, doi: 10.1016/j.cirpj.2021.06.005.

[10] C. Herrmann, F. Cerdas, T. Abraham, L. Büth, és M. Mennenga, „Biological transformation of manufacturing as a pathway towards environmental sustainability: Calling for systemic thinking", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, köt. 34, o. 157–170, aug. 2021, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.10.008.

[11] Y. J. Qu, X. G. Ming, Z. W. Liu, X. Y. Zhang, és Z. T. Hou, „Smart manufacturing systems: state of the art and future trends", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 103, sz. 9, o. 3751–3768, aug. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03754-7.

[12] A. Malshe, S. Bapat, K. Rajurkar, és S. Melkote, „Biological strategies from natural structures for resilience in manufacturing", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, köt. 34, o. 146–156, aug. 2021, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.10.010.

[13] S. Watanabe és T. Sibaoka, „Site of photo-reception to opening response in Mimosa leaflets", *Plant Cell Physiol.*, köt. 14, sz. 6, o. 1221–1224, dec. 1973, doi: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a074966.

[14] H. S. Patil és S. Vaijapurkar, „Study of the Geometry and Folding Pattern of Leaves of *Mimosa pudica*", *J. Bionic Eng.*, köt. 4, sz. 1, o. 19–23, márc. 2007, doi: 10.1016/S1672-6529(07)60008-0.

[15] L. Bonanni, C. Vaucelle, J. Lieberman, és O. Zuckerman, „TapTap: a haptic wearable for asynchronous distributed touch therapy", in *CHI '06 Extended Abstracts on Human*

Factors in Computing Systems, in CHI EA '06. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 0 2006, o. 580–585. doi: 10.1145/1125451.1125573.

[16] J. Lee, M. Ghaffari, és S. Elmeligy, „Self-maintenance and engineering immune systems: Towards smarter machines and manufacturing systems", *Annu. Rev. Control*, köt. 35, sz. 1, o. 111–122, ápr. 2011, doi: 10.1016/j.arcontrol.2011.03.007.

[17] A. Ansari *és mtsai.*, „14 - Effect of self-healing on zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites", in *Self-Healing Composite Materials*, A. Khan, M. Jawaid, S. N. Raveendran, és A. M. Ahmed Asiri, Szerk., in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. , Woodhead Publishing, 2020, o. 239–257. doi: 10.1016/B978-0-12-817354-1.00014-4.

[18] A. Kanellopoulos, T. S. Qureshi, és A. Al-Tabbaa, „Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites", *Constr. Build. Mater.*, köt. 98, o. 780–791, nov. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.127.

[19] R. Kumar *és mtsai.*, „5 - Self-repairing fiber polymer composites: mechanisms and properties", in *Self-Healing Composite Materials*, A. Khan, M. Jawaid, S. N. Raveendran, és A. M. Ahmed Asiri, Szerk., in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. , Woodhead Publishing, 2020, o. 71–85. doi: 10.1016/B978-0-12-817354-1.00005-3.

[20] Q. Li, Z. Liu, W. Chen, B. Yuan, X. Liu, és W. Chen, „A novel bio-inspired bone-mimic self-healing cement paste based on hydroxyapatite formation", *Cem. Concr. Compos.*, köt. 104, o. 103357, nov. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103357.

[21] L. Feng *és mtsai.*, „Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial", *Adv. Mater.*, köt. 14, sz. 24, o. 1857–1860, 2002, doi: 10.1002/adma.200290020.

[22] „Self-Cleaning". Elérés: 2024. október 31. [Online]. Elérhető: https://www.pilkington.com/en-gb/uk/products/product-categories/self-cleaning#

[23] www.neverwet.com, „Water Repellent Spray Applications | Anti-Wetting". Elérés: 2024. október 31. [Online]. Elérhető: https://www.neverwet.com/applications/anti-wetting.php

[24] F. van Houten *és mtsai.*, „Bio-based design methodologies for products, processes, machine tools and production systems", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, köt. 32, o. 46–60, jan. 2021, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.11.008.

[25] M. Dorigo, G. Theraulaz, és V. Trianni, „Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View]", *Proc. IEEE*, köt. 109, sz. 7, o. 1152–1165, júl. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3072740.

[26] F. E. Fish, P. W. Weber, M. M. Murray, és L. E. Howle, „The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology", *Integr. Comp. Biol.*, köt. 51, sz. 1, o. 203–213, júl. 2011, doi: 10.1093/icb/icr016.

[27] „Tubercle Technology and Aerodynamic Performance", WhalePower Corporation. Elérés: 2024. október 31. [Online]. Elérhető: https://whalepowercorp.wordpress.com/tubercle-technology-and-aerodynamic-performance/

[28] NKFIH, „Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal | Gekkók tapadásának titkáról röviden: Innováció – állatoktól ellesve". Elérés: 2024. október 31. [Online]. Elérhető: https://nkfih.gov.hu/hivatalrol/nyomtatott-sajto/gekkok-tapadasanak

[29] A. K. Geim, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, K. S. Novoselov, A. A. Zhukov, és S. Yu. Shapoval, „Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair”, *Nat. Mater.*, köt. 2, sz. 7, o. 461–463, 2003, doi: 10.1038/nmat917.

[30] L. Qu és L. Dai, „Gecko-Foot-Mimetic Aligned Single-Walled Carbon Nanotube Dry Adhesives with Unique Electrical and Thermal Properties”, *Adv. Mater.*, köt. 19, sz. 22, o. 3844–3849, 2007, doi: 10.1002/adma.200700023.

[31] L. Ge, S. Sethi, L. Ci, P. M. Ajayan, és A. Dhinojwala, „Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, köt. 104, sz. 26, o. 10792–10795, jún. 2007, doi: 10.1073/pnas.0703505104.

[32] H. E. Jeong, J.-K. Lee, H. N. Kim, S. H. Moon, és K. Y. Suh, „A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, köt. 106, sz. 14, o. 5639–5644, ápr. 2009, doi: 10.1073/pnas.0900323106.

[33] „Optimized Structural Materials Inspired by Cuttlefish and Mantis Shrimp — Innovation — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/innovation/optimized-structural-materials-inspired-by-cuttlefish-and-mantis-shrimp/

[34] „Non-Cuttable Material Inspired by Mollusk Shells and Grapefruits — Innovation — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/innovation/non-cuttable-material-inspired-by-mollusk-shells-and-grapefruits/

[35] „Fangs Combine Copper and Melanin for Tough Material — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/fangs-combine-copper-and-melanin-for-tough-material/

[36] „Shell Protects From Heat — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/shell-protects-from-heat/

[37] C. Lei, F. Xie, F. Wu, és Q. Yan, „Research on bionic design of cylindrical milling cutter based on the curvilinear configuration of the rake face of beaver teeth”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 130, sz. 9, o. 4905–4917, febr. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-12951-y.

[38] „Scales Minimize Abrasive Damage — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/scales-minimize-abrasive-damage/

[39] „The Versatile Grip of Remoras’ Suction Discs — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/sucker-attaches-to-uneven-surfaces/

[40] „Suckers Allow Fine Attachment — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/suckers-allow-fine-attachment/

[41] X. Yin és R. Müller, „Integration of deep learning and soft robotics for a biomimetic approach to nonlinear sensing”, *Nat. Mach. Intell.*, köt. 3, sz. 6, o. 507–512, jún. 2021, doi: 10.1038/s42256-021-00330-1.

[42] „Webs Communicate Only What Matters — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/webs-communicate-only-what-matters/

[43] „Receptor Organs Filter Background Noise — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/receptor-organs-filter-background-noise/

[44] „Colonies Self-assemble — Biological Strategy — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/strategy/colonies-self-assemble/

[45] „Pneumatic Soft Robot Inspired by Snakes — Innovation — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/innovation/pneumatic-soft-robot-inspired-by-snakes/

[46] „Self-Propelled, Flexible Robot Inspired by Snakes — Innovation — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/innovation/self-propelled-flexible-robot-inspired-by-snakes/

[47] „Robotic Arm Inspired by the Elephant Trunk — Innovation — AskNature”. Elérés: 2024. november 7. [Online]. Elérhető: https://asknature.org/innovation/flexible-gripper-inspired-by-the-elephant-trunk/

[48] A. Malshe, K. Rajurkar, A. Samant, H. N. Hansen, S. Bapat, és W. Jiang, „Bio-inspired functional surfaces for advanced applications”, *CIRP Ann.*, köt. 62, sz. 2, o. 607–628, jan. 2013, doi: 10.1016/j.cirp.2013.05.008.

[49] 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.

[50] M. Rechberger, H. Paschke, A. Fischer, és J. Bertling, „New tribological strategies for cutting tools following nature”, *Tribol. Int.*, köt. 63, o. 243–249, júl. 2013, doi: 10.1016/j.triboint.2012.09.008.

[51] C. E. Killian *és mtsai.*, „Self-Sharpening Mechanism of the Sea Urchin Tooth”, *Adv. Funct. Mater.*, köt. 21, sz. 4, o. 682–690, 2011, doi: 10.1002/adfm.201001546.

[52] „In situ Wear Study Reveals Role of Microstructure on Self-Sharpening Mechanism in Sea Urchin Teeth: Matter”. Elérés: 2024. november 3. [Online]. Elérhető: https://www.cell.com/matter/fulltext/S2590-2385(19)30173-0

[53] W. Jiang, „Bio-inspired self-sharpening cutting tool surface for finish hard turning of steel”, *CIRP Ann.*, köt. 63, sz. 1, o. 517–520, jan. 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.047.

[54] A. R. EVANS és G. D. SANSON, „The tooth of perfection: functional and spatial constraints on mammalian tooth shape”, *Biol. J. Linn. Soc.*, köt. 78, sz. 2, o. 173–191, febr. 2003, doi: 10.1046/j.1095-8312.2003.00146.x.

[55] M. F. Villumsen és T. G. Fauerholdt, „Prediction of Cutting Forces in Metal Cutting, Using the Finite Element Method, a Lagrangian Approach”, . *LS*, 2008.

[56] Major T. és Csanády V., „Combined FEM-SPH Simulation Method for the Modeling of the Interaction of Tillage Tools and the Soil”, *Erd. Közlemények*, köt. 5, sz. 1, o. 7–19, 2015, doi: 10.17164/EK.2015.001.

[57] M. K. Thompson és J. M. Thompson, „Chapter 5 - Defining Material Properties”, in *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*, M. K. Thompson és J. M. Thompson, Szerk., Butterworth-Heinemann, 2017, o. 147–161. doi: 10.1016/B978-0-12-812981-4.00005-8.

[58] G. R. Johnson és W. Cook, „A CONSTITUTIVE MODEL AND DATA FOR METALS SUBJECTED TO LARGE STRAINS, HIGH STRAIN RATES AND HIGH TEMPERATURES”, 2018. Elérés: 2024. október 25. [Online]. Elérhető: https://www.semanticscholar.org/paper/A-CONSTITUTIVE-MODEL-AND-DATA-FOR-METALS-SUBJECTED-Johnson-Cook/40b24ee656f8f82a1927338117cd1999c96517a7

[59] F. J. Zerilli és R. W. Armstrong, „Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations”, *J. Appl. Phys.*, köt. 61, sz. 5, o. 1816–1825, márc. 1987, doi: 10.1063/1.338024.

[60] P. S. Follansbee és U. F. Kocks, „A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable”, *Acta Metall.*, köt. 36, sz. 1, o. 81–93, jan. 1988, doi: 10.1016/0001-6160(88)90030-2.

[61] J. F. Archard, W. Hirst, és T. E. Allibone, „The wear of metals under unlubricated conditions”, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, köt. 236, sz. 1206, o. 397–410, jan. 1997, doi: 10.1098/rspa.1956.0144.

[62] O. Pantalé, J.-L. Bacaria, O. Dalverny, R. Rakotomalala, és S. Caperaa, „2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects”, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, köt. 193, sz. 39, o. 4383–4399, okt. 2004, doi: 10.1016/j.cma.2003.12.062.

[63] „Titanium Carbonitride (TiCN) PVD Coating”. Elérés: 2024. november 8. [Online]. Elérhető: https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=5ffb257a8cc74b69a140046a34b5d61c