

Szent István Egyetem

A FORGÁCSOLÁSNÁL ALKALMAZOTT MINIMÁLKENÉS (MMS)

HATÁSMECHANIZMUSA- ÉS

HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Kári-Horváth Attila

Gödöllő

2009

A doktori iskola

megnevezése: **Műszaki Tudományi Doktori Iskola**

tudományága: **Agrár Műszaki Tudomány**

vezetője: Dr. Farkas István DSc
egyetemi tanár,
SZIE-GÉK Gödöllő, Környezetipari Rendszerek Intézet

Témavezető: Dr. Valasek István PhD
címzetes egyetemi tanár,
SZIE-GÉK Gödöllő, Gépipari Technológiai Intézet

Társ-témavezető: Dr. habil Zsoldos Ibolya PhD
egyetemi docens,
SZIE-GÉK Gödöllő, Gépipari Technológiai Intézet

.....
A programvezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	3
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	4
1.1. A kutatómunka jelentősége.....	4
1.2. A kutatómunka célkitűzései.....	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
3. EREDMÉNYEK.....	10
3.1. Energiaszükséglet és – megoszlás a forgácsolási hőmérséklet nagysága és eloszlása alapján.....	10
3.2. Kenőanyagok szerepe az MMS-kenésben.....	17
3.3. Szerszámkopás mechanizmusa.....	20
3.4. Felületi érdesség és mérettartás.....	23
3.5. Krisztallit-módosulás értékelése.....	25
3.6. Az új tudományos eredmények.....	29
4. ÖSSZEFOGLALÁS.....	32
4.1. A kutatási tevékenység összefoglalása.....	32
4.2. A tudományos eredmények gyakorlati alkalmazhatósága, következtetések, javaslatok.....	32
5. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE.....	34

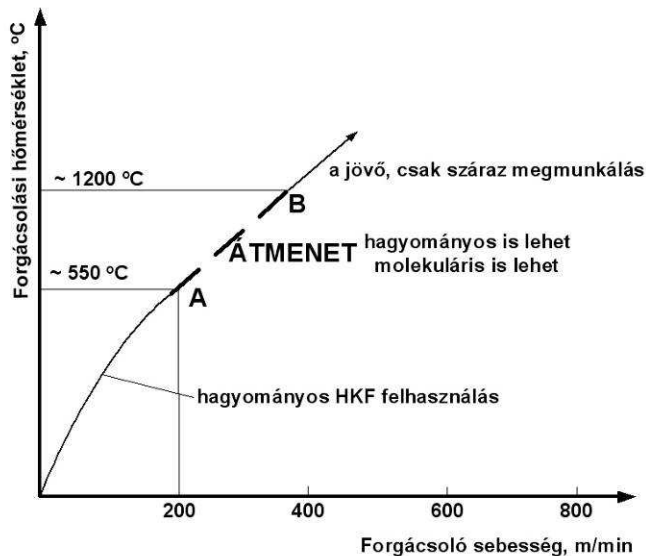
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A kutatómunka jelentősége

A forgácsolásnál alkalmazott minimálkenésnek azt a kenési módot nevezzük, amikor az óránkénti kenőanyag felhasználás általában nem haladja meg az 50 mg-ot, némely esetben még kevesebb is lehet. Az elnevezés a „Minimal Menge Schmierung” német kifejezés kezdőbetűiből alkotott mozaik szó, vagyis MMS, az angol pedig „Minimum Quantity of Lubricant”-ként vagyis MQL tárgyalja. A fentiekben definiált MMS-kenés esetén nem a hűtő-kenő folyadék anyaghalmozásának a fizikai-, kémiai és termodinamikai tulajdonságai dominálnak, hanem az adott anyag adott helyi **molekuláris** viselkedése.

A doktori (PhD) értekezésem célkitűzése a forgácsolási szakterületen használt fogalmak pontos meghatározása, az MMS-kenés hatásmechanizmusának feltárása és a forgácsolás hatékonyságának növelése, az anyagok molekuláris és hatáskvantumi viselkedésnek módosításával.

A témakörben 1990-re annyi ismeret halmozódott fel, hogy lehetővé vált egy konkrét fejlesztési koncepció megfogalmazása, amelynek lényegét a 1. ábra szemlélteti. A kutatási munkám során én az **átmeneti szakasz (AB)** vizsgálatával foglalkoztam.



1. ábra A forgácsolási hőmérséklet változása a forgácsoló sebesség függvényében, acél munkadarab és keményfém szerszám esetén

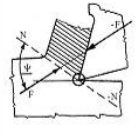
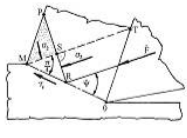
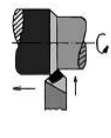
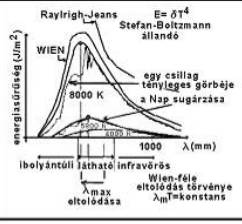
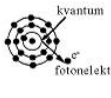
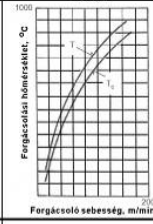
Kutatásaim során nem bonyolult matematikai modellel próbálom a valóságot követni – ami ma még lehetetlen – hanem a fizikai törvények felhasználásával kísérlelem meg a folyamatot megérteni, keresve azokat a beavatkozási lehetőségeket, amelyekkel az energiafelhasználás csökkenthető, a forgácsolás minőségének javítása mellett.

1.2. A kutatómunka célkitűzései

Az új szemléletű FORGÁCSLEVÁLASZTÁSI folyamat során bekövetkező ENERGIAÁTALAKULÁS (1. táblázat 4-5-6 kép) néhány ELMÉLETI KÉRDÉSÉNEK értelmezése, a nedves és száraz megmunkálás átmeneti szakaszában lehetőségek feltárása, amelyek:

- A FORGÁCSLEVÁLASZTÁS ENERGIAIGÉNYÉT CSÖKKENTIK
- A HKF FELHASZNÁLÁST A NULLÁHOZ KÖZELÍTIK
- AZ EMULZIÓK KÉSZÍTÉSÉTŐL – ÜZEMKÖZI KEZELÉSÉTŐL - TÁROLÁSÁTÓL ÉS BONTÁSÁTÓL A FORGÁCSOLÓ ÜZEMEKET MENTESÍTIK
- A GYÁRTMÁNY FELÜLETI MINŐSÉGÉT, MÉRETTARTÁSÁT KIVÁLÓAN BIZTOSÍTJÁK, A FELÜLET KÖZELI RÉTEGEKBE PEDIG KRISZTALLITMÓDOSULÁSOKAT OPTIMÁLJA.

1. táblázat Forgácsleválasztásnál az erő - energia-folyamat fizikai értelmezése

1. Erőhatás, F [N]	2. Fajlagos forgácsolóerő, k_c [N/mm ²]	3. Fajlagos forgácsolási munka, W , [Ws/mm ³]	4. Energia	5. Energiaátalakulás	6. Hőenergia, E [J] Hőmérséklet, T [°C]
					
A forgácsolót a szerzőm homlokklapja és a nyírási sík felől ható azonos nagyságú de ellentétes értelmű F erők tartják egyensúlyban.	Az egységnyi elméleti forgácskerekméretre ható forgácsolóerő.	A térfogategységnyi anyag forgácsolással történő leválasztásához szükséges munka.	Az energia általános értelemben a változtatásra való képességet, a fizikában a munkavégzőképességet jelöli. Egy bizonyos állapotú fizikai rendszer energiája azzal a munkamennyiséggel (W) adható meg, amellyel valamilyen kezdeti állapotból ebbe az állapotba hozható.	Einstein által az abszolút fekete test sugárzását leíró Planck-törvényt levezetéséhez bevezetett együtthatók megadják, annak a három eseménynak a valószínűségét, hogy az atom v. molekula a) elnyel a fénysugárzástól egy fotont (abszorpció), b) a beeső fénysugárzás hatására kibocsát egy fotont (indukált emisszió), c) függetlenül attól, hogy esik-e fény az atomra, kibocsát egy fotont (spontán emisszió).	A hőmérséklet egy intenzív állapothatározó, egyszerre jellemzi az anyag mikroszkopikus és makroszkopikus állapotát. Makroszkopikus nagyságú endon egy érzékelhető tulajdonság. Mikroszkopikus szinten egyenesen arányos a test hőmérsékletével az öt felépítő részecskéktől azonos m.ozgási energiájával.
Makrofizika			Mikrofizika		

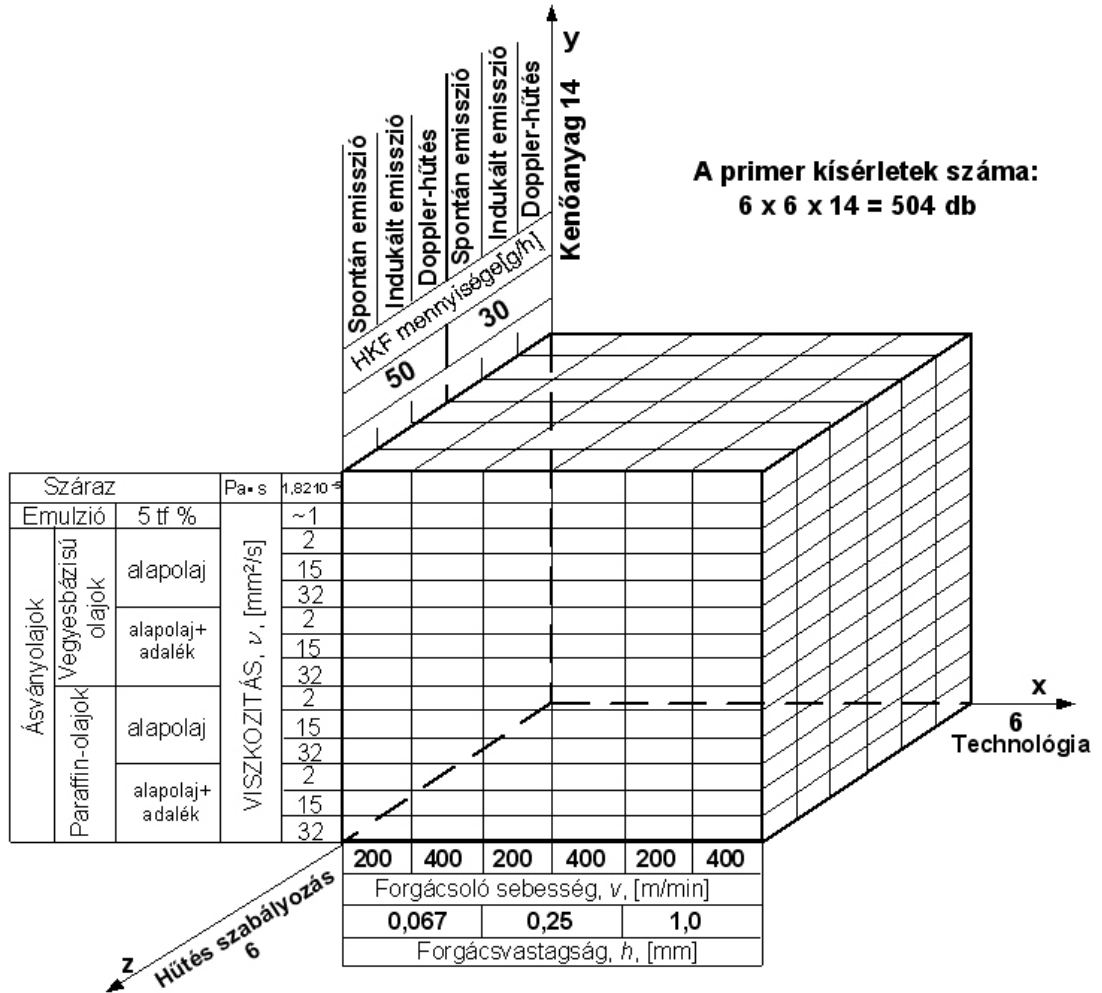
Az átmeneti szakasz vizsgálata a felszínen lejátszódó folyamatoknak az elemzésével lehetséges, erre rendkívül jó alapot nyújt a tribológiai gondolkodás. Nevezetesen, hogy a súrlódási folyamat során energiaátalakulás megy végbe. A forgácsleválasztáshoz felhasznált munka energiává alakul át a súrlódás során, ami mikrofizikai jelenségen alapul.

Azonban ha az erő – munka – energia folyamatot elemezem (1. táblázat), akkor a 4., 5. és 6. képeken bemutatott átalakulási folyamat értelmezésénél szükséges lehet a kvantumfizika egyes részeinek ismerete is. Ez a forgácsleválasztás makrofizikai tárgyalásánál nem is lehet másképp, de a probléma azonnal feloldható, ha a 4. képen és bemutatott energiaátalakulást mikrofizikai szemlélettel szilárdtest- és kvantumfizikai ismeretekkel elemezzük.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A kísérleti körülmények bemutatása

A kísérleti programot a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A kísérleti program

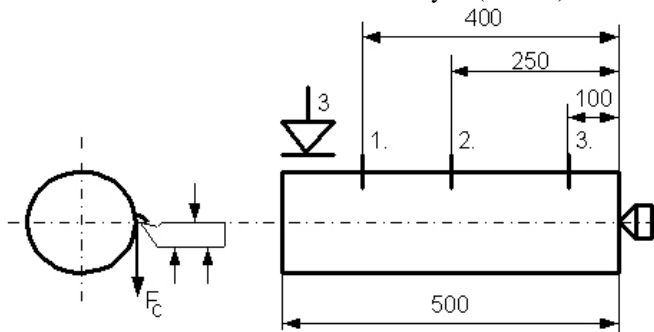
Kísérleti adatok

Normál klíma DIN50014 és ISO554-1970 szerint
 Szerszám: HC/TiN, a DIN/ISO 513 szerint
 CNMG 1204 08 PF 4015
 A munkadarab minősége: 42CrMo4-es (anyag-szám: 1.7225)
 Szerszámgép: C11A típusú eszterga
 Az MMS-kenést ellátó rendszer: Cobra 2000

Technológiai adatok

- előtolás: $f(h) = 0,25$ mm
- előtolás: $f(h) = 0,067$ mm
- előtolás: $f(h) = 1$ mm
- fogásmélység: $a(b) = 1$ mm
- a mért fordulatszám: $n = 1730 \text{ min}^{-1}$

A mérőberendezés és mérőhelyek (3. ábra)



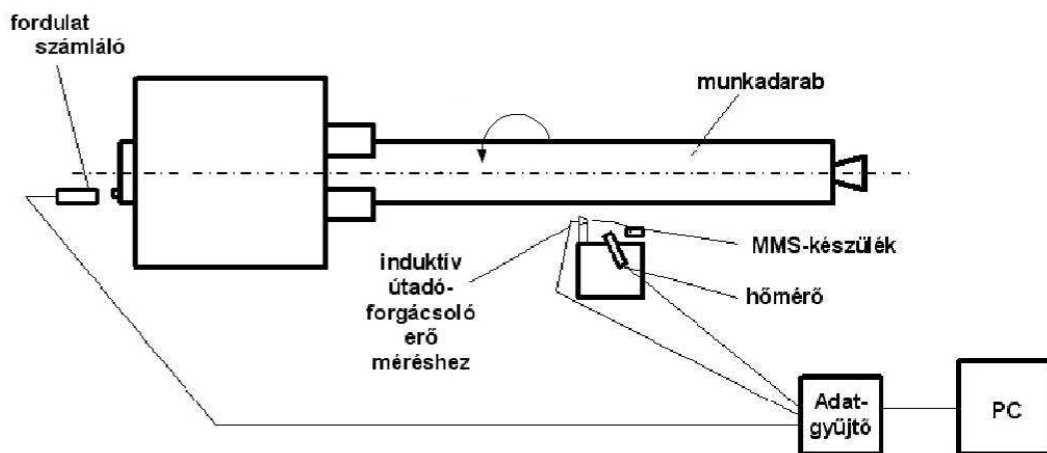
3. ábra A mérőhelyek vázlata

Mérőberendezések	Mért adatok
mikrométer (mérési tartomány: 50 – 75 mm, 75-100 mm) hagyományos tolómérő (1/20 – 150 mm) fémmikroszkóp (csiszolatvizsgálathoz, tip.: Zeits Axi imager 1M, a kiértékeléshez Axiovision 4.7 szoftver) lapkatömeg méréséhez WA33 típusú analitikai mérleg (pontosság: 0,001g) induktív útmérő az elmozdulással arányos forgácsolási erő méréséhez (tip.:TR102) jeladó a fordulatszám méréséhez (egyedi kivitel) mérő-adatgyűjtő (Spider8 Controll, Catman 4.5 program) IGA 300-as infra hőmérő Mitutoyo SJ 201P típusú gyémánt fejes felületi érdesség mérő fotonelektron létrehozó eszközök: látható fénnel fotoemitálás, lézerhűtés (a lézer: 1 mW, hullámhossza 630-680 nm): egyik alapvető változata a Doppler-hűtés, a másik az un. oldalsáv-hűtés	Az 1,2, 3-as a mérési helyek. D_1 [mm], D_2 [mm], D_3 [mm], R_a [μm], R_z [μm], R_q [μm], R_y [μm], n [min ⁻¹], F_c [N], T [°C]
Számított adatok	
D_d [mm], v_c [m/min], s [m], V_f [mm ³ /s], VB [mm], P_c [kW]	

A szerszám megmunkálási periódusát a fogásba lépéstől a kilépésig vettem figyelembe, és az átlagértéket az Excel 2003-as program matematikai függvényével határoztam meg. Az így kapott eredményt a táblázatban rögzítettem. Majd e táblázati adatok alapján készítettem el a következő függvényeket $R_a - V_f$ (az átlagos felületi érdesség – leválasztott forgácsmennyiség), $VB - s$ (hátkopás mértéke – megtett út), $VB - V_f$ (hátkopás mértéke - leválasztott forgácsmennyiség). Meghatároztam az átmérők mérettartását és a mért forgácsoló erőkből a fajlagos forgácsolóerőt határoztam meg, amelyet szintén ábrázoltam.

A különböző hatásokat MMS-kenési körülmények között vizsgáltam 50 g/h és 30 g/h olajfelhasználással. Vizsgáltam az olajok viszkozitásának, molekulaszervezetének, adalékolásának hatását manipulált és nem manipulált molekuláris körülmények között.

A mérőkör felépítését a 4. ábrán mutatom be. A szerszámgép késtartójához egy állványt készítettem, amelyhez rögzítettem az aktivációs elemeket.



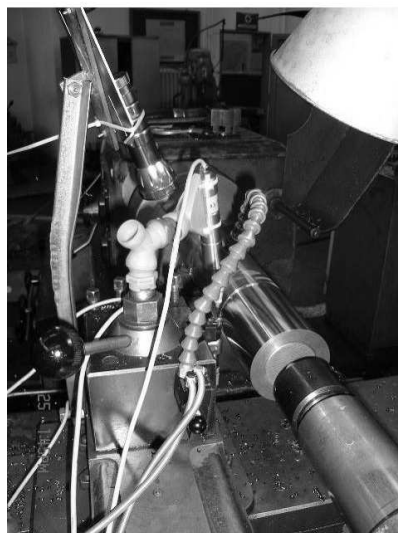
4. ábra A mérőkör elvi vázlata

A méréseknél a következő aktivációs és hűtési módokat használtam

Spontán emissziót. Ennek megfelelően az atom külső okok nélkül átmehet egy alacsonyabb energiájú állapotba. Spontán emisszióval történő hűtés: ebben az esetben nem volt szükség semmilyen más egyéb eszközre, hiszen a Planck-féle együtthatók vizsgálatakor kiderült, hogy ez a hűtési mód mindig jelen van. Egy ilyen mérést mutat be a 5. ábra.



5. ábra A spontán emisszióval történő hűtési mód



6. ábra Az indukált emisszióval történő hűtési mód

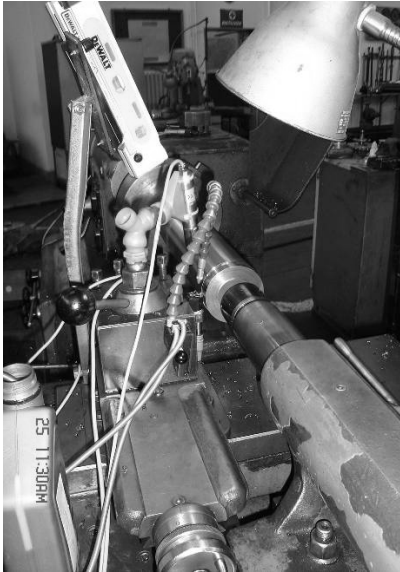
Indukált emisszióval¹ történő hűtés: ebben az esetben egy párhuzamos fénysugarú eszközt (LED-es lámpát) és a lézert használtam, melyet egy állványon rögzítettem az esztergapad késtartóján. Ezt mutatja be a 6. ábra.

Doppler-hűtés: lézerekkel atomi szinten megvalósított energia-elvonás (hűtés). A súrlódás

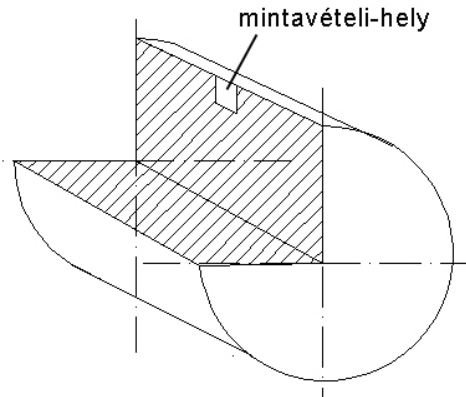
¹ Egy ν frekvenciájú foton hatására egy ugyanolyan tulajdonságú „hasonmás” foton keletkezik, miközben az atom a magasabb energiájú E_2 állapotból az alacsonyabb energiájú E_1 állapotba kerül.

folyamán a hőmérséklet állandóan emelkedik, mivel a mozgó atomok amplitudója növekszik, ezt a hatást szabályozza le a lézer úgy hogy a szembejövő mozgó atomokat a lézer lefékezi.

A szabályozott állapot az állandósáig fokozható. A Doppler-hűtésnél a késtartóra szerelt állványra egy lézert² szereltem fel, ahogy ezt a 7. ábra mutatja. A lézer ($P < 1 \text{ mW}$, $\lambda = 630 - 680 \text{ nm}$), amit használtam még nem roncsoló lézer (tehát vágásra nem alkalmas), amely két funkciót látott el egyrészt indukált aktivációt, másrészt az ún. Doppler-hűtést.



7. ábra A Doppler-hűtés alkalmazása



8. ábra Mintavételi hely a munkadarabon

Krisztallit-módosulás vizsgálata csiszolatokon

A próbadarab helyét úgy kell megállapítani, hogy az jellemző legyen a vizsgálandó termékre, mind összetétel, mind szövetszerkezet szempontjából. A próbavétel módja mindig függ:

- a darab alakjától
- nagyságától, helyzetétől
- a vizsgálat céljától.

A vizsgálati módszer leírás:

1. Minta kivétele (8. ábra) az elkészült munkadarabból metallográfiai gyorsdarabolóval vízűtés alatt
2. A kivágott darab beágyazása (meleg beágyazással, bakelit alapú anyagba – 3 min, 160 °C -)
3. Előkészítés
 - a. csiszolás (nedves csiszolás SiC alapelegyével vízűtéssel)
 - b. polírozás gyémánt szuszpenzióval (9 μm , 3 μm , 1 μm sorrendben)
 - c. végezettel 0,05 μm kolloid szilikával.
4. Maratás (alkoholos salétromsavval – NITAL – 3-5 %-os töménység)
5. Mikroszkópos vizsgálat (20x, 50x és 100x sajátnagyítású objektívvel)

² A lézerben tulajdonképpen fotonokszorozás történik az indukált emisszió révén, mert a gerjesztett fotonok újabbakat hoznak létre és lavinaszerűen kerülhetnek az alapállapotba.

3. EREDMÉNYEK

A kísérleti eredmények feldolgozását megelőzően rá kell mutatni arra a megkerülhetetlen tényre, hogy az eredmények csak kisebb részben értelmezhetők a makrofizikai ismeretekkel, nagyobb részük mikrofizikai (kvantumfizikai) tudást igényelnek.

A kísérleti programot úgy állítottam össze, hogy a különböző kenőanyagok, technológiai jellemzők és molekulamanipuláció esetén hogyan változik a hátkopás értéke a megtett út függvényében. Vizsgáltam azt is, hogy a hátkopás mértéke hogyan alakul az átlagos felületi érdesség és az időegység alatt leválasztott forgácsmennyiség függvényében.

A megmunkált anyagból metszeteket készítettem, hogy értékelni tudjam a felszín közeli rétegében kialakuló krisztallit-módosulást és a transzláció kialakulását a τ_{\max} síkjában. A reprodukálhatósággal kapcsolatban az összes ismételt mérés esetében az eredmények $\pm 5\%$ -os tartományban vannak.

A fémek alakítási technológiáinál az anyagdeformáció gyakran egy viszonylag keskeny sávra lokalizálódik, ahol a deformációs munka hatására a hőmérséklet közel adiabatikusan emelkedik. Ebbe a keskeny zónában deformáció hatására bekövetkező **alakítási keményedés** mellett **termikus-lágyulással** is számolni kell. Az egyidejűleg jelen levő ellentétes hatások termoplasztikus instabilitáshoz vezetnek.

Az $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt végrehajtott nagy forgácsoló sebességű száraz forgácsolás kivételével – mai ismereteink szerint – a hűtő-kenő folyadékok alkalmazásával csökkentjük vagy minimalizáljuk a forgácsleválasztás instabilitását.

A klasszikus megmunkálásoknál a kialakult hűtés és kenés technológiák mellett nagyon jól elkerülhetjük vagy elfogadható határok között tarthatjuk az alakítási keményedést, de a rendszer túlhűtésével a forgácsolási energiaszükséglet növekedhet. Az MMS-kenés lényege ezen a ponton fogható meg, nevezetesen a nyírási síkban a termo-plaszticitás maximalizálható, de az alakítási felkeményedés csak a forgácsolás után a homloklapon meginduló csúszás előtt következzen be, vagyis elemi forgács keletkezzen.

3.1. Energiaszükséglet és – megoszlás a forgácsolási hőmérséklet nagysága és eloszlása alapján

A kísérleti eredmények feldolgozása előtt bizonyosságot akartam szerezni, az elméleti alapon számított forgácsolási - és a kísérlet során kapott jellemzők között.

A kísérleti eredmények az ide vonatkozó bármely elméletnek megfelelnek, ugyanakkor szükségesnek tartottam a helyességüket – a vizsgálatok során mért másodlagos jellemzők felhasználásával – bizonyítani. Az eredményeket a 2. táblázatban foglaltam össze.

A legnagyobb eltérés az M1-32-es kísérleti kódszámú indukált emisszióval történő hűtésnél van, 50 g/h kenőanyag felhasználás mellett ($-9,09\%$). A legkisebb eltérés az M3-2-es kísérleti kódszámú Doppler-hűtés ahol 30 g/h a kenőanyagfelhasználás ($-0,662\%$). A súlyozott átlagokat tekintve pozitív eredményt 3 esetben, míg negatívát 12 esetben kaptam.

2. táblázat A fajlagos energifelhasználás (W_{sp1})

A kísérlet kód	A hűtés módja	A felhasznált kenőanyag mennyisége [g]	Mért adatok		Számított adatok		Eltérés
			W_{sp1} [Ws/mm ³]	k_c [N/mm ²]	W_{sp1} [Ws/mm ³]	k_c [N/mm ²]	ΔW_{sp1} [%]
száraz	spontán emisszió	-	3,196	3196	3,08	3080	- 3,63
száraz	indukált emisszió	-	3,376	3376	3,30	3300	- 2,25
száraz	Doppler-hűtés	-	3,252	3252	3,25	3250	- 0,061
E2-A	spontán emisszió	árasztásos	2,645	2645	2,56	2560	- 3,21
M1-32	spontán emisszió	50	3,628	3628	3,65	3650	+ 0,606
M1-32	indukált emisszió	50	3,124	3124	2,84	2840	- 9,09
M1-32	indukált emisszió	30	3,292	3292	3,19	3190	- 3,098
M1-32	Doppler-hűtés	50	3,668	3668	3,47	3470	- 5,39
M1-32	Doppler-hűtés	30	3,240	3240	3,34	3340	+ 3,086
M2-2	indukált emisszió	50	3,260	3260	3,47	3470	+ 6,44
M2-2	indukált emisszió	30	2,508	2508	2,47	2470	- 1,51
M2-2	Doppler-hűtés	50	3,160	3160	3,02	3020	- 4,43
M2-2	Doppler-hűtés	30	2,540	2540	2,52	2520	- 0,78
M3-2	spontán emisszió	50	2,548	2548	2,40	2400	- 5,808
M3-2	Doppler-hűtés	30	2,416	2416	2,40	2400	- 0,662

Az elvégzett elemzés egyértelműen bizonyítja, hogy a mért és az elméletileg számított eredmények között a korreláció rendkívül erős, a tribológiai kísérleti rendszerekben határértékként megadott $r > 0,9$ (DIN 50322). A vizsgálataimban $r > 0,95$, rendkívül kedvező érték.

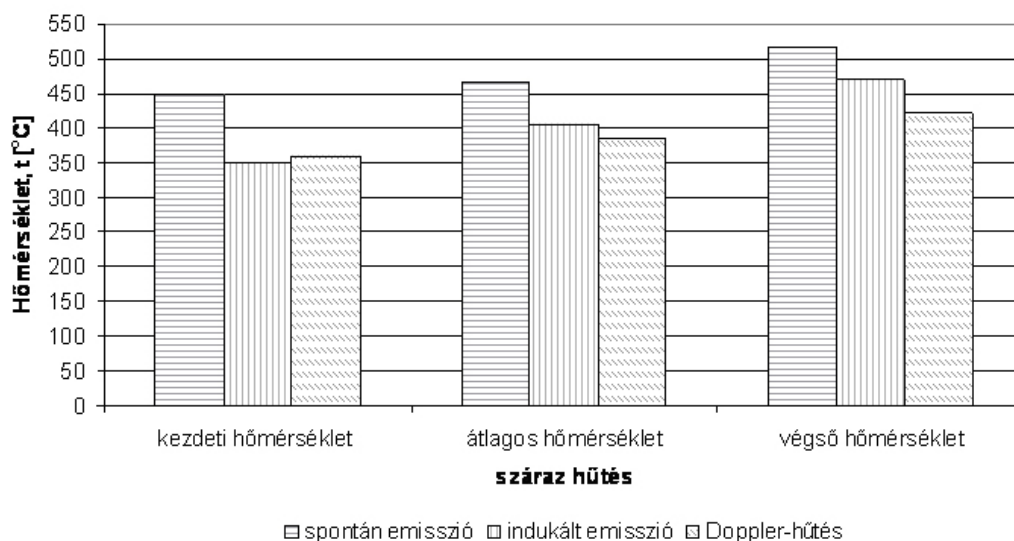
Az elmélet helyességét igazolta az elvégzett kísérlet sorozat és fordítva is, tehát a kísérlet helyességét igazolta az elmélet.

A kísérleti esztergapadon beállítható legkisebb $h = 0,067$ mm értékkel minden egyes kísérletnél egy ellenőrző mérést végeztem. Extrapolált fajlagos forgácsolóerő értékhez a szórás ± 5 %-os tartományban volt, amiből valószínűsíthető, hogy több párhuzamos mérés esetén – a kutatásoknál is elfogadható ± 3 % a szórástartományban lennének az eredmények.

A száraz-hűtéssel az alkalmazott forgácsolási paraméterek mellett ($a(b)=1$ mm, $f(h)=1$ mm) előkísérletet végeztem forgácsolási erő mérésére. Eerre azért volt szükség, hogy a referencia-egyenest saját magam is ki tudjam mérni. Azonban ilyen paraméterek mellett a szerszám gép fordulatszáma folyamatosan csökkent, emiatt a kísérlet értékelhető eredményt nem adott.

A kísérleti eredmények részértékelése

A kenőanyag nélküli ún. szárazhűtés esetén végzett kísérletek hőmérsékleti értékeit szemlélteti a 9. ábra.



9. ábra Száraz hűtésnél a forgácsolási zóna hőmérséklete

A 9. ábra alapján elmondható, hogy a kezdeti hőmérséklet spontán emisszió esetén 450 °C a legmagasabb, az átlagos 460 °C vagyis növekvő, a végső hőmérséklet 515 °C. Az $lg h - lg k_c$ koordináta rendszerben a fajlagos forgácsolóerő ~10 %-kal vagyis szignifikánsan csökkent.

Indukált emisszió esetén a hőmérsékletek jelentősen csökkentek (kezdeti: 350 °C, átlagos: 400 °C, végső: 470 °C). A fajlagos forgácsoló erő 5 %-kal csökkent.

Doppler-hűtés esetén a hőmérséklet jelentősen csökkent (kezdeti: 360 °C, átlagos: 390 °C, végső: 420 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~10 %-kal tehát szignifikánsan csökkent.

A szerszámkopás:

spontán emisszió:	kezdetiől növekvő	$\Sigma s \approx 740$ m
indukált emisszió:	fémátvitel	$a_c=420$ m, $\Sigma s \approx 600$ m
Doppler-hűtés:	fémátvitel	$a_c=700$ m, $\Sigma s \approx 900$ m

Az átlagos felületi érdesség (R_a) a spontán emisszióval és a Doppler-hűtésnél egyenletesen javuló, míg indukált emisszió esetén a_c -ig javuló, ezt követően romló.

A szerszámkopásról elmondható, hogy indukált emisszióval és a Doppler-hűtéssel a kopási folyamat késleltethető.

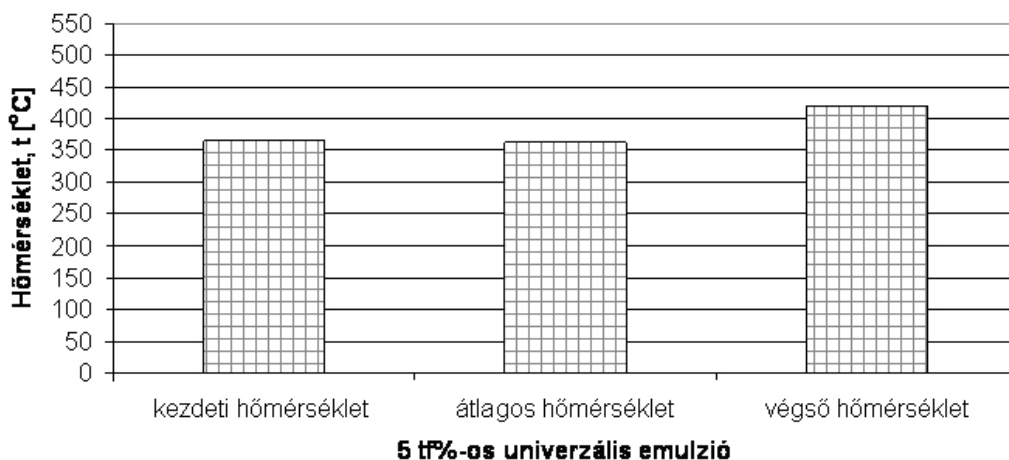
Az 5 tf%-os emulzióval történő árasztásos hűtés esetén végzett kísérletek hőmérsékleti értékeit szemlélteti a 10. ábra.

A 10. ábrán látható, hogy a kezdeti hőmérséklet spontán emisszió esetén 360 °C, az átlagos 360 °C vagyis nem változott, a végső hőmérséklet 418 °C-ra emelkedett. Az $lg h - lg k_c$ koordináta rendszerben a fajlagos forgácsolóerő ~26 %-kal vagyis szignifikánsan csökkent.

A szerszámkopás:

spontán emisszió:	fémátvitel	$a_c=1100$ m, $\Sigma s \approx 1210$ m
-------------------	------------	---

Az átlagos felületi érdesség (R_a) a spontán emisszióval és a Doppler-hűtésnél egyenletesen javuló, míg indukált emisszióval és a Doppler-hűtéssel a kopási folyamat késleltethető.



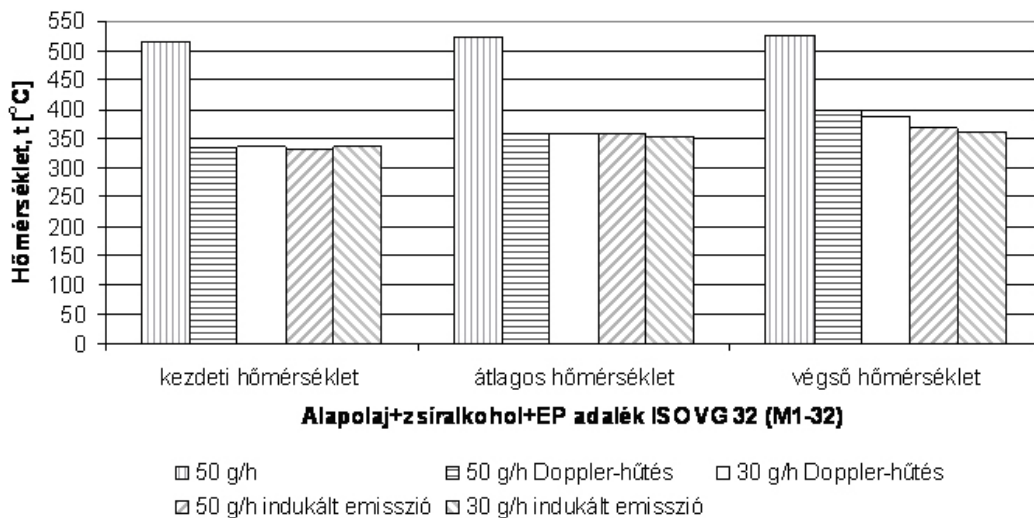
10. ábra 5 tf %-os emulzió hűtésnél a forgácsolási zóna hőmérséklete

A száraz hűtéssel mérhető és spontán emisszió alkalmazásakor a forgácsolási zónában a hőmérséklet kb. 510 °C kb. 100 °C-al több mint emulziós hűtés esetén.

Azonban tovább elemezve a száraz hűtést kijelenthető, hogy az alkalmazott hűtési módokkal (indukált emisszióval, Doppler hűtéssel) a zónában lévő hőmérséklet a spontán emissziós vizsgálathoz képest kb. 100 °C-al csökkent.

A 9. és a 10. ábra összehasonlításából az is kiderül, hogy a száraz hűtésnél, amikor a Doppler-hűtési módot használtam, akkor a forgácsolási zóna és vég hőmérséklete megegyezik az emulziós hűtés vég hőmérsékletével.

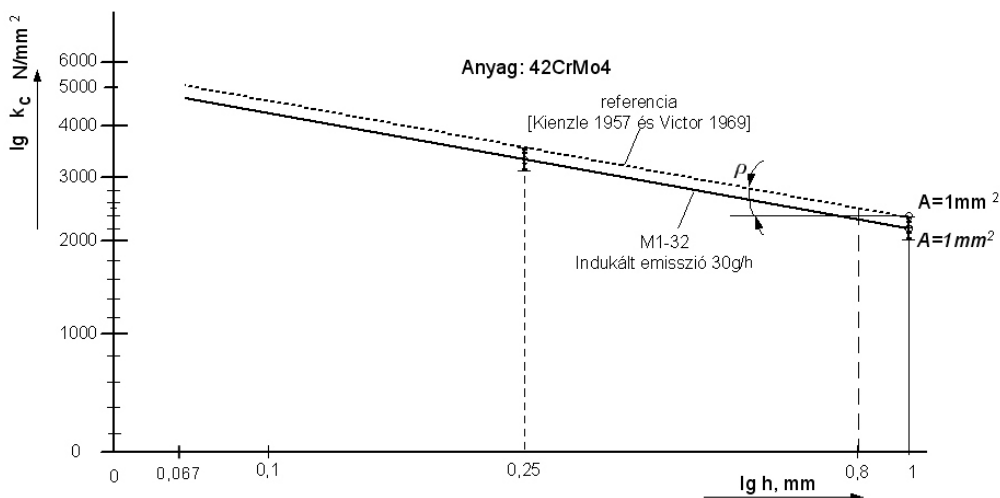
A kereskedelmi forgalomban kapható komplex adalékolású kenőolajjal végzett kísérletek hőmérsékleti értékeit szemlélteti a 11. ábra.



11. ábra A kereskedelemben kapható legjobb termék MMS-kenésénél a forgácsolási zóna hőmérséklete

A 11. ábra alapján kijelenthető, hogy a kezdeti hőmérséklet spontán emisszió (50 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén 510 °C a legmagasabb, az átlagos 522 °C vagyis növekvő, a végső hőmérséklet 525 °C. Az $I_g h - I_g k_c$ koordináta rendszerben a fajlagos forgácsolóerő kb. 1 %-kal vagyis nem szignifikánsan nőtt.

Indukált emisszió (30 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérsékletek jelentősen csökkentek, a spontán emissziós hűtéshez képest (kezdeti: 336 °C, átlagos: 353 °C, végső: 360 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~8 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent. (12. ábra)



12. ábra M1-32 indukált emisszió, 30g/h

Indukált emisszió (50 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérsékletek jelentősen csökkentek a spontán emissziós hűtéshez viszonyítva (kezdeti: 331 °C, átlagos: 357 °C, végső: 367 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~12 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent.

Doppler-hűtés (30 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérséklet jelentősen csökkent, a spontán emissziós hűtéshez képest (kezdeti: 335 °C, átlagos: 357 °C, végső: 387 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~10 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent.

Doppler-hűtés (50 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérséklet jelentősen csökkent a spontán emissziós hűtéshez képest (kezdeti: 335 °C, átlagos: 357 °C, végső: 396 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~2 %-kal nem szignifikánsan nőtt.

A szerszámkopás:

spontán emisszió (50 g/h):	kezdettől növekvő	$\Sigma s \approx 510$ m
indukált emisszió (30 g/h):	fémátvitel	$a_c=400$ m, $\Sigma s \approx 655$ m
indukált emisszió(50 g/h):	kezdettől növekvő	$\Sigma s \approx 530$ m
Doppler-hűtés (30 g/h):	kezdettől növekvő	$\Sigma s \approx 480$ m
Doppler-hűtés (50 g/h):	fémátvitel	$a_c=660$ m, $\Sigma s \approx 680$ m

Az átlagos felületi érdesség (R_a) a spontán emissziónál, indukált emissziónál (30 g/h és 50 g/h) és Doppler-hűtésnél (30 g/h) egyenletesen javuló, míg Doppler-hűtés esetén a_c -ig javuló, ezt követően romló.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a spontán emissziós vizsgálatokhoz képest jelentősen csökkent a forgácsolási zónában a hőmérséklet, amikor indukált emissziós vagy Doppler-hűtési módokat alkalmaztam.

A kísérletekhez használt kenőanyag mennyiségét figyelve elmondható, hogy a négy molekulamanipulációs kísérletsorozatnál a hőmérsékletek közötti különbség alig -, vagy egyáltalán nem mutatható ki. Az ábrából az is kiolvasható, hogy amikor indukált emissziós hűtési módot alkalmaztam, a hőmérséklet csak kis mértékben emelkedett (kb. 30 °C).

A 13. ábrán egy modell-folyadékkal (kísérleti kódja: M2-2) végrehajtott kísérletsorozat hőmérsékleti eredményei láthatóak.

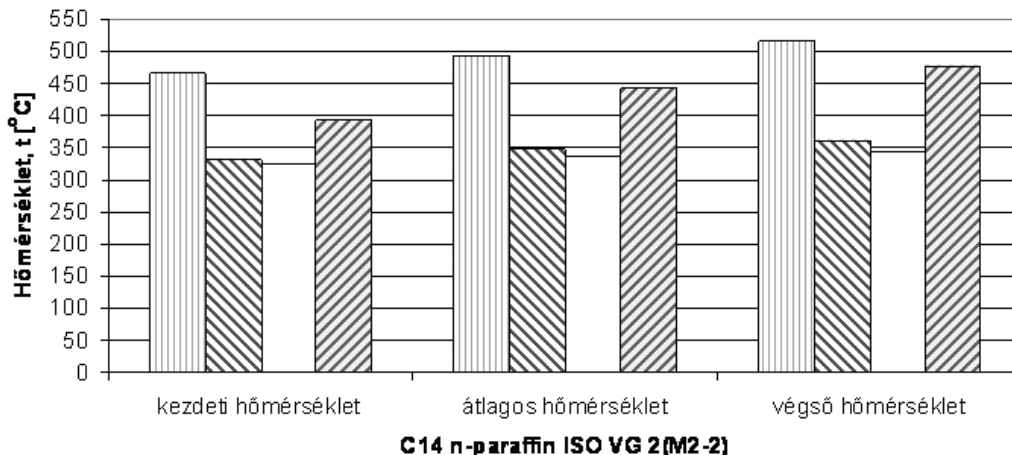
Indukált emisszió (30 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérsékletek növekedtek a kereskedelmi forgalomban kapható komplex adalékolású kenőolajjal végzett kísérletekhez viszo-

nyítva (kezdeti: 392 °C, átlagos: 443 °C, végső: 477 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~29 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent.

Indukált emisszió (50 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérsékletek jelentősen csökkentek a 30 g/h kenőanyag-felhasználású kísérlethez képest (kezdeti: 325 °C, átlagos: 335 °C, végső: 343 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~9 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent.

Doppler-hűtés (30 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérsékleti értékek jelentősen megnőtt (kezdeti: 466 °C a legmagasabb, átlagos: 493 °C, végső: 517 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~29 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent.

Doppler-hűtés (50 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérséklet jelentősen csökkent a 30 g/h kenőanyag-felhasználású kísérlethez képest (kezdeti: 332 °C, átlagos: 347 °C, végső: 361 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~12 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent.



□ 30 g/h Doppler-hűtés ▨ 50 g/h Doppler-hűtés □ 50 g/h indukált emisszió ▩ 30 g/h indukált emisszió

13. ábra Kísérleti MMS-kenőanyag (M2-2) alkalmazásakor a forgácsolási zóna hőmérséklete

A szerszámkopás:

indukált emisszió (30 g/h):	fémátvitel	$a_c=660 \text{ m}, \Sigma_s \approx 900 \text{ m}$
indukált emisszió(50 g/h):	fémátvitel	$a_c=1100 \text{ m}, \Sigma_s \approx 1450 \text{ m}$
Doppler-hűtés (30 g/h):	kezdetről növekvő	$\Sigma_s \approx 760 \text{ m}$
Doppler-hűtés (50 g/h):	kezdetről növekvő	$\Sigma_s \approx 780 \text{ m}$

Az átlagos felületi érdesség (R_a) az indukált emisszióval (30 g/h és 50 g/h) és Doppler-hűtésnél (30 g/h és 50 g/h) egyenletesen javuló. A szerszámkopásról az indukált emissziós hűtéssel készíthető.

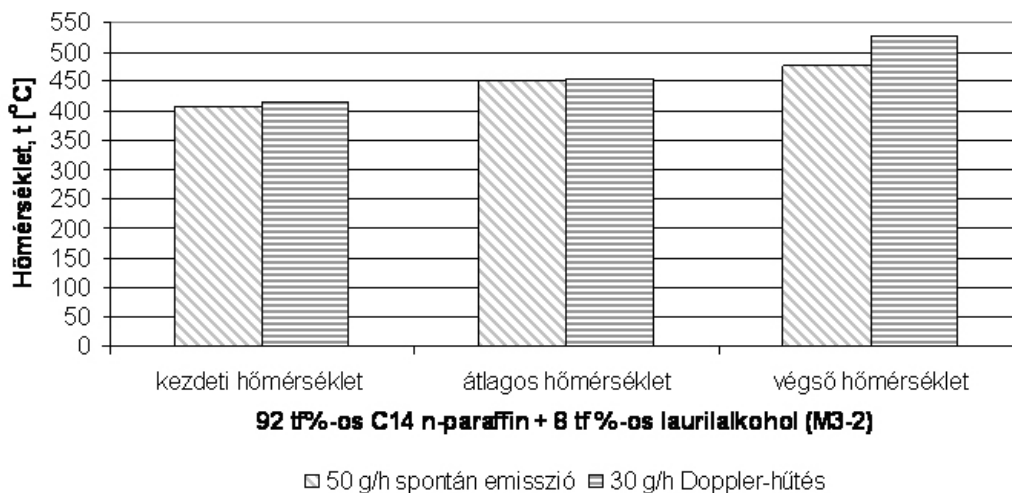
Az eredmények alapján látható, hogy a jobb eredményeket ennél a kenőolajnál akkor kaptam, amikor 50 g/h kenőanyag-mennyiséget használtam. Ha összehasonlítjuk ennél a kenőanyag-mennyiségnél a Doppler-hűtést és az indukált emissziót, akkor elmondható, hogy az indukált emisszióval történő hűtésnél a hőmérséklet-különbség (végső hőmérséklet – kezdeti hőmérséklet) kisebb, mint a Doppler-hűtésnél.

A 14. ábrán egy modell-folyadékkal (kísérleti kódja: M3-2) végrehajtott kísérletsorozat hőmérsékleti eredményei láthatóak.

A kezdeti hőmérséklet spontán emisszió (50 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a kezdeti hőmérséklet 406 °C, az átlagos 450 °C vagyis növekvő, a végső hőmérséklet 476 °C. Az $l_{gh} - l_{gk}$ koordináta rendszerben a fajlagos forgácsolóerő ~28 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent.

Doppler-hűtés (30 g/h kenőanyag-felhasználás) esetén a hőmérsékletek kis mértékben nőt-

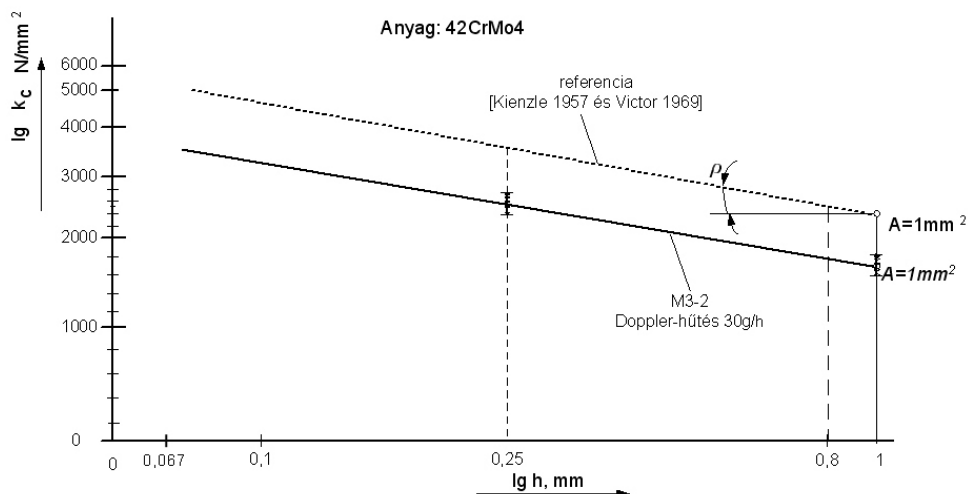
tek (kezdeti: 415 °C, átlagos: 454 °C, végső: 526 °C). A fajlagos forgácsoló erő ~32 %-kal, tehát szignifikánsan csökkent. (15. ábra)



14. ábra Kísérleti MMS-kenőanyag (M3-2) alkalmazásakor a forgácsolási zóna hőmérséklete

A szerszámkopás:

spontán emisszió (50 g/h):	fémátvitel	$a_c=660$ m, $\Sigma_s \approx 880$ m
Doppler-hűtés (30 g/h):	fémátvitel	$a_c=650$ m, $\Sigma_s \approx 870$ m



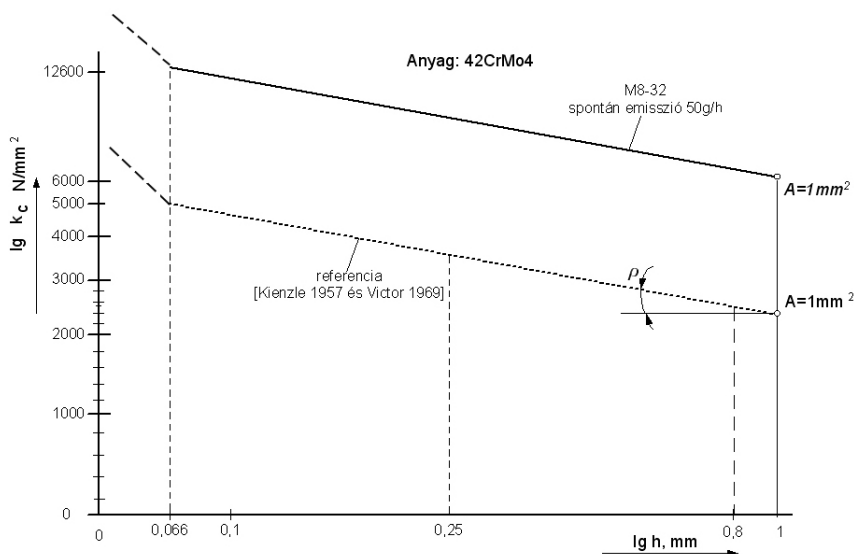
15. ábra M3-2 Doppler hűtés, 30g/h

Az átlagos felületi érdesség (R_a) a spontán emissziónál (50 g/h) és Doppler-hűtés (30 g/h) esetén a_c -ig javuló, ezt követően romló.

A szerszámkopásról elmondható, hogy a kísérleteknél alkalmazott modell-folyadékkal és hűtési módokkal a kopási folyamat késleltethető.

A 30 g/h-ás kenőanyag-mennyiség használatakor látható, hogy a megmunkálás végére a hőmérséklet jobban megnőtt, M1-32 és M2-2 kísérleti kóddal rendelkező kenőolajokkal összehasonlítva.

A 16. ábrán látható, hogy már a forgácsolás közben a homloklapon megindult a csúszás, tehát ebben az esetben a belső súrlódás mellett a külső súrlódás is megjelent.



16. ábra M8-32 spontán emisszió, 50 g/h

Ez az eset abban nyilvánul meg, hogy az elemi forgács helyett folyóforgács keletkezett. A fajlagos forgácsolóerő kb. 100 %-kal nőtt, amit túlnyomórészt a nulla homlokszögű ($\gamma = 0$) szerszám felületén csúszó forgács idéz elő. Az ábra igazolja az elméletet. A $f = 0,001$ mm előtolásnál kisebb értékekkel végzett megmunkálás nem tartozott szorosan a dolgozatom témájához, ezért ezzel a tartománnyal nem foglalkoztam bővebben.

3.2. Kenőanyagok szerepe az MMS-kenésben

A kenőanyagok összetett diszperz rendszerek, amelyek tulajdonságait, többek között a viszkozitás, a nagy molekulák átmérőjének és a mozgásuk közepes szabad úthosszának különbsége szabja meg; vagyis a viszkozitás a tér, a hőmérséklet és a molekulák közötti erő függvénye.

A molekulák aktivitásával az ütközési energia megnő, amelynek túlnyomó részét a molekula-szerkezet tárolja. Az ütközési energia az alábbi két módon épülhet be a molekula-szerkezetbe:

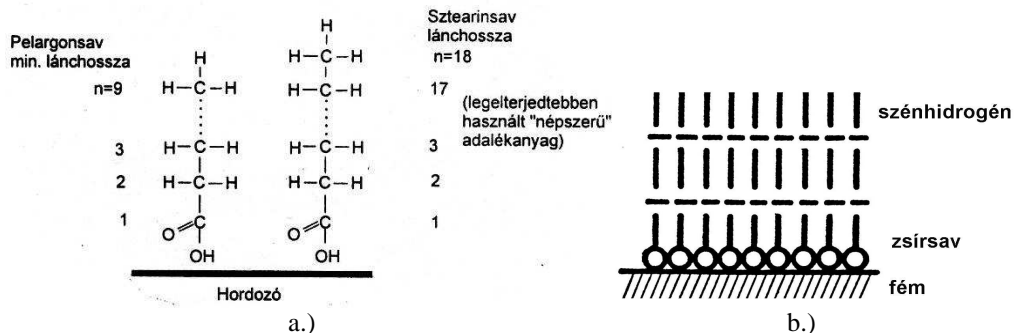
- a mozgékony (kis) molekulák szuperstruktúrákká alakulnak, majd aggregátummá állnak össze
- a kikényszerített rendszerekhez és viszonyokhoz a molekulák optimális szimmetriával (fázis-átmenetekkel) alkalmazkodnak, korlátozva a molekuláris mozgékonyt. A mozgás teljes akadályoztatása esetén az energia rezgést gerjeszt, amely túllépve az aktivitási küszöböt, a molekulák közötti kötések szakadásához vezet.

A zsírsavak, mint különböző részecskékből álló rendszerek szerkezetére következtetni lehet a belső töltés eloszlásukból, amely elektromágneses sugárzás hatására orientálódhat vagy eltolódhat:

- az irányulás az egyes dipólusok térbeli vektoriális összegzésének következménye (orientális polarizáció), amelyet kisfrekvenciájú váltakozó térben a dielektromos állandóval (δ) lehet kifejezni
- ha a dipólusok a változó tér megnövelt frekvenciája miatt már nem tudnak átírányulni, akkor a kötések mentén dipólus változásokra kerül sor, ami eltolódásos polarizációt eredményez.

A zsírsavak aszimmetrikus molekulák, permanens dipolmomentummal. A dipol molekulák pozitív töltésű fémfelületen orientált adszorpciós réteget hoznak létre. Ha a zsírsav egy telített egyenes láncú inert (pl.: C14 lineár paraffin) szénhidrogénhez kapcsolódik, akkor ún. amfipatikus³ molekula keletkezik.

Az amfipatikus molekulák rendkívüli előnye, hogy a fémfelülethez adszorpcióval kötődnek, ugyanakkor a másik oldalán inert vagyis elektromágneses töltés nincsen. A felületet borító első rétegre már az inert szénhidrogén, - a 17. ábrán látható módon - orientáltódik és másodlagos vegyértékkel laza kötést hoz létre. A zsírsavak a fém felületén van der Waals kötést hoznak létre.



17. ábra Folyadékok adszorpciója fémek felületén
a.) zsírsavak adszorpciója; b.) orientált polimolekuláris szerkezet

A polarizálhatóságot Lorentz-Lorenz-féle egyenlet definiálja. A törésmutatóból, a molekulatömegeből és a sűrűségből kiszámíthatjuk a molekuláris refrakciót (R), a fénytörést, mint a fényoptikai megfigyelés szerkezeti egységét.

A törésmutató⁴ közvetlen összefüggést mutat a szerkezeti anyag jellege és a megvalósuló kenés között. Meghatározható az ASTM D 1218, D 1747 szabványos vizsgálati módszerekkel.

Általában a szénhidrogén alapú kenőanyagok atmoszférikus nyomáson mért törésmutatója 1,51. Ha a szénhidrogén-olajat zsírsavval adalékoljuk, akkor a térfogata kissé csökken vagyis sűrűsbbé válik. Ezt a kenési folyamatban rendkívül jól kihasználhatjuk, ugyanis a minimál-kenésnél a felületet jól nedvesítő folyadékok adják a legjobb kenéstechnikai eredményeket. Mivel a törésmutató rendkívül érzékeny a kenőanyag összetételére, ezért nagyon fontos jellemzője az MMS-kenés megvalósíthatóságának. A kenőanyagok nedvesítő képességét az adhéziós és kohéziós erők aránya határozza meg.

Folyadékok terülése a szilárd testek felületén

A folyadékok terülését a szilárd felületen a csepp érintő szögének (α) nagyságával jellemezzük (3. táblázat).

Kis érintő szög \rightarrow jobb nedvesítés, nagy érintő szög \rightarrow rosszabb nedvesítés. Ha az alfa nagyobb 90° -nál, akkor a folyadékcsepp elkezd „gyöngyöződni” a felületen, lásd 3. táblázat 2.kép. A gyöngyöződött olaj a felületen gurul, tehát kenési funkciót nem lát el (makroméreteknél nagyon jól látható ez a folyamat alumínium széles szalag meleghengerlésénél).

Az érintőszög nagysága, a szilárd test felületi feszültsége valamint a folyadékok felületi – és határfelületi feszültsége között összefüggést állapít meg a Young-féle képlet.

A zsírsavval adalékolt kenőolaj felületi területe jobb, mint az ásványolajoké, következésképpen az érintő szöge kisebb. A hő hatására bekövetkező változások miatt az olajcsepp mérete nő, amit az érintő szög csökkenésével határozhatunk meg. A felületek nedvesedése függ az olajok poláris és diszperziv rész arányától.

³ Kolloid-kémiai kifejezés

⁴ a törésmutató egy adott hullámhosszú fény levegőben mért sebességének és a vizsgált olajban mért sebességének a hányadosa

3. táblázat Folyadékok területe szilárd felületen

Nedvesítési forma	Nedvesít	Nem nedvesít
Oka	Adhéziós erő >> kohéziós erő	Adhéziós erő << kohéziós erő
Hatás	A folyadék elterülése a szilárd test felületén	A folyadék cseppszerű összehúzódása
Vázlat	<p>1. kép</p>	<p>2. kép</p>
Egyenlet	Young-féle képlet: $\sigma_{12} \cos \alpha = \sigma_{13} - \sigma_{23}$	
Tartomány	$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$

Mivel a szilárd testek és a folyadékok diszperzív energia hányada között erős a kötődési hajlam, ezzel szemben a szintetikus észterek túlnyomó részt apolárosak, tehát bennük a diszperzív energiahányad a nagyobb. Tapasztalat azt mutatja, hogy ha a szilárd test diszperzív része nagyobb, akkor javul a szilárd test nedvesedése, $\alpha \rightarrow$ csökken.

Különösen nagy jelentősége van fizikai porlasztással (PVD) felvitt bevonatoknak, mivel az olajok tapadási stabilitása javul. A szilárd test polaritását a spontán epilamizálás is megváltoztatja, ronghajtja és javíthatja is. Amint az ismeretes a szénhidrogén olajok krakkolódnak (hőbomlása) 260 °C-on megindul és már 300 °C-on gazdaságos technológiák alakultak ki.

A nyírási zónában a hőmérsékletek 400-500 °C-ot is elérik, amelyen olymértékben felgyorsul a hőbomlás, hogy a hétköznapi értelemben vett anyag alakilag is és mennyiségileg is megszűnik létezni.

Vannak olyan tulajdonság-, ill. funkció- javító adalékok, amelyek működése kimondottan hőmérsékletfüggő. Ha ezeknek az anyagoknak a részecskéi hamarabb eltávoznak, mint a maradványok hamumentes elége bekövetkezne, akkor káros lerakódások (epilamizálódás) következnek be. Az újonnan képződött anyag vastagsága 3-5 nanométer elég ahhoz, hogy a szerszám poláros energiahányada lecsökkenjen.

Az MMS-kenésnél ahol nincs folyamatos kenőanyagellátás – hanem csak 5-6 másodpercenként cseppen a szerszám felületére a kenőanyag – ott már jelentős szerepe van a szerszám poláros energiahányad csökkenésének (a kenőanyag területe és a tapadása is romlik).

A kísérletek során a kenőanyag mennyiségét változtattam állandó technológiai paraméterek mellett. A száraz hűtést az MMS-kenést (egy a piacon kapható legjobb termék esetén – M1-32 -) és az 5 tf%-os emulziós kenést összehasonlítva elmondható, hogy a száraz hűtéssel jobb mérési eredményeket lehet felmutatni (az átlagos felületi érdesség, a hátkopás és a fajlagos forgácsolóerő összefüggésében).

Az MMS-kenésnél, amikor egy a piacon kapható legjobb terméket alkalmaztam 50 g/h és 30 g/h mennyiségben akkor a fajlagos forgácsolóerő változásánál az irodalomban található alapdiagramhoz képest jelentős változás nem volt.

A másik MMS-kenéskor, egy C14-es n-paraffin volt a kenőanyag és szintén 50 g/h és 30 g/h mennyiségben használtam fel. A 30 g/h mennyiségnél a fajlagos forgácsolóerő kb. 30 %-kal csökkent.

A következő MMS-kenésnél egy 92 tf%-os C14-es n-paraffin+8 tf%-os laurilalkohol felhasználásakor először 50 g/h, majd 30 g/h kenőanyag mennyiség felhasználása után a szakirodalomban található referenciához képest a fajlagos forgácsolóerő nagysága kb. 33%-kal csökkent.

Megállapítható, hogy az alkalmazott kenőanyagok mennyiségének csökkentése mellett a fajlagos forgácsolóerő nagysága adott HKF, adagolási nagyság és kiegészítő hűtési mód (molekulamanipuláció) megválasztása mellett csökkenthető. Így belátható, hogy a nedves megmunkálásból

kiindulva és a száraz megmunkálásig eljutva jelentős mértékben csökkenthető a forgácsleválasztás energiá-szükséglete. Tehát a forgácsleválasztásnál egyidejűleg a felhasznált kenőanyag tömege fokozatosan 50 g/h → 30 g/h → 20 g/h stb. csökkenthető.

Ezt legjobban az M2-2 modell-folyadékkal elvégzett kísérletek eredményei bizonyítják, ahol M2-2 indukált emisszió 50 g/h kenőanyag-felhasználás esetén 8,93 % -os a fajlagos forgácsolóerő csökkenés, minden egyéb paraméter változatlanul hagyása mellett az M2-2 indukált emisszió 30 g/h kenőanyag-felhasználás mellett már 29,94 %-os fajlagos forgácsolóerő csökkenést eredményezett.

A jelentős eredmény (fajlagos forgácsolóerő csökkenés) mellett nagyon fontos megállapítani, hogy ez a tendencia egyben a jövő fejlesztésében iránymutató is. (Hiszen így juthatunk el a száraz kenéshez.)

Az alkalmazott hűtőhatás értékelése

A kísérletek során az egy mérésen belüli technológiai paramétereket (előtolás, fogásmélység, fordulatszám) állandó értéken tartottam, miközben változtattam a hűtő-kenő folyadékok típusát és mennyiségét ill. a hűtés módját. A hűtő-kenő folyadékok alaptípusai a következők voltak:

- száraz kenés
- 5 tf %-os emulzió
- MMS-kenés

A hűtési módok a következők voltak:

- o spontán emisszió
- o indukált emisszió
- o Doppler-hűtés.

A felhasznált kenőanyagokat a következőkben mutatom be. Az első négy termék piacon kapható legjobb termék (kísérleti kódjaik: E1-A, E2-A, E3-S, M1-32), míg a többi kenőolaj csak törzsoldat (modell-folyadék), amelyek Almásfüzitőn a MOL-LUB kft. laboratóriumában készültek el. Innen származnak ezen kenőolajok vizsgálati jegyzőkönyvei is, amelyben a műszaki és biztonsági jellemzőiket adtam meg.

A kapott eredmények alapján a forgácsleválasztásnál alkalmazott hűtő-kenő folyadékokra az általam használt molekulamanipuláció jelentős hatással van. Azonban a piacon kapható (hagyományosan funkcionális adalékolású hűtő-kenő folyadékok) és az általam vizsgált hűtő-kenő folyadékokra ezen molekulamanipuláció pozitív hatását nem sikerült kimutatnom.

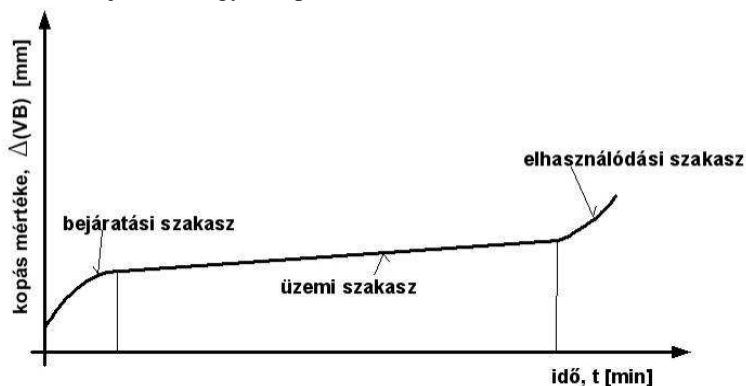
3.3. Szerszámkopás mechanizmusa

A súrlódó gépelemek között a kenőanyag teremt rugalmas kapcsolatot, ami befolyással van a súrlódási ellenállásra és a kopás⁵ kialakulására. A klasszikus kopásgörbe három szakaszból áll, ahogy azt a 18. ábra mutatja. Ettől a szerszámkopás általában eltérő.

⁵ A kopást a DIN 50321-es szabvány definiálja. A definíció szerint a kopás mértékét a **kopás jellemző számmal** adhatjuk meg, ami függ

- a komplett igénybevételtől és
 - a tribológiai rendszer szerkezetétől
- tagozódik
- kopás megjelenési formákra és a
 - kopás nagyságára.

A szerszám és a munkadarab közötti kapcsolat rendkívül erős. Az utolsó szakasz esetenként eltérő lehet, ami azt jelenti, hogy a kopás intenzívebbé vált.



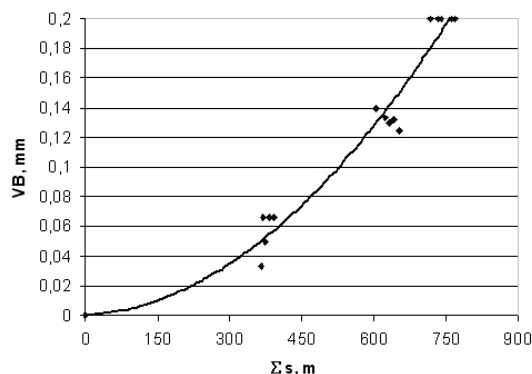
18. ábra Klasszikus kopásgörbe

A szerszámkopás mértékét – korszerű szerszámok esetén - a hátkopással lehet a legjobban jellemezni. A kísérletek során a lapkák tömegét mértem, majd ezen adatokból számoltam ki a hátkopás mértékét.

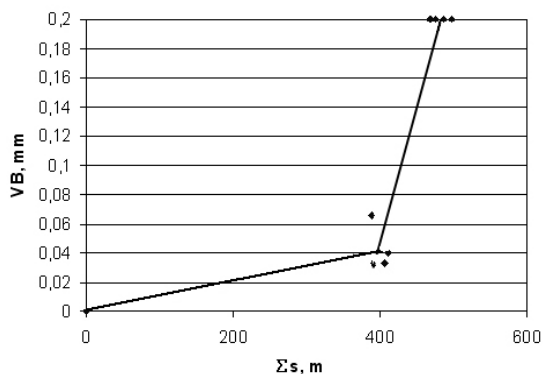
A hátkopás értékeit a hazai és nemzetközi irodalom után a forgácsoláskor megtett út és a leválasztott forgácsmennyiség függvényében ábrázoltam. A szerszámok hátkopása a hagyományos és az újabb korszerű szerszámok esetén három jellegzetes lefolyású lehet.

Első típusú kopás lefolyás, az 19. ábrán látható, hogy a megmunkálás megkezdése után nagyon hamar vagy azonnal megindul a progresszív szerszámkopás. Ilyen eredményt kaptam:

- száraz hűtés, spontán emisszió
- M2-2 kísérleti kódszámú kenőanyagnál Doppler-hűtés esetén 30 g/h kenőanyag-felhasználáskor.



19. ábra Száraz hűtés



20. ábra M1-32, Doppler-hűtés, 30 g/h

Második típusú kopás lefolyás, amely a 20. ábrán látható. A megmunkálás megkezdése után azonnal megindul a szerszámkopás, úgy hogy a kezdeti szakasz lineáris jellegű, majd egy pont után progresszív válik. Ilyen eredményt kaptam:

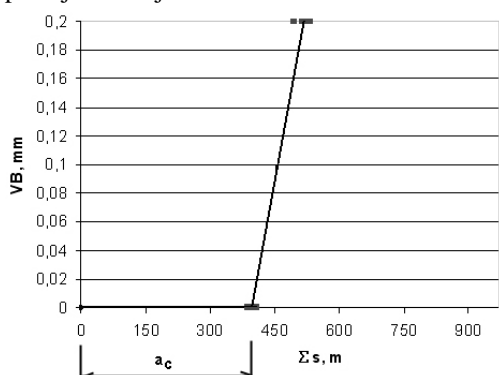
- M1-32 kísérleti kódszámú kenőanyagnál indukált emissziós hűtés esetén 50 g/h kenőanyag felhasználáskor
- M1-32 kísérleti kódszámú kenőanyagnál spontán emissziós hűtés esetén 50 g/h kenőanyag felhasználása esetén
- M1-32 kísérleti kódszámú kenőanyagnál Doppler-hűtés esetén 30 g/h kenőanyag felhasználáskor
- M2-2 kísérleti kódszámú kenőanyagnál Doppler hűtés esetén 50 g/h kenőanyag felhasználáskor.

Harmadik típusú kopás lefolyás.

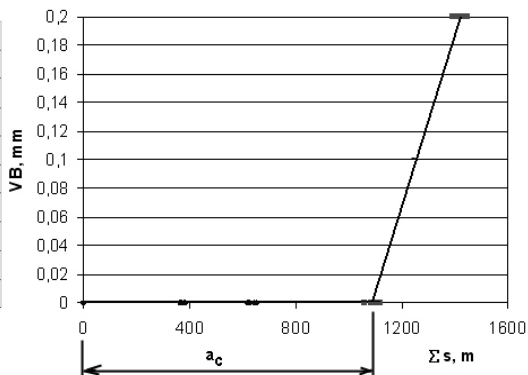
Bevonatolt keményfém szerszámoknál, ahol élszak nem képződhet, mert hőkaput képez a bevonat, ott az igénybevétel kezdetétől az adhéziós kopás kezdeti szakasza csak mint változás jön létre, amit **fémátvitelnek** nevezünk.

Vagyis molekula megy át a szerszámról a munkadarabra és fordítva (ezért nem lehet csak felületi kopásnyommal jellemezni az ilyen kezdeti kopás nagyságát, ugyanis gyakran előfordul, hogy bár kopásnyom van, de a kopóelem indulási tömege növekszik).

A fémátvitel az Európában leginkább elfogadott Csikós-féle kopási rendszertanban szerepel, de csak úgy, mint változás. Ez azt jelenti, hogy a technikai szinten rendelkezésre álló méret illetve tömeg meghatározás nem lehetséges. Ellenben a szerszámban az igénybevétel hatására energia akkumulálódik, ami egy adott szinten, véletlenszerűen a felületek közé kerülő 3. test hatására ún. Fridrik-féle törés következik be, amelynek törésképe rendkívül jellegzetes. Ezt követően intenzívvé válik a ridegtöréses kopás, amely nagy iránytangensű gyors lefolyású kopás. Ennek típusos példáját mutatja a 21. és a 22. ábra.



21. ábra Száraz hűtés indukált emisszió



22. ábra M2-2 indukált emisszió 50 g/h

A 21. ábrán látható módon egy véletlenszerűen bekövetkező törési pont jelenik meg (a_c), ezt a fajta diagramot több kísérletnél is fel tudtam rajzolni. Roßmann (1999) által meghatározott a_c értékeit forgácsolási megmunkálásnál nem tudjuk a szerszámra, mint konstans tényezőt megadni.

A 20. ábrán látható jellegét a kísérleti eredmények értékelésénél a következőknél figyeltem meg (zárójelben az a_c törési pont megjelenése):

- száraz hűtés indukált emisszió (390 m)
- száraz hűtés Doppler-hűtés (657 m)
- E2-A 5 tf %-os emulzió (1102 m)
- M1-32 Doppler-hűtés 50 g/h kenőanyag felhasználás (655 m)
- M1-32 indukált emisszió 30 g/h kenőanyag felhasználás (400 m)
- M2-2 indukált emisszió 50 g/h kenőanyag felhasználás (1129 m)
- M2-2 indukált emisszió 30 g/h kenőanyag felhasználás (650 m)
- M3-2 spontán emisszió 50g/h kenőanyag felhasználás (658 m)
- M3-2 Doppler-hűtés 30 g/h kenőanyag felhasználás (650 m).

A felhasznált kenőanyag mennyisége nagyban nem befolyásolja a véletlenszerűen bekövetkező törési pontot, viszont azon kísérleteknél vettem fel az 20. ábrán látható diagramot, ahol Doppler-hűtést és indukált emissziót alkalmaztam.

A felsorolt eredményekből jól látszik, hogy egy modell-folyadékkal és megfelelő hűtési móddal érhető el a legjobb eredmény ($s = a_c = 1129$ m). (22. ábra)

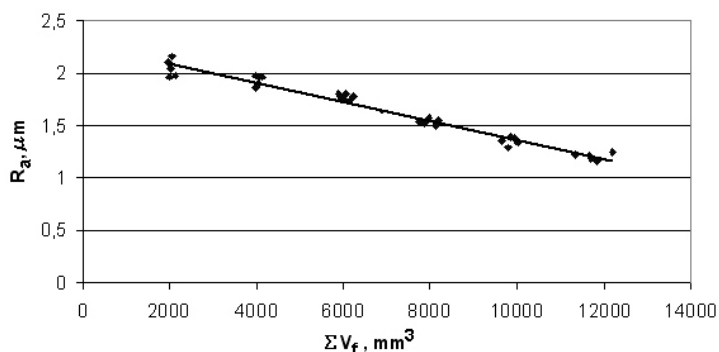
Tehát arra kell törekedni, hogy az $a_c = s$ minél nagyobb legyen, de addig technikai szinten meghatározható korra ne, csak változás következzen be. Mai ismereteink szerint olyan elmélet nem létezik, amely egységesen megadná az intenzív kopás megindulásáig eltelt időt. A kísérletekben bizonyos jelek mutattak arra, hogy milyen tényezők hatnak az intenzív kopás megindulására.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a szerszám-kopásra legerősebb hatása a molekulamanipulációnak van (késlelteti a hátkopás létrejöttét).

3.4. Felületi érdesség és mérettartás

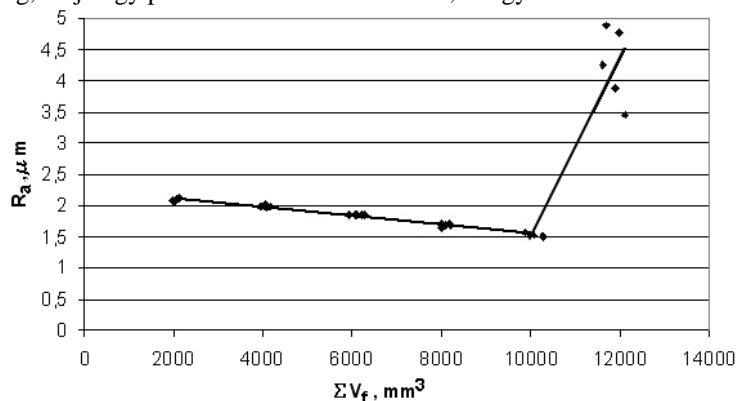
A mért adatok alapján ábrázoltam az átlagos felületi érdességet az időegység alatt leválasztott forgásmennyiség függvényében. Ebben a fejezetben az általam szélsőségesnek minősített eseteket mutatom be.

Az átlagos felületi érdesség változását a kísérletek során kétféle tendenciával lehet jellemezni. A 23. ábrából kiderül, hogy az átlagos felületi érdesség folyamatosan javul az alkalmazott hűtéssel. Az alkalmazott kenőolajra (amely egy modell-folyadék) a molekulamanipuláció jó hatással van.



23. ábra M2-2, Doppler-hűtés 50 g/h

Egy piacon kapható termékkel - ugyanazon mennyiségnél és hűtési módnál - szintén javul a felületi érdesség, majd egy pont után rohamosan romlik, ahogy azt a 24. ábra mutatja.



24. ábra M1-32, Doppler-hűtés 50 g/h

Azonban itt egy jóval nagyobb szóródás figyelhető meg. Tehát elmondható, hogy a molekulamanipulációval, valamint egy megfelelő kenőolajjal (23. ábra alapján: $R_a = 1,24 \mu$) az átlagos felületi érdesség javítható az 5 tf %-os emulzióval történő árasztásos hűtéshez képest ($R_a = 1,64 \mu\text{m}$).

A két diagram közti különbséget az adja, hogy a mérésnél a 3. mérési hely előtt érte el a

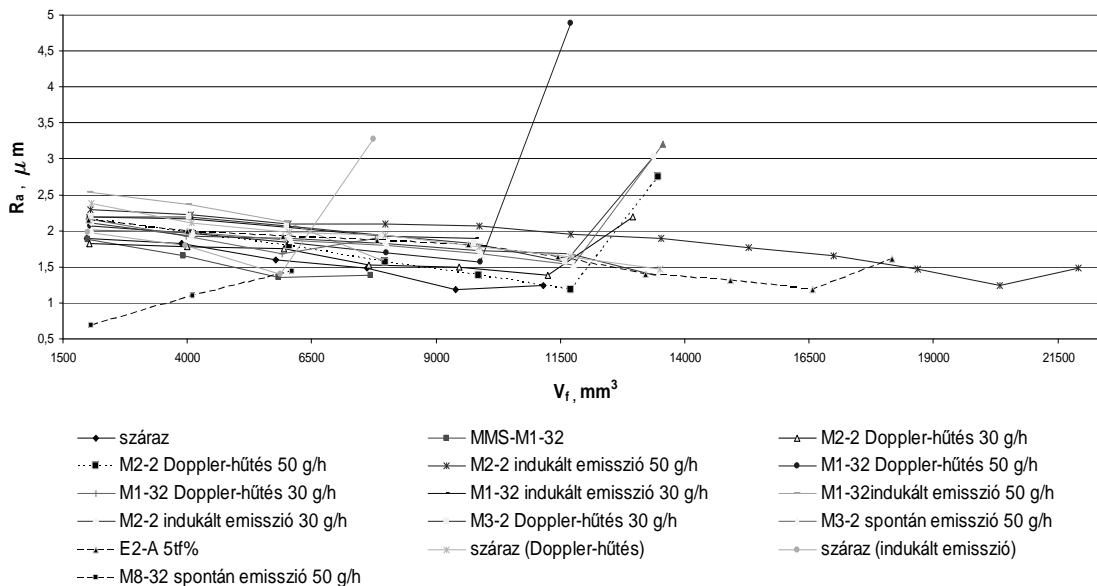
kés a hátkopás maximális értékét. A felületi érdesség változásának matematikai összefüggése minden esetben a következő:

$$f(x) = \begin{cases} a_1x + b_1 & \text{ha } A \leq 100 \\ a_2x + b_2 & \text{ha } A \geq 100 \end{cases}$$

ahol: „A” a 3-as mérési pont távolságát jelöli (3. ábra).

Az összefüggés alapján a 24. ábra bemutatott diagramból látható, hogy a leválasztott forgácstérfogat függvényében az átlagos felületi érdességnek, létezik egy javuló és egy romló szakasza.

A 25. ábrából kiderül, hogy az elvégzett kísérleteim során a C14-es n-paraffinnal (M2-2) és molekulamanipulációval (indukált emisszió) érhető el a forgácsleválasztás szempontjából a legjobb eredmény.



25. ábra Összesített diagram az átlagos felületi érdesség és a leválasztott forgácstérfogat között

A hatékony forgácsoló technológia fejlesztése a mérettartás és a felületminőség egyre fokozódó követelményeihez kapcsolódva az egyre növekvő forgácsolási sebesség és előtolás irányába halad.

A következő értékelési pont a gyártmányok (munkadarabok) mérettartására vonatkozott. Itt a vizsgálati helyeken mért átmérőkből átlagot számoltam, majd megállapítottam az átlaghoz képest a felső és alsó eltéréseket. Ezt követően meghatároztam a szabványból, hogy a kapott értékek milyen tűrésfokozathoz tartoznak. Egy ilyen átmérő állandóság (mérettartás) meghatározására egy példát a következőkben mutatok be.

1. 92,22 ^{+0,13} _{-0,14}	2. 90,23 ^{+0,13} _{-0,14}	3. 88,33 ^{+0,1} _{-0,19}	4. 86,30 ^{+0,14} _{-0,13}
5. 84,44 ^{+0,13} _{-0,14}	6. 82,59 ^{+0,06} _{-0,09}	Az átmérők pontossága megfelel az IT7-es pontosságnak.	

Természetesen a már említett példán túl jobb, IT4-es pontossági osztályú mérettartás is előfordult. Ezen eredményt a következő kísérleteknél kaptam:

- száraz-kenés Doppler- hűtéssel
- MMS-kenés esetén a piacon kapható legjobb terméknél (kísérleti kód: M1-32) Doppler-

- hűtéssel 50 g/h kenőanyagmennyiségénél
- MMS-kenés esetén a piacon kapható legjobb terméknél (kísérleti kód: M1-32) indukált emisszió alkalmazásával 50 g/h kenőanyagmennyiségénél
- kísérleti MMS-kenőanyaggal (kísérleti kód: M2-2) indukált emisszió alkalmazásával 50 g/h kenőanyagmennyiségénél.

IT2-es pontossági osztályba sorolható eredményt egy esetben kaptam:

- MMS-kenés esetén a piacon kapható legjobb terméknél (kísérleti kód: M1-32) Doppler-hűtéssel 30 g/h kenőanyagmennyiségénél.

Az eredmények elemzése alapján kijelenthető, hogy az általam alkalmazott hűtési módok befolyással vannak a munkadarabok mérettartására, így megvalósul a kész munkadarab mérettartása is.

3.5. Krisztallit-módosulás értékelése

A forgácsolásnál bevitt energia nagy része a rendkívül bonyolult deformáció és feszültségi viszonyok kiegyenlítésére kell, a kisebb része, 3%-a pedig krisztallit-módosulást hoz létre. Az elkészített csiszolatokból a következő módszer alkalmazásával láthatóan mutatom be a krisztallit-módosulást.

Terjedelmi korlátok miatt csak a jellegzetes technológiákhoz tartozó 50 µm-es csiszolatok képét mutatom be egymással összehasonlítva. A 26-31. ábrákon a sötétebb tartomány mutatja az alapréteget, a világosabb tartomány mutatja azt a réteget, ahol a megmunkálás hatása észlelhető.

A 26. ábrához tartozó mérésnél árasztásos kenést alkalmaztam 5 tf %-os emulzióval és spontán emisszióval a munkadarab hűtésére. A szemcsék mérete nagy, az átmenetnél a szemcsék deformáltak, a translációs sík kismértékben látható.

A 27. ábrán száraz hűtéssel, spontán emisszióval hűtöttem a munkadarabot. A szemcsék mérete szintén nagy, az átmenetnél a szemcsék deformáltak, a translációs sík jól látható.

A 28. ábrán a száraz hűtés indukált emisszió használatával végzett kísérlet csiszolatát mutatom. A szemcsék mérete nagy, az átmenetnél viszont nagymérvű deformáció ill. a translációs sík nem látható.

A 29. ábrán a száraz hűtéssel a Doppler-hűtés használatával végzett kísérlet csiszolatát mutatom. A szemcsék mérete kisebb, mint az indukált emisszió használatánál, az átmenetnél viszont a szemcsék mérete kisebb és kisebb mérvű deformáció figyelhető meg, a translációs sík nem látható.

A 30. ábrán MMS-kenést használtam spontán emisszióval egy piaci csúcstermékkel. A szemcseméret nagy, az átmenetnél szemcse-deformáció nem figyelhető meg. A translációs sík jól látszik.

A 31. ábrán egy az általunk készített törzsoldattal történő MMS-kenést használtam, indukált emisszióval. A kenőanyag felhasználás 50g/h volt. A szemcseméret kisebb, az átmenetnél nagymérvű deformáció figyelhető meg. A translációs sík enyhén látható. Súrlódás és kopás szempontjából kedvező szövetszerkezet.

Elmondható, hogy a 26., 27. és 30. ábrákon a translációs sík látható és a sík közelében a szemcsék deformációja nagymérvű. Azonban amikor a molekulamanipulációt indukált emisszióval vagy Doppler-hűtéssel hoztam létre (28., 29. és 31. ábra), akkor a szemcsék finomabbak, a translációs sík nem, vagy alig látható és az átmenetnél a szemcsék deformációja kisebb mérvű.

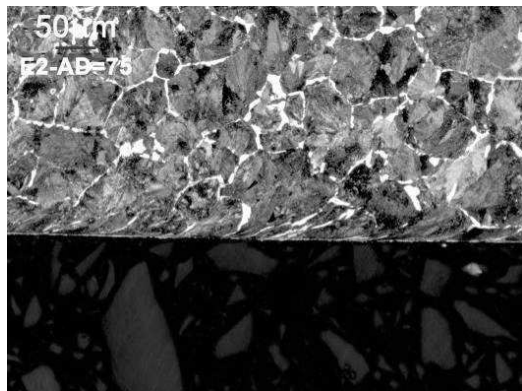
Olyan esetekben, amikor a krisztallit módosulás durva szemcsés és a felszín alatti rétegben – τ_{\max} síkjában – diszlokáció jön létre, akkor a felszínről kiinduló anyagkifáradási idő – aminek megjelenési formája a kagyló alakú pitting – lecsökken.

Felületi edzés esetén, amennyiben az átédzett réteg mélysége megegyezik a maximális τ feszültség síkjával, akkor a felületi anyagkifáradás felgyorsul, bizonyos esetekben akár néhány 10 óra után teljes felületi pusztulás következhet be. MMS-kenéssel optimális technológiai paraméterek

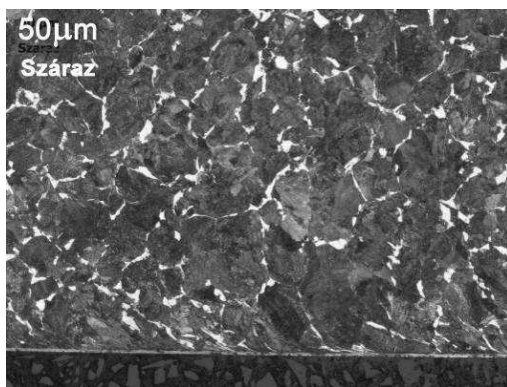
mellett az anygmódosulások káros hatásai teljes egészében kiküszöbölhetők.

A forgácsolás közben bekövetkező kristálymódosulások nem feltétlen károsak, mivel ismert, hogy az irányított igénybevétel esetén egy nagyon jó súrlódási tulajdonsággal és kopáscsökkentő hatással rendelkező dendrites szövetszerkezet alakulhat ki.

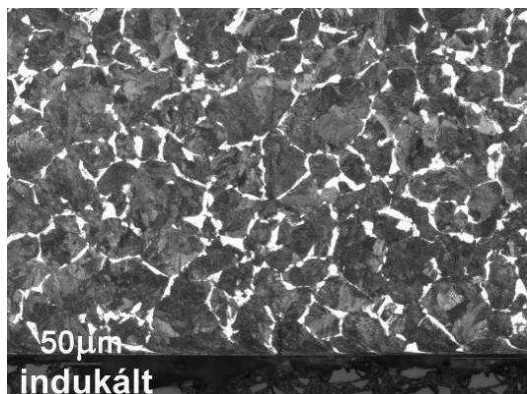
A kísérleteim azt is igazolták, hogy ha a felszín alatti réteg finomszemcsés módosuláson megy át, akkor kimutatható diszlokáció nem jön létre.



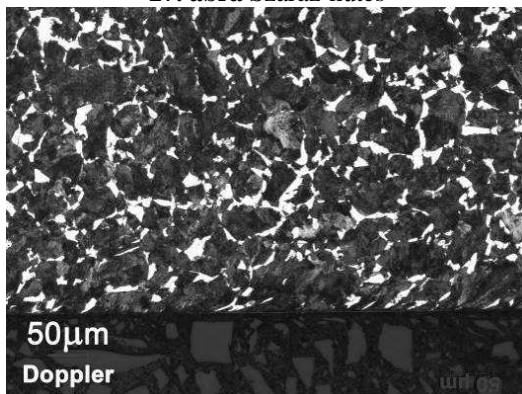
26. ábra 5 tf%-os emulzió



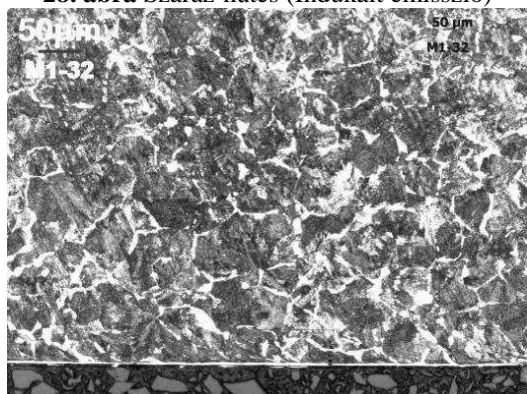
27. ábra Száráz-hűtés



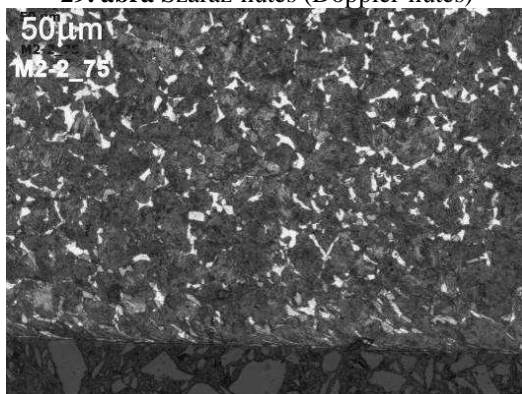
28. ábra Száráz-hűtés (Indukált emisszió)



29. ábra Száráz-hűtés (Doppler-hűtés)



30. ábra MMS-kenés (50 g/h)

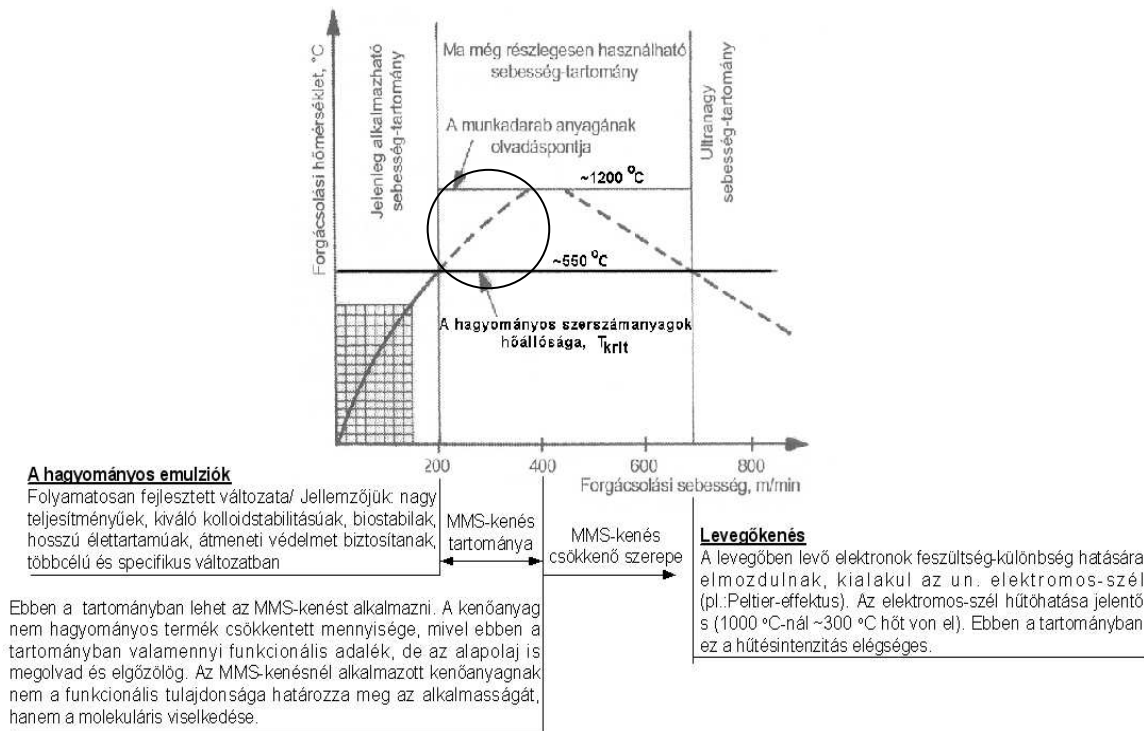


31. ábra MMS-kenés
(M2-2, Indukált emisszió, 50 g/h)

Végkövetkeztetés

Az új szemléletű kibővített forgácsolási megmunkálás koncepcióját az 1. ábrán fogalmaztam meg. A kísérleti eredmények feldolgozása után mint összefoglaló eredményt a 32. ábrán mutatom be. A 32. ábra három jól elkülöníthető részre osztható.

Az első rész a hagyományos hűtési eljárással történő forgácsolást mutatja be. A forgácsoláshoz ennél a szakasznál emulziót alkalmazunk. A folyamatosan fejlődő emulziók legfőbb jellemzője, hogy környezetbarát, nagy teljesítményű, kiváló kolloidstabilitású, hosszú élettartamú legyen. Ebben a tartományban a forgácsoló sebesség max.: 200 m/min.

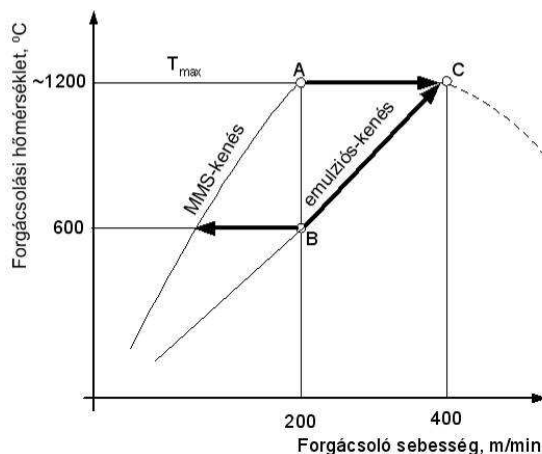


32. ábra Az új szemléletű forgácsolási megmunkálás koncepciója

A következő tartomány az ún. átmeneti szakasz, ahol az árasztásos hűtés mellett már MMS-kenést alkalmazhatunk. Az MMS-kenőanyag viszont nem a hagyományos termékek csökkentett mennyisége, mivel ebben a tartományban valamennyi funkcionális adalék, de még az alapolaj is megolvad és elgőzölög. Az MMS-kenésnél alkalmazott kenőanyagoknak tehát nem a funkcionális tulajdonsága határozza meg az alkalmasságát, hanem a molekuláris viselkedése. A forgácsoló sebesség tartománya $200 < v_c < 400$ m/min között van.

A 33. ábrán az egymás mellett használt két hűtési eljárással milyen úton juthatunk el a jövő célkitűzésének megfelelően a száraz megmunkáláshoz.

Az ábrán jól követhető, hogy az MMS-kenés esetén az A ponton keresztül jutunk el a C pontba szabályozott hűtés mellett, emulziós kenést alkalmazva erősen túlhűtve a B pontból egyenes vonalon jutunk el a C pontba.



33. ábra A hűtési mód hatása a forgácsolási hőmérsékletre

Amint az közismert a relatív alakváltozások (ε) – az anyagvizsgálatoknál előforduló értékeknek - a többszöröse.

($0,035 < \varepsilon < 1,0$) anyagvizsgálatok $1 < \varepsilon < 6$ forgácsolási tartomány ($1 < \varepsilon \leq 6$)

Az $\varepsilon = 1$ értéknél adjuk meg a $k_{c1,1}$ fajlagos forgácsoló erőt, ahogy ezt részletesen ismertetésre kerül az 1.1.2. fejezetben. A számításoknál alkalmazott összefüggések alakképlete:

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \varepsilon^m,$$

ahol:

- τ_1 - anyagra jellemző csúsztatófeszültség [MPa]
- ε - a relatív alakváltozás [-]
- m – anyagfüggő kitevő [-], értéke 0,16 – 0,25 között változik, átlagos értéke 0,2.

Vagyis az elméleti fajlagos forgácsolóerő közvetetten az anyag szakítószilárdságától ($\tau_1 = 0,8 \cdot R_m$), az „ m ” kitevőtől és „ ε ” –t alapvetően befolyásoló h forgácsvastagságtól, továbbá a forgácsoló sebességtől függ.

Kutatási eredményeim feldolgozásánál – már az előzőkben ismertetésre került – lgh – l g_k koordináta rendszerben ábrázoltam k_c értékeket (amely egy egyenes) és ezt tekintem alaphelyzetnek. Ehhez viszonyítva adtam meg a változó paraméterek hatására bekövetkező fajlagos forgácsolóerőt. Az elvégzett sorozatvizsgálataim azt is bizonyítják, hogy az energia-felhasználásban bekövetkező változások egyértelműen összefüggésbe hozhatók a felületi energiaszinttel. Einstein megállapítása szerint viszont az energia lineárisan függ a elektromágneses frekvenciától (ν) a változások pedig „ h ” függvényében párhuzamosak és valamennyi fémfelületre azonosak.

A szűk frekvencia-tartományra korlátozódó látható fény, és az alkalmazott még nem ronsoló lézer frekvenciája is állandó. Ebből következik, hogy az új szemléletű forgácsolási megmunkálás energia szintje adott feltételek mellett azonos, tehát a különböző fémek k_c alapegyeneshez viszonyított változás %-os értéke is azonos.

Kimondható, hogy a **kibővített új szemléletű forgácsolási megmunkálás elmélete egyetemleges.**

Kísérleteim többségét ebben a tartományban végeztem el és a kenőolaj (amely nem a hagyományos adalékolási, hanem ún. modell-folyadék) mennyiségének csökkentése (50 g/h-ról 30 g/h-ra) mellett egyre jobban elértem a harmadik tartományt. A harmadik tartományban, már csökken az MMS-kenés szerepe, tehát a felhasznált kenőanyag-mennyisége minimálisan keresztül nullára csökkenthető, vagyis a szárazmegmunkálás tartományba érhetünk. Azt is mondhatom, hogy ezek a kísérletek hozzájárulhatnak a **forgácsolás paradigmaváltásához.**

3.6. Az új tudományos eredmények

1. Tézis A kísérleteimmel megalapoztam egy új módosított forgácsleválasztási elméletet és kiegészítettem az energiaátalakítási folyamat elemzésével.

1.a.) A kísérletekkel bizonyítottam, hogy elektromágneses hullámokkal manipulálható az energiaátalakulás folyamata, ezt bizonyítja a mért és az elméletileg számított eredmények közötti rendkívül erős korreláció ($r > 0,95$). A molekulamanipulációval lokálisan és egymástól függetlenül módosítható a termo-plaszticitás és az alakítási keményedés.

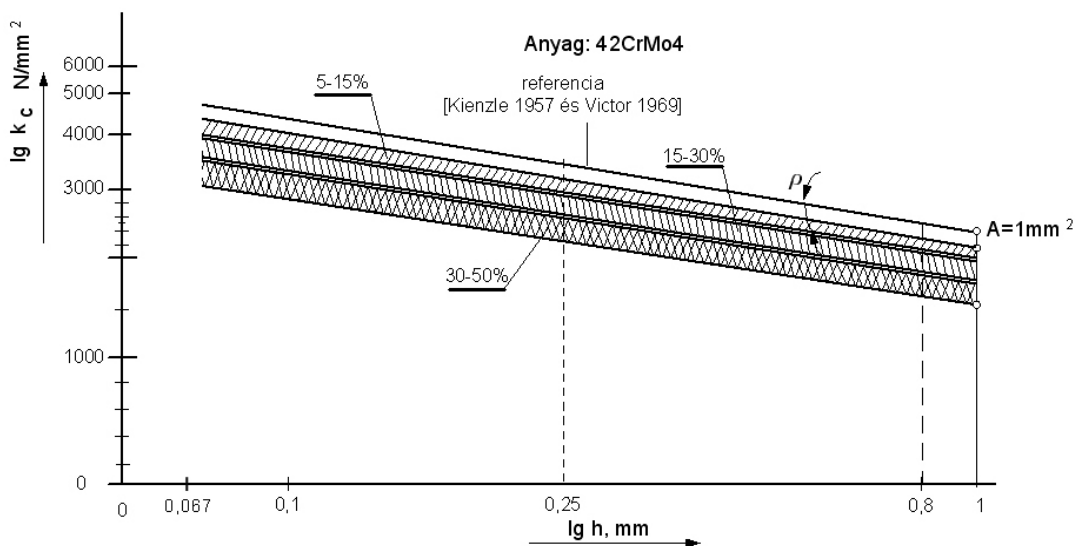
1.b.) Kísérleti úton bebizonyítottam, hogy a forgácsolási zónában lejátszódó energiaátalakulás adott, speciális hűtő-kenő folyadék alkalmazása esetén szabályozható, ha az indukált emissziót látható fénnel ($\lambda = 10^{-6}$ m és a $10^{14} < f < 10^{15}$ Hz) hozzuk létre, illetve lézerrel ($P < 1$ mW, $\lambda = 630-680$ nm) energia-elvonást (hűtést) valósítunk meg. Trendjelleggel az is bizonyítható, hogy a kisebb hullámhosszú ($\lambda = 10^{-8}$ m) és nagyobb frekvenciájú ($f = 10^{17}$ Hz) röntgen sugárzás alkalmazásával (γ -foton) az eredmények még fokozhatók. A kibővített új szemléletű forgácsleválasztási elmélet egyetemleges.

2. Tézis Kísérletekkel egyértelműen igazoltam, hogy 42CrMo4-es anyag esetén (az új eljárás valamennyi forgácsolható anyagra kiterjeszhető) a fajlagos forgácsolóerőt (k_c) az MMS-kenéssel

jelentősen csökkenteni lehet, ha k_c ($k_c = \frac{k_{c1,1}}{h^m} = \frac{F_c}{h \cdot b}$) összefüggésében az egyes jellemzők a megadott határok között változtak ($230 < F_c < 920$ N; $0,067 < h < 1$ mm; $b \leq 1$ mm).

Az eltérő technológiai jellemzőkkel végrehajtott forgácsolási kísérleteim alapján megállapítottam, hogy a forgácsolás során a fajlagos forgácsolási erő csökkenésében a következő jellemző tartományokat lehet elhatárolni (34. ábra):

2.	k_c csökkenés [%]	hűtési mód	kenőanyag	viszkozitás [mm^2/s]	kenőanyag-mennyiség [g/h]
2.a.)	5 - 15	indukált emisszió	vegyes bázisú, adalékolt <i>ásványolajjal</i>	2 - 32	50
2.b.)	16 - 30	spontán emisszió	5 tf%-os emulzióval (az emulzol a kereskedelmi forgalomban kapható legjobb termék)	emulzol viszkozitása >28	elárasztásos
2.c.)	31 - 50	Doppler-hűtés	92 tf%-os C14-es n-paraffin + 8 tf%-os laurilalkohollal	2 - 7	30



34. ábra A fajlagos forgácsolóerő csökkenés

3. Tézis Elemeztem a korszerű szerszámbevonatok energia-szintjét és megállapítottam, hogy a poláris energiahányaduk közel azonos, változásukat főleg a kenőanyag adalékból visszamaradó - kémiailag módosult - szennyeződések módosíthatják (általában rontják). A felület profilteljességi-tényezője $K_h \sim 96$ %-os, ami azt jelenti, hogy a felület ABBOTT-féle olajtároló képessége közel nulla. Ezeket a kedvezőtlen körülményeket kenőanyag minőséggel, technológiai paraméterek beállításával stb. kompenzálni kell. A kompenzáció azért szükséges, hogy a molekulamanipuláció által előidézhető hatások érvényre jussanak.

4. Tézis Többirányú kísérletek és elemzések ékesen bizonyítják, hogy az MMS-kenőanyag alap és járulékos követelményei jelentősen eltérnek a hagyományos emulziók és vágóolajok követelményeitől. Nem kell számolni a (4 – 6) s-os élettartamú olajok időfüggő tulajdonságaival.

4.a.) Megállapítottam, hogy az MMS-kenőanyagoknak nagyon jó terülő-, vagyis nagyon jó nedvesítő-képességgel ($\alpha < 30^\circ$) kell rendelkeznie és erős kötéssel kapcsolódnia a szerszám felületéhez ($\sigma = 32$ mN/m).

4.b.) Bizonyítottam, hogy azok a kenőanyagok adnak MMS-kenés esetén jobb eredményeket, amelyek egy poláris fejből (-OH, -COOH, -NH₂ stb.) és hozzá kapcsolódó telített, azonos szénszámú, lineáris, apoláros szénhidrogénből állnak, vagyis amfipatikus molekulák. Ilyen kenőanyag alkalmazása esetén épül fel a felületen leggyorsabban és sérülésmentesen a szükséges orientált polimolekuláris kenőanyag-réteg.

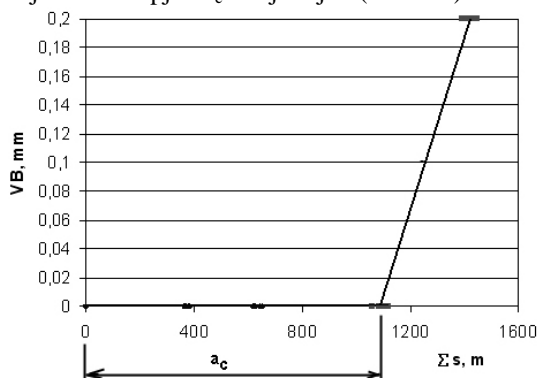
4.c.) Megállapítottam, hogy az MMS-kenés akkor a leghatékonyabb, ha 4 -5 s alatt párolgás és ionizációs úton maradék nélkül eltávozik a felületről.

4.d.) Kísérleteim során egyértelműen bizonyítható volt, hogy a kenőanyagok kezdőforrójának ill. a desztillációs görbe jellegének van a legnagyobb jelentősége. Két alaptípust különböztetünk meg:

- ásványi alapolajok és
- észterolajok.

Az MMS-olajoknak stabil törésmutatóval kell rendelkeznie, nagysága $n = 1,51$.

5. Tézis Kutatásaim bizonyították, hogy a megmunkáló szerszámokon – a gépelemekre jellemző - három szakaszra osztható klasszikus kopási folyamat nem alakul ki. A megmunkálásnál keletkező szerszámkopás lefolyása párhuzamos a vízszintes tengellyel és erre az ún. **alapkopásra** szuperponálódnak a „forgácsoló sebesség függvényében” a különböző hatásmechanizmusú kopások (ilyenek pl.: adhéziós, revésedés és nagy forgácsoló sebességeknél diffúzió, stb.). Bevonatos keményfémszerszámokon az alapkopás molekuláris szinten, mint fémátvitel jelenik meg és 400 m/min forgácsoló sebességeknél – ha a szerszám és a munkadarab között kohászati affinitás van – diffúzió. Egyéb járulékos kopások nem alakulnak ki. A kopás megjelenési formája; a fényesedés. A szerszámiban - folyamatos használat esetén - energia akkumulálódik, amely egy idő után „a harmadik” test iniciálásának hatására robbanásszerűen, törésés kopást idéz elő. Az addig megmunkálási hosszát (amit megadhatunk tömegben, időben stb.) tekinthetjük a szerszám élettartamának és a kerámiákra jellemző élettartam jelölése alapján a_c -vel jelöljük (35. ábra).



35. ábra A a_c szakasz értelmezése

Az első törési pont után rendkívül intenzívvé válik a törésés kopás, ami már felületminőség romláshoz és energia-szint emelkedéséhez vezet. Az első törési pont nem paraméterfüggő, hanem rendszer-jellemző, amely fordított arányban van a forgácsleválasztás megvalósulásának energia-szintjével.

6. Tézis Kísérletileg bizonyítottam, hogy a Hamiltoni-elvnek megfelelően, a forgácsleválasztás minimál-energia-szinten megy végbe. Ekkor a felszín közeli rétegekben finomszemcsés kristallitmódosulások jönnek létre, kialakul a kiváló sűrűdési tulajdonsággal és kopáscsökkentő hatással rendelkező ún. dendrites szövetszerkezet, továbbá a felszín alatt levő τ_{max} síkban sem jön létre diszlokáció.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

4.1. A kutatási tevékenység összefoglalása

A gépek, gépelemek kenési technológiákban már több mint 60 éve erős törekvés mutatkozik a kenőanyagfelhasználás minimálására. Jól definiált körülmények között már széleskörűen használják. A kenőkészülékek ellenben jelentős fejlődésen mentek át.

Jelenleg, mind a gyakorlatban, mind a tudományban, itthon és külföldön egyaránt keverednek a fogalmak. Mísem bizonyítja jobban ezen állítást, mint az hogy néhány kutató kolloid rendszerekkel végez kísérleteket, holott az MMS-kenés lényegéből adódóan egységes molekula rendszerű anyagok alkalmazhatók eredményesen.

Az irodalmi összefoglaló alapján, a jelenleg alkalmazott és széleskörűen elterjedt forgácsolási technológiák hiányosságait fogalmaztam meg, elsőként a forgácsolási folyamatok energiapazarló jellegét. Ezt követően összefoglaltam a forgácsolási technológiák és kapcsolt elemeinek fő irányait, ebben a fejezetben többek között egy újszerű emulzió-kezelési technológiai kialakításának leírását adtam közre.

Kutatási munkám során megfogalmaztam a forgácsleválasztás új szemléletű alapjait, majd elkészítettem a kutatás elméleti kísérleti programját. Ezek után az elméleti kísérleti programot – a kísérleti feltételek korlátozottsága miatt – erősen szűkíteni kellett. A jelentős szűkítést azonban igyekeztem úgy végrehajtani, hogy az a kutatási program tartalmát kevésbé érintse. Ezért a rendszerjellemzők közötti kapcsolatok erősségének sorrendjében hajtottam végre a szűkítést. Egyidejűleg a párhuzamos kísérletek számát a „még elégséges” szintre redukáltuk.

Bemutattam a kísérletbe bevont kenőanyagok műszaki és biztonsági jellemzőit, a kísérleti feltételeket, - eszközöket, méréseket (főforgácsolóerő, fordulatszám, hőmérséklet), a vizsgálatok hitelesítését és reprodukálhatóságát.

A 3. fejezet a kísérleti eredmények feldolgozását és értékelését tartalmazza. Elsőként az energiaszükséglet- és megoszlás a forgácsolási hőmérséklet nagysága és eloszlása alapján. Vizsgáltam a kenőanyagok szerepét az MMS-kenésben. A következő részben vizsgáltam a szerszámkopás mechanizmusát, értékeltem a kísérleti eredményeket a felületi érdesség és mérettartás alapján. végzetül értékeltem az elkészült csiszolatok felvételein a krisztallit-módosulásokat.

Az utolsó fejezetben pedig az elvégzett kísérletek eredményeinek feldolgozása és értékelése alapján új tudományos eredményeket fogalmaztam meg, amelyeket külön téziszűzetben is összefoglaltam. Végezetül javaslatokat tettem az elért eredmények gyakorlati hasznosítására.

4.2. A tudományos eredmények gyakorlati alkalmazhatósága, következtetések, javaslatok

A disszertáció a forgácsoló megmunkálás három lehetséges irányának eredményeit mutatja meg.

Új „recycling”-technológia

A dolgozatban bemutatott új technológia lényege, hogy az emulzióellátó rendszer kialakí-

tásával külön beavatkozás nélkül biztosítjuk az emulziók stabilitást. Ezzel az emulziók "sebezhetősége" csökken, az egyenletes teljesítőképesség megtartása mellett. Újra kell értelmezni az emulziók élettartamát, amely nem a gépbe való betöltéstől a gépből való kivételig tart, hanem folyamatos.

Tehát az élettartamot ne a gyártási technológia határozza meg, hanem az anyag mérlegből kiszámítható használati idő. Ez lehetővé teszi az eddig külön alkalmazott – sok esetben a felhasználási helytől távol eső – főleg vegyszeres bontás elhagyását és helyben a folyamatos, gazdaságos vízelvétel megvalósításával az emulzió 92-98 %-át kitevő víz, mint értékes komponens visszanyerését.

Az új technológia lehetővé teszi, hogy az anyagok a lehetőségekhez képest az üzemben cirkuláljanak és felhasználás után ne kerüljenek ki az üzem területéről. A vizet ne utazzassuk többször is, hanem annak teljes körforgását valósítsuk meg az energiatakarékos víz-visszanyerő, környezetkímélő desztilláló berendezés technológiai folyamatba iktatásával.

Környezetvédelem

A komponensek elhelyezéséről gondoskodni kell. Vegyük pl.: a vizet. Minőségi vizet vásárolnak az üzemek az emulziókészítéshez, beszállítják, felhasználják, majd az emulziókat szállítják a bontóba, ahol környezetszennyező savas technológiával megbontják, a kapott vizet még egy adszorpciós koagulációs technológiával a finoman diszpergált olaj- és zsiradékreszecséktől megszabadítják, hogy megfeleljen a 28/2004.(XII.25.) KvVm rendelet szennyvizek kibocsátási követelményeinek, majd csatornába engedik. A legutolsó műveletben keletkező hidroxid iszapok rendkívül ártalmas és az ártalmatlanítási költsége igen nagy.

Az országban, egy évben kb. 400000 tonna elhasznált emulzió keletkezik, amelyet többször utazzatnak az ország közútjain, felhasználás közben folyamatosan és egyre drágább segédeszközökkel ellenőrzik a minőségi változást, költséges és erősen környezetszennyező technológiával megbontják, póttechnológiát iktatnak be, hogy a víz a csatornába engedhető legyen.

Ebből kiindulva az emulzió felhasználási helyén végrehajtható víz-visszanyerésre dolgoztuk ki egy energia-takarékos desztilláló berendezést, amellyel az elhasznált emulzióról helyben ledesztillálható lenne a víz, amely mint előkezelt komponenst újra hasznosítható az emulziógyártáshoz. Ezzel az új eljárással az alkatrész árában a jelenlegi ~17 %-kal szereplő emulzió + kezelési költségek közel harmadára, kb. 6 %-ra csökkenne.

Új szemléletű forgácsolás

A forgácsleválasztási folyamatra kidolgozott egyetemleges elmélet kibővíthető más anyagokra is, mi több más súrlódó rendszerekre is mint pl.: a bevonatolt kerámia-tárcsás fékrendszerekre, motor szelepre, hidraulikák azon elemeire, amelyeknek tömítő funkciójuk is van és a vezérlő elemek sarkai nem koptanak.

Valamennyi új ismeret, vagy régi ismeretek új értelmezése, minél előbb kerüljön be a szakterületi felsőszintű oktatásba és menjenek át a gyakorlatba, pl.: géptervezés, kenőanyag-fejlesztés stb..

A tudományos eredmények oly mértékben kapcsolódnak a gyakorlathoz, hogy azonnal konkrét technológiák dolgozhatók ki. Ilyenek:

- az alkalmazott MMS-kenés mennyiségének meghatározása
- optimális technológiai paraméterek meghatározása
- kenőanyag molekuláris viselkedésének alkalmazása
- átmenet a nedves kenésből a légkenésbe
- a forgácsolási technológiában bekövetkező paradigmaváltás alapirányát határolja be és konkrét ismereteket ad a műszaki megoldásokhoz.

5. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

Folyóirat cikkek:

- *Lektorált cikk világnyelven:*

[1.] A. KÁRI-HORVÁTH, I. Valasek (2009a): Machining: some new aspects, R&D Mechanical Engineering Letters, 75-87.p., HU ISSN 2060-3789, CD-ROM ISSN 2060-3797

[2.] A. KÁRI-HORVÁTH, I. Valasek (2009b): Developing directions and utilization technology of cooling-oiling liquids from environmental effects, R&D Mechanical Engineering Letters, 324-331.p., HU ISSN 2060-3789, CD-ROM ISSN 2060-3797

[3.] A. KÁRI-HORVÁTH, I. Valasek, I. Zsoldos (2009): The effect of the molecule manipulation on the lifetime of the product, R&D Mechanical Engineering Letters, 34-42.p., HU ISSN 2060-3789, CD-ROM ISSN 2060-3797

- *Lektorált cikk magyar nyelven:*

[4.] Valasek I., Pálffy A., KÁRI-HORVÁTH A. (2007):Minimálkenésű (MMS) forgácsolási jellemzők meghatározása, Gépgyártás XLVII. Évfolyam, 2-3. szám, 47-56. p., HU ISSN 0016-8580

[5.] Valasek I., KÁRI-HORVÁTH A. (2007a):Az üzemi emulziókezelési technológia felülvizsgálata és fejlesztési irányának meghatározása, Gépgyártás XLVII. Évfolyam, 5.szám (I. rész) 18-25. p., HU ISSN 0016-8580

[6.] Valasek I., KÁRI-HORVÁTH A. (2007b):Az üzemi emulziókezelési technológia felülvizsgálata és fejlesztési irányának meghatározása, Gépgyártás XLVII. Évfolyam, 6.szám (II. rész) 26-33. p., HU ISSN 0016-8580

[7.] Valasek I., KÁRI-HORVÁTH A. (2008):Az üzemi emulziókezelési technológia felülvizsgálata és fejlesztési irányának meghatározása, Gépgyártás XLVII. Évfolyam, 1-2. szám (III. rész) 53-59. p., HU ISSN 0016-8580

[8.] KÁRI-HORVÁTH A., Valasek I. (2009a): Az üzemi emulziókezelési technológia felülvizsgálata és a gyorsvizsgálati módszerek alkalmazása, Gép, LX. évfolyam 4-5. szám, 105-111. p., ISSN 0016-8572

[9.] KÁRI-HORVÁTH A., Valasek I. (2009b): Energiatakarékos forgácsolás molekulamanipuláció alkalmazásával – Mezőgazdasági Technika, L. évfolyam, március 2-5. p., HU ISSN 0026 1890

Konferencia kiadványok:

- *Magyar nyelvű proceedings teljes terjedelemben:*

[10.] KÁRI-HORVÁTH A., Valasek I. (2008b): Forgácsolási segédanyagok, mint alattomos és rendkívül veszélyes környezetkárosító ágensek, VI. Alföldi Tudományos Tájgazdálkodási Napok, Mezőtúr, 2008. október 16-17. ISBN 978-963-87874-2-2 , ISBN 978-963-87874-1-5

[11.] KÁRI-HORVÁTH A., Valasek I. (2008a): A minimál (MMS)-kenés elméleti alapjainak bizonyítása, MTA-AMB 2008. évi XXXII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, Gödöllő, 2008. január 22. Kiadvány p.189-194. ISBN 978-963-611-449-7

- *Magyar nyelvű abstract:*

[12.] Valasek I., KÁRI-HORVÁTH A. (2007): „Szerszámgépek, Szerszámok, Szerszámanyagok” konferencia a MACH- TECH 2007 kiállításon: Forgácsoláshoz használt hűtő-kenő folyadékok szerepének felülvizsgálata, Budapest 2007. május 10.

[13.] KÁRI-HORVÁTH A., Valasek I. (2006):Fotonenergia alapon megvalósított minimálkenésű (MMS) forgácsolási jellemzők meghatározása (Abstrac) – SZIE TDK Előadásainak összefoglalói, Gödöllő ISBN-10: 963-9483-70-2, ISBN-13: 978-963-9483-70-5

Könyv, - részlet, szerkesztés:

- *Magyar nyelvű könyv, részlet:*

[14.] Zsidai L., Kakuk Gy., KÁRI-HORVÁTH A., Szakál Z. (2008): Gyártástervezés, NSZFI, Budapest NS 108 0276 06 005-1