

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet
Gépgyártástechnológiai Tanszék



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**Környezetkímélő gyártás (Green
Manufacturing) alkalmazása egzotikus
anyagok forgácsolásakor**

Szerző: **Szikora Péter**
gépészmérnöki szak, IV. évfolyam

Konzulensek: **Dr. Sipos Sándor**
mestertanár
Csuka Sándor
intézeti mérnök

Budapest, 2014.

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	2
1. GREEN MANUFACTURING, AZ EGZOTIKUS ANYAGOK	3
1.1 Környezetkímélő gyártás elemzése.....	3
1.2 Minimálkenés.....	5
1.2.1 Minimálkenésre használható anyagok.....	5
1.2.2 Minimálkenés adagolásának módjai.....	6
1.3 Egzotikus anyagminőségek.....	8
1.3.1 X6CrNiTi1810 jelű anyagminőség.....	8
1.3.2 GTD jelű, HRSA anyagminőségek.....	9
2. VIZSGÁLATI KÖRÜLMÉNYEK, A TESZTELT SZERSZÁM	10
2.1 Vizsgálati körülmények leírása	10
2.2 Szerszámteszteket megelőző műveletek	11
2.3 A tesztelt szerszámok.....	12
3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK	13
3.1 Adatvariációs technológiai kísérletek	13
3.1.1 Adatvariációs technológiai kísérlet X6CrNiTi1810 anyagminőségen	13
3.1.2 Adatvariációs technológiai kísérlet GTD-241 anyagminőségen	15
3.1.3 Adatvariációs technológiai kísérlet GTD-262 anyagminőségen	16
3.1.4 Adatvariációs technológiai kísérletek összegzése	18
3.2 Hosszú időtávú forgácsolási kísérletek	19
3.2.1 Kopásvizsgálat minimálkenés alkalmazásával	19
3.2.2 Kopásfelvételek a kis hűtőcsatornájú maróról.....	22
3.2.3 A kopás és az erőkomponensek alakulása a kis hűtőcsatornájú szerszámnál.....	24
3.2.4 A vizsgált szerszámok eredményeinek összegzése:	26
3.3 Különböző hűtési módozatok összehasonlítása	27
3.3.1 Nagy hűtőcsatorna vs. minimálkenés	27
3.3.2 Kis hűtőcsatorna vs. minimálkenés	28
4. ÖSSZEFOGLALÁS.....	30
5. FELHASZNÁLT IRODALOM.....	31
6. MELLÉKLETEK.....	33

BEVEZETÉS

Napjainkban, az egyre fejlődő fémmegmunkáló iparágban, ahol a nehezen megmunkálható anyagokkal foglalkoznak, egyre nagyobb jelentőséggel vizsgálják, hogy hogyan lehetne a gyártás költségén csökkenteni, valamint hogyan lehetne a gyártás során alkalmazott technológiák egyre környezetkímélőbb módszereit bevezetni. Nyugat-európában olyan környezetkímélő megoldásokat tesztelnek, amelyek képesek kiváltani az árasztásos hűtést, mégis megmarad környezetszennyező hatásuk, ilyen például a szerszám CO₂ való hűtése.

A dolgozatban olyan nikkelbázisú hőálló szuperötvözeteken és korrózióálló acélminőségen végrehajtott kísérletekről számolok be, amelyeken a hagyományosnak tekinthető környezetkímélő eljárást, a minimálkenést alkalmaztuk. Ez a hűtő-kenő módszer a legelterjedtebb az iparban, ahol környezetkímélő módon forgácsolnak, ezért is vizsgáltuk ezzel a módszerrel a szerszámokat.

Az alapvető célkitűzés az volt, hogy a környezetkímélő eljárással végzett vizsgálatok során kapott adatokkal bővítsük azokat az ismereteket, amelyek az egzotikus anyagféleségek marásáról rendelkezésre állnak. Az is a célkitűzések között szerepelt, hogy a szerszámgyártó által rendelkezésünkre bocsátott, még fejlesztés alatt álló újmarókon szerteágazó képességvizsgálatot hajtsunk végre és így fontos információhoz juttassuk a szerszámgyártót illetve a felhasználókat.

A szerszámtesztek egyenirányú sarokmarásra terjedtek ki. A vizsgálatok két fő részből tevődtek össze. Először a három anyagminőségen ún. rövid időtávú vizsgálatokat hajtottunk végre. Itt mértük a fellépő erőket, majd a szerszám által létrehozott palástfelület érdességi jellemzőit. A második részben, nikkelbázisú szuperötvözetben (GTD-262) ún. hosszú időtávú vagy más néven éltartam vizsgálatokat hajtottunk végre. Elsődlegesen a szerszámok kopását figyeltük meg és mértük hozzá a szerszámok által produkált erőket. A németországi szerszámgyártó fejlesztési részlegének kérésére a szerszámok belső hűtőcsatornáját is felhasználva elvégeztük a tesztek, majd a kapott eredményeket összehasonlítottuk a minimálkenésnél kapottakkal.

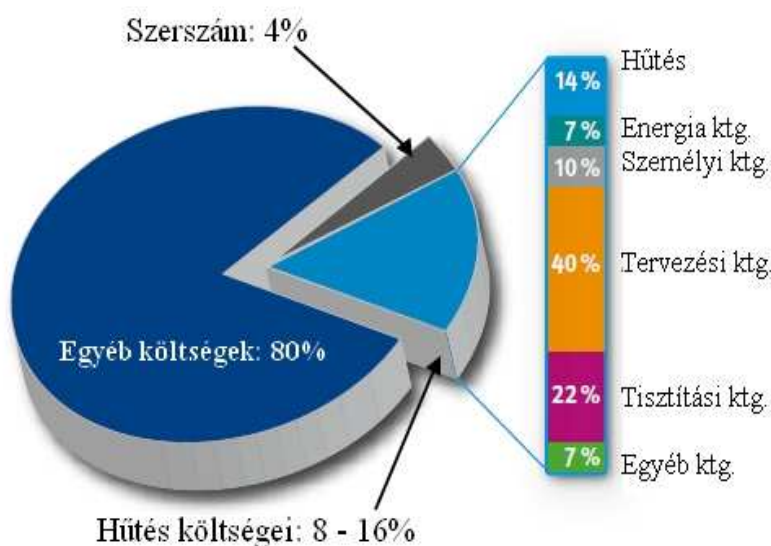
Ezúton is szeretnék köszönetet mondani a Walter Prototyp-nek, hogy támogatták a kutatási munkát szerszámokkal.

1. GREEN MANUFACTURING, AZ EGZOTIKUS ANYAGOK

1.1 Környezetkímélő gyártás elemzése

A forgácsolással foglalkozó üzemekben egyre több helyen fordul elő olyan környezetkímélő gyártási eljárás, amelynek segítségével a cég évente jelentős költséget takarít meg, illetve ezzel nagymértékben hozzájárul ahhoz, hogy az ökológiai lábnyoma kisebb legyen. Nem utolsó szempont a gépkezelő munkás egészségére gyakorolt hatás sem. Mivel a különböző emulziók és hűtésre használt káros anyagok a minimálkenés bevezetésével visszaszorulnak, így az egészségkárosító hatású anyagok emberi szervezetbe való jutása is minimalizálódik, ezzel egy egészségesebb légkört teremtve a dolgozó személyeknek. [1][2]

Több felmérésből és kimutatásból is kiderül, hogy a gyártási folyamatok 80 %-át a fő költségek viszik el (szerszámgép karbantartás, üzemi költségek, stb.), addig a hűtés a teljes gyártási költség 8–16 %-át érinti. Ez egy folyamatosan működő üzemben, egy gazdasági évet tekintve jelentős részét képezi a költségeknek. [3]



1.1. ábra
Gyártási folyamat
költségei, részletezve
a hűtési költségekkel
[3]

Az 1.1. táblázat tartalmazza a felmérésekből származó adatok egyes részeit. Egyértelműen láthatóvá válik, hogy a minimálkenő berendezést működtetni a gyártási folyamatok során sokkal jobban kifizetődőbb, mint az árasztásos hűtés alkalmazása.

	Árasztásos hűtés	Minimálkenés
Felhasznált energia	kb. 25.000 kWh/év	kb. 200 kWh/év
Időráfordítás (utántöltés, tisztítás, ellenőrzés, stb.)	30 óra/év	4 óra/év
Felhasznált HKF mennyiség	10.000 liter/év (emulzió)	60 liter/év (minimálkenő olaj)
1.1. táblázat Hűtési technológiák összehasonlítása (részlet) [1]		

A legelterjedtebb környezetbarát technológia a minimálkenés, illetve a CAG (Cold Air Gun) hűtés. Ezeket követi a szárazforgácsolás, valamint a szerszám CO₂-vel való hűtése. A legújabb, de még kevésbé elterjedt, az ún. Cryogenic technológia. Ezzel a hűtési módszerrel a szerszámot folyékony nitrogén segítségével -190°C körüli hőmérsékletre hűtik le forgácsolás közben. Ezt a hűtési módszert előszeretettel kombinálják a vállalatok a minimálkenéssel, mivel a kriogén hűtés nem ad megfelelő kenést a szerszámnak.



1.2. ábra
Cryogenic hűtés [4]

Mind a CO₂, mind pedig a Cryogenic hűtési módszer jóval költségesebb a többi hűtési módszerrel szemben, hiszen ezekhez különálló, jól szigetelő szerszámgépekre, megfelelő elszívó berendezéssel ellátott ipari egységekre van szükség. [4]

1.2 Minimálkenés

A minimálkenés azt jelenti, hogy a szerszámmra (a vágóélre) kis mennyiségben (5-50 ml/h között) juttatunk hűtő-kenő olajt, amely így az árasztásos hűtéssel szemben nagyságrendekkel kevesebb folyadék mennyiséget használ fel a forgácsolási folyamat során. [5]

A szerszám élének kenését ennél a módszernél jelentős kenő hatású HKF alkalmazásával lehet optimalizálni és forgácsolási szempontból hatékonyá tenni. A szerszám környezetében az ún. öblítő hatás a minimális folyadékmennyiség miatt nem jön létre, a forgács megfelelő kimosása csak „nyílt forgácstérben”, megfelelő légbefúvás mellett lehetséges.

A szárazforgácsoláshoz képest a minimálkenés megfelelő alternatívát nyújt az alábbi folyamatoknál [6]:

- ahol HKF nélkül gazdaságtalan a forgácsolás (pl. korrózióálló és HRSA anyagminőségek),
- ahol a forgács az anyagminőségtől függően összetapadhat.

1.2.1 Minimálkenésre használható anyagok

A hűtő-kenő közegként alkalmazható és a minimálkenésre alkalmas anyagokat a DIN 51385 szabvány tartalmazza. [7] Ez alapján minimálkenésre az alábbi vegyületeket lehet használni:

- Vízrel elegyet alkotó, főképp a hűtőhatást létrehozó anyagok,
- Vízrel elegyet nem alkotó, főképp a kenést létrehozó anyagok.

Az anyagok különböző kombinációi alapanyagból, kísérő- és adalékanyagból állnak össze.

Az *alapanyag* hozza létre a hűtő-kenő folyadék (HKF) legfontosabb tulajdonságát, a súrlódáscsökkentő (kenő) hatást. Ez lehet például növényi és állati eredetű olaj valamint ásványi olajból kivont alapolaj is. A technika fejlődésével egyre fokozottabban terjednek el a szintetikus bázisolajok. Legnagyobb előnyük, hogy a molekulaszervezetük miatt előre meghatározott mechanikai tulajdonságok állíthatóak elő vele és ezek bármikor reprodukálhatóak, tehát kiszámíthatóbbá teszik a gyártási

folyamatot. További előnyük még a nagy viszkozitás, a biológiai lebonthatóság és a környezetbarát jelleg.

Az alapanyagon kívül az *adalékanyagoknak* is fontos szerepük van az hűtő-kenő folyadék összetételében, ezek leginkább az alkalmazástechnikai tulajdonságokat javítják fel. Rengeteg fajta segédanyag található, ezek közül a 3 legfontosabbat említem meg. Mindhárom adalék elősegíti a szerszám gördülékeny munkáját, megóvjá az éleket és ez által segít meghosszabbítani az éltartamját.

Az első a *kopás ellen védő* anyagok (Anti-Wear-Additives), amelyek szobahőmérsékleten reakcióba lépnek a fémmel és azon egy olyan filmréteget hoznak létre, amely kopáscsökkentő tulajdonsággal rendelkezik (pl. foszfátok).

Hasonló adalékok a *súrlódáscsökkentők* (Friction Modifiers). Itt azonban nem reakcióba lépnek a fémes felülettel, hanem megtapadnak rajta, így létrehozva egy olyan réteget, amely csökkenti a szerszám és a megmunkált anyag közötti fellépő súrlódást. Ilyenek például az észterek (szintetikus és természetes).

A harmadik egyben igen fontos adalékanyagokként említhetők a *berágódás elleni anyagok* (Extreme Pressure Additives). Ezek tulajdonsága, hogy megakadályozzák a fémfelületek közötti mikro-összehegedések létrejöttét. Ezt úgy érik el, hogy a határsúrlódási zónában reakcióba lépve magas nyomás- és hőállóságú réteget képeznek a felületen.

A vegyületekhez szoktak még különböző korróziót és oxidációt csökkentő adalékokat valamint habzásgátlókat is adagolni. A keverékekhez nem tervezett kísérőanyagok is tartoznak, ezek olyan, csak a gyártók által ismert összetevők, amelyek a bázisanyagok és az adalékanyagok kapcsolata során alakulnak ki.

A szintetikus anyagokat jelentős mértékben alkalmazzák az iparban, mivel az egészségre való hatása és a környezeti terhelése jóval tervezhetőbb és megfelelőbb. [6]

1.2.2 Minimálkenés adagolásának módjai

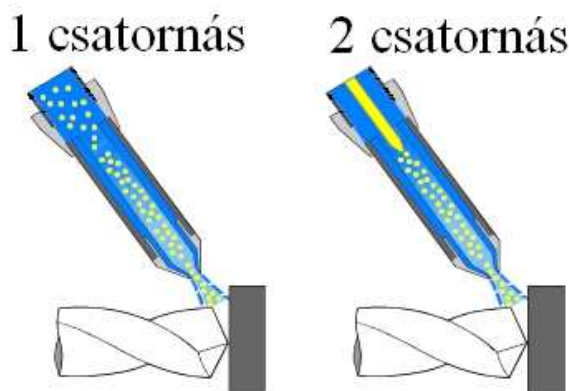
Az adagolási módoknál két fő eset különböztethető meg:

- Külső hozzávezetésű rendszer
- Belső hozzávezetésű rendszer

A minimálkenő berendezések további alcsoportra bonthatóak. Ez a csatorna szerinti felosztást jelenti. Létezik a szerkezetekből egy- illetve kétcsatornás változat. A kettő között annyi a különbség, hogy amíg az egycsatornás kiépítésű rendszerben az olaj-levegő keverék végig együtt „utazik” a szerszámig a fúvókákban, addig a kétcsatornás rendszerben külön csövön érkezik az olaj valamint a levegő, majd a fúvóka végében, a kiáramlás előtt keveredik össze. Az 1.2. táblázatban a két különböző csatornakialakítás előnyei és hátrányai olvashatóak.

	<i>Egycsatornás</i>	<i>Kétcsatornás</i>
Előnyök	utólagosan kialakítható; egyszerűbb csatlakoztatás	alacsonyabb olaj- és levegőfogyasztás; jobb beállíthatóság; magasabb folyamatbiztonság;
Hátrányok	olaj kicsapódása, magas felhasználása;	költségesebb; utólagos felszerelése bonyolult;
1.2. táblázat Hűtőcsatornák számának összehasonlítása [10]		

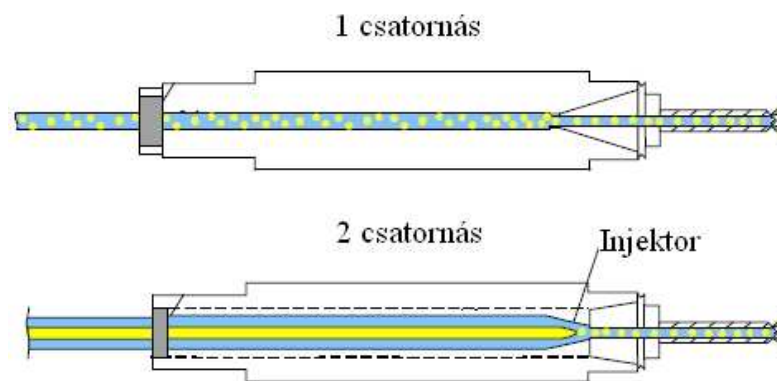
Külső hozzávezetésű kenést mutat a 1.3. ábra. A hűtő-kenő közeget a forgácsolási zónába különböző flexibilis csövek segítségével juttatjuk el. Ez az eljárás esztergálási és sarokmarási folyamatoknál hatékonyabb, mivel a szerszám élei könnyebben és célzottan kenhetőek vele.



1.3. ábra

Külső hozzávezetésű minimálkenés [9]

Az 1.4. ábra a belső hozzáfűzetű rendszereket mutatja be. Itt a kenésre olyan szerszámgűpet, szerszámbeűogót és nem utolsó sorban olyan szerszámot kell alkalmazni, amelyek megfelelő csatornákkal vannak ellátva. A szerszámgűpben megfelelő kiűpítésű folyadűkszállítási rendszernek kell lennie, továbbá olyan speciális kialakítású főorsónak, amely alkalmas a minimálkenés használatára. Ez a fajta kenés optimális választás fűráshoz ($l/d > 3$), mivel a fűrót külső hozzáfűzetés mellett nehéz megfelelően kenni, addig a belűlről hozzáfűzetett HKF mindig a szerszám vágóélét keni. Menetfűráshoz vagy dörzsárazáshoz is ezt a módszert részesítik előnyben a forgácsolással foglalkozó cégek. [6] [8] [10]



1.4. ábra

Belső hozzáfűzetű minimálkenés [9]

1.3 Egzotikus anyagminőségek

Az ISO szerinti anyagminőség csoportosítás szerint egzotikus anyagminőségnek számít az ISO S (HRSA és titán), az ISO H (edzett acél) és egyes források szerint még az ISO M (korrózióálló) acélcsoport is. A dolgozatban szereplő teszteket egy X6CrNiTi1810 (EN. 1.4541) korrózióálló acélminőségen és két ISO S szerinti, nikkelbázisú, GTD jelű anyagminőségen hajtottuk végre.

1.3.1 X6CrNiTi1810 jelű anyagminőség

A *rozsdamentes acélminőség* napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazott acélfajta, amit már nem csak az egészségűgyben és az élelmiszeriparban használnak. Egyre több cég forgácsolja az anyagminőséget környezetkímélő módon, mivel a

szerszámgyártók olyan fejlett szerszámokat és újabbnál újabb bevonatokat fejlesztenek ki évről-évre, hogy ennek a lehetősége már adott.

Az egyik rövidtávú vizsgálatot a legelterjedtebb korrózióálló minőségen végeztük el. Ismertebb nevén KO-36, ami az ausztenites rozsdamentes acélminőségekhez tartozik. Az 1.3. táblázat tartalmazza a főbb alkotó elemeit [11].

Kémiai összetétel %								
C max	Si max	Mn max	P max	S max	Cr	Mo	Ni	Egyéb
0,08	1,00	2,00	0,045	0,015	17,0 - 19,0	-	9,0 – 12,0	Ti: (5xC/0,70)
1.3. táblázat X6CrNiTi1810 kémiai összetétele								

Főbb alkalmazási területei az anyagminőségnek: élelmiszeripar és vegyipar, fegyvergyártás, szállítóipar, repülőgépgyártás, gépipar.

1.3.2 GTD jelű, HRSA anyagminőségek

A GTD-241 és a GTD-262 acélok igen speciális anyagminőségek, de tulajdonságaik és összetételük miatt az ISO S anyagcsoportba sorolhatóak. Alapvetően ezek az anyagok kiváló korrózióállósággal és nagy szakítószilárdsággal rendelkeznek. Speciális összetételük miatt ezt a tulajdonságot magas hőmérsékleten is megtartják (>1000°C). Forgácsolási szempontból nehezen megmunkálhatóak, mivel hővezetésük rossz, a forgáccsal nem távozik a hő 50-60 %, az a forgácsolási zónában marad, és a szerszám éleit terheli. Az anyagok szakaszos forgácsképződésűek, így a szerszámot dinamikus forgácsoló erők terhelik.

Az anyagminőségek általános felhasználása az energiaiparban illetve a repülőgépiparban terjedt el, ahol az anyag tulajdonságait kihasználva különböző turbinákban alkalmazzák. Készül belőlük turbinalapát, turbinalemez (Turbine Discs), stb.

A fent említett két acélfajta a General Electric saját összetételű, nikkelbázisú anyagminősége. Kémiai összetétele titkos, az anyag leginkább az Inconel 718 jelű, szintén nikkelbázisú anyagminőséghez hasonlítható. [12] [13] [14]

2. VIZSGÁLATI KÖRÜLMÉNYEK, A TESZTELT SZERSZÁM

2.1 Vizsgálati körülmények leírása

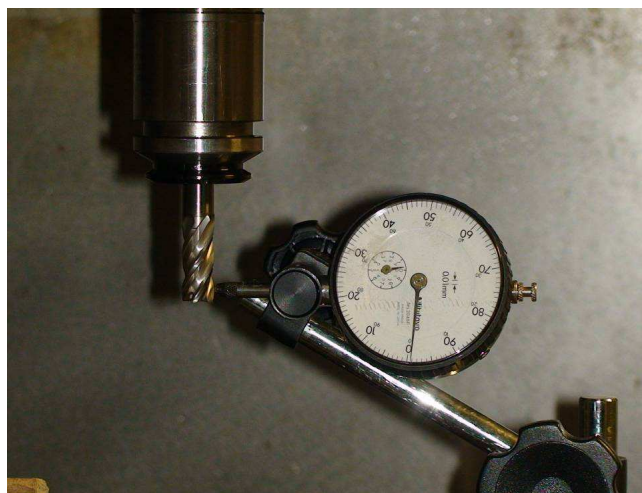
A kísérletekre szolgáló szerszámgép a Mazak Nexus 410A típusú CNC megmunkálóközpont volt (vezérlés: Mazatrol™; $P_{\text{mot}}=12 \text{ kW}$; $n_{\text{max}}=12000 \text{ min}^{-1}$).

Az alapanyagul szolgáló munkadarabok befogása gépi satuban történt. A KISTLER 3 komponenses erőmérő pad szolgáltatja erőjeleket a *DynoWare* szoftver segítségével értékeltem ki.

A HCS250 típusú, TKM GmbH. gyártmányú minimálkenő berendezést a műhelyben szokásosan használt 1 bar levegő- és 3 bar olajnyomással, 26 ml/óra olajfogyást mérve, működtettük. A kenőanyag TRIM TAP NC jelű növényi olajészter volt. A fúvókákat úgy állítottuk be, hogy a fúvott levegő és olaj aeroszol a lehető legtöbb forgácsot a lehető leggyorsabban távolítsa el a forgácsolási zónából, illetve az olajpermet a szerszámon a forgácsolási hossz teljes egészében érje az éleket.

Az ujjmarókon EMUGE-FRANKEN SK40 típusú hidegzsugor befogást alkalmaztunk. A Spannsystem PGR „powRgrip®“ berendezés (ami az össze- és a szétszerelést végzi) mindig ugyanolyan erősségű befogást és szerszámkinyúlást produkált.

A szerszámokon minden első vizsgálat előtt, majd időközönként megvizsgáltam az ütést, amely mindig 0,01 mm belül volt.



2.1. ábra Ütészvizsgálatról készült kép

Ezzel egy fontos tényező hatását minimalizáltam a vizsgálatoknál, amivel így a szerszám fogai nem roncsolódtak különböző mértékben a forgácsolás alatt.

A kopásvizsgálathoz és a marófogakon kialakuló elhasználódás méréséhez 45-szörös maximális nagyítású WMS (HI-TECH GmbH) sztereómikroszkópot használtam. A felvételeket az Image-Pro Insight program segítségével értékeltem ki. Az egyes élek kopásméréséhez minden szerszámnál előre beállított és kalibrált mikroszkópot használtam (2. számú melléklet).

A felületérdességi vizsgálatokat a Surftest SJ301 típusjelű, Mitutoyo cég által gyártott műszerrel végeztem. A felhasznált tapintó a műszerhez tartozó Standard 5 µm profilú mérőfej volt.

A dolgozatban a szerszám éleinek megnevezésére a 2.2. ábra szolgál jelmagyarázatként.



2.2. ábra

A szerszám éleinek megnevezése

2.2 Szerszámteszteket megelőző műveletek

Az alapanyagok előkészítése során darabolási illetve síkmarási műveleteket hajtottam végre. Ezen előkészítő műveletek után a munkadarabokon keménységmérést végeztem. Ezeket a méréseket az Óbudai Egyetem BGK AGI Anyagtudományi intézetének laborjában lévő Vickers és Brinell keménységmérő gépeken hajtottam végre. A mérések után a kapott eredményeket átváltási táblázatok segítségével HRC illetve HB paraméterekre váltottam át. Az eredményeket összefoglaló táblázatot az 1. számú melléklet tartalmazza.

2.3 A tesztelt szerszámok

A szerszámok a Walter Prototyp fejlesztés alatt álló 4 élű keményfém ujjmarói voltak. A szerszámtest 10% kobaltot tartalmazó keményfém. A szerszámban a gyártó elhelyezett két darab axiálisan csavart hűtőcsatornát.

A mérések során két különböző szerszámtípus állt rendelkezésünkre. Ezek a szerszámok csak a hűtőcsatornák méretében tértek el. A szerszám DIN 6527 L befogószárral rendelkezik.

A központi vágóél és az ún. „csonka” élek nem merőlegesen helyezkedtek el egymáshoz képest, valamint a szerszám spirálszögei sem egységesek ($35^\circ / 38^\circ$). Ennek a horonyszög elrendezésnek köszönhetően a szerszám kisebb rezgéseket produkál, ezáltal jobb felületi érdességet hoz létre és megnöveli a szerszám éltartamját.

A szerszám 45° sarokletöréssel van ellátva, ezzel védve a sarkait és éleit a csorbulástól, letöréstől.



2.3. ábra A tesztelt szerszám képe

A szerszám speciális ún. TAA bevonattal van ellátva. A TAA nyilvános források alapján TiAlN + TiAl bevonatból áll össze. Ennek az egyedi bevonatolásnak köszönhetően a szerszám jobban ellenáll a hő illetve egyéb, a forgácsolást befolyásoló tényezőkkel szemben. A gyártó leírásai alapján a bevonatnak köszönhetően jelentős mértékben csökkent az élrátét képződésének a veszélye. A szerszám által létrehozott felület a bevonatnak köszönhetően gyártási szempontból jobb lett, mint az előző generációs szerszámokkal létrehozott felületek. [15]

3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

Az eredményeket abban a sorrendben ismertetem, ahogyan végrehajtottuk a tesztek.

3.1 Adatvariációs technológiai kísérletek

A méréseket a következő beállítási adatokkal hajtottuk végre:

Állandó adatok:

<i>Anyag</i>	<i>v_c (m/min)</i>	<i>n (min⁻¹)</i>
X6CrNiTi1810	88	2800
GTD-241	60	1900
GTD-262	38	1200

- axiális fogásmélység, $a_p = 5$ mm

Változó adatok:

- radiális fogásszélesség, $a_e = 1 \dots 2,5$ mm
- fogankénti előtolás, $f_z = 0,04 \dots 0,063$ mm

Az adatvariációs kísérletek során csak a két leginkább befolyásoló erőhatást értékeltem ki, ezek pedig az előtolásirányú illetve az axiálisan ható erőkomponensek. A fellépő erőhatásokat diagramokban ábrázoltam, majd pedig külön-külön elemeztem ezeket. A kísérletsorozatot úgy terveztük és hajtottuk végre, hogy minden egyes beállításnál ép maradt a készített palástfelület, és ezeken hajtottam végre a felületi érdesség mérését. Minden mart szakasz teljes érdességi protokollja rendelkezésemre áll, azonban – terjedelmi okok miatt – itt csak a szokásos R_a és R_z értékek alakulását vizsgáltam. A teljesség igényével összehasonlítottam a szűrt és a szűretlen profilokat is. Az utóbbi jellemzők ezekben az években – részben a Szakcsoport kutatási eredményei révén – terjednek el a szakirodalomban. A dolgozatban részletesen csak a GTD-262 anyagminőségnél elért eredményeket elemeztem, mivel korrózióálló acélban már jelentős mennyiségű mérési adat áll rendelkezésre.

3.1.1 Adatvariációs technológiai kísérlet X6CrNiTi1810 anyagminőségen

A kísérleti fázis erőtani eredményeit az 3.1. táblázat tartalmazza, amely 9 mérési beállításnál rögzített előtoló erők és axiális erők minimális, maximális és átlagos

értékeit tünteti fel. Az adatokból látható, hogy az erőértékek nem nagyok, az 1,6 és a 2,5 mm fogásszélesség között közel hasonló értékek alakultak ki. Az adatsorokhoz tartozó diagramokat a 3. számú melléklet tartalmazza.

Mérési eredmények										
S.	Adatok			Előtolóerő/axiális erő, F_t/F_{ax} N						Forgács, videó
sz.	a_e , mm	v_s , mm/min	f_z , mm	F_{tmin}	$F_{tátl}$	F_{tmax}	F_{axmin}	$F_{axátl}$	F_{axmax}	
1.	1	448	0,040	-76,14	61,80	207,80	-86,67	-22,66	20,14	
2.	1	560	0,050	-81,63	75,42	245,50	-97,35	-34,59	10,68	
3.	1	706	0,063	-86,52	92,63	293,00	-97,66	-34,18	16,48	
4.	1,6	448	0,040	-73,84	82,23	237,60	-98,27	-35,40	21,67	
5.	1,6	560	0,050	-72,63	103,80	287,90	-104,10	-43,12	13,43	
6.	1,6	706	0,063	-47,00	142,80	331,60	-172,70	-72,32	16,78	
7.	2,5	448	0,040	-49,13	92,72	217,90	-128,20	-48,31	28,69	
8.	2,5	560	0,050	-46,08	119,10	274,50	-148,60	-56,92	22,58	
9.	2,5	706	0,063	-43,95	146,60	343,20	-176,40	-68,16	16,17	
10.										

3.1. táblázat

Mért erőértékeket tartalmazó táblázat korrózióálló acélban

A 3.2. táblázatban az érdességmérésből kapott adatok találhatók. Az eredményekből megállapítható, hogy a szerszám palástélével létrehozott felület érdessége gyártási szempontból megfelelő, a szerszám stabilan tartotta a 0,3 ... 0,5 μm közötti átlagos felületi érdességet. Jelentős különbség nem figyelhető meg a szűrt és a szűretlen profil között, ezért kijelenthető, hogy a szerszám által keltett rezgések nem voltak olyan mértékűek, amelyek a létrehozott felületi struktúrát számottevően befolyásolták volna. A táblázatban található adatokhoz tartozó diagramokat a 4. számú melléklet tartalmazza.

Egy mérési szakasz hossza 5 alaphossznyi ($\ell=0,8$ mm), azaz 4 mm volt.

Mérési eredmények									
S.	Adatok			Érdességi paraméterek (μm)					Forgács, videó
sz.	a _g , mm	v _s , mm/min	f _z , mm	Ra	Rz	Rz/Ra	Pa	Pz	
1.	1	192	0,040	0,31	1,71	5,52	0,33	1,91	
2.	1	240	0,050	0,33	1,61	4,88	0,34	1,63	
3.	1	302	0,063	0,38	1,77	4,66	0,41	2,14	
4.	1,6	192	0,040	0,37	1,78	4,81	0,37	1,75	
5.	1,6	240	0,050	0,30	1,41	4,70	0,34	1,68	
6.	1,6	302	0,063	0,45	2,15	4,78	0,90	3,81	
7.	2,5	192	0,040	0,35	2,38	6,80	0,43	2,96	
8.	2,5	240	0,050	0,31	1,70	5,48	0,37	2,04	
9.	2,5	302	0,063	0,46	2,61	5,67	0,50	2,65	
10.									

3.2. táblázat

Érdességmérésből származó értékek

3.1.2 Adatvariációs technológiai kísérlet GTD-241 anyagminőségben

A 3.3. táblázatban a mérési eredmények összesítése látható. Az erőértékek kb. kétszer nagyobbak lettek, mint a korrózióálló acélminőségben. A nagyobb kapcsolási szám miatt a 2,5 mm fogásszélesség kedvezőbb előtoló erőket produkált, de az axiális irányú komponensnél már nagyobb volt a különbség a különböző fogásszélességek között. A táblázatban lévő adatokhoz tartozó diagramokat az 5. számú melléklet tartalmazza.

Mérési eredmények										
S.	Adatok			Előtolóerő/axiális erő, F_t/F_{ax} N						Forgács, videó
sz.	a_{er} mm	v_s mm/min	f_z mm	F_{tmin}	$F_{tátl}$	F_{tmax}	F_{axmin}	$F_{axátl}$	F_{axmax}	
1.	1	304	0,040	-64,54	89,41	301,50	-163,90	-34,31	68,97	
2.	1	380	0,050	-79,50	115,50	386,00	-173,30	-45,59	100,10	
3.	1	479	0,063	-82,40	140,70	506,00	-217,00	-53,55	116,60	
4.	1,6	304	0,040	-63,63	93,74	437,00	-208,10	-53,96	97,96	
5.	1,6	380	0,050	-80,26	123,60	506,90	-243,20	-61,42	109,90	
6.	1,6	479	0,063	-79,80	164,60	572,50	-282,60	-79,87	101,30	
7.	2,5	304	0,040	-152,70	113,40	398,30	-298,20	-59,81	166,00	
8.	2,5	380	0,050	-133,40	139,50	463,00	-363,50	-83,80	143,10	
9.	2,5	479	0,063	-274,20	181,10	658,90	-415,00	-103,50	150,80	
10.										

3.3. táblázat

Mért erőértékek GTD-241 anyagminőségben

A 3.4. táblázatban az érdességmérési eredmények láthatók. A szerszám az adott anyagminőségben már nem tudott 0,3...0,5 μm közötti átlagos érdességet folyamatképesen előállítani. Gyártási szempontból a létrehozott felületek megfelelőnek minősülnek ugyan, de Ra 0,4 μm alatti felületi érdesség csak bizonyos korlátok között hozható létre.

Mérési eredmények									
S.	Adatok			Érdességi paraméterek (μm)					Forgács, videó
sz.	a_{er} mm	v_s mm/min	f_z mm	Ra	Rz	Rz/Ra	Pa	Pz	
1.	1	192	0,040	0,29	1,47	5,07	0,47	2,30	
2.	1	240	0,050	0,29	1,43	4,93	0,31	1,83	
3.	1	302	0,063	0,46	2,33	5,07	0,53	2,68	
4.	1,6	192	0,040	0,25	1,26	5,04	0,47	2,17	
5.	1,6	240	0,050	0,30	1,66	5,53	0,31	1,64	
6.	1,6	302	0,063	0,61	2,63	4,31	0,79	4,22	
7.	2,5	192	0,040	0,33	1,92	5,82	0,50	2,77	
8.	2,5	240	0,050	0,53	2,27	4,28	0,82	4,52	
9.	2,5	302	0,063	0,44	2,21	5,02	0,48	2,46	
10.									

3.4. táblázat

Érdességmérési adatok GTD-241 anyagminőségben

Az érdességi paraméterekhez tartozó diagramokat a 6. számú melléklet tartalmazza.

3.1.3 Adatvariációs technológiai kísérlet GTD-262 anyagminőségben

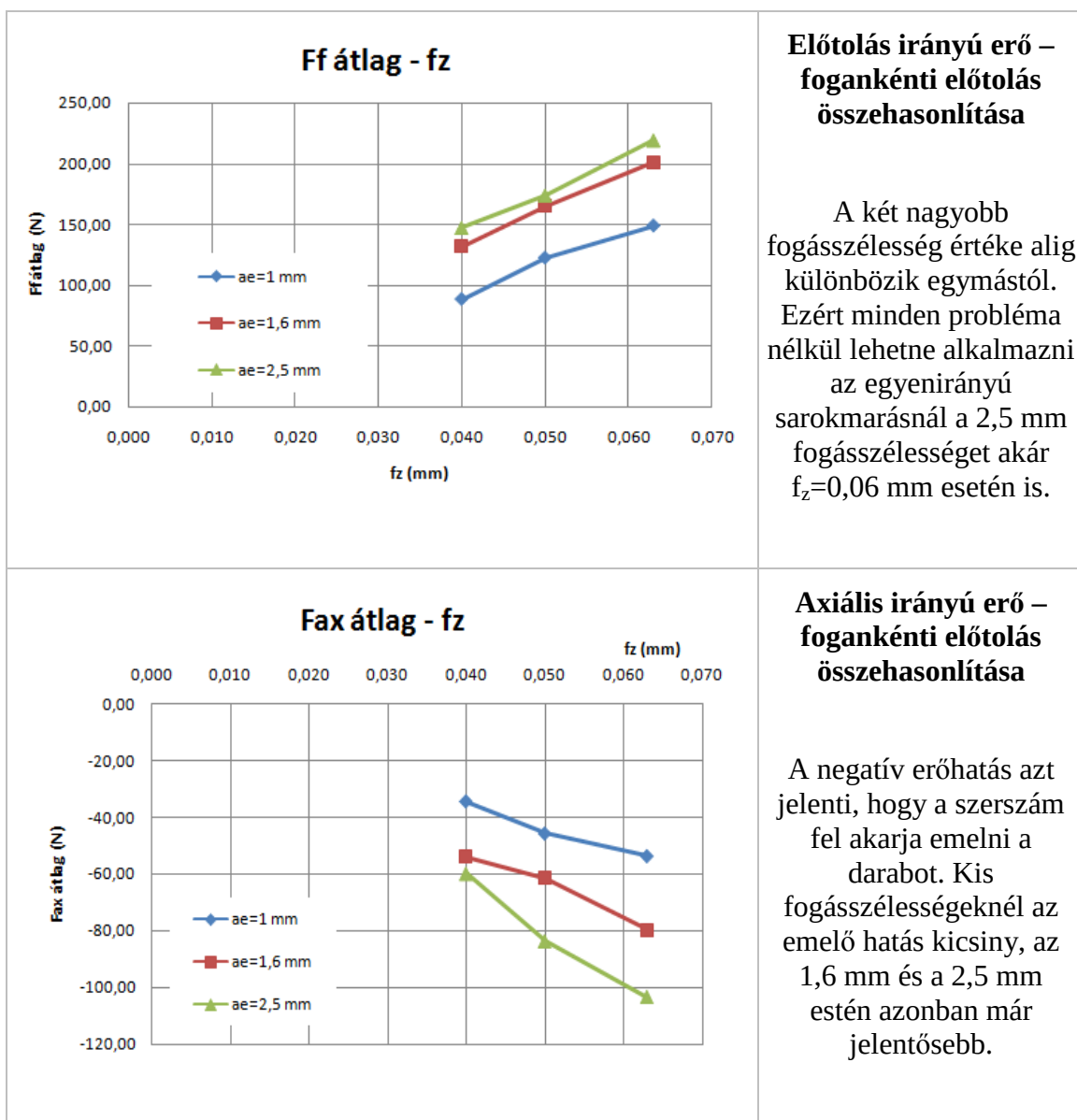
Az erőmérési eredményeket az 3.5. táblázat tartalmazza. Az értékek nagyon hasonlóak az előző nikkelbázisú anyagminőségben kapottakhoz, mivel a GTD-241 anyagminőség a GTD-262 acélhoz közel hasonló kémiai összetételű. A két acélminőség között a különbség a keménységben illetve a szakítószilárdságban mérhető.

Mérési eredmények										
S.	Adatok			Előtolóerő/axiális erő, F_t/F_{ax} , N						Forgács, videó
Sz.	a_{e1} , mm	v_s , mm/min	f_z , mm	F_{fmin}	F_{fati}	F_{fmax}	F_{axmin}	F_{axati}	F_{axmax}	
1.	1	192	0,040	-54,93	88,44	291,30	-141,00	-38,82	21,67	
2.	1	240	0,050	-46,39	122,50	327,90	-149,80	-43,95	27,16	
3.	1	302	0,063	-60,12	149,00	384,50	-195,00	-50,40	35,10	
4.	1,6	192	0,040	-95,52	132,00	390,60	-166,90	-43,68	39,67	
5.	1,6	240	0,050	-70,50	165,30	448,50	-190,70	-68,53	44,86	
6.	1,6	302	0,063	-70,34	200,90	575,60	-204,80	-71,38	36,93	
7.	2,5	192	0,040	-104,40	147,30	405,00	-207,80	-74,74	48,52	
8.	2,5	240	0,050	-73,85	173,90	533,40	-255,70	-85,90	72,02	
9.	2,5	302	0,063	-81,30	219,40	583,80	-259,40	-92,34	83,92	
10.										

3.5. táblázat

Erőértékek GTD-262 anyagminőségben

A táblázat értékeit felhasználva az erőtani vizsgálatok átlagos eredményeit 3.1. ábra mutatja. A diagramokat elemezve megállapítható, hogy az előtoló erőt tekintve az 1,6 mm és 2,5 mm fogásszélesség megközelítőleg azonos erőértékeket produkál, mert a szerszám érintkezése a munkadarabbal $(0,16...0,25) \times D$ értékű. Jelentősebb eltérést csak az 1 mm fogás használata mutat, itt a kapcsolat $0,1 \times D$ szélességű. Az is látható, hogy a fogankénti előtolás növelésével az erőértékek nagyobbak lesznek, mégpedig – a forgácsoláselméletet bizonyítva – a fogankénti előtolás degresszíven befolyásolja az átlagos erőt. Az axiális irányú erők negatív értékei azt jelentik, hogy a szerszám fel akarja emelni a gépsatuból a munkadarabot.



3.1. ábra

Az erőtani vizsgálatok átlagos eredményei

A 3.6. táblázatban találhatóak az érdesség mérési vizsgálatból származó eredmények. A szerszám az adott anyagminőségben már nem tudta a 0,3 ... 0,5 μm közötti átlagos érdességet megfelelően tartani. Gyártási szempontból a mart felületek megfelelőek, de 0,4 μm alatti átlagos érdességű felület csak bizonyos kompromisszumok megkötésével hozható létre. A 3.6. táblázatban található adatokhoz elkészített diagramokat a 7. számú melléklet tartalmazza.

Mérési eredmények										
S.	Adatok			Érdességi paraméterek (μm)						Forgács, videó
sz.	a _e , mm	v _s , mm/min	f _z , mm	Ra	Rz	Rz/Ra	Pa	Pz		
1.	1	192	0,040	0,34	1,66	4,88	0,46	2,55		
2.	1	240	0,050	0,29	1,41	4,86	0,36	1,89		
3.	1	302	0,063	0,46	2,12	4,61	0,75	3,38		
4.	1,6	192	0,040	0,27	1,69	6,26	0,35	2,17		
5.	1,6	240	0,050	0,31	1,57	5,06	0,37	2,09		
6.	1,6	302	0,063	0,47	2,18	4,64	0,38	1,77		
7.	2,5	192	0,040	0,44	2,32	5,27	0,45	2,56		
8.	2,5	240	0,050	0,45	2,35	5,22	0,52	2,57		
9.	2,5	302	0,063	0,54	2,93	5,43	0,66	3,49		
10.										

3.6. táblázat

Felületi érdesség adatok GTD-262 anyagminőségben

3.1.4 Adatvariációs technológiai kísérletek összegzése

Összegzésként az állapítható meg, hogy az ujjmarók minimálkenés alkalmazása mellett minden tesztelt anyagminőségben megfelelően teljesítettek.

A forgácsolás közben kialakult erőértékek a forgácsolás elméletét alátámasztották, nem volt semmilyen kiugró érték tapasztalható.

A *forgács* minden esetben apróra töredezett, jól kezelhető volt. A szerszámon megfelelőnek tekinthető a forgácselvezetés is.

A szerszámokon különböző mértékű kopás volt megfigyelhető:

- Korrózióálló acélminőségben a szerszámot az 525 mm összegzett forgácsolási úthossznak megfelelő teszt után megvizsgáltam és mindösszesen 0,03 mm kifényesedést / kopást figyeltem meg rajta. Ez az érték a korábbi mérési tapasztalatok alapján még a bekopási szakasznak felel meg, tehát a szerszám ebben a korrózióálló acélban, minimálkenés alkalmazása mellett nagyon jól teljesített.
- GTD-241 és GTD-262 anyagminőségekben 525 mm forgácsolási úthossz után a szerszámok élein 0,08 - 0,1 mm kopás volt jellemző. A kopáskép egyenletes volt, nem volt jelentősebb mértékű csorbulás.
- Látható volt a szerszámok palástélein a fogásvétel maximum pontjában (5 mm) bizonyos mértékű csorbulás. Ez a forgácseltávozás, illetve a forgácsfeltapadás okozta erő- és hőtöbblet miatt alakulhatott ki.

3.2 Hosszú időtávú forgácsolási kísérletek

Az éltartam vizsgálatoknak fontos szerepe van a szerszámok teljesítőképességének megítélésékor. A nikkelbázisú ötvözetekben, minimálkenés alkalmazása mellett tesztelt szerszámok eredményeiből megállapító, hogy mennyi forgácsot képesek eltávolítani, amíg eléri a kopáshatárt. A kísérleteket nem csak környezetkímélő módon, külső hozzávezetés mellett, hanem a maró hűtőcsatornáját felhasználva, árasztásos módszerrel (6 bar nyomáson) végeztük el, majd a kapott eredményeket összehasonlítottam. Ez azért is fontos, mivel így konkrét mérési adatok állnak rendelkezésre arról, hogy a minimálkenés alkalmazása versenyképes-e az árasztásos hűtéssel szemben.

A méréseket a következő beállítási adatokkal hajtottuk végre minden szerszámnál:

$$v_c = 38 \text{ m/min}; \quad a_p = 5 \text{ mm}; \quad a_e = 1,6 \text{ mm}; \quad f_z = 0,05 \text{ mm}; \quad v_f = 240 \text{ mm/min}$$

A forgácsolást rövid hosszokon végeztük, egyetlen szakasz 45 mm hosszú volt. A továbbiakban már csak ezekről a szakaszokról lesz szó. Egy vagy néhány szakasz megtétele után fényképeztem a szerszámélek elhasználódását (kifényesedését, kopását és/vagy csorbulását), előre kalibrált mikroszkóp és szoftver segítségével megállapítottam az élkopás mértékét. A szakaszok megtételekor mértem a fellépő erőhatásokat is.

Tekintettel arra, hogy sarokmarás esetén a szerszám palástja dolgozik a forgácsolási folyamat során – tehát a homlokél kopása nem volt jelentős –, ezért a kopásértékeket mindig a palástéleken állapítottam meg. A teszteket addig folytattuk, ameddig egy élen az általunk előre meghatározott határként a **0,2 mm** kopásméretet nem észleltem. Ezt tekintettem az előzőekben említett kopáskritériumnak, amely után még gazdaságosan újraélezhető a szerszám.

3.2.1 Kopásvizsgálat minimálkenés alkalmazásával

A későbbi összehasonlítás miatt a kis átmérőjű illetve a nagy átmérőjű hűtőcsatornával ellátott szerszámokon is elvégeztük az éltartam vizsgálatot. A táblázatokban (3.7. és 3.8. táblázat) szereplő adatokból és a kopásgörbékből (3.2. és 3.3. ábra) is jól látható, hogy a marók közel azonos mértékű elhasználódást szenvedtek, és az egyes mérési időpontoknál a kétféle szerszám között legfeljebb 0,01 - 0,02 mm eltérés mérhető. Ebből arra lehet következtetni, hogy külső hozzávezetésű

minimálkenésnél a hűtőcsatorna mérete nem befolyásolta a szerszám forgácsolóképeségét.

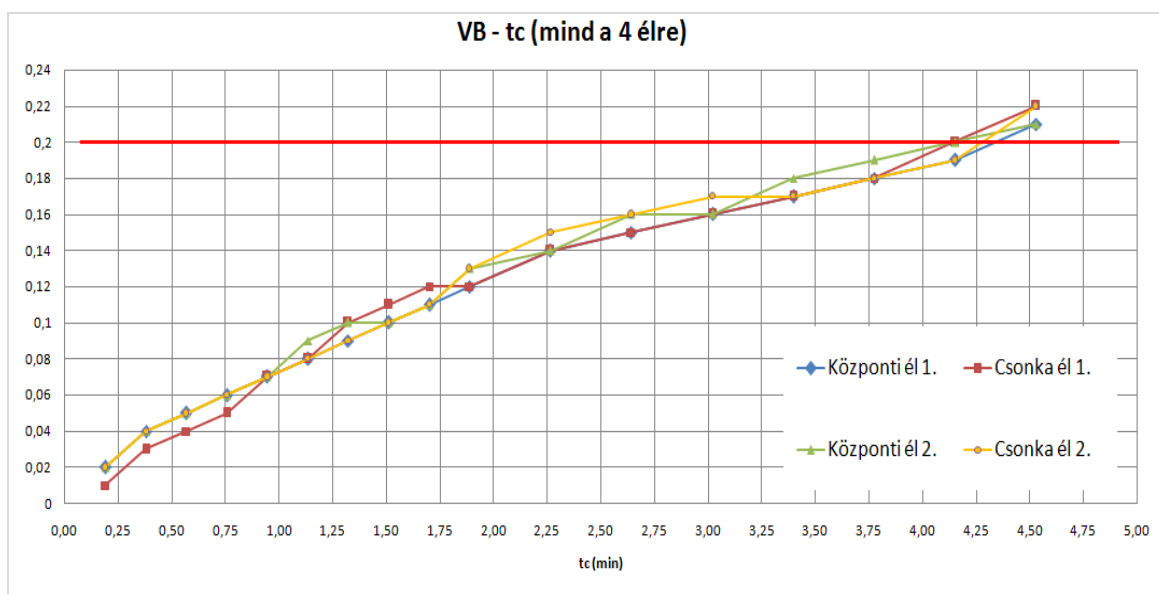
A 3.7. táblázat és az 3.2. ábra tartalmazza a **nagyobb hűtőcsatornával** ellátott szerszám kopásmérési adatait. A szerszám a kopáshatár eléréséig összesen 24 szakaszt forgácsolt.

Mérési eredmények						
sorszám	forgácsolt hossz (mm)	forgácsolásban eltöltött idő t_c (min)	VB (mm)			
			Központi él 1.	Csonka él 1.	Központi él 2.	Csonka él 2.
1	45	0,19	0,02	0,01	0,02	0,02
2	90	0,38	0,04	0,03	0,04	0,04
3	135	0,57	0,05	0,04	0,05	0,05
4	180	0,75	0,06	0,05	0,06	0,06
5	225	0,94	0,07	0,07	0,07	0,07
6	270	1,13	0,08	0,08	0,09	0,08
7	315	1,32	0,09	0,1	0,1	0,09
8	360	1,51	0,1	0,11	0,1	0,1
9	405	1,70	0,11	0,12	0,11	0,11
10	450	1,89	0,12	0,12	0,13	0,13
11 & 12	540	2,26	0,14	0,14	0,14	0,15
13 & 14	630	2,64	0,15	0,15	0,16	0,16
15 & 16	720	3,02	0,16	0,16	0,16	0,17
17 & 18	810	3,40	0,17	0,17	0,18	0,17
19 & 20	900	3,77	0,18	0,18	0,19	0,18
21 & 22	990	4,15	0,19	0,2	0,2	0,19
23 & 24	1080	4,53	0,21	0,22	0,21	0,22

3.7. táblázat

Nagy hűtőcsatornás szerszám kopásmérétei

A kopásgörbén jól látható, hogy a négy él kopása között nem lehetett megfigyelni jelentősebb különbséget, mert a szerszám élkialakítása precíz, anyaga pedig homogén volt, a vizsgált maró befogása pedig pontosnak bizonyult.



3.2. ábra

Kopásgörbék a vizsgált szerszám mind a 4 élére

Az ábrán egy olyan görbesor jelenik meg, amelyen a különböző kopási szakaszok nem különíthetők el teljesen, azaz a maró nem viselkedik úgy, mint azt a „klasszikus kopásgörbét” leíró irodalmak tartalmazzák. A bekopási szakasz után szinte végig degresszív jelleggel használódnak a fogak, majd a forgácsolásban töltött 3,5 perc körül erősödik fel a progresszív kopásintenzitás, amíg a maró el nem éri az éltartam kritérium értékét.

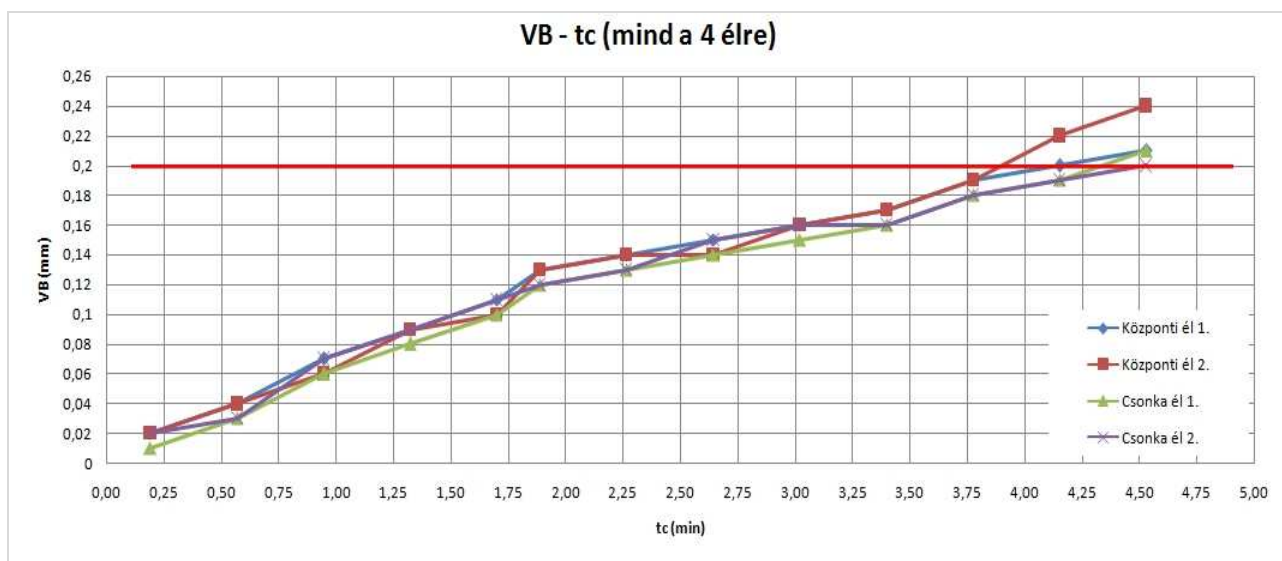
A **kisebb hűtőcsatornával** ellátott szerszám mind a 4 élének kopásadatait a forgácsolási idő függvényében a 3.8. táblázat valamint a 3.3. ábra tartalmazza.

Mérési eredmények						
sorszám	forgácsolt hossz (mm)	forgácsolásban eltöltött idő t_c (min)	VB (mm)			
			Központi él 1.	Csonka él 1.	Központi él 2.	Csonka él 2.
1	45	0,19	0,02	0,01	0,02	0,02
2 & 3	135	0,57	0,04	0,03	0,04	0,03
4 & 5	225	0,94	0,07	0,06	0,06	0,07
6 & 7	315	1,32	0,09	0,08	0,09	0,09
8 & 9	405	1,70	0,11	0,1	0,1	0,11
10	450	1,89	0,13	0,12	0,13	0,12
11 & 12	540	2,26	0,14	0,13	0,14	0,13
13 & 14	630	2,64	0,15	0,14	0,14	0,15
15 & 16	720	3,02	0,16	0,15	0,16	0,16
17 & 18	810	3,40	0,17	0,16	0,17	0,16
19 & 20	900	3,77	0,19	0,18	0,19	0,18
21 & 22	990	4,15	0,2	0,19	0,22	0,19
23 & 24	1080	4,53	0,21	0,21	0,24	0,2

3.8. táblázat

Kis hűtőcsatornás szerszám kopásmérései

Az előző szerszám görbéjéhez (3.2. ábra) képest itt már jobban megfigyelhető a „hagyományos” kopásgörbe, azonban itt is nehéz meghúzni az egyes szakaszok határait. A kopáskritérium közelében, a két központi él között mintegy 0,02 – 0,03 mm különbség alakult ki. Ez az eltérés azonban nem látványosan (csorbulással, lepattanással) jelent meg a kopásfelvételeken, csupán a 2. számú központi élen szélesebb kopási sáv volt mérhető.



3.3. ábra

Kis hűtőcsatornás szerszám kopásgörbéi

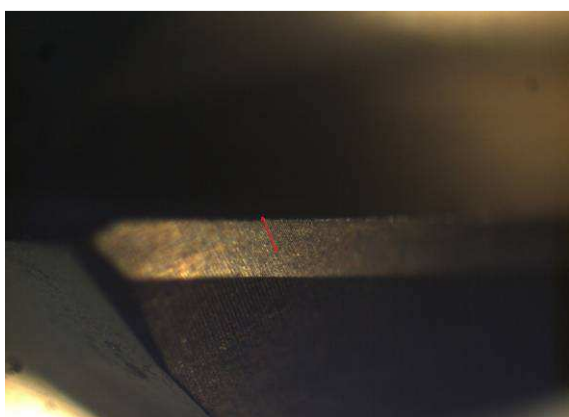
3.2.2 Kopásfelvételek a kis hűtőcsatornájú maróról

A mérési eredményekből jól látható, hogy a 2 különböző hűtőcsatornájú száras maró közel ugyanolyan értékekkel és ugyanolyan mértékben kopott el, ezért csak az egyik szerszámon mutatom be a jellemző kopásképeket. A másik szerszámról készült fontosabb felvételeket a 8. számú melléklet tartalmazza.

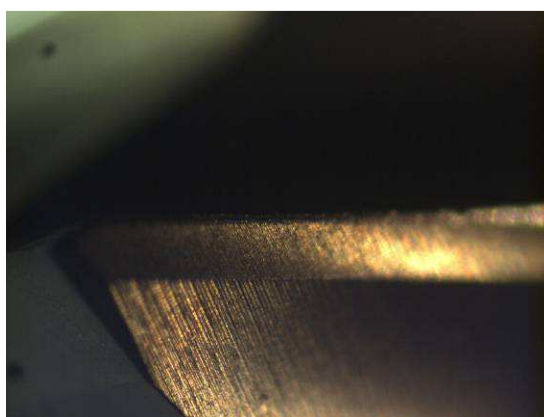
A 3.4. ábrán 2. központi él kopásfelvételei láthatóak. Ez lett a szerszám ún. vezéréle, amely meghatározza, hogy milyen mértékben kell majd a szerszámot újraélezni.

A kopásfelvételeken látszik, hogy az ujjmaró különösebb roncsolódás nélkül érte el a kopáskritériumot. Az élek mindvégig egyenletesen koptak el. A 3.4/c. ábrán az figyelhető meg, hogy a 20. szakasznál az élből kisebb darabok kezdtek „lepattogzódni”, ez azonban a forgácsolási folyamatot mérhetően negatívan nem befolyásolta.

A szerszám egyes élein a fogásmélység maximum pontjában (5 mm) megfigyelhető volt az élek szélkopás jellegű kicsorbulása. Ez a forgács eltávozásakor kialakult erőtöbblet, illetve hőhatás miatt alakulhatott ki, valamint hozzájárulhatott a darab legfelső rétegének fokozott keménysége (esetleges felkeményedése) is. Mindezen csorbulásoknak az értéke nem haladta meg a palástéleken jelentkező kopás méretét, ezért nem befolyásolja az esetleges újraélezés mértékét.

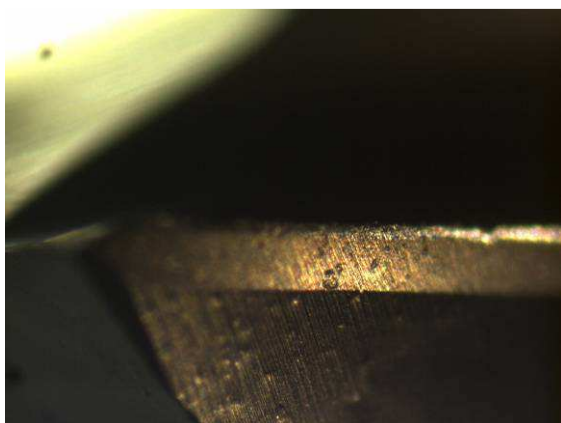


0. szakasz (VB = 0 mm)

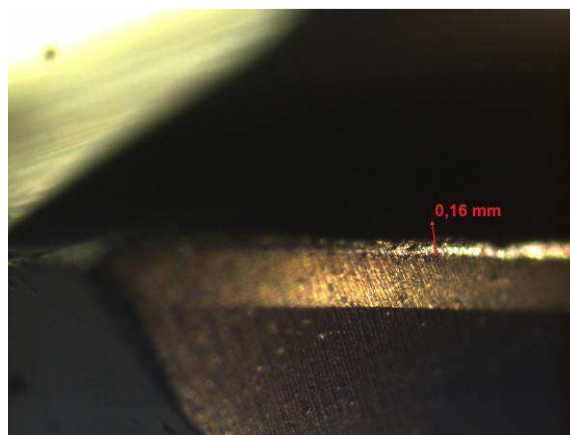


5. szakasz (VB = 0,06 mm)

a.) Első vizsgálati fázis

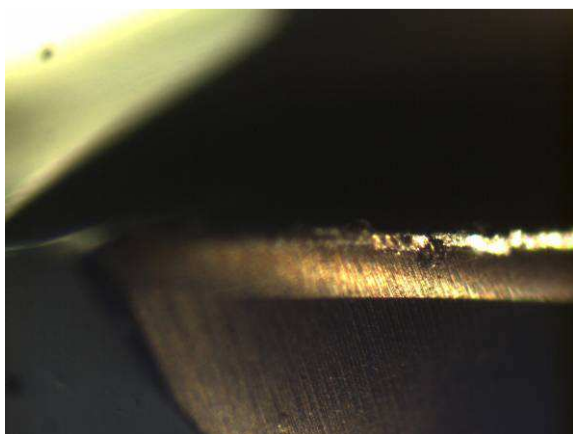


10. szakasz (VB = 0,13 mm)

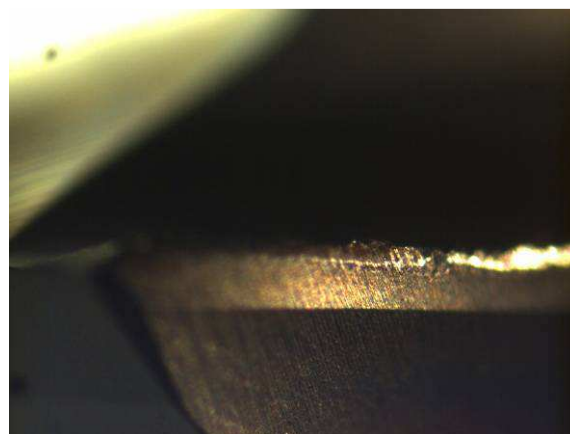


16. szakasz (VB = 0,16 mm)

b.) Középső vizsgálati fázis



20. szakasz (VB = 0,19 mm)



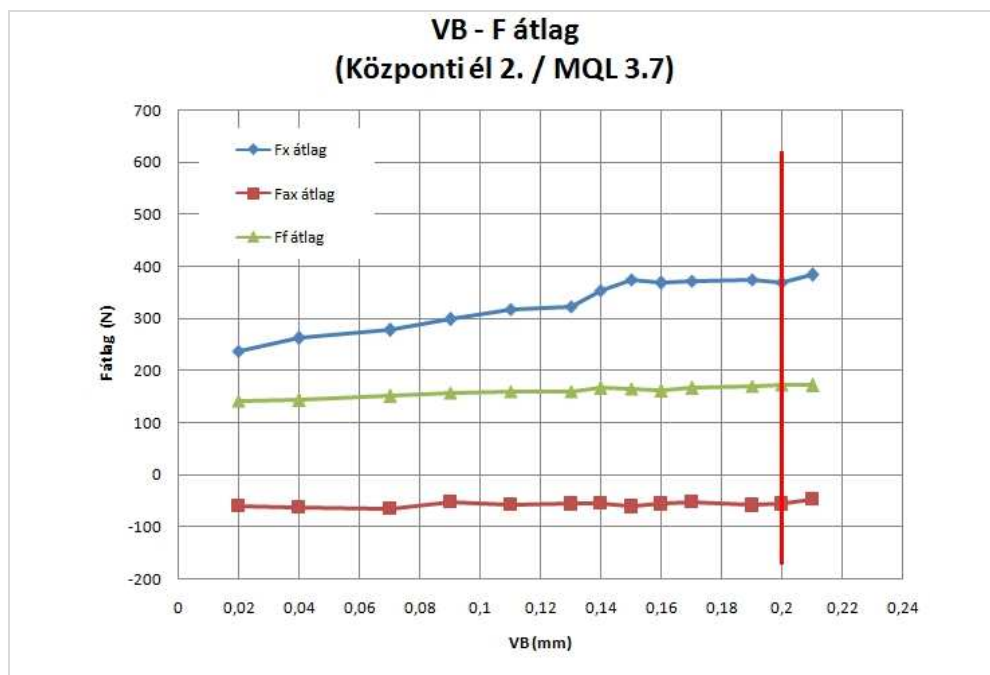
24. szakasz (VB = 0,24 mm)

c.) Végző vizsgálati fázis

3.4. ábra A maróról készített kopásfelvételek (30-szoros nagyítás)

3.2.3 A kopás és az erőkomponensek alakulása a kis hűtőcsatornájú szerszámmál

Az erőmérések során semmiféle kiugró értéket nem észleltünk. Amíg ez előtoló erő, illetve az axiális komponens értékei egészen minimális növekedést mutattak a mérés folyamán, a normálirányú erőkomponens (F_x) az elhasználódás előrehaladtával fokozatosan, kb. 25%-kal megnövekedett.

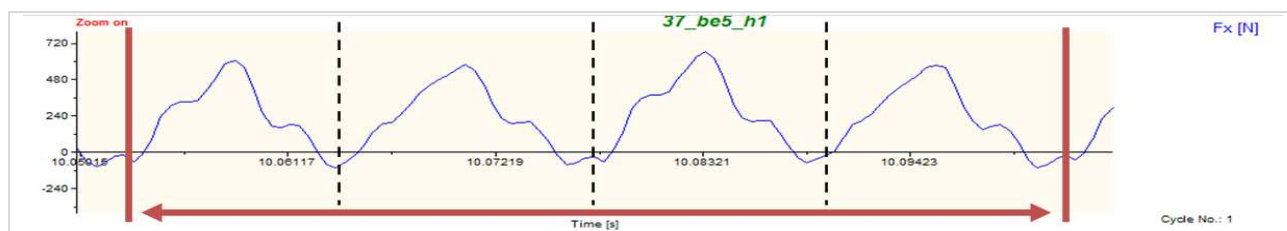


3.5. ábra

A kopás és a mért erőhatások összefüggése

A 3.6, 3.7. és 3.8. ábra a szerszámvizsgálat első és utolsó fázisaiban mért erőhatásokat mutatja be, mégpedig a maró egy fordulatra jutó adatsorok (ún. ZOOM-felvételek) kinagyításának segítségével. Ezzel láthatóvá tettük a 4 fog működésekor kapott erőingadozások pillanatnyi változását, mindhárom erőösszetevőre. Az ábrásor segítségével jól összehasonlítható az új élekkel végzett marás az elhasználódott szerszámmal történő forgácsolással.

Általánosságban elmondható, hogy minden erőgörbe jelentősebben változott az első és az utolsó mérési pontokban. Minden erőkomponensben megállapíthatóak a szerszám különböző élei, sőt, az erőlefutás jellegéből el lehet különíteni a központi éleket a csonka élektől.



a) első szakaszon mért erőkomponens

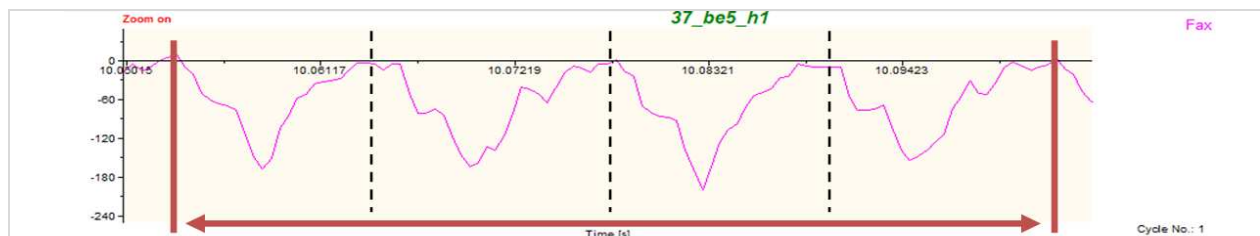


b) utolsó szakaszon mért erőkomponens

3.6. ábra

Normálirányú erőkomponens

A normálirányú erőnél az utolsó mérési pontban kapott erőgörbe megtartotta az első görbének a jellegét, de negatív irányban sokkal jobban kitért, továbbá sokkal sűrűbb lett az erőingadozás.



a) első szakaszon mért erőkomponens



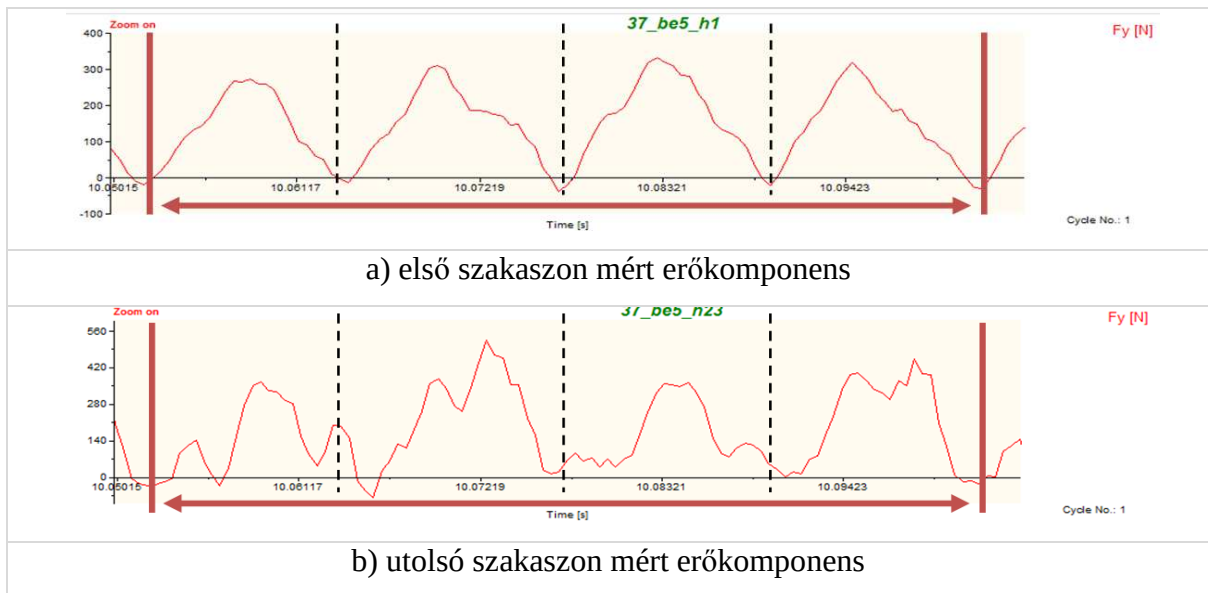
b) utolsó szakaszon mért erőkomponens

3.7. ábra

Axiális irányú erőkomponens

Az axiális irányú erőnél látható a legnagyobb eltérés az első és az utolsó kinagyított görbe között. Az egyes fogak nehezebben elkülöníthetőek, de még így is fel lehet

fedezni a 2-2 fog szabályos váltakozásait. Pozitív irányban enyhén eltolódott a görbe az első mérési ponthoz képest, mert a szerszám kopottsága már olyan fokú, hogy bizonyos mértékig vasalja is a mart felület.



3.8. ábra

Előtolás irányú erőkomponens

Az előtolás irányú erőnél is megmaradt a 4 fog jellegzetes kicsúcsosodása, de itt sokkal jobban előjöttek a fogak különböző mértékű kopásaiból adódó erőkülönbségek.

3.2.4 A vizsgált szerszámok eredményeinek összegzése:

- A kopáshatárig az ujjmarók egységesen 24 szakaszt tettek meg, ami 1080 mm forgácsolt hosszt jelent. Ez $\sim 8640 \text{ mm}^3$ leválasztott forgácsmennyiséget jelent. A megtett távolság $\sim 4,5 \text{ min}$ (272 sec) forgácsolási időnek felel meg,
- Az élek közel egyenletesen koptak, így újraélezésük és bevonatolásuk nem ütközik komoly nehézségbe,
- A jellegzetes kopási forma az élek kopása, lekerekedése volt,
- Megfigyelhető volt az 5 mm fogásmélységnél kialakult terhelés miatti él csorbulás, de ennek nagysága nem volt számottevő mértékű,
- A forgácsolás során minimális élrátét volt látható, ez a feltapadás kialakulhatott az olajkenés miatt is.

- A megmunkálás során keletkezett forgács jól kezelhető, apróra töredezett volt végig.

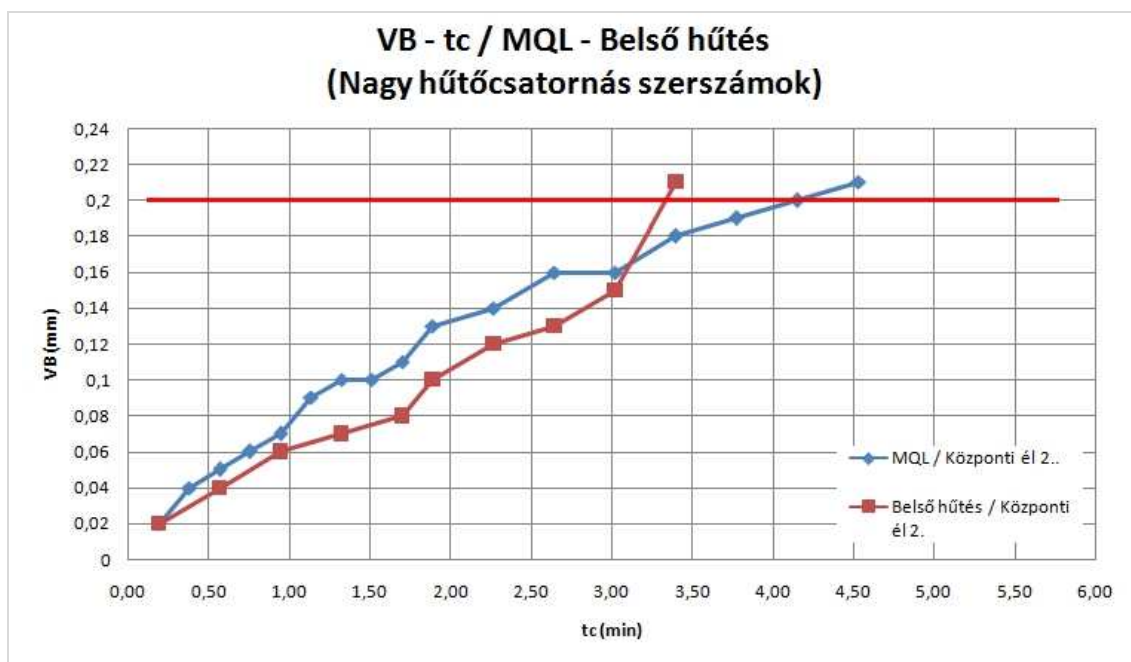
3.3 Különböző hűtési módok összehasonlítása

Az éltartamvizsgálatokhoz elkészített kiértékelések alapján könnyen össze lehet hasonlítani a különböző szerszámok teljesítőképességét még az eltérő hűtés-kenés körülmények esetén is. HRSA anyagminőségekben még nem publikáltak ilyen összehasonlítást, ezért is szolgáltatnak értékes információkat mind a szerszámgyártónak, mind a kutatást végző egyetemnek.

Általánosságban megállapítható az, hogy minimálkenés alkalmazása mellett a szerszámok „intenzívebb” kopásadatokat mutattak, mint az árasztásos hűtésnél. A kopásgörbéken jól megfigyelhetők a különbségek. A minimálkenés (MQL) alkalmazásakor minden esetben a bekopási szakaszt követően legalább 0,03-0,04 mm különbség alakult ki az egyes mérési pontokon. A belső hűtés előnye a kis hűtőcsatornájú szerszámoknál figyelhető meg jelentősebb mértékben.

3.3.1 Nagy hűtőcsatorna vs. minimálkenés

A 3.9. ábra szemlélteti a nagyobb hűtőcsatornával ellátott szerszámok összehasonlító diagramját. Látható, hogy a belső hűtés alkalmazása rosszabb eredményt hozott, mint a minimálkenésnél mért éltartam. Ennek oka feltehetőleg az lehetett, hogy a belső hűtés nem volt elegendő a forgács „kiöblítésére” a forgácsolási zónából, és az éleket nem kente kellően a hűtőfolyadék. Ennek hatására nagyobb hő fejlődött a forgácsolási zónában, aminek a következménye képpen a szerszám gyorsabban kopott.



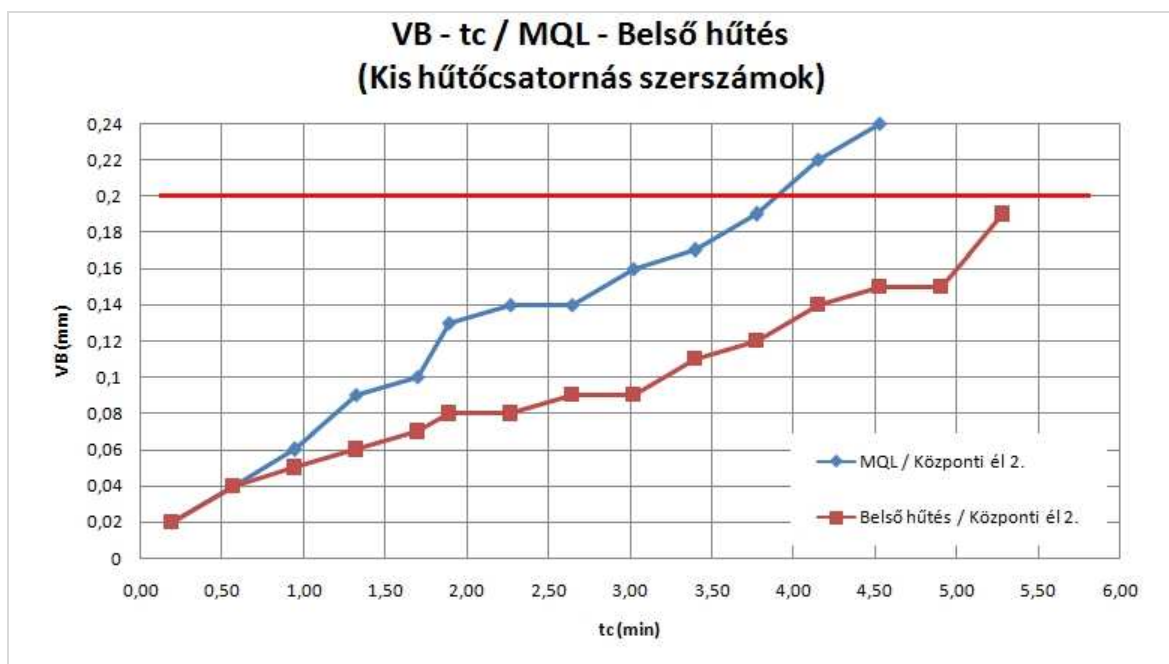
3.9. ábra

Minimálkenésnél (MQL) kapott kopásgörbe összevetése a belső hűtésnél kapott kopásgörbével a 2. Központi élre

Mivel a minimálkenésnél volt megfelelő kenés és forgácseltávolítás, ezért a szerszám kb. 25%-kal tovább tudott dolgozni a kopáskritérium eléréséig.

3.3.2 Kis hűtőcsatorna vs. minimálkenés

A 3.10. ábrán a kis hűtőcsatornás szerszám és a minimálkenés összehasonlítása látható. A görbék alakulásából és elhelyezkedéséből teljesen egyértelmű, hogy a belső hűtés előnyösebb volt a minimálkenéshez képest, mert tetemesnek tekinthető különbség alakult ki a két szerszám kopásméretei között. Az is látható, hogy amíg minimálkenéssel 4,5 perc volt a szerszám éltartama, addig a belső hűtésnél 5,28 perc forgácsolási idő telt el a kopáskritérium eléréséig. A kapott eredmények egyértelműen alátámasztják, hogy a kis hűtőcsatorna geometria pozitívan hatott a szerszám működésére.



3.10. ábra

Belső hűtés és minimálkenés összehasonlítása kis hűtőcsatornás szerszámoknál

További eredményként szolgál az is, hogy a szerszámok a belső hűtőcsatornát használva mennyire különböző eredményeket produkáltak. Figyelemre méltó, hogy a kis hűtőcsatornás szerszám közel 2 perccel tovább tudott forgácsolni a kopáskritérium alatt. Ez annak tudható be, hogy a szerszám kisebb átmérőjű csatornája nagyobb nyomással juttatta a hűtőfolyadékot a forgácsolási zónába, ezáltal az öblítő hatás is eredményesebb volt. Ebből az okból a szerszám éleinek terhelése kisebb és az egyes fogak hűtése és kenése jobb volt.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerszámokkal végzett vizsgálatokat sikeresen végrehajtottuk. A közölt eredmények értékes adatokat szolgáltatnak mind a szerszámgyártónak, mind pedig a felhasználóknak. A tesztelt szerszámok a vizsgált anyagminőségekben alkalmasak a forgácsolásra. A környezetkímélő minimálkenés egyes esetekben kedvező alternatívája lehet az árasztásos kenésnek.

A **rövid időtávú (adatvariációs) vizsgálatok** eredményeit összesítve az a megállapítás, hogy a tesztelt szerszámok a vizsgálat folyamán nem produkáltak nagy erőhatásokat, továbbá nem keltettek olyan mértékű rezgéseket, amelyek károsan befolyásolták volna a forgácsolási folyamatot. A különböző forgácsolási beállítások közül az 1,6 és a 2,5 mm fogásszélesség is probléma nélkül alkalmazható, fogankénti előtolás beállítására pedig 0,063 mm is alkalmas. A szerszámokkal létrehozott felületek a tesztelt anyagminőségekben gyártási szempontból jónak számítanak, de a szerszám nikkelbázisú ötvözetekben inkább nagyolási műveletekhez lehet megfelelő választás.

A **hosszú időtávú vizsgálatoknál** a szerszámok kopását és az éltartamidejét állapítottam meg. Az eredmények is mutatják, hogy a szerszámok jól teljesítettek mind minimálkenés, mind a belső hűtőcsatorna alkalmazásakor. Az ujjmarók kopása egyenletes volt, nem jelentkeztek nagyobb mértékű csorbulások, lepattanások.

A jövőbeni feladatok egyik fontos lépése, hogy a tesztekkel más forgácsolási adatokkal is végre kell hajtani, hogy még nagyobb adathalmaz álljon rendelkezésre a hőálló szuperötvözetek forgácsolásáról. A vizsgálatokból egyértelműen kiderül, hogy a környezetkímélő forgácsolás versenyképes az árasztásos hűtéssel szemben, még olyan anyagoknál is, ahol az irodalmak szerint nem előnyös a Green Manufacturing. Az iskolai felszereltség lehetőséget ad, hogy a jövőbeni tesztekkel ne csak minimálkenéssel, hanem CAG, minimál + CAG hűtéssel is végrehajtsuk. Valamint további mérések elvégzésére van lehetőség más egzotikus anyagminőségekben (René_{xx}) is.

A kutatási munka fő céljai megvalósultak. A jövőbeni célok között szerepel, hogy a környezetkímélő forgácsolás lehetőségeit továbbfejlesszük, a szerszámok használhatóságának határait kiderítsük és a felhasználókat értékes tapasztalatokhoz valamint irányértékekhez juttassuk.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bielomatik: Minimalmengen-Schmierung - die effiziente Alternative
http://www.bielomatik.de/bkmauto/mms_broschuere_de_bkm/ 2014.09.17.
- [2] Uwe Heisel - Marcel Lutz (Stuttgart); Dieter Spath - Robert Wassmer - Ulrich Walter (Karlsruhe): Application of Minimum Quantity Cooling Lubrication Technology in Cutting Processes <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5072/pdf/hei135.pdf>
2014.09.22.
- [3] DGUV - BGI/GUV-I 718: Minimalmengenschmierung in der spanenden Fertigung BILD1. http://www.euk-info.de/fileadmin/PDF_Archiv/Regelwerk_Archiv/GUV-I/GUV-I_0718.pdf 2014.09.15.
- [4] Haider Willrett: Eiskalt lebt die Schneide länger; Industrieanzeiger Nr. 3/2012 p.52-55; http://www.industrieanzeiger.de/c/document_library/get_file?uuid=3d82f8f3-5a4e-4209-89f4-0c1b438af292&groupId=32571342 2014.10.15.
- [5] Biró Szabolcs - Csuka Sándor - dr. Sipos Sándor:
http://www.forgacsolaskutatas.hu/kornyezet/A_forgacsolasi_folyamat_vizsgalata_mini_malkenes 2014.10.05.
- [6] Dudás Illés – Friedhelm Lierath – Varga Gyula: Környezetbarát technológiák a gépgyártásban. Műszaki kiadó, Budapest, 2010. p. 39-51.
- [7] DIN 51385 kivonat: http://www.igmetall.de/SID-4BA680AD-BF806F63/internet/docs_VKIS_VSI_IGM_Liste_Stand_2013_12_11_54c88686223dee971eb4939562018f649ae0b375.pdf 2014.10.05.
- [8] Dr. Varga Gyula: Környezetbarát megmunkálás; Nemzeti tankönyvkiadó;
http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0001_1A_G1_07_ebook_kornyezetbarat_megmunkalas/adatok.html 2014.10.06.
- [9] Dr. Klaus Gerschwiler: WZL/Fraunhofer Institut Produktionstechnologie, Technologietag 2013. p.21. http://www.benz-tools.de/upload/files/emailing/Supermailer/2_RWZL_DrKlausGerschwiler_MMSSGrundlagen.pdf 2014.10.08.

- [10] Dr. Pintér József: Különleges megmunkálási technológiák, Minimélkenés, szárazforgácsolás, keménymegmunkálások; Széchenyi István Egyetem Győr, p. 15-46
http://rs1.sze.hu/~pinter/M_aj003_1_K%DCL%D6NL_MEGM_TECHN/K%DCL%D6NL_MEGM_TECHN_4_EA_MMS_2011v1.pdf 2014.10.06.
- [11] Inoxservice Roszdamentes acél anyagtulajdonságok;
<http://www.inoxservice.hu/index.php/hu/anyagtulajdonsagok> 2014.10.06.
- [12] Tállai Péter – Csuka Sándor - dr.Sipos Sándor – Zólyomi Attila: Nikkelbázisú hőálló szuperötvözet marási tapasztalatai Műszaki kiadványok, Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek 2013. p. 74-78
- [13] P.W. Schilke: GE Energy GER-3569G (08/04) Advanced Gas Turbine Materials and Coatings
http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger3569g.pdf
2014.10.10.
- [14] Sandvik Coromant: Heat Resistant Super Alloys EN
<http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-034.pdf> 2014.10.10.
- [15] Walter Prototyp gyártói információk www.waltertools.com 2014.10.10.

6. MELLÉKLETEK

1. sz. melléklet: M1. Alapanyagok keménységmérési adatai

2. sz. melléklet: M2. A mikroszkópi kép (mérőskálával, „célkeresztel”)

3. sz. melléklet: M3. Adatvariációs technológiai vizsgálat erődiagramjai X6CrNiTi1810 anyagminőségben

4. sz. melléklet: M4. Érdességmérési diagramok X6CrNiTi1810 anyagminőségben

5. sz. melléklet: M5. Adatvariációs technológiai vizsgálat erődiagramjai GTD-241 anyagminőségben

6. sz. melléklet: M6. Érdességmérési diagramok GTD-241anyagminőségben

7. sz. melléklet: M7. Érdességmérési diagramok GTD-262 anyagminőségben

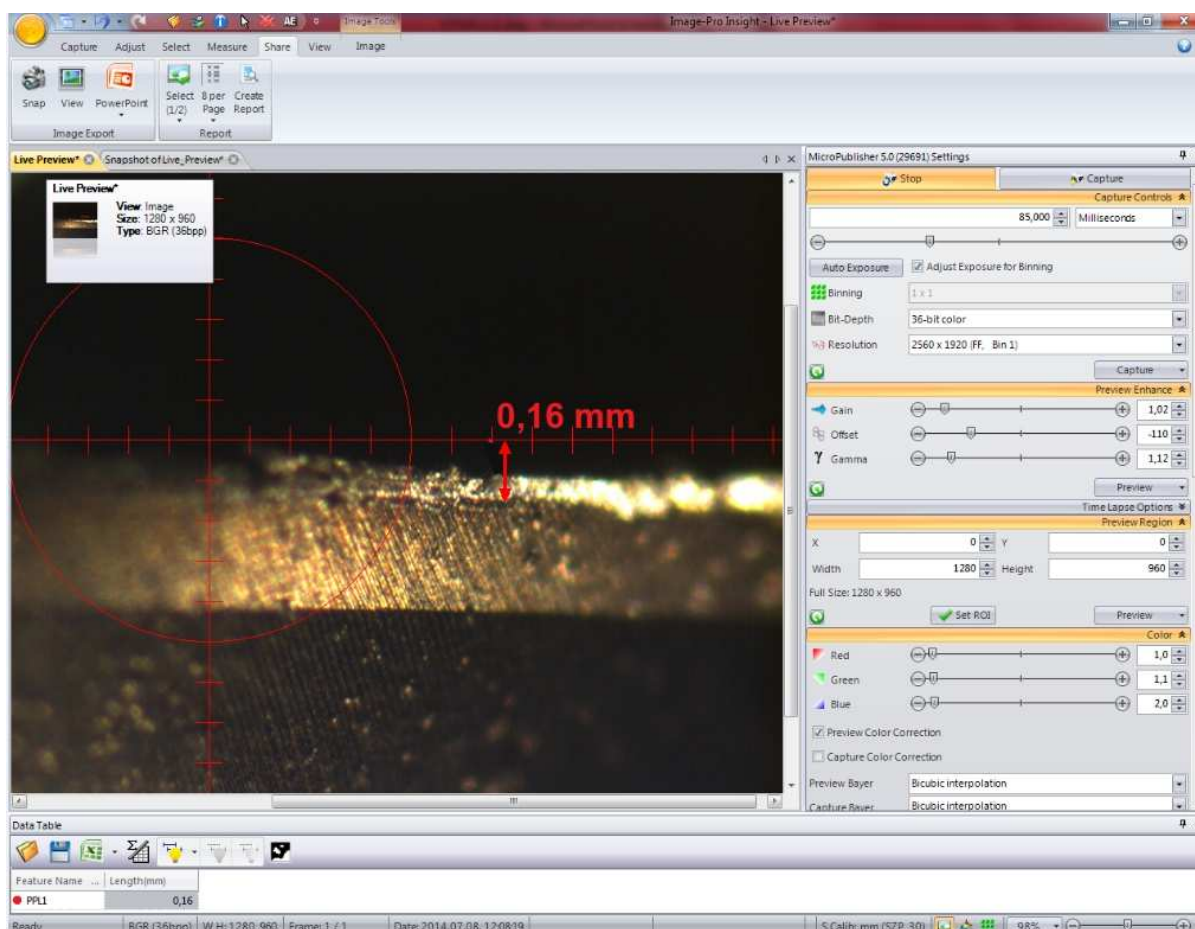
8. sz. melléklet: M8. Élekről készült képek a nagy hűtőcsatornás ujjmaróhoz

M1. Alapanyagok keménységmérési adatai

X6CrNiTi1810				GTD-262				GTD-241			
	mért értékek	átlag	HB		mért értékek	átlag	HV		mért értékek	átlag	HV
1.	1,138	1,142	173	1.	0,358	0,359	432	1.	0,378	0,380	385
	1,145				0,36				0,381		
2.	1,155	1,158	168	2.	0,38	0,377	391	2.	0,391	0,385	375
	1,16				0,374				0,379		
3.	1,183	1,169	165	3.	0,388	0,380	385	3.	0,386	0,389	368
	1,155				0,372				0,391		
4.	1,15	1,144	172	4.	0,378	0,382	381	4.	0,389	0,388	370
	1,137				0,385				0,387		
5.	1,142	1,137	175	5.	0,379	0,375	396	5.	0,385	0,382	381
	1,132				0,371				0,378		
átlagok:		1,1497	170,6			0,3745	397			0,3845	375,8
			170±1 HB				40±1 HRC				37±1 HRC

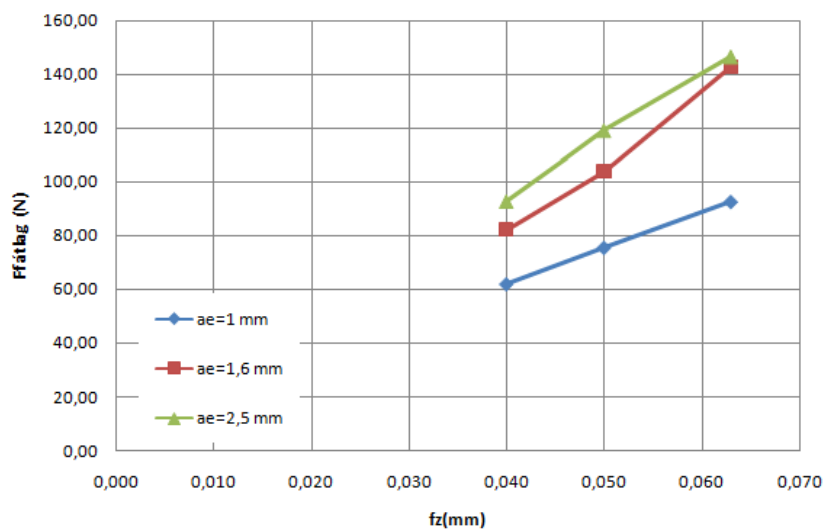
Mért értékek összefoglaló táblázata

M2. A mikroszkópi kép (mérőskálával, „célkereszttel”)



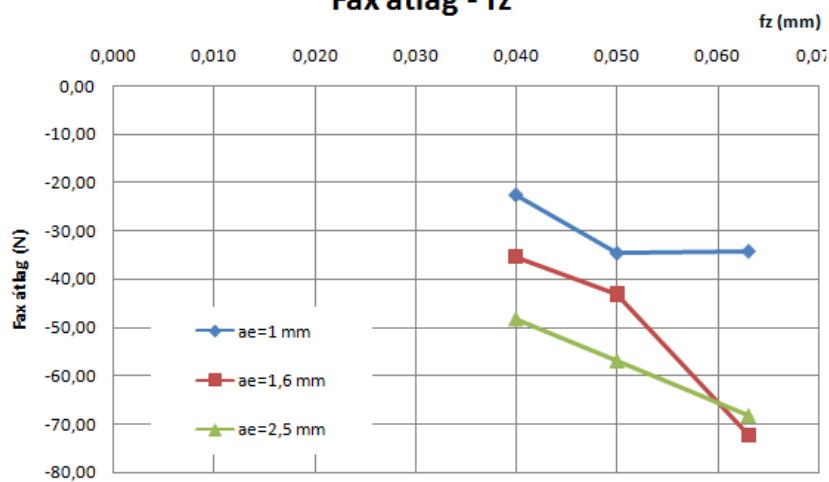
M3. Adatvariációs technológiai vizsgálat erődiagramjai X6CrNiTi1810
anyagminőségben

Ff átlag - fz



Előtolás irányú erő (átlag)
 – fogankénti előtolás
 összefüggése

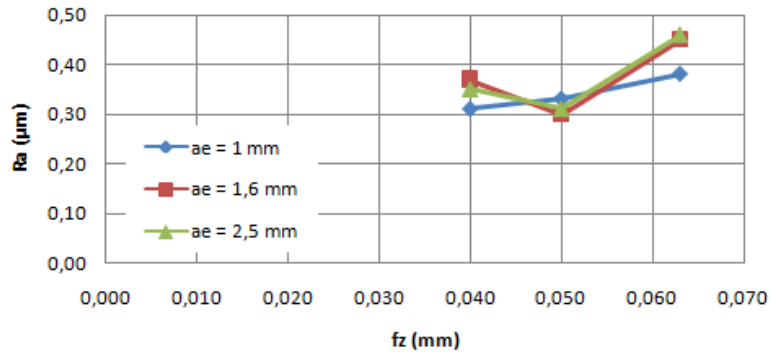
Fax átlag - fz



Axiális irányú erő (átlag) –
 fogankénti előtolás
 összefüggése

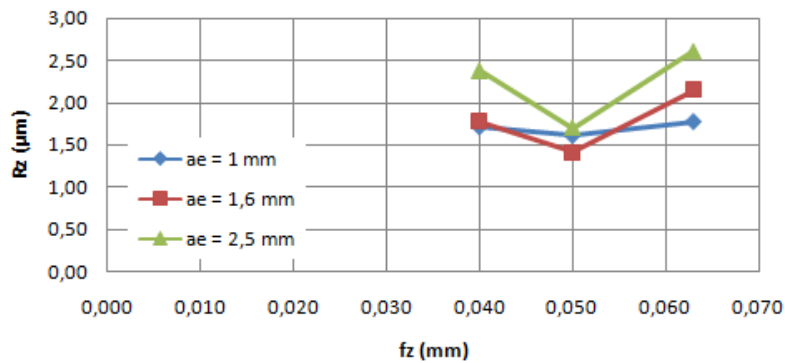
M4. Érdességmérési diagramok X6CrNiTi1810 anyagminőségben

fz - Ra



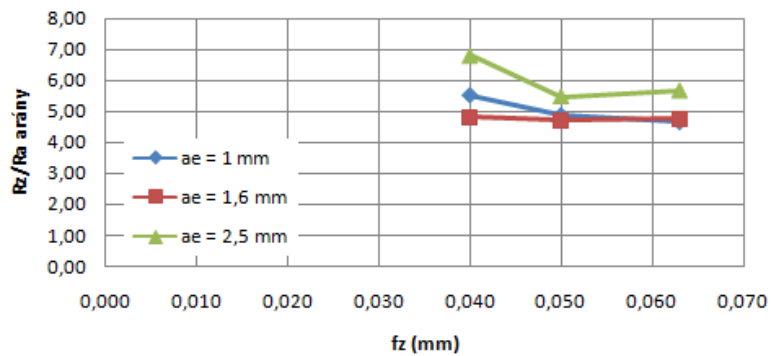
Átlagos érdesség (Ra) a fogankénti előtolás függvényében

fz - Rz



Egyenetlenségmagasság (Rz) a fogankénti előtolás függvényében

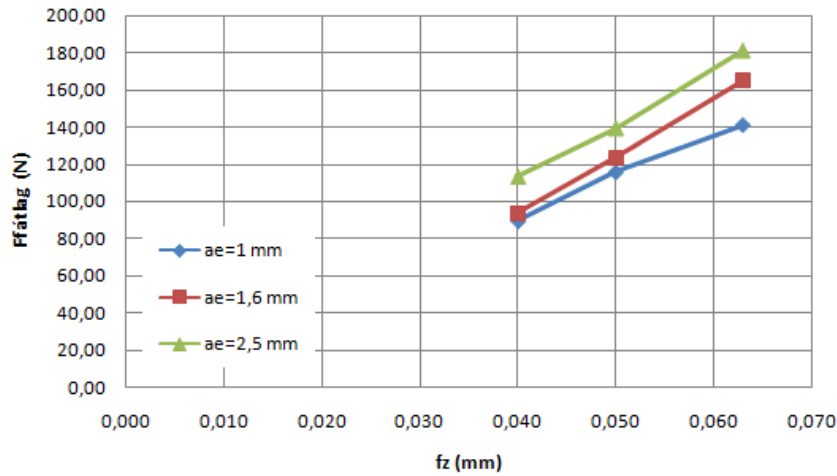
fz - Rz/Ra



Rz/Ra arány a fogankénti előtolás függvényében

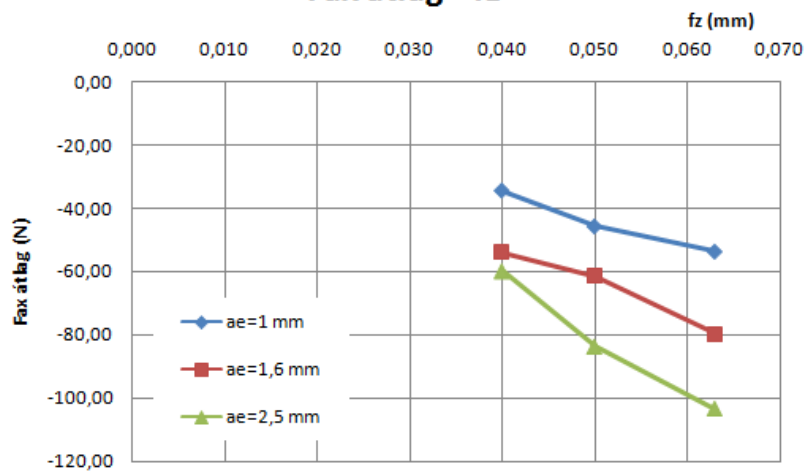
**M5. Adatvariációs technológiai vizsgálat erődiagramjai GTD-241
anyagminőségben**

Ff átlag - fz



Előtolás irányú erő (átlag)
– fogankénti előtolás
összefüggése

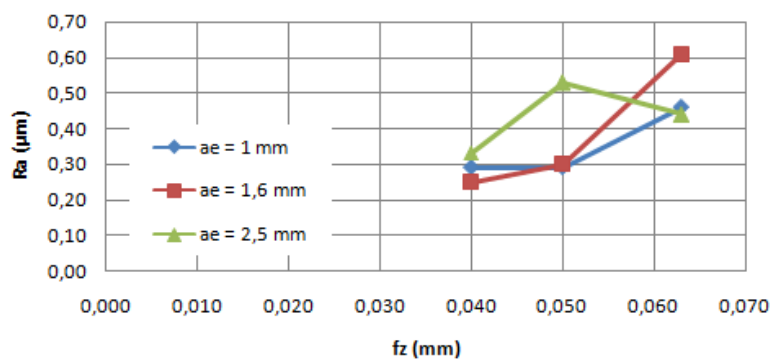
Fax átlag - fz



Axiális irányú erő (átlag) –
fogankénti előtolás
összefüggése

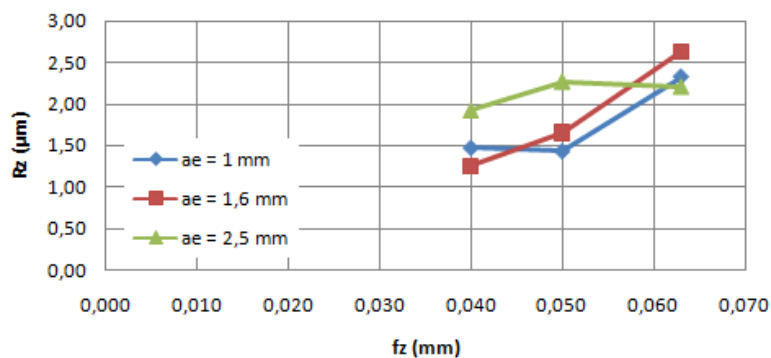
M6. Érdességmérési diagramok GTD-241anyagminőségben

fz - Ra



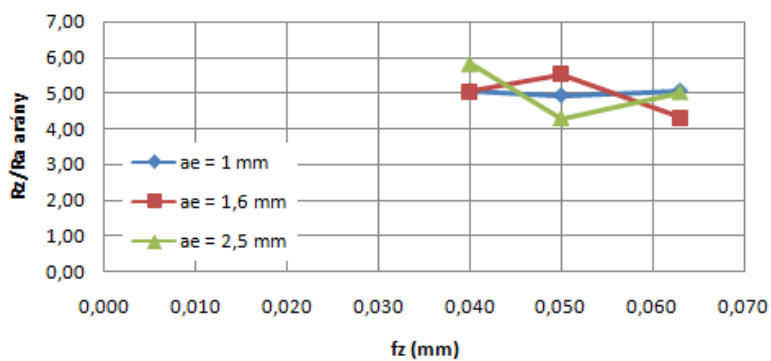
Átlagos érdesség (Ra) a fogankénti előtolás függvényében

fz - Rz



Egyenetlenségmagasság (Rz) a fogankénti előtolás függvényében

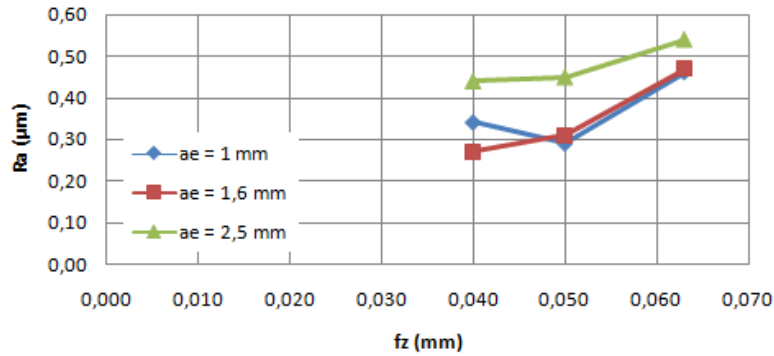
fz - Rz/Ra



Rz/Ra arány a fogankénti előtolás függvényében

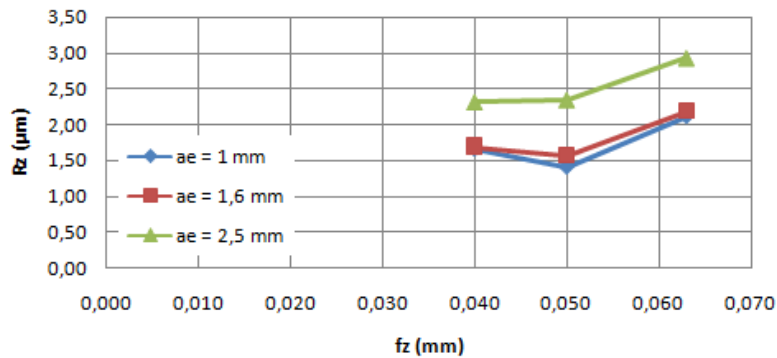
M7. Érdességmérési diagramok GTD-262 anyagminőségben

fz - Ra



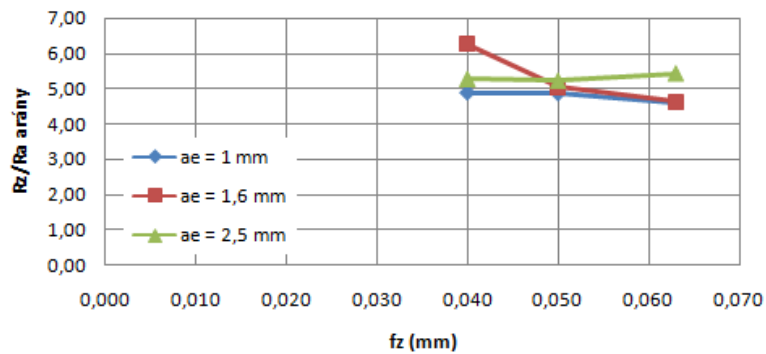
Átlagos érdesség (Ra) a fogankénti előtolás függvényében

fz - Rz



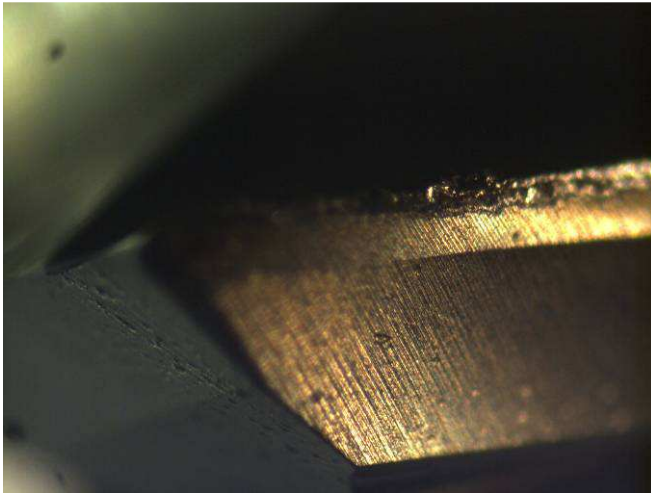
Egyenetlenségmagasság (Rz) a fogankénti előtolás függvényében

fz - Rz/Ra



Rz/Ra arány a fogankénti előtolás függvényében

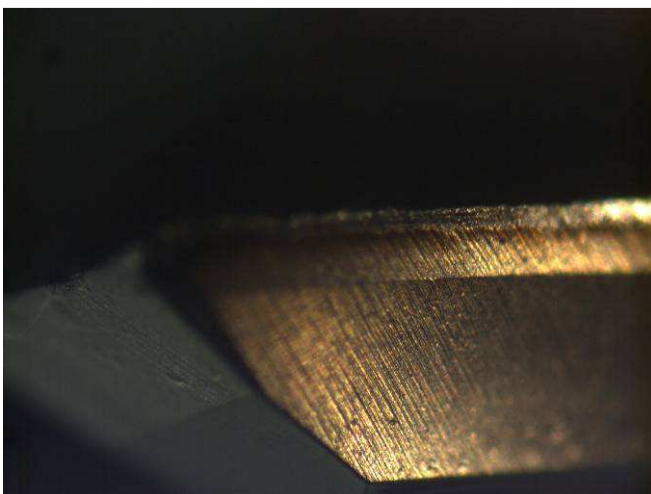
M8. Élekről készült képek a nagy hűtőcsatornás ujjmaróhoz



Csonka él 1.
Utolsó forgácsolt szakasz



Központi él 1.
Utolsó forgácsolt szakasz
5 mm fogásnál kialakult csorbulás



Csonka él 2.
Utolsó forgácsolt szakasz
Egyenletes és csorbulás mentes
kopás