



ÓBUDAI EGYETEM

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet

A PVD-bevonatok és az élkialakítás kísérleti vizsgálata nehezen forgácsolható acélok marásakor

Készítette:

Troszt Gergő

4. évfolyamos hallgató

Konzulensek:

dr. Sipos Sándor, mestertanár

Csuka Sándor, intézeti mérnök

Budapest, 2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Innováció és azok alkalmazhatósága a nehezen forgácsolható acélok megmunkálásánál.....	5
2.1 PVD bevonatrendszerek.....	6
2.2 Élpreparáció, éllekerekedés.....	8
2.3 Nehezen forgácsolható acélok.....	13
2.3.1 Titán	14
2.3.2 HRSA anyagok (Heat Resistant Super Alloys= hőálló szuperötvözetek)	14
2.3.3 Ausztenites korrózióálló acél.....	15
3. Kísérleti körülmények bemutatása.....	18
4. Mérési eredmények bemutatása.....	22
4.1 Szerszámok éllekerekedésének és mikrogeometriájának mérése	22
4.2 A tesztvizsgálat körülményei	24
4.3 A tesztvizsgálat eredményei.....	25
4.3.1 Mérési eredmények 120 m/min forgácsolósebességen.....	25
4.3.2 Mérési eredmények 150 m/min forgácsolósebességen.....	27
4.4 Összesített kopásmérési eredmények	29
4.5 Kopásintenzitás, erőtani elemzés	31
4.6 Erőtani elemzés	32
4.6.1 Előtolás irányú erőhatás.....	33
4.6.2 Axiális irányú erőhatás	35
4.6.3 „X” irányú erőhatás	36
4.7 Összesítés	38
5. Felhasznált irodalom.....	42
6. Melléklet	44

1. Bevezetés

A 21. században a cégeket nagy feladat elé állítja az, hogy a piacon elfoglalt helyüket meg tudják tartani és ne szoruljanak ki a szoros vállalati versenyből. Ez folyamatos fejlesztésekkel és technológiai újításokkal érhető el, amelyek fő célja a termékek minőségének folyamatos javítása, vagy új, korszerűbb változatok létrehozása. Ezzel a forgácsoló szerszámokat gyártó multinacionális cégek sincsenek másként. A szerszámfelhasználók elsősorban a megmunkálendő termékük gyártási költségeinek minimalizására törekednek. Ezt részben a szerszámköltségek és a gépi fő- és mellékidők csökkentésével (ez teszi ki gyártási költségek kb. 60%-át), illetve a termeléshez szükséges egyéb eszközök mellőzésével, vagy egyre kisebb mennyiségek használatával (a hűtő-, öblítő- és kenőfolyadékok – rövidítve HÖK - például a forgácsolás költségének 16%-ára rúgnak) próbálják elérni.

A hűtő-kenő-öblítő folyadékok teljes mértékű elhagyása nem csak a gyártási költségek csökkentését jelenti, hanem a környezettudatos forgácsolás alapelve is. A TDK dolgozatomhoz elvégzett kísérlet során ezeket a tényeket figyelembe véve HÖK folyadék nélkül, **szárazon** munkáltuk meg a rendelkezésünkre álló anyagot.

A szerszámköltség csökkentése nem elsődleges szempont, mivel ez az összköltségnek mindössze 3-4%-át teszi ki. A szerszámok fejlesztésével elérhető nagyobb éltartam növekedés az eszközigény csökkenését eredményezi, a nagyobb forgácsolósebesség, fogásmélység és fogankénti előtolás, azaz a percenkénti leválasztható forgácstérfogat (Q) beállítása pedig a termelékenységi egyértelmű növeléséhez vezet.

A szerszámoknál megfigyelhető technológiai fejlesztések új élgeometriák és korszerű bevonatok bevezetésével járnak. Az elmúlt években nagy jelentőséget kapott a szerszámminnováció körében a forgácsoló szerszámok élének mikrogeometriája, és az él menti felületek topográfiájának fontossága. Kísérletünk létjogosultságát Egyetemünk Gépgyártástechnológiai Tanszékén végzett korábbi vizsgálatok alapozták meg. A forgácsoláskutatásról és szerszámminősítésről elhíresült Szakcsoportban többek között olyan témakörökben végeztek kísérleteket, mint a szerszám innováció a nehezen megmunkálható anyagok területén, vagy a TiAlN bevonatú szerszámok piacképességeinek vizsgálata.

Az általunk használt forgácsoló szerszámok is AlTiN bevonatúak. Korábbi tapasztalataink alapján a marási műveleteknél ettől a bevonattípustól kedvező eredményeket várhatunk el. Magas (750-800°C) hőállósága miatt a nehezen megmunkálható korrózióálló anyagok forgácsolásánál is pozitív eredményekkel lehet alkalmazni.

A kísérletet egy manapság egyre szélesebb körben alkalmazott acélminőségen hajtottam végre. Az ausztenites szövetszerkezetű korrózióálló acél az egyik legnehezebben megmunkálható változat. Jelen dolgozat áttekinti ennek az anyagminőségnek a forgácsolási nehézségeit, és azok okait, valamint a vizsgált szerszámok alkalmasságát és a különböző változatok előnyeit.

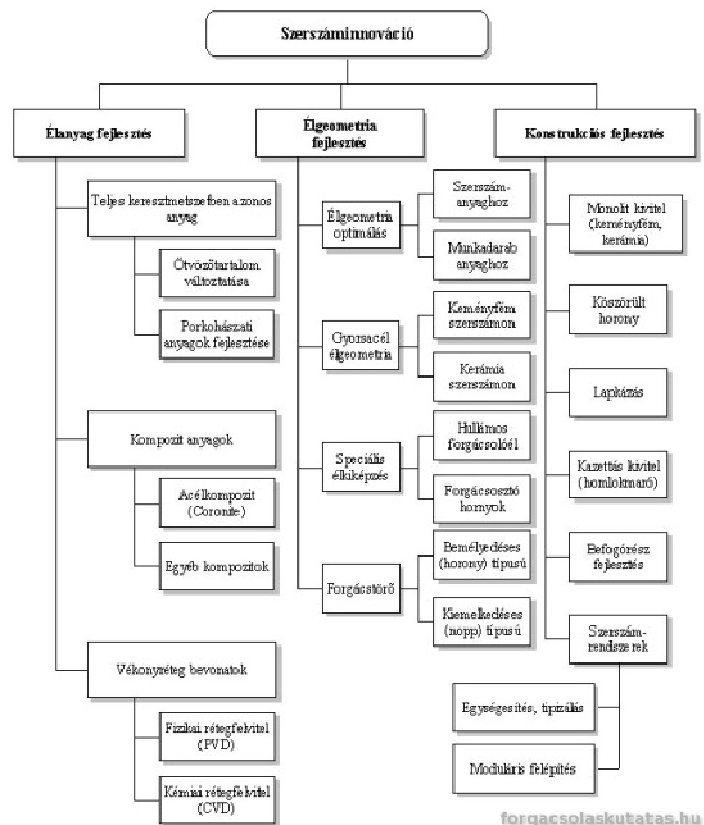
Ebbe a sorba illeszthető be jelen TDK dolgozat fő témája is. A különböző élkialakításokat tartalmazó szerszámok a köszörülés és bevonatolás után eltérő élpreparáción estek át. Az élpreparáció hatására különböző nagyságú éllekerekedés mérhető a vizsgált szerszámokon. Vizsgálatom során arra kerestem a választ, hogy a különböző élkialakítással rendelkező szármarók hogy viselkednek az említett anyagminőség sarokmarásakor. Ezeknek a forgácsolóképessegre gyakorolt hatását kísérletek sorozatával vizsgáltam. Az összehasonlítást két különböző forgácsoló sebességen hajtottam végre, melynek során mértem a maráskor fellépő erőhatásokat, illetve vizsgáltam a forgácsolás következtében kialakuló kopási jelenségeket. TDK dolgozatomhoz a **WALTER** szerszámgyártó cég biztosította a felhasznált szerszámokat.

2. Innováció és azok alkalmazhatósága a nehezen forgácsolható acélok megmunkálásánál

Mérési eredményeim ismertetése előtt ebben a fejezetben foglalom össze a PVD vékony réteg bevonatok jelentőségét, a különböző bevonatok előnyeit és alkalmazhatóságukat. Betekintést adok a fizikai rétegfelvitellel készített bevonatok fejlődésére, és szerepükre a forgácsolókéesség javításában. Továbbá ismertetem az élpreparáció definícióját, összefoglalom a különböző élkialakításokat és említést teszek az eddigi elért eredményekről az élpreparációs vizsgálatok során.

Az előzőekben említettek nagyban hozzájárulnak a szerszámok teljesítőképességének és megbízhatóságának javításához és az éltartam megnöveléséhez. Az **1. ábrán** is látszik, hogy a szerszáminnováció területén is fontos szerepet töltenek be és komoly eredmények elérésére hivatottak. Végezetül összefoglalom a nehezen forgácsolható acélok csoportját, ezen belül külön kitérek a kísérletem során felhasznált ausztenites korrózióálló acél megmunkálási nehézségeire.

[1]



1. ábra. Szerszáminnováció [1]

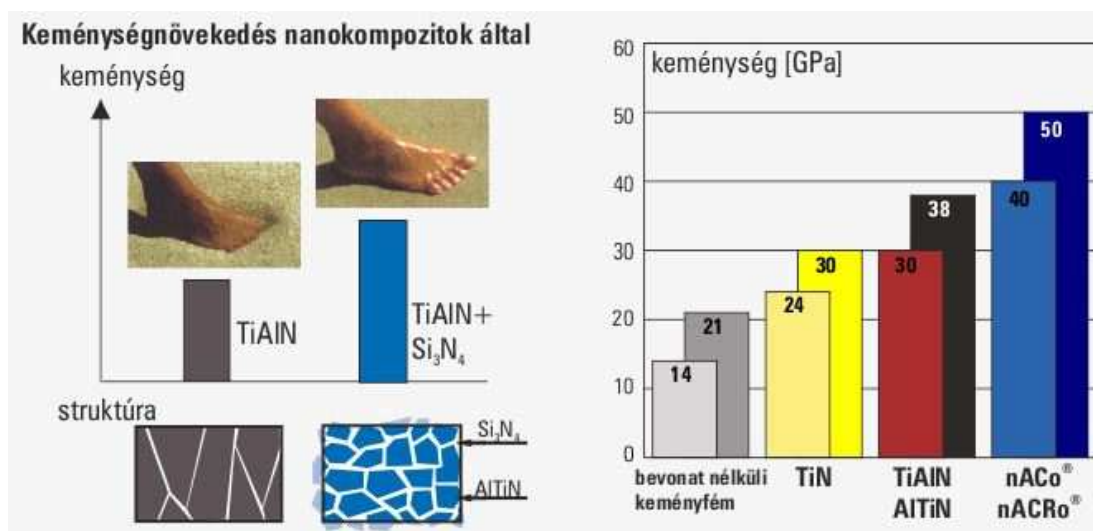
2.1 PVD bevonatrendszerek

Az **1. ábrán** is látható, hogy a szerszáminnovációnak egy fontos részét képezi a vékonyréteg bevonatok, amiknek a fejlesztésével lehetővé válik a különböző anyagok gazdaságos forgácsolása mellett a termelékenység növelése is.

A fizikai rétegfelvitellel (PVD-Physical vapor deposition) létrehozott bevonatok nagy fejlődésen mentek át az elmúlt években, ennek eredményeként alkalmazásuk nagyon elterjedt az iparban. Az általánosnak mondható 1. generációs, egyrétegű, egyfázisú kemény PVD bevonatokat (TiN, TiC, CrN vagy az Al_2O_3) rendkívül széles körben használják, forgácsoló szerszámoktól kezdve, kivágó lyukasztó szerszámokon át az orvosi iparban használatos implantátumokhoz is, mivel akár 3-4-szeres élettartamnövekedés érhető el alkalmazásukkal a bevonat nélküli szerszámokhoz képest. További fejlesztések eredményeként megjelentek a három összetevős (például az AlTiN) bevonatok, és lehetővé tették a többrétegű és az ún. gradiens (szabályosan változó összetételű) rétegszerkezetek elterjedését. A 4. generációs bevonatokhoz sorolható kombinációk olyan előnyös tulajdonságokkal bírnak, mint a nagyobb bevonati szilárdság, vagy a kisebb bevonati réteg érdesség. Fizikai tulajdonságaik közül kiemelkedő az extrém keménységük és hőszilárdságuk, továbbá nagymértékű oxidációs képességük. [1; 2]

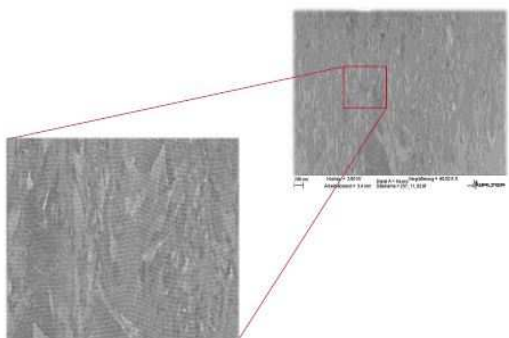
A bevonatolás terén és az új bevonatok fejlesztésénél a nanokompozit bevonatok jelentik az igazi innovációt. A nanokompozit szerkezetű bevonatok ugyanis nagy alap-, és melegkeménységgel, fokozott oxidációs ellenállással és csekély hővezető képességgel rendelkeznek. Ezeket az előnyöket annak köszönheti a bevonatstuktúra, hogy a TiN, TiAlN vagy AlCrN részecskék Si_3N_4 mátrixba ágyazódnak be, ami előnyös, mert a Si burok megakadályozza a nanokristály-részecskék növekedését, ami szilárdságcsökkenéshez vezetne. Így ezekkel a bevonatokkal akár 35%-os keménységnövekedést is elérhető. Ezzel a nanokompozit struktúrával jelentősen fejlődött a bevonatok karakterisztikája is. A szilícium növeli a bevonatok szívósságát, ezzel egyidejűleg csökkenti a belső feszültségeket. A struktúrának a keménységnövekedésre gyakorolt hatását a leglátványosabban a strandhomok példáján keresztül szemléltethetjük. A száraz homokban a láb egyszerűen elsüllyed, viszont a

nedves homokban a víz kitölti a térközöket, így a homoknak nagyobb lesz az ellenállása, vagyis keményebb lesz, és a láb nem süllyed el. **(2. ábra)** [3]



2. ábra. A nanostruktúra által elért keménység növekedés [3]

Korrózióálló acélok forgácsolásakor fontos, hogy a szerszám éle a keletkezett magas hőmérsékletnek minél jobban ellen tudjon állni. Ez fokozottan érvényes a környezetbarát forgácsolásnál („green manufacturing”), ahol az árasztásos hűtés helyett minimál kenést és/vagy hideg levegős hűtést (Cold Air Gun) alkalmaznak. A legnagyobb hőmérsékletet az AlTiN bevonattal rendelkező szerszámok viselik el. Mivel a kísérletünk során a korrózióálló acél marásakor a forgácsolási zónát csak hideg levegővel hűtöttük, így az általunk használt szármarók is a hőmérsékletnek legjobban ellenálló, a Walter cég saját fejlesztésű TAT (AlTiN) bevonatot kapták. A speciális bevonat tulajdonságait és struktúráját az **1. táblázat** tartalmazza. A réteg a nagyobb hőmérséklet elviselése mellett nagyobb oxidációs ellenállást fejt ki a szerszám használata közben, így fokozottan megvédi a marószerszámot. A bevonat kedvező hatásai az általánosan alkalmazott paramétereket meghaladó, nagy sebességeknél is jól megfigyelhetők. [4]

	TAT	NANO-RÉTEG STRUKTÚRA
Szín	kék-ibolya	
Hőmérséklet	kb. 550°C	
Keménység	3200 HV	
Szilárdság	440 GPa	
Bevonat struktúra	Nano-réteg	
Magas hőmérséklettel szembeni ellenállás		
Vastagság	1-2 µm	

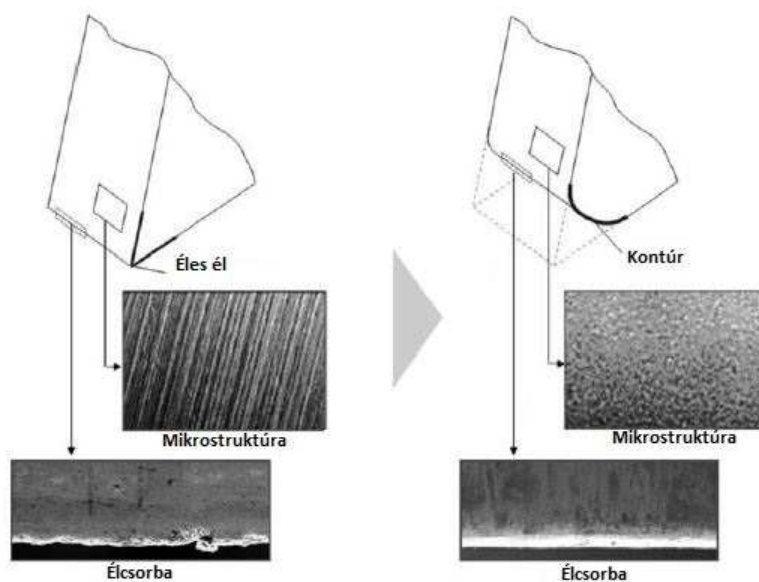
1. táblázat. Speciális TAT bevonat, Walter AG [4]

2.2 Élpreparáció, éllekerekedés

A forgácsolóélminőség olyan komplex fogalom, amely tartalmazza a szabályos élgeometriájú szerszámok élén a forgácsolópont kis környezetének, vagy bizonyos, általában aktív élszakaszának mikrogeometriai jellemzőit, valamint rétegtulajdonságait. Ilyen mikrogeometriai jellemzők a homlok-és hátfelület érdessége, a forgácsolóél érdessége, valamint a forgácsolóél sugara, azaz az éllekerekedés. Az anyagleválasztás folyamán a forgáccsal érintkező homlokfelület hajlamos az adhézióra, amely kráterkopáshoz vezethet, másrészt megkönnyítheti az élrátét kialakítását, ami az általunk forgácsolt anyagminőségnél fokozottan megfigyelhető. A durván élezett homlokfelület eredményeként megnő a forgács és a homloklap közötti súrlódás, ami a kopás intenzitásának növekedéséhez vezet, így éltartamromlás következhet be. A hátfelület durva élezésével is hasonló eredmények figyelhetők meg. A munkadarab és a felület között fellépő adhézió nagyobb kopáshoz vezet, így a munkadarab pontossága csökken, érdességének paraméterei megnőnek. A durván élezett homlok és hátfelület eredményeként a szerszám élének érdessége is megnő. Ez nagy jelentőséggel bír a munkadarabra előírt minőség szempontjából. Ezeket összegezve elmondhatjuk, hogy a szerszámélminőség optimalizálása épp olyan fontossággal bír, mint a 2.1-es fejezetben tárgyalt bevonatrendszerek fejlesztése. A törekvés az optimális élminőségre három indokkal magyarázható. Az első, és talán a legfontosabb szempont a minél nagyobb

termelékenység elérése és annak minőségi javítása. Ez a megmunkáló gép állásidejének csökkentésével, a szerszámok cseréjének mérséklésével érhető el. A harmadik szempont pedig a gazdaságosság fokozása, amely az éltartamnövekedéssel áll szoros kapcsolatban. [5]

Egy köszörült, kezeletlen vágóél megannyi mikro defektusokat idézhet elő, amik negatív hatással lehetnek a szerszám éltartamára. Ezeknek a defektusoknak a kiküszöbölésére alkalmas eljárás az élpreparáció, amelynek célja az él stabilizálása, azaz a meghibásodások valószínűségének csökkentése, ami a szerszám hosszabb idejű használatához vezet. A köszörülést követő eljárásnak az él stabilizálásán kívül fontos célja az élsorja csökkentése, az él mikrogeometriájának, a homlok- és hátfelület érdességének és az élérdességnek a javítása. A **3. ábrán** látható egy kezeletlen és egy preparált vágóél és azok mikrogeometriájának megváltozása az élpreparációt követően. A preparációval elért élminőség-javulás hatására a szerszámfelhasználók drasztikus szerszámköltség-csökkenést és teljesítményjavulást figyelhetnek meg. [6]

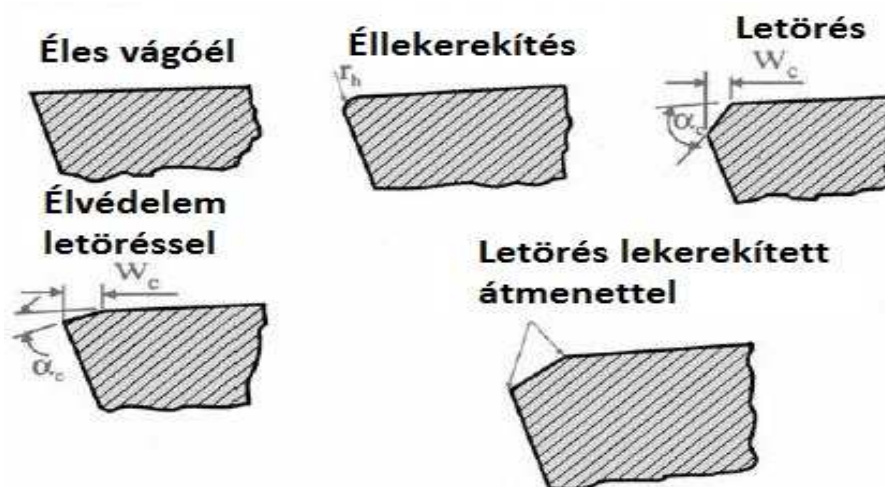


3. ábra. Az élpreparáció céljai [7]

Az élpreparáció, mint a szerszám forgácsolásképségének javítására szolgáló technológia, napjainkban terjed el. Ez arra vezethető vissza, hogy a múltban a szerszámfejlesztők elsődleges kutatási területe a szerszámok alapanyagában,

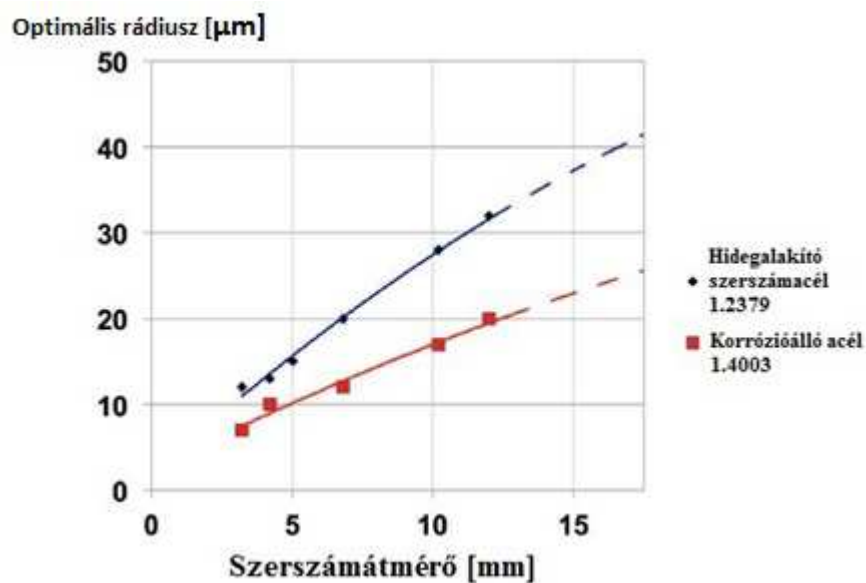
konstrukciójában és a bevonatok fejlesztésében merült ki. Az élpreparációval kapcsolatos kutatások éppen ezért a közelmúlta és a jelenre tehetők. A preparáció technológiai nehézségét jelenti, hogy egy ideális éllekerekedés eléréséhez egy sor követelménynek kell teljesülnie. Alkalmazhatósági-technikai szempontból fontos a megvalósított geometria pontossága és variabilitása. Ezeket a követelményeket úgy kell elérni, hogy magának a technológiának a vezérlése csak szűk határok között változhat. Mindezekben felül beállíthatónak kell lennie a különféle kezdeti feltételeknek pl.: érdességi paraméterek). Különösen nagy fontossággal bír a létrehozott élgeometria reprodukálhatósága. Az élpreparációval több különböző struktúrájú élkialakítás hozható létre. Egyes esetekben a szerszám éle teljesen le van kerekítve, ezt nevezzük éllekerekedésnek, rövidítve r_n , másik variációként az élen létrehozott fazettás kialakítás jelenti az élvédelmet, így védik meg a szerszám élet a tönkremeneteltől. **(4. ábra)** A fazettás kialakításnál újra éles élek jönnek létre, amik hosszabb használat esetén az él kitöredezéséhez vezethetnek, valamint a megmunkálás során is nagyobb erők ébrednek, mint a lekerekített él esetében. Egy további előny, ami az éllekerekedés mellett szól, hogy az axiális fogásvétel megnövelésével kevésbé nőnek meg a megmunkálási erőhatások, mint a fazettás élkialakításnál. [7]

Kísérletem során az egyik fajta szerszám kezeletlen (eredeti élezés és bevonatolás), volt a másik kettőn viszont két különböző nagyságú lekerekedés volt mérhető.



4. ábra Élalkalmazások karakterisztikája [7]

A forgácsolóél lekerekítésének optimális tartománya nem csak a szerszámok alkalmazásától függ (fúrás, marás, esztergálás...), hanem azok átmérőjétől és a megmunkálandó anyagminőségtől egyaránt. Ezt kísérletek sorozatával és az azokból készített számítóképletekkel lehet meghatározni, mint ahogy ez a következő ábrán is látható, ahol egy fúrószerszám optimális éllekerekedése került meghatározásra, hidegalakító szerszámacélok és korrózióálló acélok megmunkálásánál. (5. ábra) [2]



5. ábra. Optimális lekerekedés meghatározása [2]

Az eltérő nagyságú éllekerekedéseket különböző eljárásokkal lehet létrehozni. Ilyen módszerek többek között a forgófiniselés, áramlásfiniselés, elektropolírozás vagy a kefékkel megvalósított koptatás.

Az iparban egyik leggyakrabban használatos eljárás a forgófiniselés, amivel térdprotéziseken át forgácsoló szerszámok is megmunkálhatók. Alkalmazásának nagy előnyei közé tartozik az eredmények folyamatbiztonsága és reprodukálhatósága, így elsődlegesen használatos éllekerekedések készítésekor. A forgófiniselő gép felépítése viszonylag egyszerű. A csiszolóanyagok széles választéka és a beállítható paraméterek változtatása lehetővé teszi különböző anyagok és geometriák megmunkálását. A 6. ábrán látható a szerszámgép felépítése és működésének elvi vázlata. Az eljárás során a szerszámok egy speciális szerszámtartóban vannak elhelyezve. Ezek az eljárás folyamán

körkörös irányban mozognak a csiszoló, vagy polírozó anyaggal ellátott tartályban. A nagy sebességű forgó mozgás nyomást hoz létre a befogott szerszámok és a szubsztrátum között, így eredményezi a kívánt lekerekítést. Hátrányai közé sorolható a relatív hosszú ütemidő. [8]



6. ábra. Forgófiniselő gép felépítése és működésének elvi vázlata [2]

A kívánt éllekerekedés eléréséhez számos befolyásoló tényezőt kell figyelembe venni a preparáció alkalmazásakor. A megfelelő koptató anyag kiválasztásával nagyban javíthatjuk a preparáció eredményességét. A szubsztrátum szemcsenagysága, keménysége és sűrűsége határozza meg annak koptató hatását. A **6. ábrán** látható géphez olyan granulátumok használhatók, mint pl.: dióhéjból készült őrlemények vagy más speciális alapanyagból előállított granulátumok. Ezek különböző szerszámanyagok megmunkálására alkalmasak. További befolyásoló paraméter a szerszám forgásirányának megválasztása. Az irány beállításával megoldható, hogy a szerszám melyik részeit érje koncentráltabban a koptató hatás. A fordulatszám beállítása ennél a technológiánál is nagy fontossággal bír, az alkalmazott szubsztrátummal együtt határozzák meg a leválasztás teljesítményét. Túl nagy fordulatszám beállítása esetén a növekedő erőhatások miatt a vékony szerszámok eltörését is okozhatja. A megmunkálási idő a kezdeti méretektől és a kívánt értékektől függ, és szoros kapcsolatban van az alkalmazott közeggel is. Amíg egy durvább szemcsenagyságú anyaggal ugyanannyi idő alatt nagyobb lekerekedés érhető el, addig egy finomabb

változattal, jóval kisebb lekerekedés valósítható meg. Azt is megemlíthetjük, hogy a szerszám átmérőjének nagysága és a szerszám hossza kevésbé befolyásolja a megmunkálás eredményét. [7]

2.3 Nehezen forgácsolható acélok

A forgácsoló szerszámok fejlődése szoros kapcsolatban áll a megmunkálandó anyagminőségek típusainak növekedésével. Az egyre nagyobb ütemben fejlődő technika hatására, a megmunkálandó anyagokkal szemben támasztott követelmények is növekedtek. Ennek következtében javítani kell az anyagminőségek teljesítőképességét, új, előnyösebb tulajdonságokkal rendelkező változatokat kell létrehozni.

Az acélok széleskörű alkalmazhatósága miatt léteznek olyan egyedülálló metallurgiai tulajdonságokkal rendelkező típusok, amik szélsőséges igények (korrózió, magas hőmérséklet) mellett is alkalmazhatóak, viszont ezeknek az anyagoknak a forgácsolhatósága nagy kihívást jelent. Ezeket az acélokat nevezzük nehezen forgácsolható acéloknak. Ilyen például a titán és ötvözetei, a korrózióálló acélok, az edzett acélok, a szerszámacélok és a HRSA anyagok (Heat Resistant Super Alloys= hőálló szuperötvözetek). A szerszámgyártó cégek többféleképpen reagálnak ezen anyagok megmunkálására. Egyes gyártók különféle alapanyagú, bevonatú és élgeometriájú lapkák fejlesztésével, mások a tömör keményfém szerszámok innovációjával próbálják megoldani az említett anyagok megmunkálását. Dolgozatomban, tömör keményfém marószerszámok tesztelésére került sor.[9]

A munkadarabok anyagminőségének, és ezek tulajdonságainak megismerése nagyon fontos része a forgácsolás megtervezésének. Ahhoz, hogy az éltartamot és a termelékenységet maximálisra tervezhessük, tudnunk kell, hogy a forgácsolás közben milyen jelenségek léphetnek fel. A következőkben a fent említett, nehezen forgácsolható anyagokat mutatom be.

2.3.1 Titán

A titán magas szilárdsági tulajdonsággal és kedvezőbb korrózióval szembeni ellenállásának köszönhetően nagymértékű teljesítménynövekedés érhető el az energiaellátó berendezésekben. A titán ötvözetek megmunkálhatósága nehezebben valósítható meg, mint az általános és a korrózióálló acéloké. A titán hővezetése igen gyenge, illetve a szilárdságát magas hőmérsékleten is megtartja. Ennek hatására a forgácsolás következtében nagy forgácsoló erőket és hőképződést eredményez. Az erősen elnyírt, vékony forgácsok összetömörödhetnek, így a homlokfelületen koncentráltabb forgácsoló erők ébrednek. Magas forgácsoló sebesség mellett reakcióba léphet az anyag a szerszámmal, ami a szerszám töréséhez vezethet. A titán megmunkálásához általában finomszemcsés, bevonat nélküli keményfém szerszám használatos, pozitív geometriával és jó élszívossággal. [10]

2.3.2 HRSA anyagok (Heat Resistant Super Alloys= hőálló szuperötvözetek)

Az ISO S csoportban a titán és ötvözetein kívül a HRSA anyagok találhatók, amelyek három csoportra oszthatók: nikkel alapú, vas alapú és kobalt alapú ötvözetek. Fő felhasználási területei a repülőgép ipar, olaj és gázipar, orvosi protézisek gyártása. (7. ábra) A HRSA anyagok közül a kobalt alapú ötvözeteket lehet a legnehezebben megmunkálni, ezt követik a nikkel alapú anyagok, „legkönnyebben” pedig a vas alapúak forgácsolhatók. A szakaszos forgácsképződés következtében dinamikus erők mérhetőek. Erre az anyagminőségre is jellemző a rossz hővezető képesség, melynek eredményeképpen magas hőmérsékletet fejlődik a szerszám élének környezetében, ami csorbulásos kopáshoz vezet. Megmunkálásához nagy belépő szögű (kör alakú) és pozitív geometriájú lapka ajánlott. A hőálló szuperötvözetek gazdaságos megmunkálása speciális szerszámkímélő stratégiákkal valósítható meg, ilyen pl. a trochoidális marás. [10]



7. ábra Turbinalapát HRSA anyagból [11]

2.3.3 Ausztenites korrózióálló acél

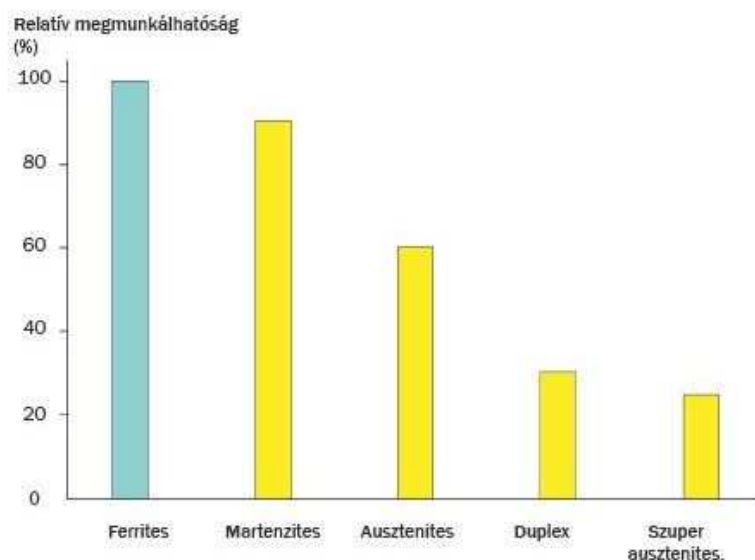
A nehezen megmunkálható acélok csoportjában, felhasználásukat tekintve, a korrózióálló acélminőségek terjedtek el a legjobban. Alkalmazásuk az utóbbi időben erőteljesen növekedett az olyan területeken, ahol nem ritka a szélsőséges hőmérséklet. Ilyenek pl.: az élelmiszeripar, az építészet, a vegyipari gépgyártás, a petrokémiai üzemek, a szállítási ipar, az egészségügy és a gyógyszeripar. A korrózióálló, más néven rozsdamentes acélok vas alapú ötvözetek magas, 12%-nál nagyobb krómtartalommal és általában alacsony széntartalommal ($C \leq 0,05\%$), további ötvözők a nikkel (Ni), molibdén (Mo), nióbium (Nb) és a titán (Ti). Ezek hozzáadásával különböző mechanikai és kémiai tulajdonságok érhetőek el, ilyenek a korrózióállóság és a szilárdság magas hőmérsékleten, viszont e tulajdonságok javulásával az acél forgácsolása jelentősen romlik.

A korrózióálló acélokat szövetszerkezetük szerint öt nagy csoportba lehet sorolni. Ezek a következők:

- Ferrites
- Martenzites
- Ausztenites
- Duplex (ferrit- ausztenites)
- Kiválásosan keményedő acélok

Ezen anyagcsoport tagjai nagy szilárdságuk és felkeményedési hajlamuk miatt nehezebben munkálhatóak meg, mint az ötvözetlen vagy kevésbé ötvözött acélok. A korrózióállóságot és szakítószilárdságot növelő ötvözők jelentősen rontják az anyag

forgácsolhatóságát, mert hatásukra nő az acél képlékenysége. A korrózióálló acélokhoz nagy forgácsolási teljesítmény szükséges és alacsony forgácsolási sebesség. A tapasztalatok alapján a különböző típusú rozsdamentes acélok forgácsolhatósága is eltérő. Ezt mutatja a **8. ábra**. [12; 13]

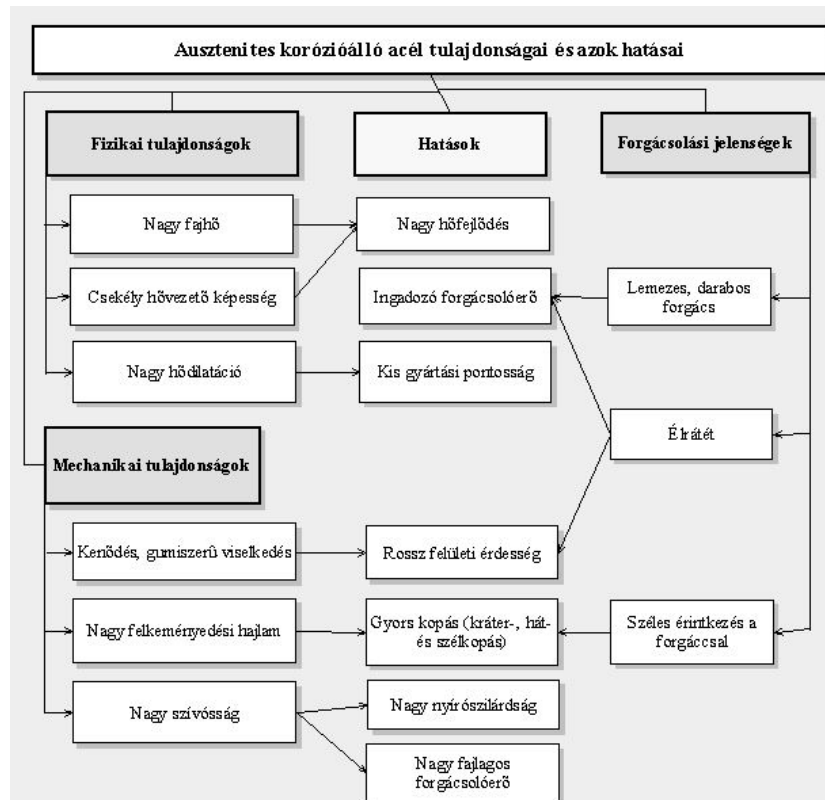


8. ábra Korrózióálló acélok relatív megmunkálhatósága [13]

TDK dolgozatomhoz megvalósított kísérletnél ausztenites korrózióálló acélban végeztünk forgácsolási vizsgálatokat. Ezért a következőkben ezzel az anyagminőséggel foglalkozok részletesebben.

Ausztenites korrózióálló acélt olyan helyeken alkalmaznak, ahol a korrózióállóság mellett fontos követelmény az acél szívóssága is. Leggyakoribb összetétele a 18% Cr és 8% Ni. Az ilyen típusú acélok forgácsolása nehezen valósítható meg, tulajdonságait és azok hatásait a forgácsolásban a **9. ábra** mutatja. Az ábrán megfigyelhetjük, hogy milyen kapcsolat van az anyag fizikai, mechanikai és a forgácsolási tulajdonságai és a forgácsoláskor tapasztalt jelenségek között. Az anyag nagy fajhőjének és csekély hővezető képességének következtében forgácsoláskor nagy hő fejlődik a szerszám élén. Ezért ezeket az anyagokat intenzív hűtés, kenés mellett szokták megmunkálni. A magas hőterhelésnek köszönhetően a szerszám éle elveszti szilárdságát és kicsorbul, ami az éltartam romlásához vezet. Az anyagra jellemző hődilatáció miatt a gyártási pontosság romlik. Mechanikai tulajdonságai közül a nagy

szívósság, a felkeményedési hajlam és a gumyszerű viselkedés emelhető ki, utóbbi következtében romlik a felületi érdesség.



9. ábra Az auszténites korrózióálló acél tulajdonságai és azok hatásai [12]

A szóban forgó acél terhelhetősége számos tényezővel jellemezhető, mint például szakító-, a kifáradási-, a kúszási- vagy az ütési szilárdság, illetve a keménység. Az anyagminőség sajátos jellemzője a nagy felkeményedési hajlama, aminek következtében kemény felületek jönnek létre a munkadarabon, melyek berepedezéssel kopáshoz vezetnek. A felkeményedés következtében leválhat a bevonat az élen, így hamarabb kitöredezik az él, ami a felület romlásához vezet. A technológia tervezésénél ügyelni kell arra, hogy a fogásmélység a felkeményedett réteg alatt legyen. A forgácsolás következtében olyan jelenségeket figyelhetünk meg, mint a szerszám élén kialakult élrátét, aminek a hatására az erőhatások erősen ingadoznak és a felület minősége is romlik. Az anyagminőség „gumyszerű” viselkedése miatt a munkadarabon sorjaképződés figyelhető meg, ami az él gyors elhasználódásához vezet. [12; 13]

3. Kísérleti körülmények bemutatása

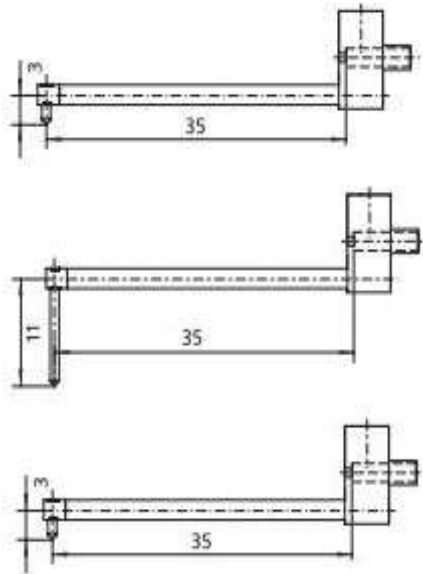
A forgácsolási kísérlet során, a Bánki Kar tulajdonában lévő gépeken végeztem el a méréseket. A gépek mindegyike kifogástalan, a kísérletek végrehajtására alkalmas állapotú.

A szármarók előzetes vizsgálata, az éllekerekedés, az él, - hátoldali és – homlokoldali érdesség meghatározásához használt mérőgép: MarSurf XR 20, előtoló eszköz: MarSurf GD 120.



10. ábra MarSurf XR 20

A képen látható (10. ábra) MarSurf XR 20 egy számítógéppel támogatott tapintós érdességmérőgép, ami nem csak a felületi érdesség és hullámosság pontos meghatározását teszi lehetővé, hanem a szerszámok éllekerekedésének vizsgálatára is alkalmas. A mérőgép vízszintes irányban 120 mm-es mérési tartománnyal rendelkezik, függőleges irányban 500 mm-es elmozdulásra képes. A különböző felületek érdességének meghatározásához háromféle mérő tapintót használtunk.



Az éllekerekedést és a hátfelület érdességét a képen (11. ábra) látható MFW Tastarm 60°/2 μm típusú tapintóval mértem.

A 11. ábrán látható középső tapintóval a szerszám homlokfelületének érdességét határoztam meg. A tapintó típusa: Mahr 90°/2 μm

A forgácsoló él érdességének meghatározásához az MFW Tastarm 60°/5 μm m. Schneide típusú tapintót használtam.

11. ábra Mérőtapintók [14]



12. ábra A kísérlethez használt marógép

A forgácsolási vizsgálatához használt marógép típusa: Mazak Nexus 410A-II, vezérlés: Mazatrol Matrix. Az képen látható (12. ábra) szerszámgép asztalának mérete 900 x 410 mm, X (vízszintes) irányban 560 mm, Z (függőleges) irányban 410 mm és Y (az előző kettőre merőleges)

irányban pedig 510 mm mozgástartománnyal. A gép gyorsjárat sebessége 36 m/min, maximális fordulatszáma 12000 1/perc, maximális teljesítménye 18,5 kW. A szerszámtárba maximum 30 darab szerszám fogható be egyszerre. A legnagyobb befogható szerszámtátmérő $d=30$ mm, legnagyobb szerszámhossz $L=350$ mm. Az asztal 500 kg-ig terhelhető.



13. ábra Mikroszkóp

A forgácsolás előtt (élesség megállapítása) és közben a szerszámokon észrevehető kopásokat a képen (13. ábra) látható sztereo mikroszkóppal vizsgáltuk és elemeztük. A mikroszkóp 7-45-szörös nagyításra képes. A mikroszkópra egy CCD kamera van rögzítve, ami rögtön továbbítja a képet egy számítógépnek. A számítógépes program segítségével (Image-Pro Insight) könnyen és hatékonyan lehet elemezni a szerszámon megfigyelhető kopásra utaló jelenségeket, illetve (hitelesítés után) mérni lehet a kopásokat.

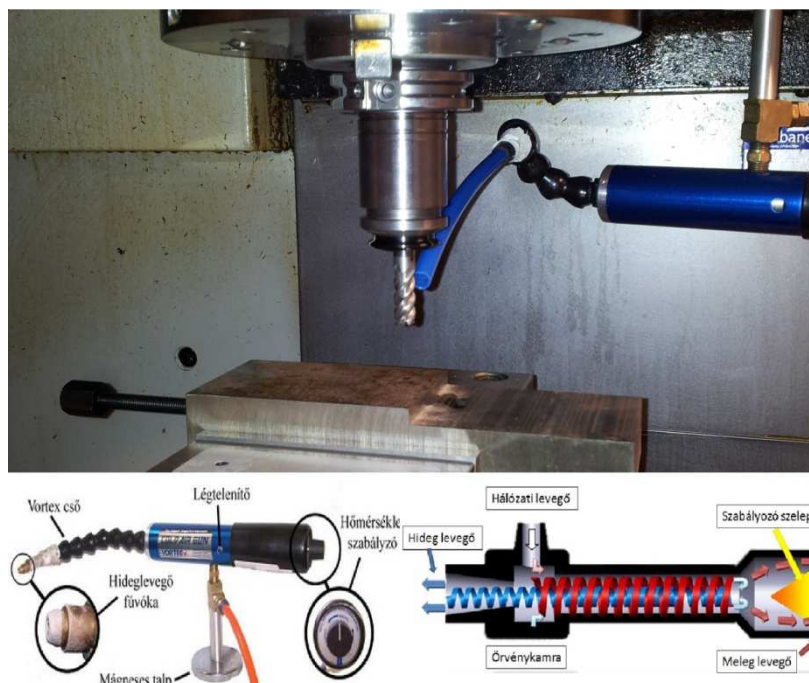
A marási kísérlet folyamán mértük a forgácsoláskor fellépő erőhatások is. Az erőmérés az F_{ax} (axiális irányú) és az előtolási erő (F_f) meghatározására terjedt ki. A munkadarabra ható erőkomponenseket egy 9757 A típusú, Kistler gyártmányú erőmérő cella segítségével regisztráltuk (14. ábra).



14. ábra Kistler erőmérő cella [15]

Az erőmérő a három irányba ható dinamikus erőhatások mérésére alkalmas. Mérési tartománya F_z -5...10 kN, F_y -5...5 kN és F_x -5...5 kN, 0-70°C között használható.

A szerszám, illetve a forgácsolási zóna hűtését és a forgács eltávolítását hűtött levegővel oldottuk meg. Az általunk használt ColdAirGun (CAG) készülék elengedhetetlen kelléke a környezetbarát forgácsolásnak, mivel környezetet szennyező anyagok nélkül, a műhely sűrítettlevegő hálózatát felhasználva hűti a szerszámot. A Vortex-cső kb. 20mm távolságból $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli hőfok elérésére képes. Működési elve: a levegőt hideg és meleg levegőre választja szét. A hideg levegőt közvetlenül a forgácsolási zóna közelébe vezeti, a meleg levegő pedig távozik a készülékből. A hideg levegős hűtést közvetlenül a szerszámmra vezettük (**15. ábra**). [16]



15. ábra A hűtött-sűrített levegőt előállító berendezés elve, részei és alkalmazása [16]

4. Mérési eredmények bemutatása

A kísérlethez felhasznált négyélű, Proto-max TG (Tough Guy) típusjelű száras marókat a **Walter** szerszámgyártó cég biztosította számunkra. A szerszámok közül egy kezeletlen (eredeti élezés és bevonatolás) és két, különböző élpreparációval kialakított változatot kaptunk. Mindhárom fajtából három-három darab marószerszám állt rendelkezésünkre. A szerszámok adatait a **2. táblázat** foglalja össze.

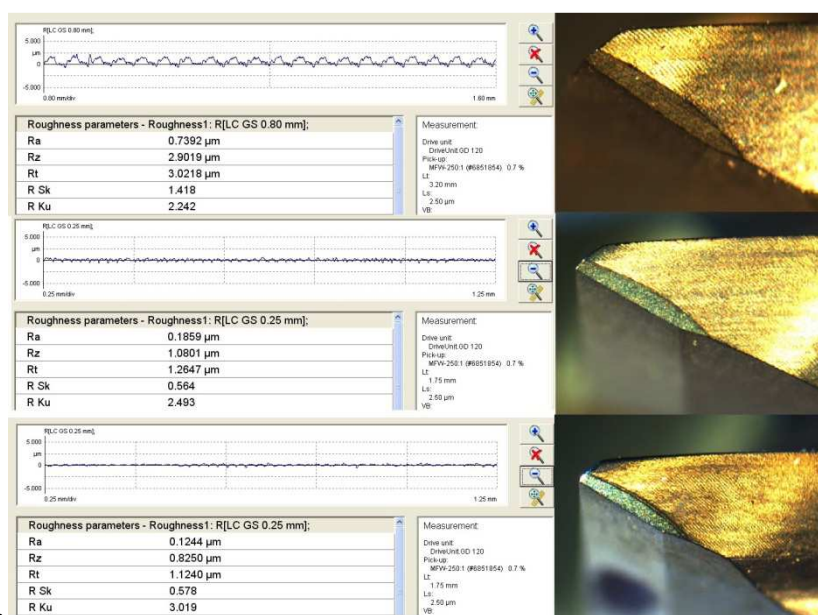
Jellemző értékek	Kezeletlen	Preparáció1	Preparáció2
Szerszámkód	W_0	W_1	W_2
Átlagos éllekerekedés [μm]	5	7	13
Átmérő [mm]	10		
Fogszám	4		
Szerszámanyag	Keménymetall		
Bevonat	AlTiN		
λ [$^\circ$]	50		

2. táblázat. Kísérlethez használt szármarók adatai

4.1 Szerszámok éllekerekedésének és mikrogeometriájának mérése

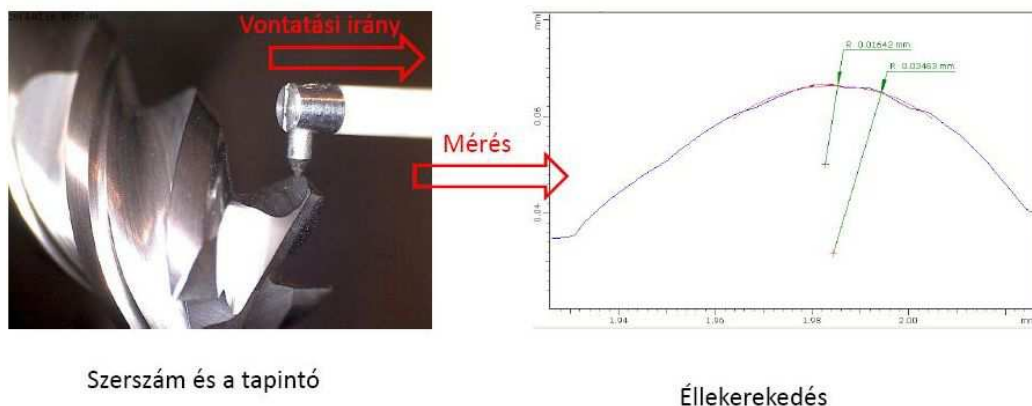
A második fejezetben tárgyaltak szerint a forgácsolószerszámok élezése mikroszkopikus roncsolódásokat okoz a vágóél közvetlen környezetében, ezeket az eltéréseket az élmínőséggel jellemezhetjük. Az élmínőség definíciója a 2.2-es fejezetben került kifejtésre. Ezek a mikroérdességek, nem szabatos éllekerekedések, illetőleg a rétegtulajdonságok jelenléte és kedvezőtlen nagysága negatívan befolyásolhatja az anyagleválasztás végkimenetelét, élpreparáció alkalmazásával viszont az érdességi paraméterek (R_a , R_z) nagyban javíthatók. Ezt bizonyítva előzetes érdességi méréseket végeztem. A mérés során tapintós módszerrel megmértem a marószerszám homlok- és hátlapjának érdességét, illetve az élérdességet. A **16. ábrán** látható, hogy a kezeletlen szerszám hátlapján az átlagos érdesség $0,74 \mu\text{m}$, míg az OTEC berendezéssel preparált W_1 jelzésű szerszámon $0,19 \mu\text{m}$ -t lehetett mérni. A legjobb felülete az üveggyönggyel preparált szerszámnak lett, itt az R_a értéke $0,12 \mu\text{m}$. A hátfelületről készített képeken is

meg lehet figyelni, hogy a preparáció hatására az él környezetében egyre csökkennek a mélyedések, az abrazív közeg lekoptatja a köszörűkorong szemcséi által keletkezett barázdákat, ezzel magyarázható az érdesség javulása. Ennek köszönhetően kisebb lesz az anyagleválasztás során a forgács és a hátfelület között a súrlódás, így a várható éltartam nagyobb lehet.



16. ábra. Mikrogeometria változása az élpreparáció hatására

A forgácsoló szerszámok élén található r_n lekerekedést is tapintós módszerrel mértem. A kúpos kialakítású gyémánt mérőtapintó (az élre merőlegesen) a homlokfelületről indul, méri az él lekerekedését és a hátfelületen végződik a vontatás (17. ábra). A tapintó csúcsának megtett pályája a számítógépes szoftveren jelenik meg, amire egy kört illesztve lehet meghatározni a lekerekedés nagyságát. Minden élen a fogcsúcstól kb. 1,5 mm távolságra mértem a sugarat. A szerszámankénti átlagos értékeket a 2. táblázat tartalmazza.



17. ábra. Éllekerekedés mérése és regisztrátuma tapintóval történő méréskor

4.2 A tesztvizsgálat körülményei

A kísérletsorozat a Bányai Kar Gépműhelyébe telepített Mazak gyártmányú, függőleges tengelyű megmunkálóközponton folyt. A vizsgálatok szakaszonként történtek, egy szakasz megegyezett a munkadarab szélességi méretével ($b_w=80$ mm). A tesztmérések előtt, illetve bizonyos számú szakasz megtétele után CCD-kamerával felszerelt sztereomikroszkópon vizsgáltuk meg a szerszámélek állapotát. A kopásmérés természetesen mind a négy élre kiterjedt. A kopásvizsgálattal párhuzamosan méréssel történt a forgácsoláskor fellépő erőkomponensek értékének megállapítása is. Ehhez Kistler erőmérőrendszer és a hozzá illesztett *DynoWare* szoftver állt rendelkezésre.

A különböző élkiképzésű szerszámok közül az egyik üveggyönggyel való kezelésem, a másik pedig OTEC berendezésben végrehajtott preparáción esett át. Minden változat összehasonlítása két különböző forgácsolósebességen történt. A többi paraméter, azaz a radiális (a_e) és axiális (a_p) fogásvétel, illetve a fogankénti előtolás (f_z) állandó értékű volt. A beállított forgácsolási adatok a következők:

- Forgácsolósebesség: $v_c=120$ és 150 m/min
- Fordulatszám: $n=3820$ és 4775 1/min
- Fogankénti előtolás: $f_z=0,06$ mm (állandó érték)
- Előtolósebesség: $v_f=917$ és 1146 mm/min
- Radiális fogásvétel: $a_e=0,2 \times D=2$ mm (állandó érték)
- Axiális fogásvétel: $a_p=0,5 \times D=5$ mm (állandó érték)

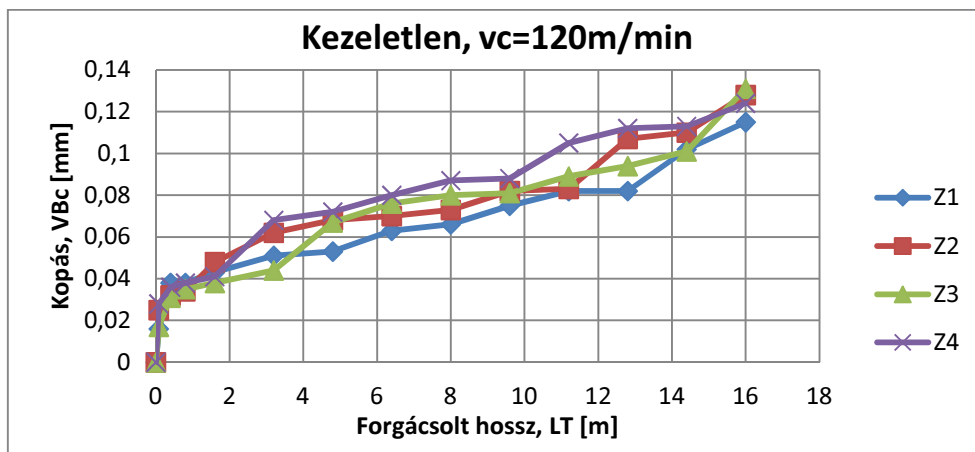
A tesztek – a bevezetőben említett okok miatt – ColdAirGun sűrített levegővel történő hűtés mellett végeztük.

4.3 A tesztvizsgálat eredményei

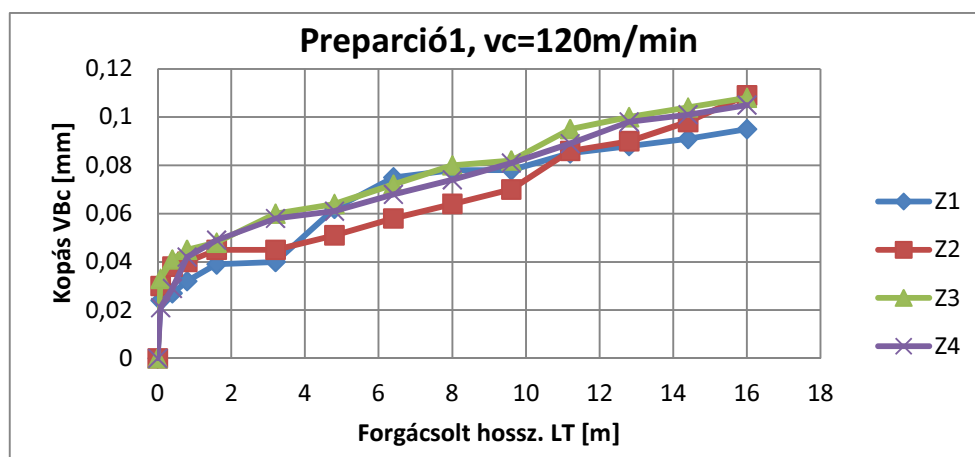
A kísérleti vizsgálat során a száras maró élein megállapítottuk a kopás helyét és nagyságát. Az elhasználódás rendszerint a fogak hátfelületén és a csúcán jelentkezett. A mért értékeket, a forgácsolási hossz függvényében ábrázolva kialakult a kopásgörbe, amelynek elemzése módot ad a különféle élpreparációjú szerszámok viselkedésének vizsgálatára. Az így nyert diagramokból meg lehet határozni a szerszámok kopásának kezdeti szakaszát, ami a szerszám bekopásáig tart, az állandósult szakaszt, ahol a szerszám egyenletesen kopik, illetve túlkopási szakaszt, ami már a marószerszám tönkremenetelére utal.

4.3.1 Mérési eredmények 120 m/min forgácsolósebességen

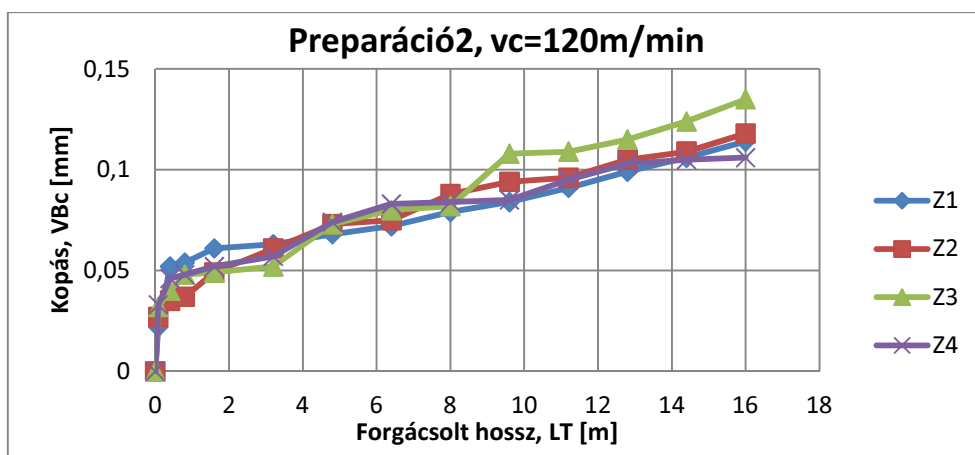
A vizsgálatokat – célszerűségi okokból – az alacsonyabb forgácsolósebességen kezdtük. Ennél a sebességnél a szerszám olyan kimagaslóan jó teljesítőképességet mutatott, hogy kérdéses volt az előkészített munkadarabok elegendő mennyisége. A rendelkezésre álló anyagmennyiséggel való takarékoskodás miatt ezért a marási úthosszt 16 m-ben maximáltuk, ami számszerűen 200 szakasz megtételét jelentette. Az ilyen módon vizsgált 4 élre kapott kopásgörbéket a **18-20. ábra** tünteti fel.



18. ábra. A kezeletlen marószerszám elhasználódása



19. ábra. Az üveggyönggyel preparált szerszám elhasználódása



20. ábra. Az OTEC berendezésben preparált maró elhasználódása

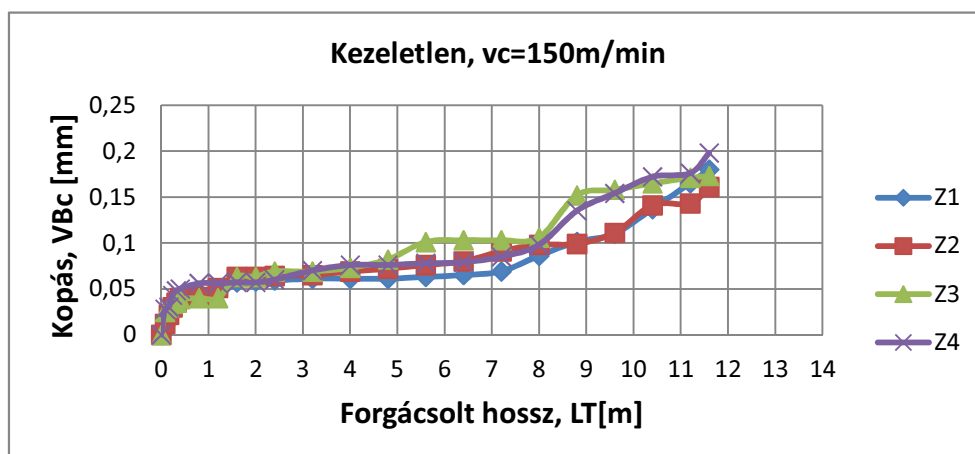
A közölt kopásdiagramokból megállapítható, hogy a különféle élkialakítású szerszámoknál az alkalmazott sebességen célul kitűzött marási hosszra nem figyelhető meg nagy eltérés. A bekopás már az első hossz megtétele után jelentkezett minden élen, a kezeletlen maró (négy élen mért átlagos) kopásmérete $VB=0,13$ mm volt, a két kezeltté is alig maradt el ettől ($VB=0,11$ mm). Ennél a sebességnél a Preparáció1 bizonyult legjobbnak, a másik két változaton, az egyes éleken mért kopásértékek szóródása is nagyobb volt.

4.3.2 Mérési eredmények 150 m/min forgácsolósebességen

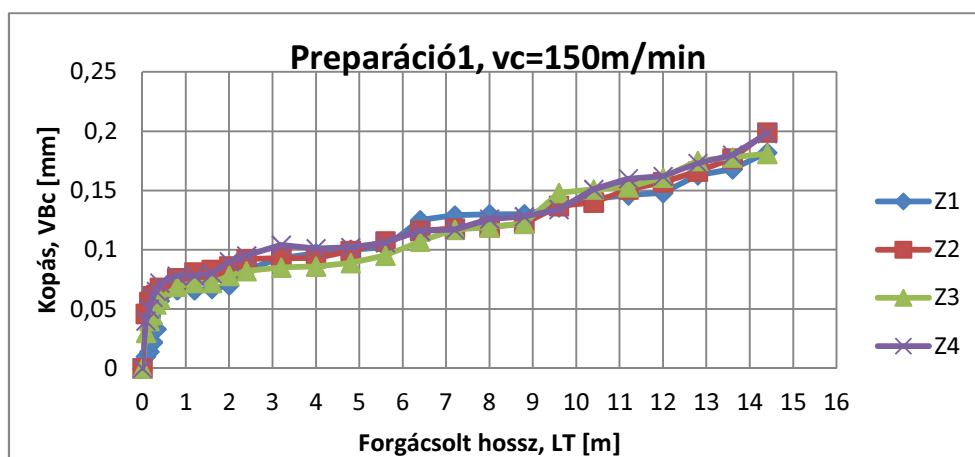
A forgácsolósebesség fokozásakor természetesen megnövekszik a kopásintenzitás, ezért a nagyobb (150 m/min) sebességen vizsgált szerszámoknál nem a mart hosszt maximáltuk, hanem előre meghatározott kopáskritérium alapján végeztük a további tesztek. Amennyiben a vizsgált szerszám valamelyik éle elérte a $VB=0,2$ mm értékű kopásméretet, a szerszámot kopottnak minősítettük. Ez a kritérium megfelel az üzemi gyakorlatban elterjedt „újraélezhetőségi kopottság” mértékének. Ennél nagyobb kopásméreteket mutató szerszámokat (különféle okok miatt, például megnő az élkítőredezés veszélye, stb.) viszonylag ritkán szoktak újraélezni.

Az emelt forgácsolósebességen mért kopásokból szerkesztett görbéket az **21.- 23. ábra** mutatja be. A közölt diagramok arról tanúskodnak, hogy kb. 5 m forgácsolt úthosszig a mért kopások mindhárom változatnál viszonylag kis szóródást mutatnak. A kezelt marók fogainak elhasználódása **sokkal egyöntetűbb**. A legkisebb teljesítőképességű a kezeletlen maró, mert a kopáskritériumig kb. 11,5 m úthosszig forgácsolt. Az üveggyönggyel kezelt maró 14,4 m utat tett meg, míg a legjobb forgácsolóképeségű változat az OTEC berendezésben kezelt szerszám. Ez utóbbi 15,2 m marási úthosszig ért el.

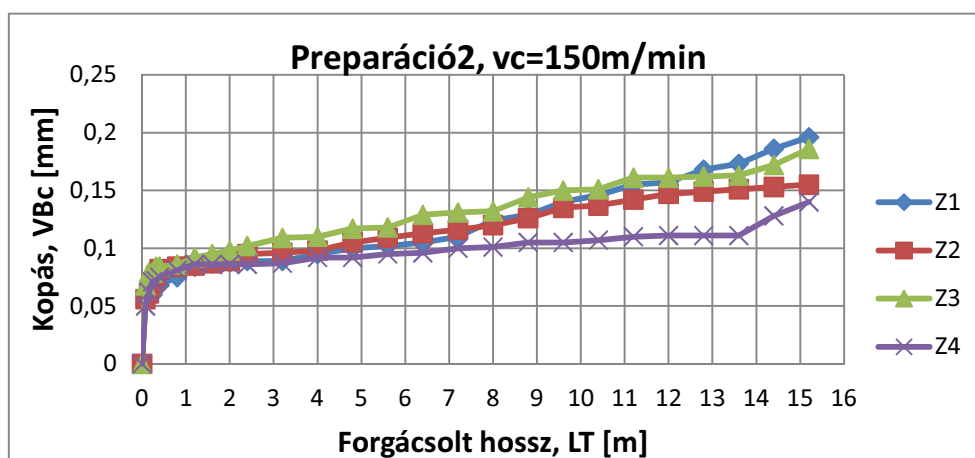
A vizsgálatok első fázisából számunkra az is kiderült, hogy az élpreparáció közege, végrehajtásának módszere és a maró forgácsolóképesége között szoros kapcsolat van. Ez főleg a nagy termelékenységet adó sarokmarási kísérleteknél derült ki: a kezeletlen marókhoz viszonyítva a kezelt szerszámok **24-31%-kal** nagyobb éltartamot értek el.



21. ábra. A kezeletlen marószerszám elhasználódása $v_c=150\text{ m/min}$ értéknél



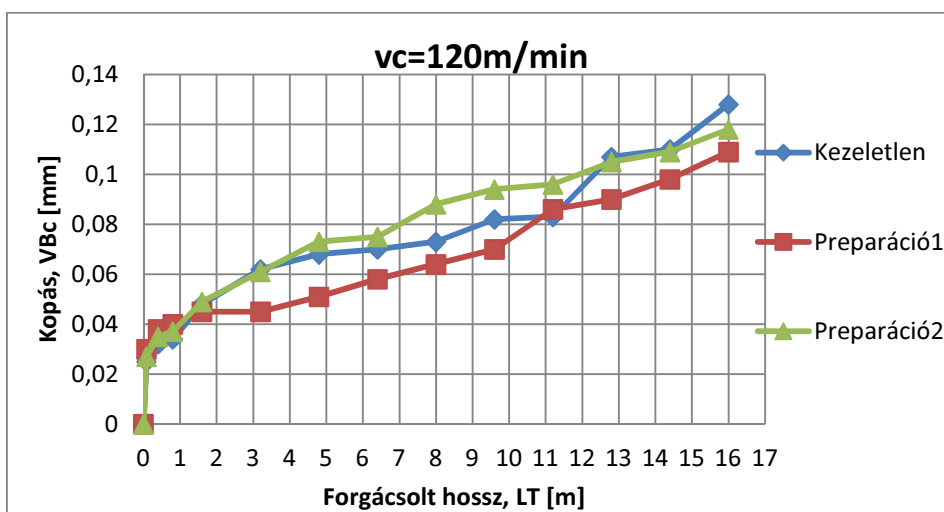
22. ábra. A Preparáció1 kezelt szerszám elhasználódása $v_c=150\text{ m/min}$ értéknél



23. ábra. Az OTEC berendezésben preparált maró elhasználódása 150 m/min sebességen

4.4 Összesített kopásmérési eredmények

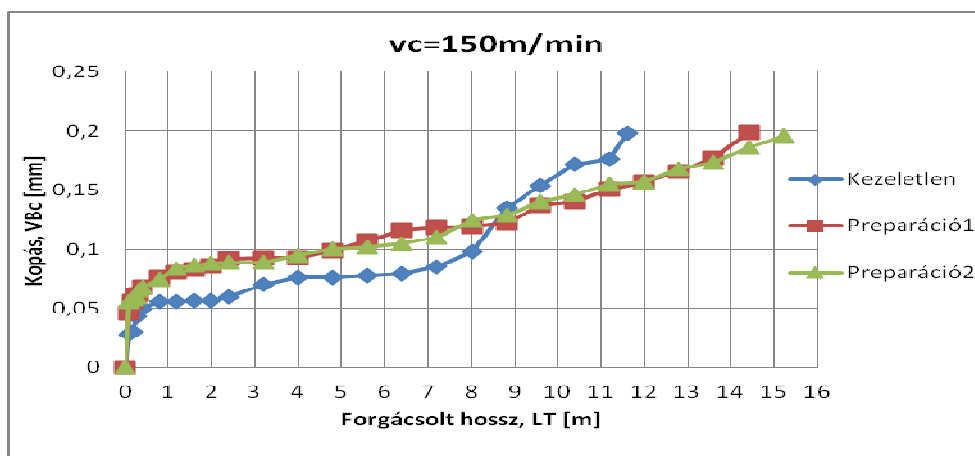
Az üzemi gyakorlat szerint „a szerszám működése és kopása szempontjából a vezérél a meghatározó”. Ennek kopása éri el ugyanis először a kopáskritérium értékét, és ez az él a mérvadó az újraélezés szempontjából. A 24. és 25. ábra a különböző kezelésű vezérélek kopását tünteti a marási úthossz függvényében.



24. ábra. A legnagyobb kopású élék teljesítőképessége 120 m/min sebességen

A 120 m/min forgácsolósebességen vizsgált marók kopásgörbéiből kiderül, hogy a 16 m (azaz 200 szakasz) forgácsolása után egyik szerszámon sem lehetett 0,2 mm kopást mérni. Ez arra enged következtetni, hogy a szerszámgyártó valószínűleg ezekre a körülményekre tervezte a szerszámot, ezen a sebességen ugyanis az éltartam igen kedvezően alakul. A diagramon az is látszik, hogy a klasszikus kopásgörbe szakaszaiból csak 2 figyelhető meg, mert a túlkopási szakasz – az éltartamkritérium következtében – nem is következik be. A bekopási szakasz minden (!) változatnál kb. 1 méterig tart, ezután különböző intenzitással használnak el az egyes marók. Az is megállapítható, hogy 16 méter forgácsolt hossz után a kezeletlen szerszámon alakult ki a legnagyobb kopás (0,128 mm), míg a W_1-es kódú marón pedig a legkisebb kopás (0,109 mm) volt mérhető.

Ezek alapján elmondható, hogy a vizsgálati körülmények között (tehát ezen a sebességen, ebben az anyagminőségben, illetve ezeket a forgácsolási adatokat beállítva) a 7 μ m átlagos éllekerekedéssel rendelkező szerszámmal érhető el a legnagyobb éltartam.



25. ábra. A legnagyobb kopású élek teljesítőképessége 150 m/min sebességen

A növelt forgácsoló sebességgel ($v_c=150$ m/min) végzett kísérlet eredményeit a **25. ábra** mutatja. A kezeletlen szerszám görbájén a tankönyvekben szereplő kopásgörbe mindhárom szakasza megfigyelhető: a bekopási szakasz kb. egy méterig kialakul, az állandósult kopás szakasza kb. 8 méterig tart, ezt követően –egy nem túlságosan vehemens túlkopási szakasz figyelhető meg. A szerszám 11,6 méter után elérte a kopáshatárt, így a kísérletet felfüggesztettük. A $7\ \mu\text{m}$ éllekerekedésű szármáró kopásgörbájén már nem lehet olyan egyértelműen megkülönböztetni a három kopási szakaszt. A bekopás után egy kis intenzitású, elnyúló kopási szakaszt láthatunk, amit közvetlenül a kopáskritérium elérése előtt egy túlkopási szakasz vált fel. Ezzel a preparációval a szerszám 14,4 méter forgácsolás után kopott el. Érdekes megfigyelni, hogy a kétféle élpreparációjú szerszám kopásgörbéje csaknem azonos, és a legnagyobb éllekerekedésűre kezelt szerszám csak a túlkopási szakaszban mutat nagyobb tartósságot. Ennek eredményeként, ezzel a szerszámmal tudtunk a legtovább forgácsolni, összesen 15,2 métert. Ismét hangsúlyozni kell azonban, hogy ezen a sebességen is csak egyetlen mérést hajtottunk végre, amelyet célszerű lenne megismételni.

4.5 Kopásintenzitás, erőteni elemzés

A vizsgálat során kapott eredményekből számítással meg lehet határozni a szerszám forgácsoló élének kopásintenzitását. A kopásintenzitás megadja, hogy az élen mért kopás nagysága, hány perchez tartozik. A számítóképlet a következőképpen alakul: [17]

$$I_{VB}(t_c) = 1000 * \frac{VB}{t_c} \left[\frac{mm}{min} \right]$$

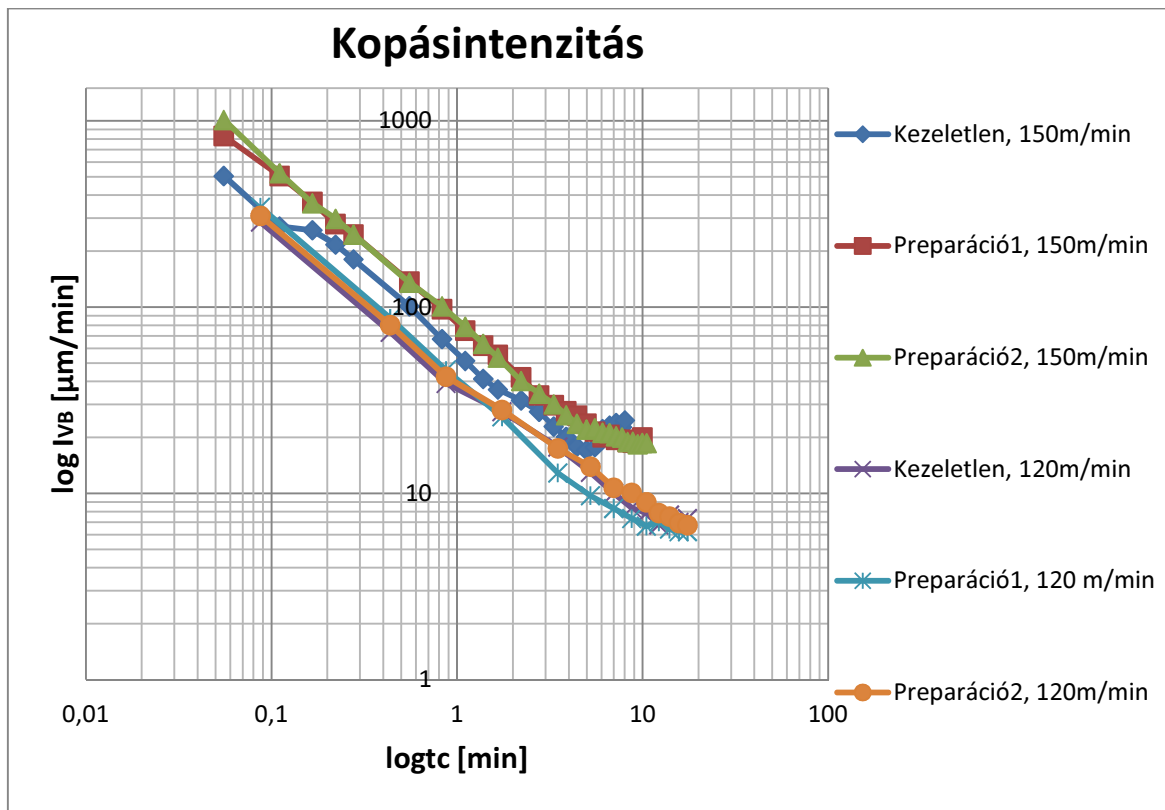
ahol:

t_c = forgácsolásba eltöltött idő [min]

VB = az élen mérhető hátkopás nagysága [mm]

$I_{VB}(t_c)$ = pillanatnyi kopásintenzitás számított értéke [mm/min]

A számított kopásintenzitást log-log diagramban ábrázoltam.



26. ábra Kopásintenzitás számított értékei

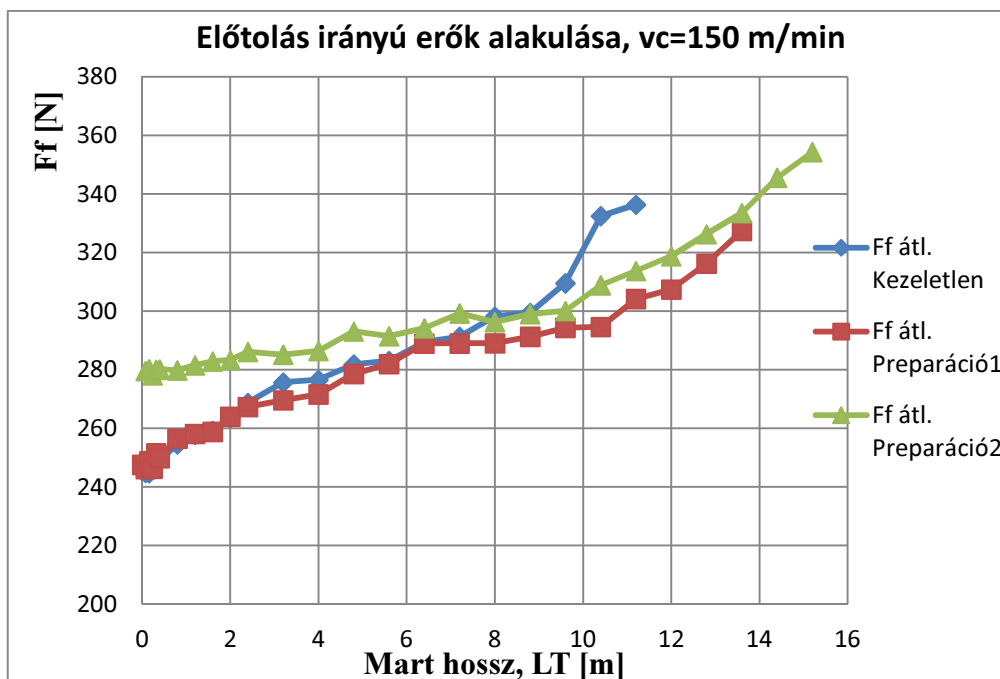
A diagramon **(26. ábra)** látható, hogy a forgácsolásban eltöltött idő növekedésével a kopás intenzitása csökken, majd újra növekszik. Ez a kopásgörbe három, meghatározott szakaszának tudható be (bekopás, állandósult kopás, túlkopás). Azt is meghatározhatjuk, hogy a különböző nagyságú éllekerekedések hatására a kopás intenzitása nem változik, mind a három változatnál megmarad a görbe lineáris jellege, majd a túlkopási szakaszhoz érve újra növekvő intenzitással kopik a szerszám éle.

4.6 Erőtani elemzés

A forgácsleválasztás során a forgácsolóél behatolása közben a megmunkálandó anyag képlékenyen és rugalmasan deformálódik. Az anyagleválasztás következtében a szerszám és a munkadarab érintkező felületei súrlódnak egymáson, a munkadarab ellenállást fejt ki a szerszámmal szemben. Ennek következtében munkát kell kifejtetni. A forgácsleválasztás során jelentős erő- és hőhatások lépnek fel, ezek megismerése és kielemezése fontos a megmunkálás tervezéséhez. A forgácsoláskor fellépő erőhatások nagysága és iránya befolyásolhatja a munkadarab pontosságát, meghatározza a szerszám, a készülék, sőt a gép kiválasztását is. [18]

A munkadarabot rögzítő készüléket a Kistler erőmérőre rögzítve az alábbi erőhatásokat mértem: az axiális erőhatás (F_x), ami a szerszám tengelyének irányába mutat, az előtolás irányú erőhatást (F_f), ami pedig a munkadarab „y” tengelye felé mutat. Az „x” irányú erőt (F_x) normál erőnek mondjuk, ami a vízszintes irányú erőhatásnak felel meg, de az előtoló erőre merőlegesen ébred. A meghatározott értékek mindhárom erőhatásnál mind pozitív, mind negatív értékek is lehetnek, az előjelek változása az erők irányát (nyomás/húzás) adják meg.

4.6.1 Előtolás irányú erőhatás



27. ábra Előtolás irányú erők alakulása, $vc=150$ m/min

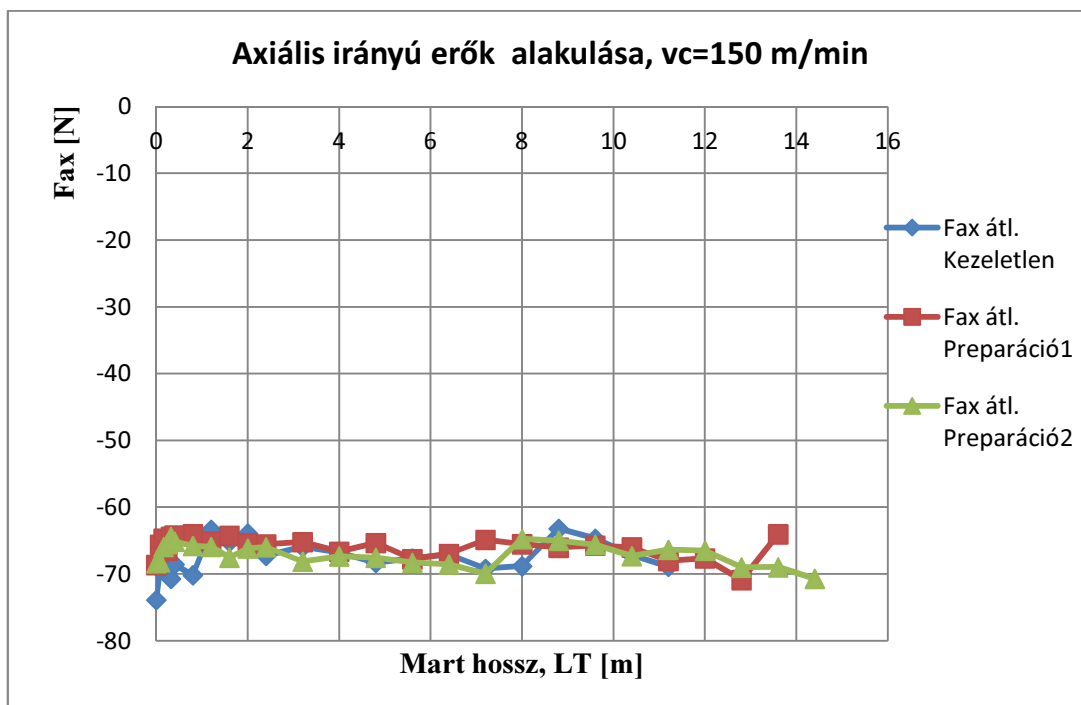
A 27. ábrán, a 150 m/min-es forgácsolósebességgel végzett kísérletnél mért előtolás irányú erők átlagértékeinek alakulását ábrázoltam, a mart hossz függvényében. A diagramot elemezve a következő megállapításokat tehetjük:

- Minél hosszabb utat tett meg a szerszám, annál nagyobb erők fellépése mellett forgácsolt. Ez annak tudható be, hogy a szerszám éle kopásnak indult, így az anyagleválasztás feltételei romlottak, ami következtében nagyobb ellenállást tanúsított a munkadarab a szerszámmal szemben. A kopás hatására a szerszám és az anyag érintkező felületein megnő a súrlódás, ami szintén az erők növekedéséhez vezet.
- A különböző élkialakítású szerszámok görbéit összevetve azt lehet megállapítani, hogy az első szakasz marásakor ($L_T=0,08$ m) a kezeletlen és a 7 μ m-es lekerekedéssel rendelkező marószerszám használatakor kb. azonos nagyságú erőt lehetett regisztrálni (~275 N és ~276 N), viszont a legnagyobb lekerekedéssel ellátott szerszámnál 25 N-os erőnövekedés figyelhető meg. A forgácsolt anyagminőség szívóssága miatt, a nagyobb lekerekedés

eredményeképpen az anyagleválasztáshoz nagyobb előtoló erő szükséges, mivel a szerszám éle nehezebben hatol az anyagba és választja le azt. Ez okozhatja a forgácsolás kezdetén a nagyobb erőt.

- A kezeletlen szerszámnál egy hosszabb lineáris szakasz után, 8 méter forgácsolást követően, egy drasztikus erőnövekedés látható. A forgácsolt anyagra jellemzően a szerszám hegyes éle és csúcsa a nagy hőterhelés hatására kicsorbul, ez a szerszám forgácsoló élének elkopását eredményezi. A vizsgálat során ez az erőnövekedés jelzés értékű volt számunkra: a szerszámnak romlik a forgácsolóképesége, ami - várhatóan - a szármáró tönkremenetelét fogja okozni. Az erő növekedéséhez egy folyamatosan erősödő hanghatás és a gép rezgésének növekedése is társult.
- Az üveggyönggyel preparált szerszám görbéje 3 szakaszból tehető össze. Az első szakaszban ($L_T=0-5$ méter között) az erők közel lineárisan növekednek, az ezt követő szakaszban 5-10 méter megtétele között a görbe meredeksége csökken, az erők növekednek, de sokkal kisebb ütemben, mint az első 5 méter megtétele közben. Ezt egy újabb lineáris szakasz követi, viszont itt már nagyobb mértékben növekszik az erőhatás, amíg a szerszám éle el nem éri a meghatározott kopáskritériumot.
- A 13 μm -es lekerekedésű marószerszámnál mért előtoló irányú erő 10 méterig mindösszesen 20 N-nal növekedett a mérés kezdetéhez képest. A lekerekedés hatására a szerszám éle stabilabb, jobban ellenáll a hőhatásnak, nem csorbul ki, így kisebb mértékben kopik és az erők értékei sem növekednek olyan gyorsan, mint a másik két szerszámnál. Ezt a szakaszt egy meredekebb rész követi, ahol nagyobb intenzitással nő az erőhatás.
- Összességében megállapítható, hogy a lekerekedésekkel ellátott szerszámoknál kevésbé jellemző a hirtelen erőnövekedés, mint a kezeletlen, élesebb szerszámnál.
- A 120 m/min-es forgácsoló sebességgel végzett kísérletek során szintén mértem az erőhatásokat. A mért értékeket itt is diagramok segítségével ábrázoltam.

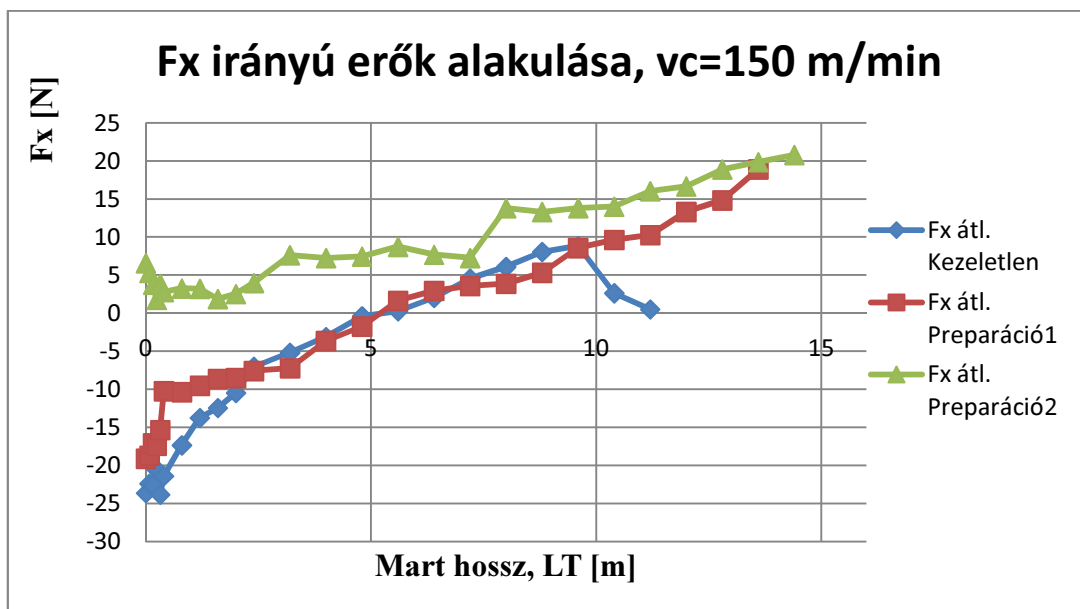
4.6.2 Axiális irányú erőhatás



28. ábra Axiális irányú erők alakulása, $v_c=150$ m/min

A **28. ábrán** vizsgálatomkor mért axiális erőt ábrázoltam a mart hossz függvényében. A diagramon látható, hogy a mért értékek a negatív tartományban vannak. Ez az erő irányára utal: a forgácsolás hatására a szerszám felfelé, a satuból ki akarja húzni a munkadarabot. Ez a munkadarab befogásának megtervezéséhez egy nagyon légyeges adat. Ez a felismerés nagy jelentőségű az ausztenites korrózióálló anyagok megmunkálásakor, mivel ennek az anyagcsoportnak kivételesen nagy a felkeményedési hajlama. Ha az axiális erő pozitív irányú, a szerszám nyomja lefelé a munkadarabot, ami ennek az erőhatásnak a következményeként felkeményedik és a későbbi megmunkálást (újabb fogásvétel) károsan befolyásolja. A diagramon látszik, hogy az ábrázolt értékek mind a három különböző élkialakítású maró szerszámnál lineáris jelleget mutatnak, illetve a három eltérő szerszámnál -63 N és -74 N között váltakoznak. Összefoglalva azt lehet mondani, hogy a különböző nagyságú éllekerekedéseknek nincs jelentősebb hatása az axiális erőre. Az alacsonyabb (120 m/min) forgácsoló sebességen átlagosan 5 N-al alacsonyabb tengely irányú erőket lehetett mérni a növelt vágósebességhez képest.

4.6.3 „X” irányú erőhatás



29. ábra Fx irányú erők alakulása, vc=150 m/min

A 29. ábra 150 m/min forgácsolósebesség mellett mutatja a normál (F_x) erőket a mart hossz függvényében. Ez az erőhatás a munkadarab vízszintes síkjában hat. Ha az előjele negatív, az azt jelenti, hogy a szerszám magára akarja húzni a munkadarabot. Ha pedig pozitív, akkor a szerszám nyomja az anyagot. A diagramot elemezve a következőket lehet megállapítani:

- A kezeletlen és az üveggyönggyel preparált szerszám kísérleti vizsgálatokor, a mért erőértékek a forgácsolás folyamán kb. 5 méter forgácsolt hossz után előjelet váltottak. Az forgácsleválasztás megkezdésekor mind a kettő típusú szerszámnál negatív előjelű erőket lehetett mérni, amik a forgácsolás végén (11,6 m és 14,4 m) pozitív előjelűre váltottak. Az értékek mind a két szerszámnál közel lineárisan növekedtek. A kezeletlen szerszámnál felvett görbén megfigyelhető, hogy 10,4 méter megtétele után az erők értékei csökkenni kezdtek a szerszám tönkremeneteléig. Ennek az lehet az egyik oka, hogy az egyre kopottabb szerszámon anyagfelrakódások alakultak ki, amelyek a szerszám „élességét” növelték.
- A W_2 jelű, legnagyobb lekerekedéssel rendelkező marószerszámnál, már az első szakasz forgácsolásakor is pozitív előjelű erőket mértem, ami azt jelenti,

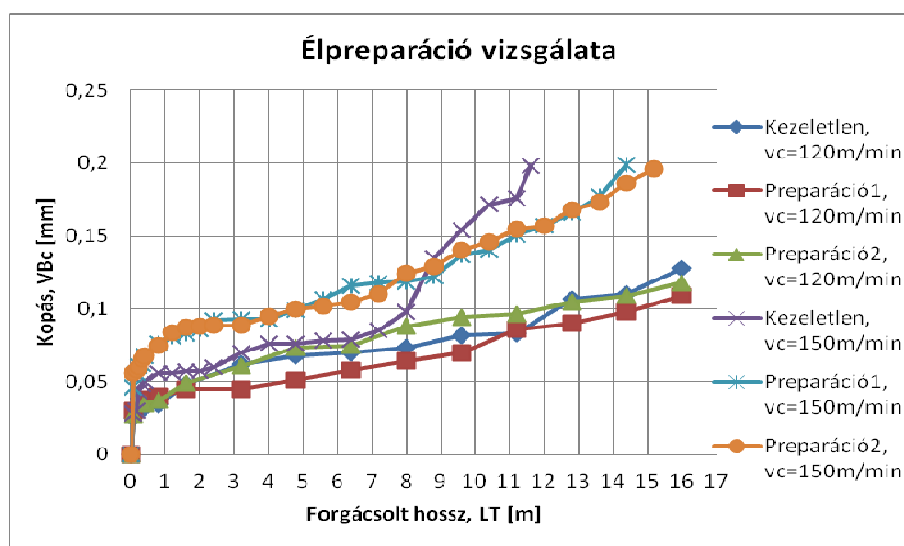
hogy - az előző két szerszámmal ellentétben - itt a szerszám nyomja a darabot. Ennél a szármárónál az erők szakaszosan növekednek a forgácsolás végéig.

- Nagyobb lekerekedéssel rendelkező szerszámoknál mért x irányú erő előjele pozitív és nem változik a hossz függvényében.
- A kisebb éllekerekedésű szerszámoknál tapasztalt előjelváltás problémát jelenthet a forgácsolás tervezésekor. Mivel az erőhatások kihatnak a munkadarab pontosságára, ebben az esetben nem lehet előre meghatározni, hogy meddig a pontig nyomja a szerszám az anyagot és mekkora út megtétele után próbálja azt húzni. Ez a bizonytalanság a munkadarab méretpontosságának romlásához vezethet, szűk tűrésű daraboknál akár selejtet is okozhat.

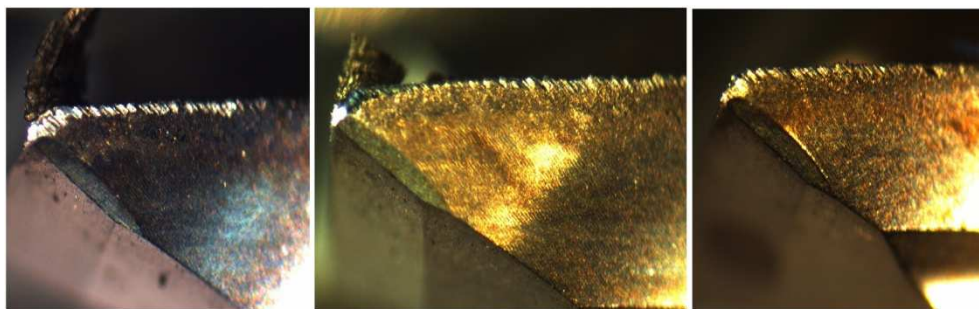
4.7 Összesítés

A mért és ábrázolt adatokat összegezve (30. ábra) azt lehet megállapítani, hogy a preparációval ellátott szerszámokkal **nagyobb éltartamot lehet elérni** az ausztenites korrózióálló acélok sarokmarásakor. Ezt azzal lehet magyarázni, hogy a megmunkált anyag rossz hővezető képessége miatt a szerszám élét fokozott hőterhelés éri. Az élesre köszörült él (31. ábra) hamarabb elveszíti mikrokeménységét és mechanikai/termikus terhelhetőségét a bevonati réteg(ek) lekopása után. Ez a kezeletlen szerszámok élének gyors kopásához és kicsorbulásához vezet. Az él különböző mértékű lekerekítése nagyobb stabilitást kölcsönöz a szerszámnak, így elkerülhető az élek gyors kopása és csökken a hirtelen kicsorbulás veszélye is.

Vizsgálatunk során a nagyobb ($r_n=13\ \mu\text{m}$) éllekerekedéssel rendelkező szerszámmal 31%-os éltartam növekedést értünk el a kezeletlen szerszámhoz képest (32. ábra). A különböző élpreparációk között viszont nem volt olyan nagy eltérés. A forgácsolósebességtől függően hol a kisebb, hol pedig a nagyobb lekerekedés érte el a kedvezőbb tartósságot. A növelt sebességnél például itt 7%-kal tudott többet a 2. preparációval ellátott szerszám.

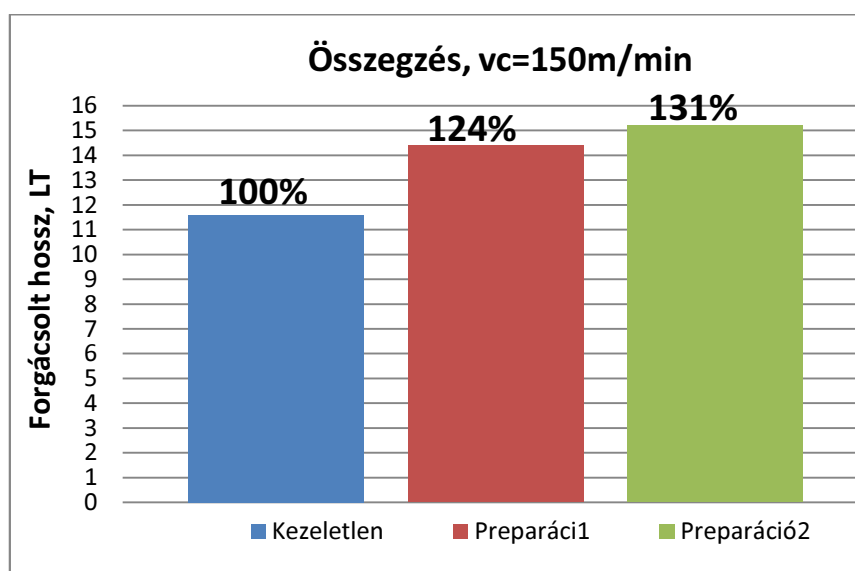


30. ábra. A vizsgált marók legnagyobb kopású élének teljesítőképessége



31. ábra Kopásfelvételek 145 szakasz forgácsolása után

(kezeletlen, preparáció1, preparáció2)



32. ábra A vizsgált marók legnagyobb kopású éleinek teljesítőképessége

A forgácsoláskor mért erőhatásokat összegezve, azt lehet elmondani, hogy a preparációval ellátott szerszámoknál nem volt hirtelen erőnövekedés megfigyelhető, ami egy sokkal egyenletesebb és kiszámíthatóbb gyártást tesz lehetővé. Az $r_n=13\text{ }\mu\text{m}$ lekerekedésű szerszámnál mért „x” irányú erő hatására - a másik két típussal ellentétben - a megmunkálás teljes időtartamában, a maró nyomást gyakorolt a munkadarabra, ami könnyebbé teszi a forgácsolás tervezését. A tesztvizsgálatot nagyoló megmunkálással hajtottuk végre, ezért a munkadarab felületi minősége nem elsőrendű fontosságú. Viszont a **34. ábrán** láthatjuk, hogy a szerszám a megmunkálás következtében a munkadarabon sorját hagy, az anyagból való kilépéskor nem képes leválasztani a forgácsot, így a darab szélén oldalsorja keletkezik, amit a későbbi megmunkálás során

(fogásvétellel) kell eltávolítani. A megmunkálásnál megfigyelhettük, hogy mind a három eltérő szerszám darabos, tört forgácsot választott le.



34. ábra Forgácsolt munkadarab

További feladatként jelölhetjük ki a kísérletek megismétlését és a mérési eredmények bővítését más preparációjú marókkal. Itt egy olyan optimális éllekerekedés megtalálása lenne a cél, ahol a szerszám a legnagyobb éltartam mellett kedvező erőtani viselkedést is mutat. Elsősorban itt a normál irányú erők alakulására gondolok, ahol az lenne a cél, hogy a marószerszám a megmunkálás közben egyirányú erőt fejtsen ki a munkadarabra, ne változzon az. További cél lenne az éltartam szempontjából legkedvezőbb lekerekedés megtalálása. A dolgozatomban tapasztalataiból arra lehet következtetni, hogy egy, a $13\text{ }\mu\text{m}$ -nél nagyobb lekerekedéssel nagyobb éltartamot lehetne elérni ennek az anyagminőségnek a forgácsolásakor. A lekerekedés mértékének felső korlátját az a nagyságú r_n jelentené, ahol a szerszám használatakor nem érvényesül az ékhatás, így nem, vagy csak kevésbé képes az anyagot leválasztani. További kísérletek kapcsán, az éllekerekedés mellett a szerszámok bevonatát is lehetne változtatni más, eltérő struktúrájú bevonatokat alkalmazni, azok teljesítőképességeit elemezni. További kísérletek során tesztelni lehetne a dolgozatomban szereplő marószerszámokat eltérő forgácsolási paraméterek beállítása mellett, különösképpen a fogankénti előtolás növelésével. Ettől a kísérlettől azt lehetne várni, hogy az eltérő élpreparációval kezelt szerszámok között jobban kijönnének az éltartambeli

különbségek. A további kísérleteknél újabb cégek bevonásával lehetne bővíteni az ismereteket, illetve összehasonlítani a különböző cégek szerszámainak teljesítőképességét és forgácsolóképességét. Későbbi kísérletek keretein belül eltérő anyagminőségben lehetne vizsgálni az élpreparáció hatását. Különösképpen a nehezen megmunkálható acélok körében, a korrózióálló acélok mellett a titán és a HRSA anyagoknál, ahol a hőterhelés fokozottan jelen van és a szerszám éle nagyobb kopásnak van kitéve. Ezeknél az anyagoknál a szerszám forgácsoló főélének mikrogeometriai javítása és a lekerekedés növelése pozitív hatással lehet a marószerszámok éltartamára. További feladatok elvégzésével, olyan komplex eredményt kaphatnánk az élpreparációval ellátott marószerszámok használatánál, nehezen forgácsolható acélok megmunkálásakor, amik segítségével a szerszámgyártó a katalógusokban szereplő termékajánlásokat pontosíthatja, vagy bővítheti azokat.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni köszönetemet konzulenseimnek, dr. Sipos Sándor mestertanárnak és Csuka Sándor intézeti mérnöknek, hogy munkájukkal segítették a dolgozatomhoz való felkészülésem, és észrevételeikkel, tapasztalataikkal folyamatosan támogatták a témában való előmeneteletem. Továbbá köszönettel tartozom dr. Palásti Kovács Béla Tanár Úrnak, és Baranyai Gézának a mérések során nyújtott segítségükért. Egyúttal köszönöm a WALTER Hungária Szerszám-, Szerszámgyártó és Kereskedelmi Kft.-nek, hogy szerszámaikat rendelkezésemre bocsátották.

5. Felhasznált irodalom

- [1] Forgácsoláskutatás.hu: Szerszáminnováció
<http://www.forgacsolaskutatas.hu/elmelet/szerszaminnovacio>
 (2014.03.12)
- [2] Platit AG: Platit Kompendium 2013, 51. Ausgabe, (44-53. és 65-75. oldal)
- [3] Pannonplatit.com: Bevonatok
<http://www.pannonplatit.com/bevonatok>
 (2014.03.12)
- [4] Walter AG: Proto maxTM_{TG},
- [5] Forgácsoláskutatás.hu: Élminőség
<http://www.forgacsolaskutatas.hu/elmelet/elminoseg>
 (2014.03.12)
- [6] Lümke, A., Büchel, C., Cselle, T., Morstein, M.: Schneidekantenpräparation und Beschichtung: Schlüsselrollen beim Optimieren von Hochleistungswerkzeugen. XIII Internationales Oberflächenkolloquium Chemnitz, 2012. (5-7. oldal)
- [7] Franz Tikal (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit R. Bienenmann und L. Meckmann: Schneidekantenpräparation, Ziele, Verfahren und Messmethoden. Kassel, 2009
 (8-20. oldal)
- [8] OTEC: Schleppfinishanlagen. <http://www.otec.hu/schleppfinishanlagen.html>
 (2014.03.12)
- [9] American Machinist: Cutting Difficult-to-Machine Materials
<http://americanmachinist.com/cutting-tool-digest/cutting-difficult-machine-materials>
 (2014.03.12)
- [10] Sandvik Coromant: ISO S HRSA és Titán
http://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_s_hrsa_titanium/pages/default.aspx
 (2014.03.12)

[11] Sandvik Coromant: Turbinalapát

http://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/industrysolutions/condensing_power/steam_turbines/pages/turbine-blade.aspx

(2014.03.12)

[12] dr. Sipos Sándor, dr. Palásti Kovács Béla: Új lehetőségek a korrózióálló acélok esztergálásában

<http://www.bgk.uni-obuda.hu/ggyt/kutatas/korr.htm>

(2014.03.12)

[13] Sandvik Coromant: ISO M Rozsdamentes acél

http://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx

(2014.03.12)

[14] Mahr.de: XR 20

<http://www.mahr.de/scripts/relocateFile.php?ContentID=1254&NodeID=2997&FileID=12762&ContentDataID=49575&save=0>

(2014.03.12)

[15] Kistlet: Multicomponent Force Plate

<http://www.kistler.com/it/de/product/force/9257B>

(2014.03.12)

[16] Halász Gábor, Pálincás Tibor, dr. Sipos Sándor: Korszerű menetfúrók környezetbarát alkalmazása

http://www.forgacsolaskutatas.hu/kornyezet/korszeru_menetfurok_kornyezetbarat_alkalmazasa

(2014.03.12)

[17] Forgácsoláskutatás.hu: Kopásintenzitási modell

http://www.forgacsolaskutatas.hu/elmelet/kopasintenzitasi_model

(2014.03.12)

[18] Dr. Angyal Béla, Dr. Dobor Lászlóné, Dr. Palásti Kovács Béla, Dr. Sipos Sándor: Forgácsolás és szerszámai. Budapest, 2003 (70. oldal)

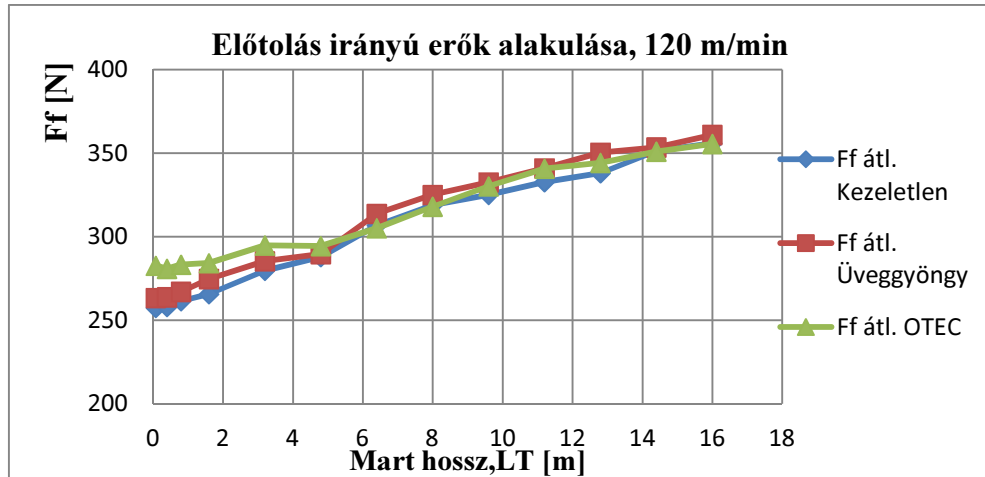
6. Melléklet

1. Melléklet Éllekerekedés mért értékei	45
2. Melléklet Előtolás irányú erők alakulása, 120 m/min	46
3. Melléklet Axiális irányú erők alakulása, $v_c = 120$ m/min.....	46
4. Melléklet F_x irányú erők alakulása, $v_c = 120$ m/min	46
5. Melléklet Kopásképek, $v_c = 150$ m/min.....	47
6. Melléklet Kopásképek, $v_c = 120$ m/min.....	50
7. Melléklet Erőhatások lefutása.....	53
8. Melléklet Kopásmérési adatok, OTEC berendezéssel, $v_c = 150$ m/min	56
9. Melléklet Kopásintenzitás számított értékei, $v_c = 120$ m/min.....	57
10. Melléklet Kopásintenzitás számított értékei, $v_c = 150$ m/min.....	58

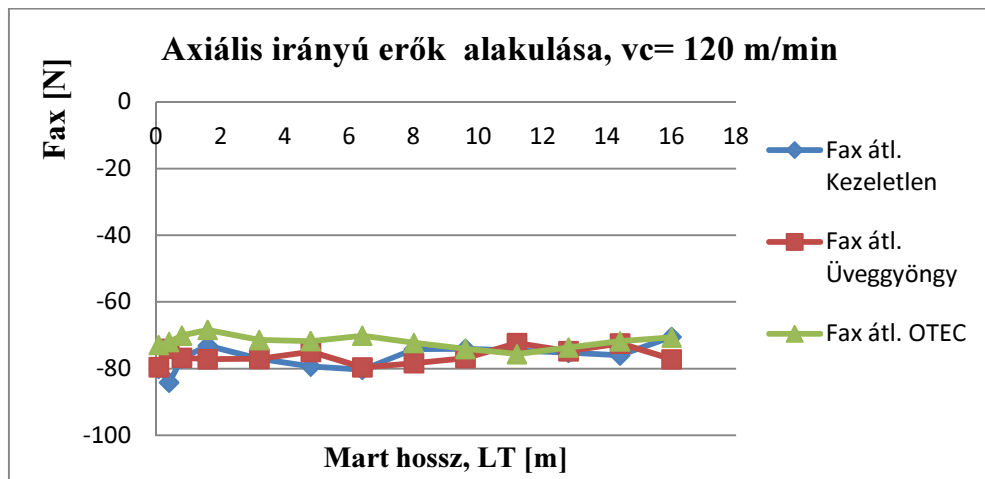
1. Melléklet Éllekerekedés mért értékei

Mérési dokumentáció								
Mérés témája:								
Éllekerekedés mérése								
Mérés helye:								
Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar								
Mérőgép								
Típus	Megnevezés				Megjegyzések			
Mahr	Mahrsurf GD 120				Program: MarSurf XCR 20			
Tapintó								
Típus	Megnevezés				Megjegyzések			
Mahr GmbH	MFW Tastarm 60°/2µm				Befogó: MFW-250 Mahr			
Szerszámjelölések								
Gyártó:	Preparáció	[µm]	Kódjel	Szerszám1	Szerszám2	Szerszám3		
Walter	Kezeletlen	-	W_0	W_0_1	W_0_2	W_0_3		
	Üveggyönggyel	5	W_1	W_1_1	W_1_2	W_1_3		
	OTEC	15	W_2	W_2_1	W_2_2	W_2_3		
Mérési eredmények (2µm levonva)								
Éllekerekedés [µm]								
Szerszám kód:	Walter_0_1				Walter_0_2			
Sorszám:	z1	z2	z3	z4	z1	z2	z3	z4
Éllekerekedés	5,73	4,4	6,21	3,75	6,79	4,33	5,33	5,33
Éllekerekedés [µm]								
Szerszám kód:	Walter_1_1				Walter_1_2			
Sorszám:	z1	z2	z3	z4	z1	z2	z3	z4
Éllekerekedés	7,17	5,42	5,4	7,87	6,12	11,35	6,74	6,91
Éllekerekedés [µm]								
Szerszám kód:	Walter_2_1				Walter_2_2			
Sorszám:	z1	z2	z3	z4	z1	z2	z3	z4
Éllekerekedés	12,91	13,48	13,46	12,3	14,42	13,49	10,94	14,26
Átlagérték	Éllekerekedés_átlag [µm]							
	Szerszám állapot:	Walter_0_1		Walter_0_2				
	Éllekerekedés	5,0225		5,445		rn= 5 µm		
	Éllekerekedés_átlag [µm]							
	Szerszám állapot:	Walter_1_1		Walter_1_2				
	Éllekerekedés	6,465		7,78		rn= 7 µm		
	Éllekerekedés_átlag [µm]							
	Szerszám állapot:	Walter_2_1		Walter_2_2				
Éllekerekedés	13,0375		13,2775		rn= 13 µm			

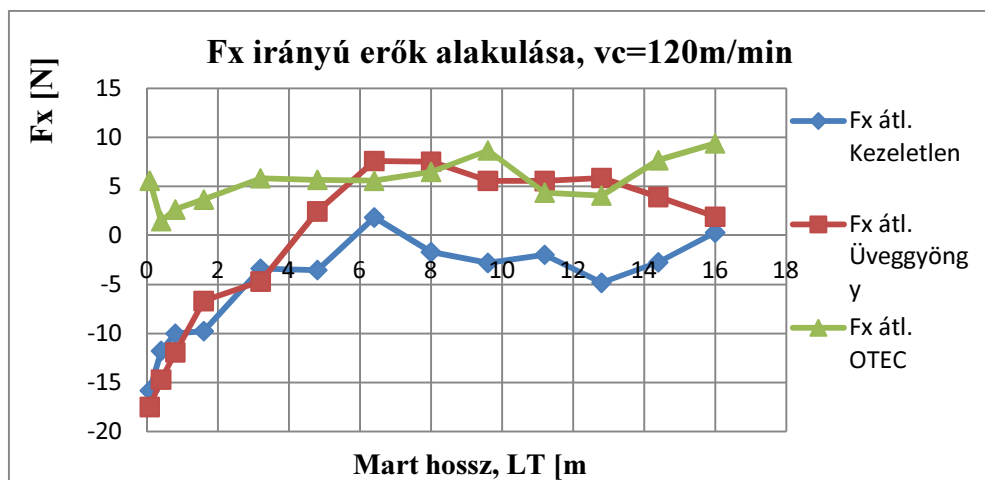
2. Melléklet Előtolás irányú erők alakulása, 120 m/min



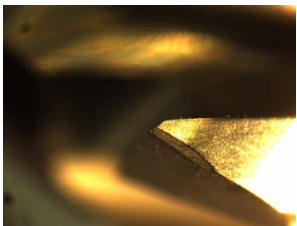
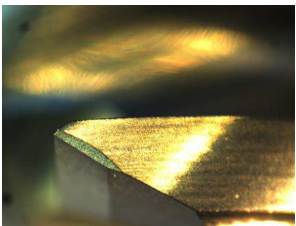
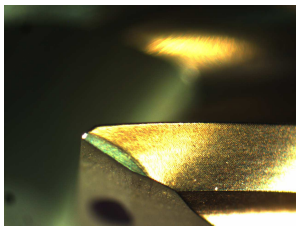
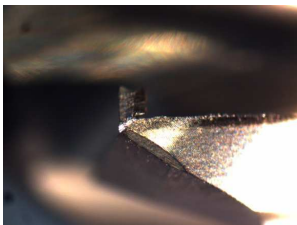
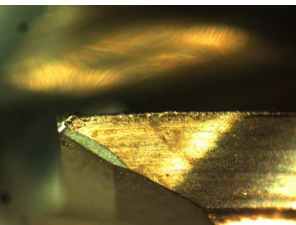
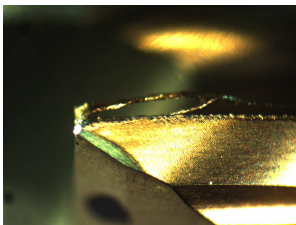
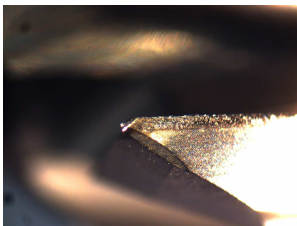
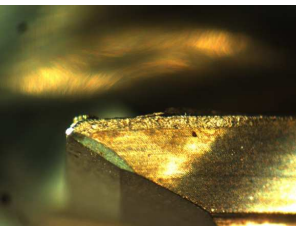
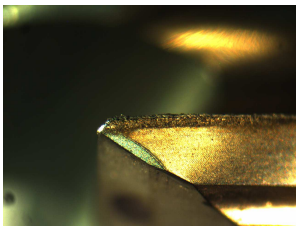
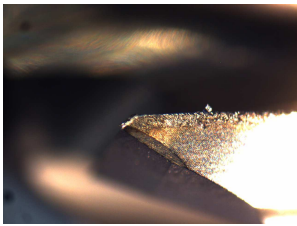
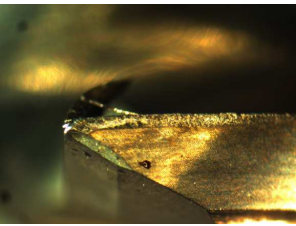
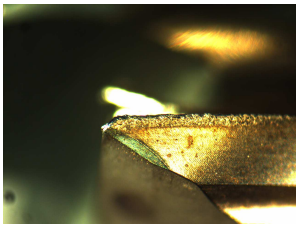
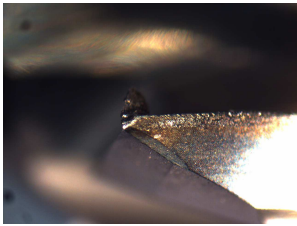
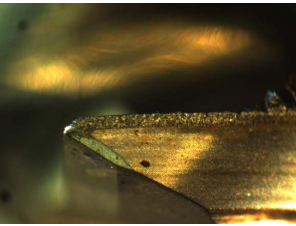
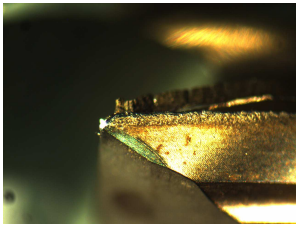
3. Melléklet Axiális irányú erők alakulása, vc= 120 m/min

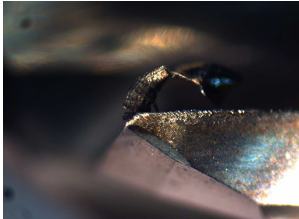
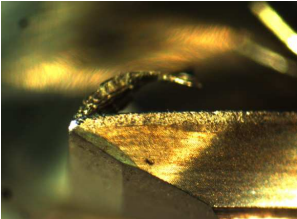
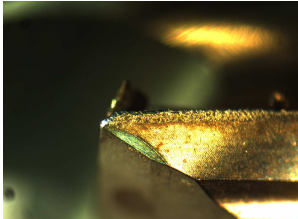
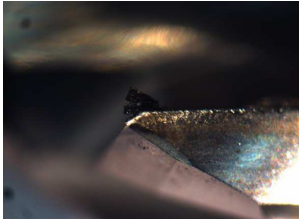
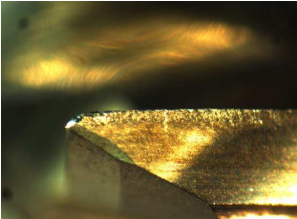
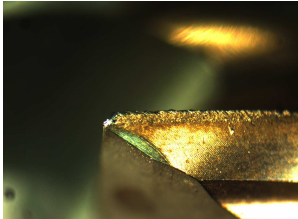
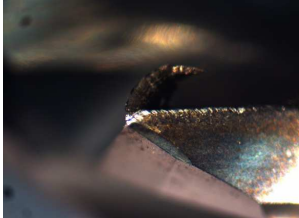
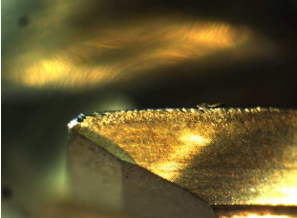
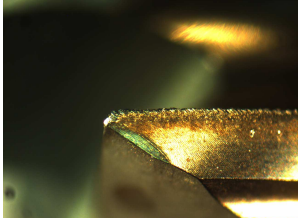
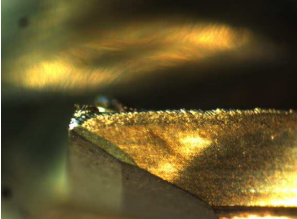
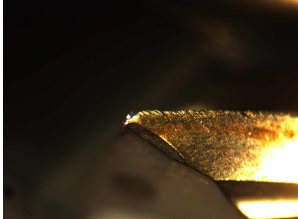


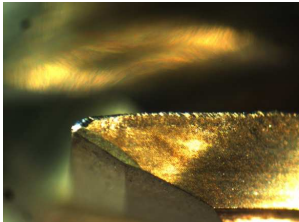
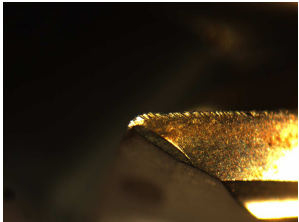
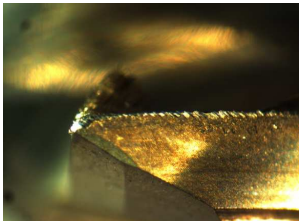
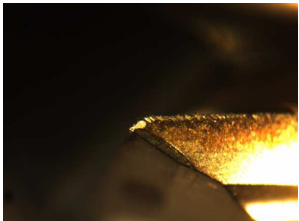
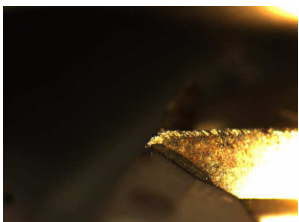
4. Melléklet Fx irányú erők alakulása, vc=120m/min



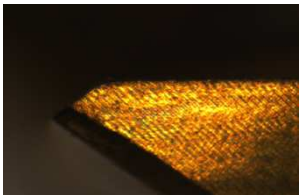
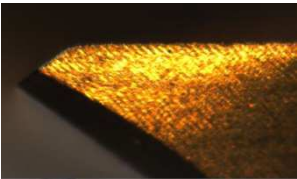
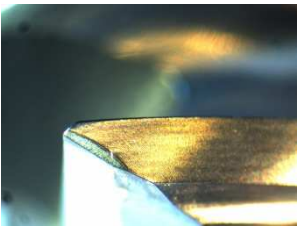
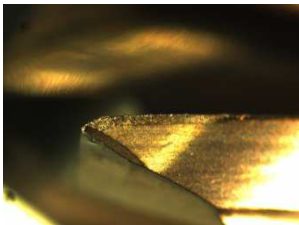
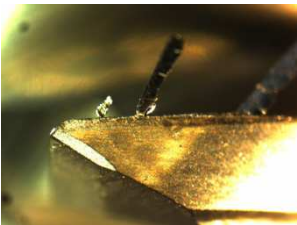
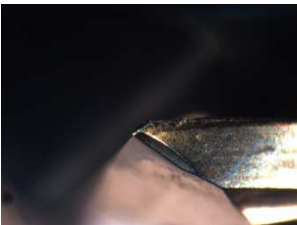
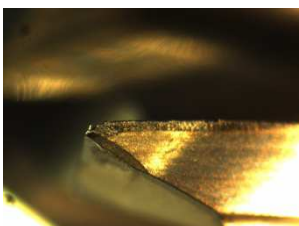
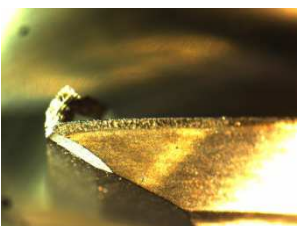
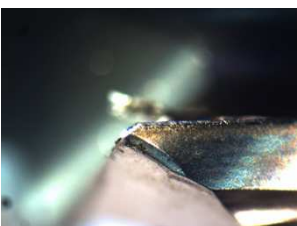
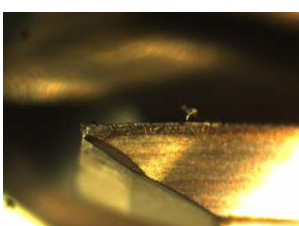
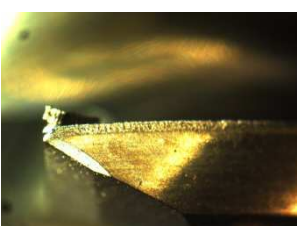
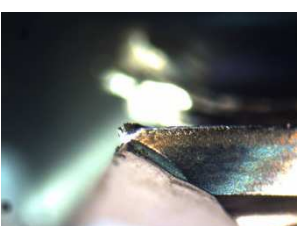
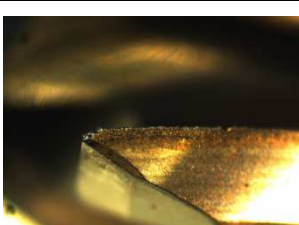
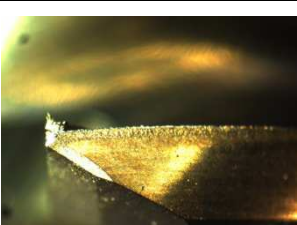
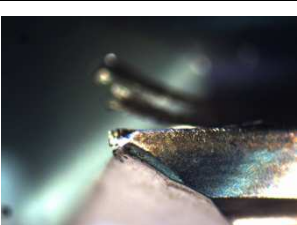
5. Melléklet Kopásképek, $v_c=150$ m/min

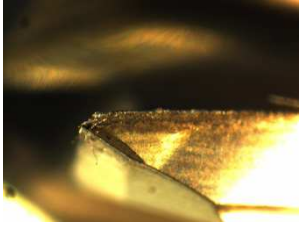
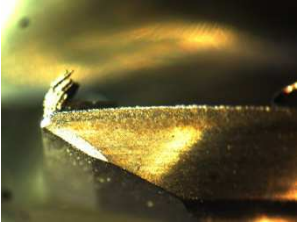
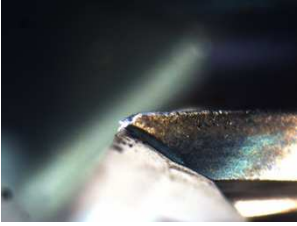
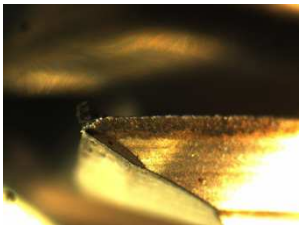
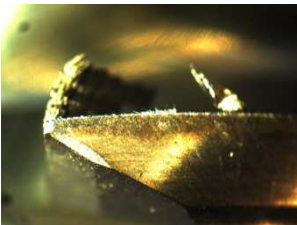
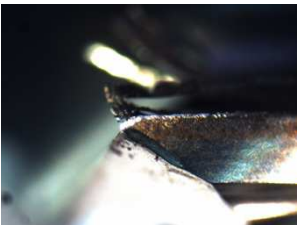
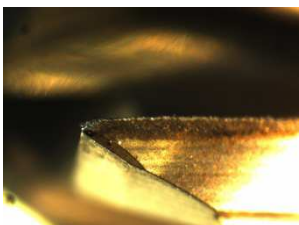
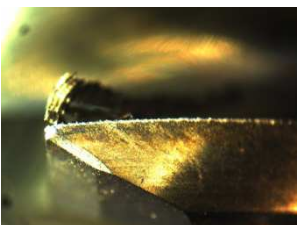
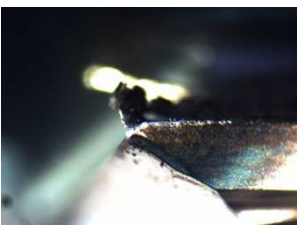
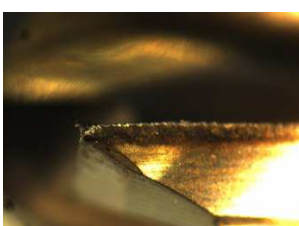
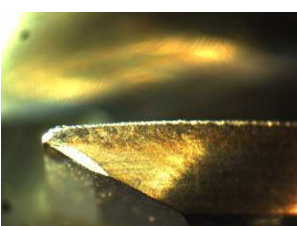
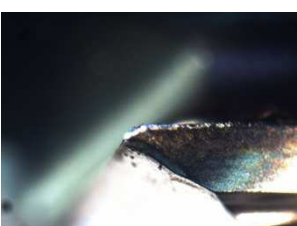
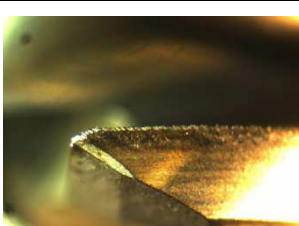
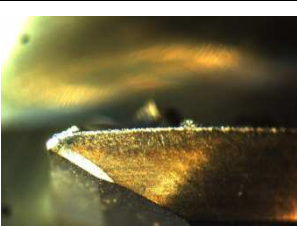
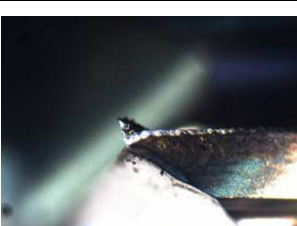
Szakasz [db]	Kezeletlen	Üveggyönggyel preparált	OTEC berendezésben preparált
0			
1			
20			
40			
60			

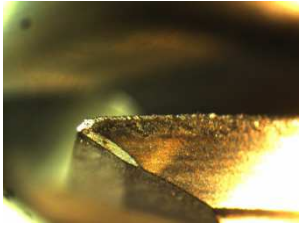
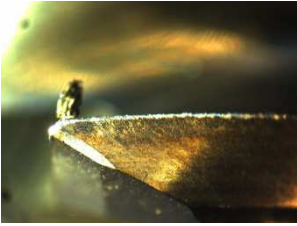
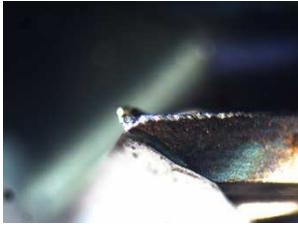
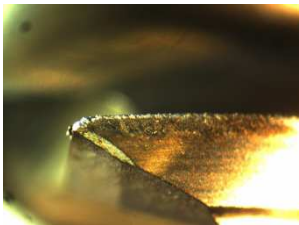
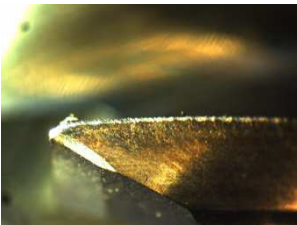
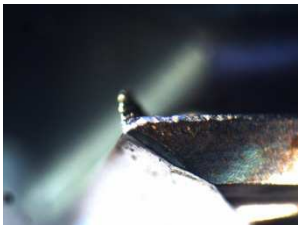
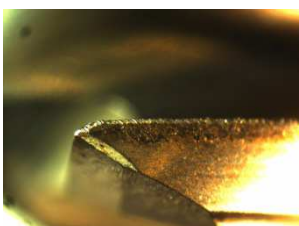
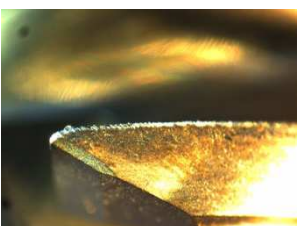
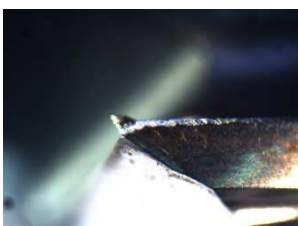
Szakasz [db]	Kezeletlen	Üveggyönggyel preparált	OTEC berendezésben preparált
80			
100			
120			
140			
145			

Szakasz [db]	Kezeletlen	Üveggyönggyel preparált	OTEC berendezésben preparált
160	145 szakasz marása után elérte a kopáshatárt		
180			
190		180 szakasz marása után elérte a kopáshatárt	

6. Melléklet Kopásképek, $v_c=120$ m/min

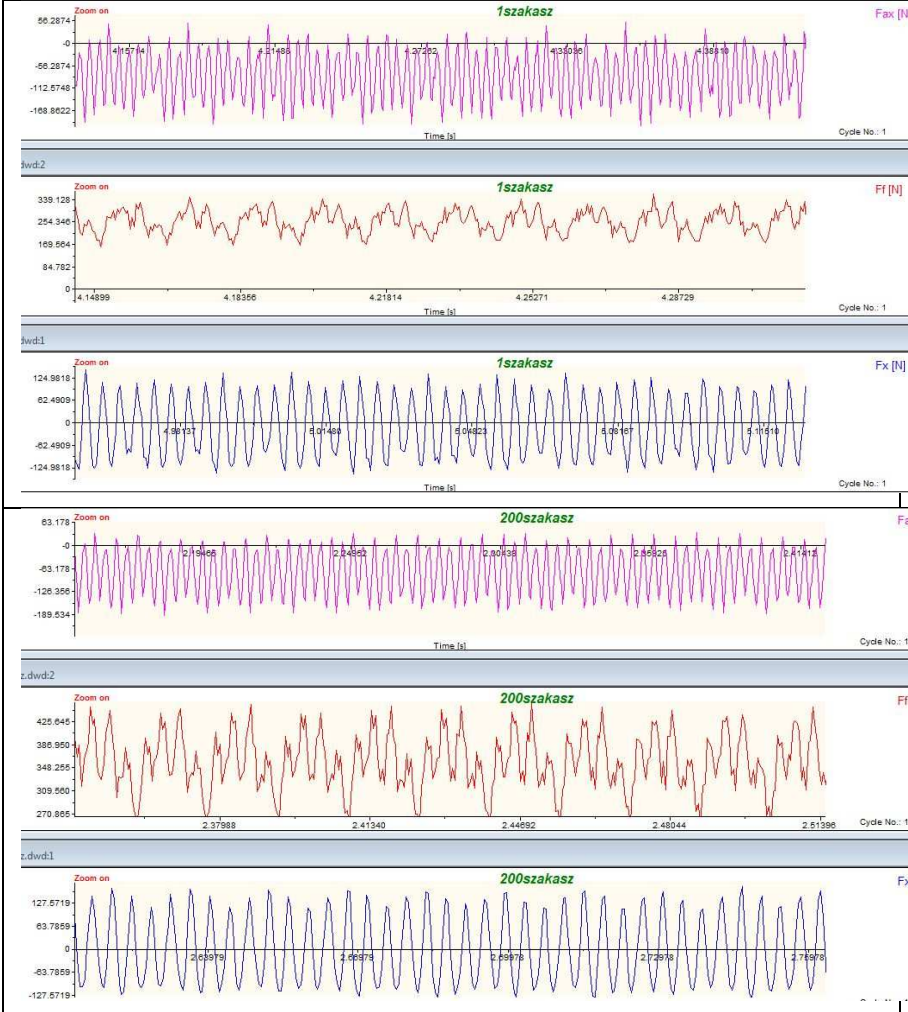
Szakasz [db]	Kezeletlen	Üveggyönggyel preparált	OTEC berendezésben preparált
0			
1			
10			
20			
40			

Szakasz [db]	Kezeletlen	Üveggyönggyel preparált	OTEC berendezésben preparált
60			
80			
100			
120			
140			

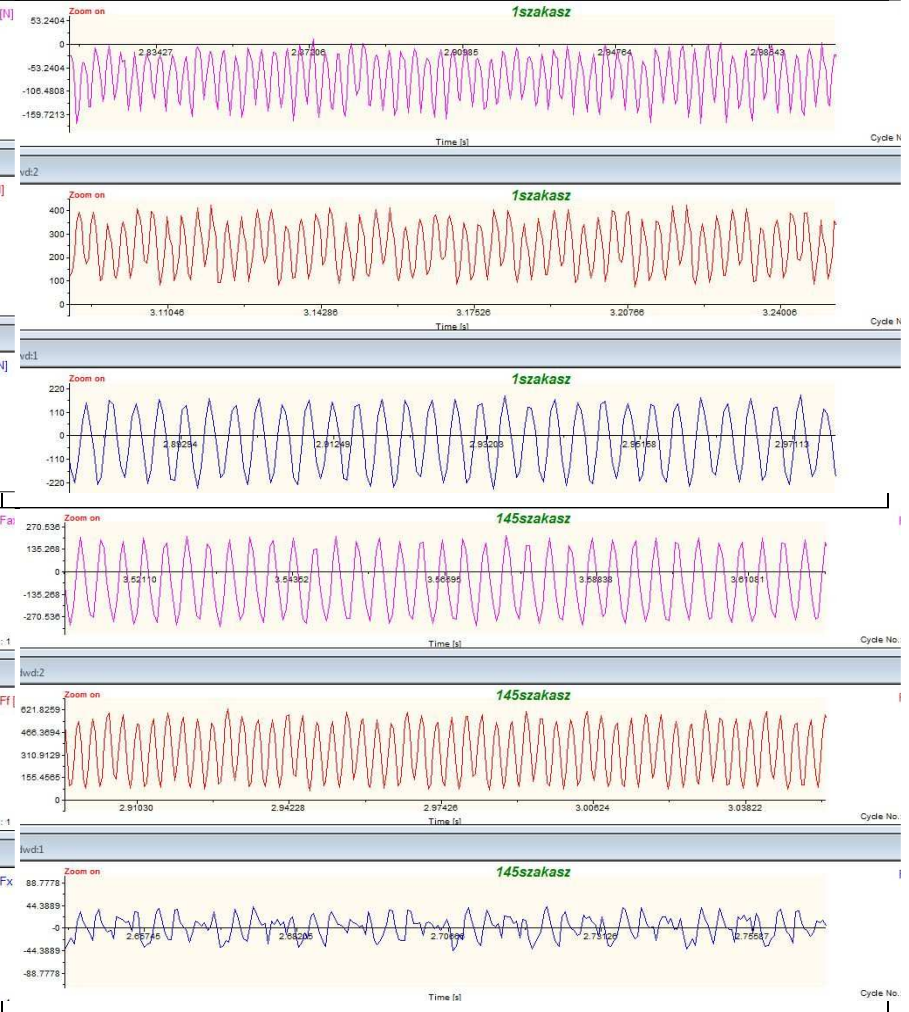
Szakasz [db]	Kezeletlen	Üveggyönggyel preparált	OTEC berendezésben preparált
160			
180			
200			

7. Melléklet Erőhatások lefutása

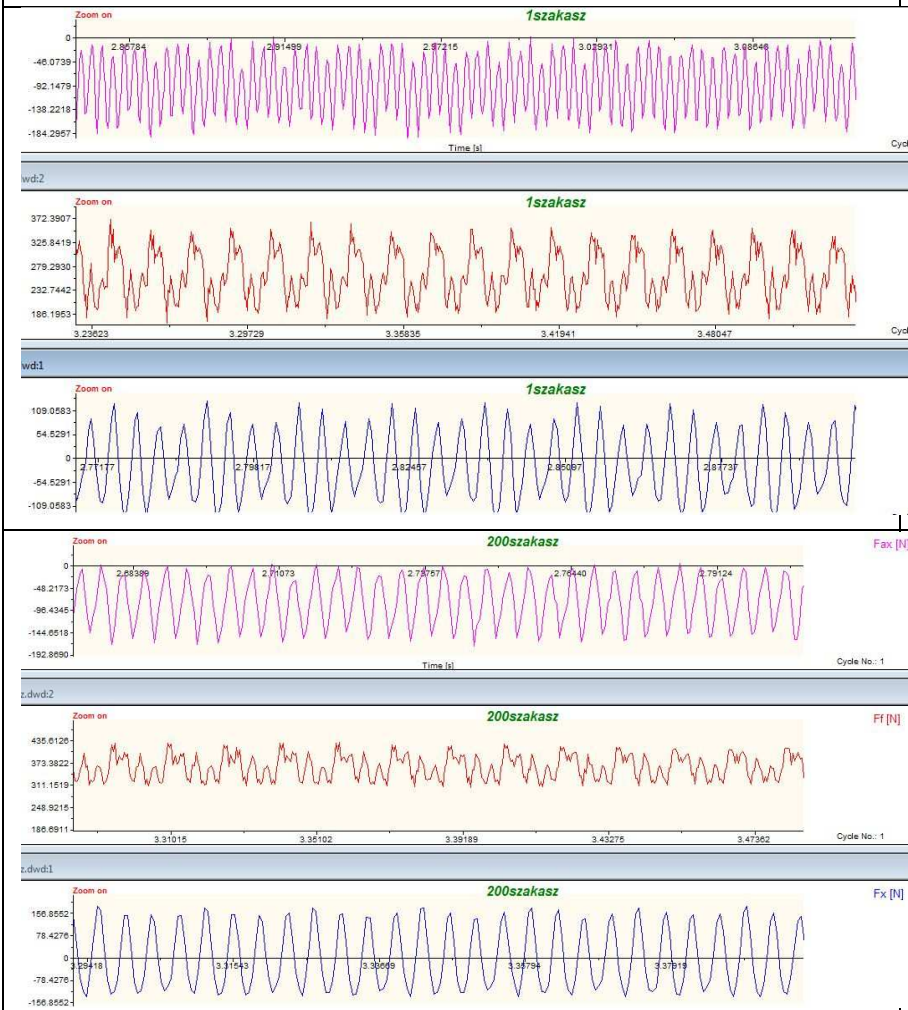
Kezeletlen, $v_c=120$ m/min



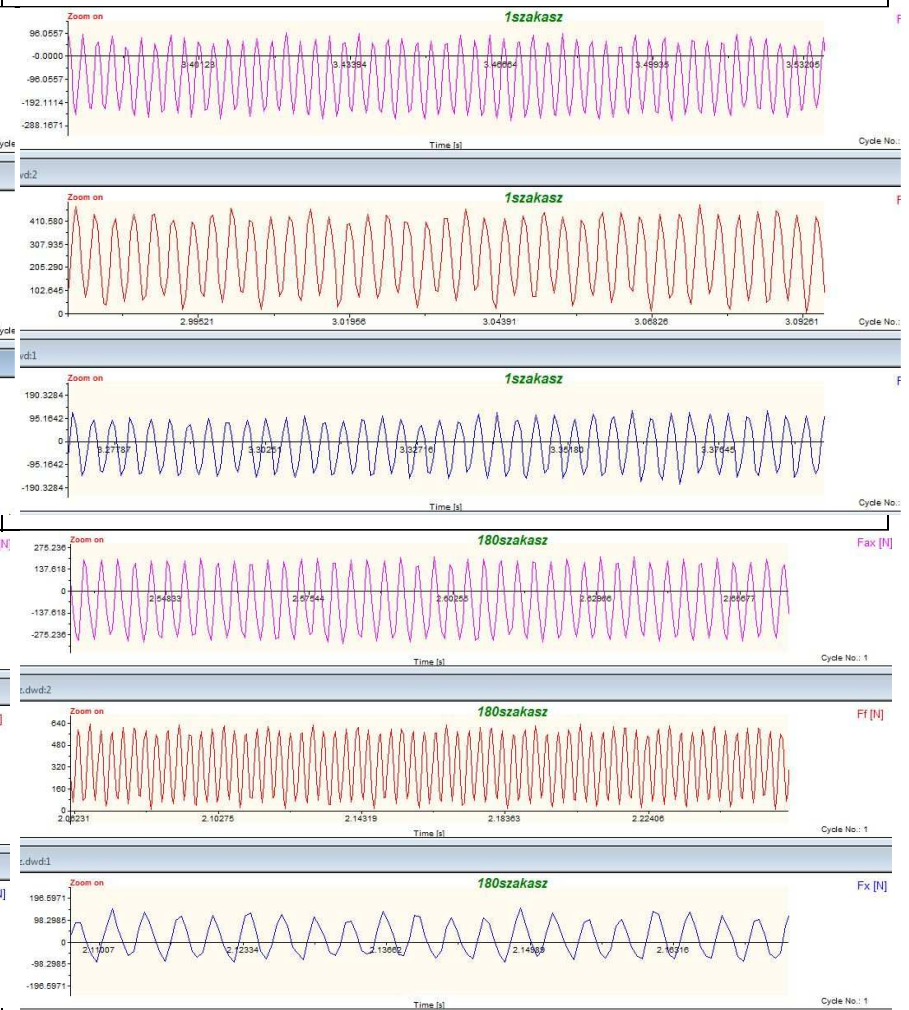
Kezeletlen, $v_c=150$ m/min



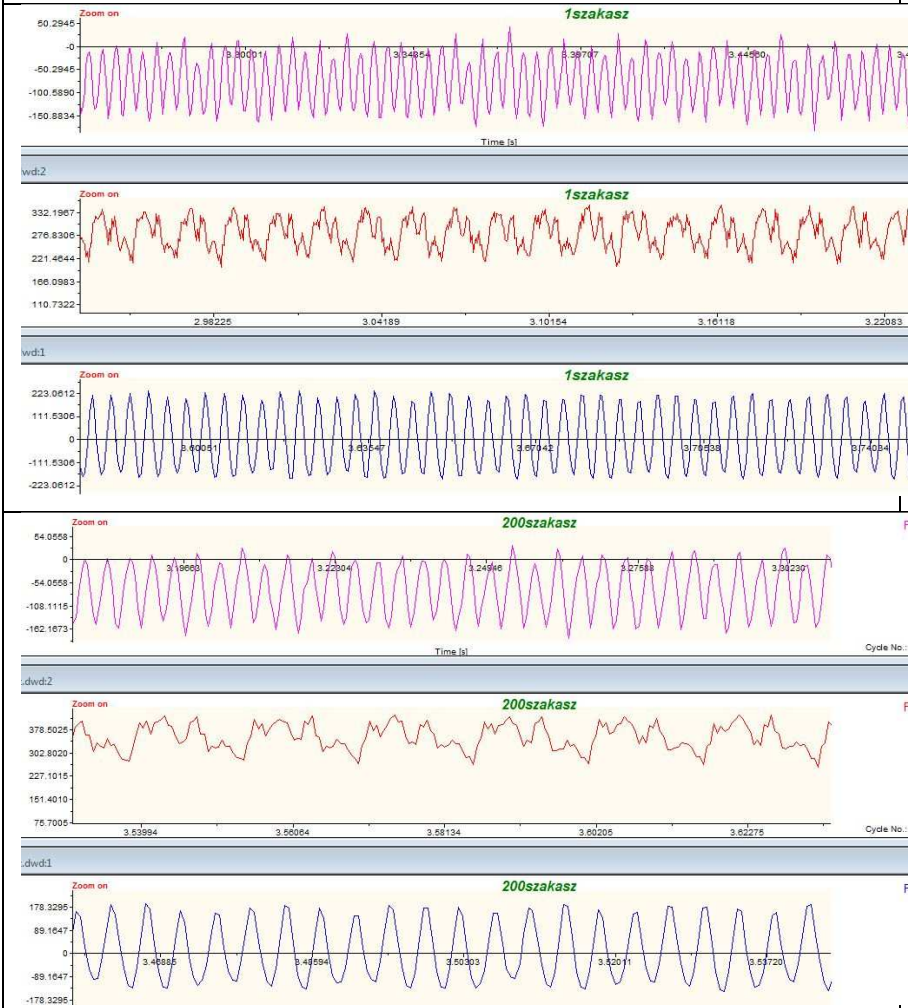
Üveggyönggyel, vc=120 m/min



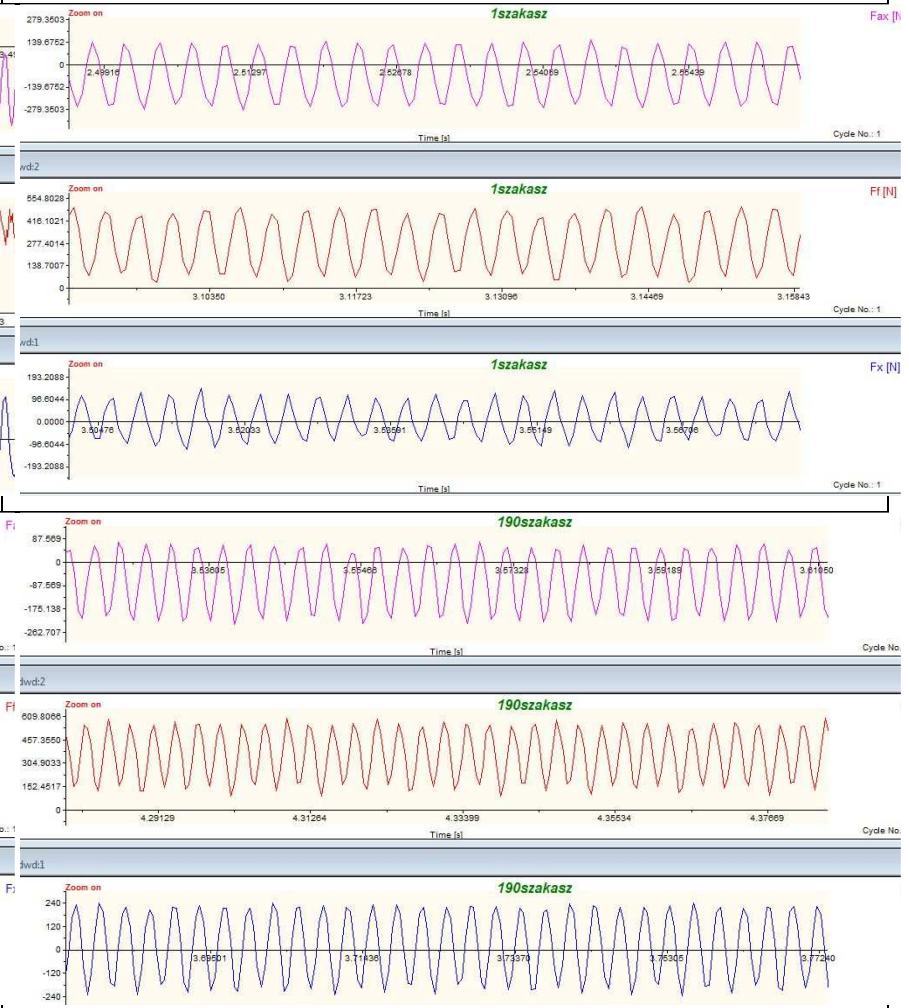
Üveggyönggyel, vc=150 m/min



OTEC, vc=120 m/min



OTEC, vc=150 m/min



8. Melléklet Kopásmérési adatok, OTEC berendezéssel, $v_c=150$ m/min

Forgácsolt szakasz [db]	LT, [m]	tg [min]	VBC1, [mm]	Fax min. [N]	Fax átl. [N]	Fax max [N]	VBC2, [mm]	Ff min [N]	Ff átl [N]	Ff max [N]	VBC3, [mm]	Fx min [N]	Fx átl [N]	Fx max [N]	VBC4, [mm]
0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,08	0,07	0,056	-292,36	-68,36	164,18	0,056	-39,06	279,65	552,83	0,068	-219,57	6,59	227,2	0,05
2	0,16	0,14	0,058	-329,28	-68,2	202,94	0,061	-49,44	280,25	536,35	0,079	-201,72	5,32	227,51	0,062
3	0,24	0,21	0,06	-317,38	-65,93	220,64	0,07	-66,38	278,17	522	0,079	-195,01	3,78	222,78	0,071
4	0,32	0,28	0,066	-321,96	-65,46	211,18	0,076	-17,4	280,06	525,2	0,084	-186,9	1,78	216,98	0,072
5	0,4	0,35	0,068	-319,52	-64,4	205,99	0,082	-29,75	280,24	527,19	0,084	-173,03	3,86	211,18	0,075
10	0,8	0,70	0,075	-300,9	-65,14	219,42	0,084	-36,16	279,86	524,9	0,086	-163,12	2,81	203,86	0,081
15	1,2	1,05	0,084	-294,8	-65,78	210,57	0,085	-51,42	281,59	528,56	0,092	-139,62	3,28	196,84	0,086
20	1,6	1,40	0,087	-305,79	-65,93	213,01	0,087	-54,78	282,93	534,67	0,095	-122,83	3,22	182,34	0,086
25	2	1,75	0,088	-304,57	-67,55	212,1	0,089	-60,12	283,4	533,29	0,098	-117,34	1,88	176,54	0,086
30	2,4	2,09	0,089	-297,85	-66,16	202,94	0,095	-5,19	286,18	529,48	0,102	-112	2,54	181,73	0,086
40	3,2	2,79	0,089	-290,22	-65,97	185,85	0,096	-40,59	285,21	530,85	0,109	-91,86	3,99	169,98	0,087
50	4	3,49	0,095	-282,29	-68,12	167,24	0,098	-34,48	286,5	528,56	0,11	-102,23	7,64	163,12	0,092
60	4,8	4,19	0,1	-260,93	-67,34	156,86	0,105	18,77	293,13	519,56	0,117	-130	7,26	157,93	0,092
70	5,6	4,89	0,102	-253,3	-67,53	139,77	0,109	13,89	291,51	513,31	0,118	-148,64	7,46	147,55	0,095
80	6,4	5,59	0,105	-251,77	-68,29	129,09	0,113	15,11	294,23	522,31	0,129	-166,17	8,74	160,37	0,096
90	7,2	6,28	0,11	-234,08	-68,56	118,1	0,116	14,65	299,3	513,92	0,131	-191,65	7,7	181,43	0,1
100	8	6,98	0,124	-231,02	-69,94	95,52	0,12	-26,4	296,35	521,39	0,132	-207,52	7,27	205,69	0,101
110	8,8	7,68	0,129	-359,5	-64,74	249,63	0,126	-62,26	299,09	593,11	0,144	-133,67	13,8	238,8	0,105
120	9,6	8,38	0,14	-339,36	-65	254,52	0,135	-64,85	300,14	589,6	0,15	-128,48	13,32	211,64	0,105
130	10,4	9,08	0,146	-308,23	-65,62	184,63	0,137	-36,77	308,93	578,31	0,151	-183,11	13,82	273,9	0,107
140	11,2	9,77	0,155	-287,17	-67,3	149,54	0,142	-16,78	313,79	581,21	0,161	-185,39	14,02	241,85	0,11
150	12	10,47	0,157	-283,81	-66,35	139,16	0,147	-35,4	318,83	572,97	0,161	-183,87	16,03	235,6	0,111
160	12,8	11,17	0,168	-270,39	-66,5	139,77	0,149	-22,13	326,36	571,44	0,162	-201,72	16,67	231,02	0,111
170	13,6	11,87	0,173	-286,87	-69,01	130,31	0,151	-0,15	333,57	596,47	0,163	-219,57	18,91	228,73	0,111
180	14,4	12,57	0,186	-262,15	-68,96	132,75	0,153	21,38	345,63	600,84	0,172	-237,58	19,86	246,28	0,128
190	15,2	13,26	0,196	-257,57	-70,7	109,56	0,155	27,92	354,38	611,11	0,186	9247,19	20,8	265,96	0,14

9. Melléklet Kopásintenzitás számított értékei, $v_c=120$ m/min

vc=120 m/min					Kezeletlen	Üveggyöngy	OTEC
Lt [m]	Tc [min]	VB_Kezeletlen (Z2)	VB_Üveggyöngy (Z2)	VB_OTEC (Z3)	IVB [ym/min]	IVB [ym/min]	IVB [ym/min]
0	0,00	0	0	0	n.é.	n.é.	n.é.
0,08	0,09	0,025	0,03	0,027	286,563	343,875	309,488
0,4	0,44	0,032	0,038	0,035	73,360	87,115	80,238
0,8	0,87	0,034	0,04	0,037	38,973	45,850	42,411
1,6	1,74	0,048	0,045	0,049	27,510	25,791	28,083
3,2	3,49	0,062	0,045	0,061	17,767	12,895	17,480
4,8	5,23	0,068	0,051	0,073	12,991	9,743	13,946
6,4	6,98	0,07	0,058	0,075	10,030	8,310	10,746
8	8,72	0,073	0,064	0,088	8,368	7,336	10,087
9,6	10,47	0,082	0,07	0,094	7,833	6,686	8,979
11,2	12,21	0,083	0,086	0,096	6,796	7,041	7,860
12,8	13,96	0,107	0,09	0,105	7,666	6,448	7,522
14,4	15,70	0,11	0,098	0,109	7,005	6,241	6,941
16	17,45	0,128	0,109	0,118	7,336	6,247	6,763

10. Melléklet Kopásintenzitás számított értékei, $v_c=150$ m/min

vc=150m/min									Kezeletlen	Üveggyöngy	OTEC
Lt [m]	Tc [min]	Kezeletlen z4	LT	Tc [min]	Preparáció1 z2	LT	Tc [min]	Preparáció 2 Z1	IVB [ym/min]	IVB [ym/min]	IVB [ym/min]
0,08	0,0553	0,028	0,08	0,0553	0,0460	0,08	0,0553	0,0560	506,1000	831,4500	1012,2000
0,16	0,1107	0,030	0,16	0,1107	0,0560	0,16	0,1107	0,0580	271,1250	506,1000	524,1750
0,24	0,1660	0,043	0,24	0,1660	0,0610	0,24	0,1660	0,0600	259,0750	367,5250	361,5000
0,32	0,2213	0,048	0,32	0,2213	0,0620	0,32	0,2213	0,0660	216,9000	280,1625	298,2375
0,40	0,2766	0,050	0,40	0,2766	0,0680	0,40	0,2766	0,0680	180,7500	245,8200	245,8200
0,80	0,5533	0,056	0,80	0,5533	0,0760	0,80	0,5533	0,0750	101,2200	137,3700	135,5625
1,20	0,8299	0,056	1,20	0,8299	0,0810	1,20	0,8299	0,0840	67,4800	97,6050	101,2200
1,60	1,1065	0,057	1,60	1,1065	0,0830	1,60	1,1065	0,0870	51,5138	75,0113	78,6263
2,00	1,3831	0,057	2,00	1,3831	0,0860	2,00	1,3831	0,0880	41,2110	62,1780	63,6240
2,40	1,6598	0,060	2,40	1,6598	0,0920	2,40	1,6598	0,0890	36,1500	55,4300	53,6225
3,20	2,2130	0,070	3,20	2,2130	0,0930	3,20	2,2130	0,0890	31,6313	42,0244	40,2169
4,00	2,7663	0,076	4,00	2,7663	0,0930	4,00	2,7663	0,0950	27,4740	33,6195	34,3425
4,80	3,3195	0,076	4,80	3,3195	0,0990	4,80	3,3195	0,1000	22,8950	29,8238	30,1250
5,60	3,8728	0,078	5,60	3,8728	0,1070	5,60	3,8728	0,1020	20,1407	27,6289	26,3379
6,40	4,4260	0,079	6,40	4,4260	0,1160	6,40	4,4260	0,1050	17,8491	26,2088	23,7234
7,20	4,9793	0,085	7,20	4,9793	0,1180	7,20	4,9793	0,1100	17,0708	23,6983	22,0917
8,00	5,5325	0,098	8,00	5,5325	0,1190	8,00	5,5325	0,1240	17,7135	21,5093	22,4130
8,80	6,0858	0,135	8,80	6,0858	0,1220	8,80	6,0858	0,1290	22,1830	20,0468	21,1970
9,60	6,6390	0,154	9,60	6,6390	0,1370	9,60	6,6390	0,1400	23,1963	20,6356	21,0875
10,40	7,1923	0,172	10,40	7,1923	0,1400	10,40	7,1923	0,1460	23,9146	19,4654	20,2996
11,20	7,7455	0,176	11,20	7,7455	0,1510	11,20	7,7455	0,1550	22,7229	19,4952	20,0116
11,60	8,0221	0,198	12,00	8,2988	0,1570	12,00	8,2988	0,1570	24,6817	18,9185	18,9185
			12,80	8,8520	0,1660	12,80	8,8520	0,1680		18,7528	18,9788
			13,60	9,4053	0,1770	13,60	9,4053	0,1730		18,8193	18,3940
			14,40	9,9585	0,1990	14,40	9,9585	0,1860		19,9829	18,6775
						15,20	10,5118	0,1960			18,6458