

# **Gépipari környezetkímélő megmunkálási eljárások vizsgálata, modellezése**

**című kutatási témáról:**

**A kutatási időszak: 2003 - 2007**

**Témavezető:**

**Dr. Varga Gyula**

egyetemi docens

Miskolci Egyetem

Gépgyártástechnológiai Tanszék



**A téma kidolgozói:**

**Dr. Dudás Illés**

**Dr. Bányai Károly**

**Nyíró József**

**Dr. Varga Gyula**

**Miskolc, 2008.**

# Gépipari környezetkímélő megmunkálási eljárások vizsgálata, modellezése

## 1. Előzmények

A mai modern kiélezett gazdasági viszonyok között a termék-előállítókkal szemben támasztott alapvető négy követelmény:

- a jó minőség,
- a magas termelékenység,
- a gazdaságosság,
- a hatékony környezetvédelem.

A gyártórendszeren belül ezeket a kisebb egységekben, a megmunkálás helyén kell megalapozni, ill. biztosítani. A gépipari forgácsoló eljárásoknál a megfelelő forgácsleválasztási teljesítmény és gyártmányminőség elérése érdekében általában nagy mennyiségű hűtő-kenő folyadékot keringtetnek és használnak fel az üzemi megmunkáló rendszerekben. A munkadarab-szerszám rendszer hűtésének főbb céljai:

- a) a forgácseltávolítás öblítéssel, illetve mosással,
- b) a munkatér hűtése,
- c) a szerszám- és munkadarab között fellépő súrlódás és szerszámkopás csökkentése.

A hűtő-kenő folyadékok használatának a termelékenység növelésén kívüli további előnyei közé tartoznak a szerszám-élettartam növelése, a megmunkálási idők csökkentése és a megmunkálási folyamat megbízhatóságának növelése voltak. A hagyományos hűtő-kenő eljárások eredményesen megvalósítják a fenti célkitűzéseket, de a kedvező hatásaik mellett vannak károsak is. A forgácsra rátapadó és azzal eltávozó, valamint a forró szerszámról és forgácsról elpárolgó hűtő-kenő folyadék részek a dolgozók egészségére ártalmasak és károsítják a környezetet. Nagy nehézséggel és költséggel jár az elhasznált hűtő-kenő folyadék megsemmisítése is. A nem megfelelően kezelt elhasznált hűtő-kenő folyadékok világszerte jelentősen károsítják a környezetet. E miatt a gépipari megmunkáló rendszerekben korábban elterjedt hűtő-kenő folyadékok alkalmazását, valamint alkalmazásuk kedvezőtlen egészségkárosító és környezetszennyező hatásait világszerte igyekeznek csökkenteni.

Áttekintve az elmúlt évtizedeknek a hűtő-kenő folyadékok alkalmazásaival foglalkozó szakirodalmát, megállapíthatjuk, hogy azok feldolgozzák szinte minden jelentősebb hagyományos határozott élgeometriájú forgácsoló megmunkálásoknak (esztergálás, fúrás, marás, stb.) és a határozatlan élgeometriájú forgácsoló megmunkálásoknak (köszörülés, tükrösítés, stb.) hűtés-kenési problémáit. A kutatási célkitűzéseik azonban csak ritkán irányultak a hűtő-kenő folyadékok minimális mennyiségben történő alkalmazására vagy elhagyására, inkább a fent említett (a, b, c) főbb célkitűzések minél hatékonyabb megvalósítására törekedtek.

A Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszéke számottevő sikereket ért el az Európai Közösség által finanszírozott „Környezetbarát megmunkálások - a hűtő-kenő anyag csökkentése, ill. megszüntetése fúrásnál” című projekt megvalósításakor. A vizsgálatok öntöttvas munkadarabanyagra terjedtek ki. Eredményeink kiajánlása az autóipar számára folyamatban van. Jelenleg Tanszékünk a 2000-2002 időtartam alatt a D-40/99 jelű Magyar - Német Kormányközi TÉT együttműködésben vesz részt melynek címe „Minimális hűtéstechnika felhasználása esztergáláskor”, amely szintén a környezetkímélő fontosságát támasztja alá.

A hűtő-kenő folyadékok alkalmazásának korlátozása és visszaszorítása nem csupán szakmai kérdés. Részét képezi a nemzeti környezetvédelmi programunknak is, amely összefügg az Európai Unió tagságra való felkészülésünkkel. A környezetvédelmi és hulladékgazdálkodási nemzeti politikánkban számos szempont között kiemelten szerepel az, hogy „törekedni kell – a műszaki és a tudományos ismeretek környezeti elemeinek javításával – a képződő hulladék mennyiségének és veszélyességének minimálisra csökkentésére”. Ennek az elősegítésére új módszereket, minőségileg más eljárásokat és megoldásokat kell felkutatni, ezért a gépipari megmunkálások környezetkímélő eljárásainak a kutatása, vizsgálata hosszú időre új és aktuális feladat.

## 2. Célkitűzés

Célunk volt a környezetkímélő „száraz”, vagy minimális kenőanyag felhasználást alkalmazó forgácsoló megmunkálások elméletének megvizsgálása, gyakorlatának olyan kidolgozása, amely megfelelő minőséget, termelékenységet, gazdaságosságot, egészség- és környezetvédelmet biztosít a megmunkálásokat végző gépipari üzemek számára.

A hűtő-kenőanyagmentes megmunkálások előnyei közé tartoznak, hogy:

- nincs levegő- és vízszennyezés,
- egészségmegőrző (kevesebb a bőrbetegség, légúti betegség, stb.),
- csökken a forgács tisztítás költsége,
- elmarad a hűtőfolyadék beszerzési költsége,
- elmarad a hűtőfolyadék tisztítási költsége.

Ezen kutatómunka fontos része a környezetkímélő gépipari megmunkálások adekvát mechanikai-, tribológiai modelljeinek felépítése, részletes tudományos vizsgálata. A modellek felállítása, a kísérleti vizsgálatokkal végzett ellenőrzésük és felhasználásuk segítségével várhatóan olyan kutatási eredményekhez juthatunk, amelyek ipari alkalmazásával és bevezetésével költségtakarékosabb „tisztább” gépipari megmunkálások valósíthatók meg.

Manapság gyakran megfigyelhető a szárazmegmunkálás, valamint a gyors megmunkálás összekapcsolódása is. Kutatásunk során vizsgálni kívánjuk azokat a forgácsolási jelenségeket, amelyek meghatározóak a szárazmegmunkálás illetve bizonyos gyors megmunkálások kapcsolata terén. Ily módon a gyors megmunkálások is összefüggésben vannak a környezetkímélő megmunkálásokkal.

A folyamatjellemzők vizsgálatának egy modern módszere a szakirodalom szerint a CCD kamerás vizsgálatok alkalmazása. Ezért ezzel mi is foglalkozunk.

A következő témákban igyekszünk feltárni az összefüggéseket, feltételeket:

- szerszám–munkadarab kapcsolat vizsgálata (szerszámanyag, szerszám bevonat, munkadarab anyag, munkadarab felület),
- hőhatások elemzése a száraz-megmunkálás szempontjából (munkadarab hőhatásai, szerszám hőterhelése),
- száraz megmunkálás és bizonyos típusú gyors megmunkálás esetén a szerszámkopásokra ható tényezők és összefüggések vizsgálata,
- forgácsképződésre ható tényezők és összefüggéseik (pl. munkadarab- és szerszámanyag, technológiai paraméterek, stb.),
- megmunkálás közbeni méretellenőrzések, szerszámkopás vizsgálata (pl. CCD kamerás képfeldolgozó rendszerrel)

### 3. Megoldandó feladatok

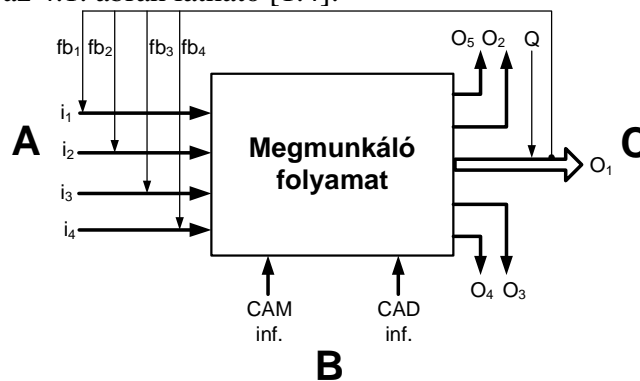
#### Évenkénti bontás

2003. Elméleti modellek felállítása. A környezetkímélő gépipari megmunkálások irodalmának átfogó elemzése, tanulságok levonása. Elméleti tribológiai, kopási vizsgálatok. A különböző kopás-modellek tanulmányozása. A forgácsolási folyamat modellezése. CCD kamerás vizsgálatok. Szándékozunk olyan eljárások elméletét kidolgozni, melyek üzemi körülmények között is képesek információt szolgáltatni.
2004. Elméleti modellek felállításának folytatása. A forgácsolási folyamat mechanikája. A száraz megmunkálás energetikai alapú vizsgálata: érintkező felületek 2D vizsgálata, a felület geometriájának elemzése, a meglévő kopásmodellek továbbfejlesztése, új kopásmodellek alkotása. A hűtő-kenő folyadék környezeti hatásának elemzése. Ezek a kutatások az elmúlt néhány évben jelentősen felgyorsultak, az alkalmazások területét jelentősen kiszélesítették. A CCD kamerás vizsgálatok folytatása.
2005. Elméleti modellek felállítása, Végeselemes vizsgálatok. Kezdeti vizsgálatainknál cél a nagy alakváltozásokat tartalmazó végeselemes program alkalmazása, eredményeinek kiértékelése. A 3D-s analízissel kapott eredmények kiterjesztésével a különféle forgácsolási eljárások modellezése. A forgácsolás közben keletkező rezgések elemzése.
2006. Elméleti modellek felállítása. Kísérleti vizsgálatok. Az elméleti vizsgálatok kiegészítése céljából illetve a megalkotott modellek jóságának ellenőrzése végett kísérleti vizsgálatok végzése. A környezetkímélő megmunkálások (pl. fúrás, esztergálás, marás) kísérleti vizsgálata különböző hűtés-kenés esetén: (pl. szárazon, ill. minimális kenés alkalmazásával Bio-kenőanyagok használatával). Megmunkálási vizsgálatok közben rezgésmérés. A rezgések és a felületi érdesség kapcsolatának elemzése.
2007. A korábban végzett kutatások szintézise, összedolgozása történik meg.

### 4. Teljesített feladatok (tematikus bontásban)

#### 4.1. BEVEZETÉS

A gépipari megmunkálási rendszerekben, a folyamatok eredményeként **anyagijavak előállítása valósul meg**. Ehhez annak környezetéből a rendszerbe anyag, energia, információ, munkaerő jut, amelyek a rendszerben zajló folyamatok hatására a rendszer környezetébe való kimeneten - értéket és használati értéket jelentő - termékben, nyereségben realizálódik. Ezen kívül képződik hulladék is, amely valamely mértékben hasznosítható lehet. A vizsgált rendszer működéséhez bemenő információra van szükség, és működése során információt kibocsát ki. A megmunkáló folyamat rendszer jól ismert egyszerűsített vázlatát továbbfejlesztés után az 4.1. ábrán látható [1.4].



4.1. ábra

*A megmunkáló folyamat egyszerűsített vázlat*

A 4.1. ábra rövidítéseinek jelentései a következők:

INPUTOK: A

- i<sub>1</sub>** – **nyers- és segédanyagokkal**, (félkész termékekkel és kereskedelmi árukkal való) ellátás folyamata,
- i<sub>2</sub>** – **energiával való ellátás** folyamata (villamos energia, sűrített levegő, stb.),
- i<sub>3</sub>** – **gyártóberendezések** (gépek, készülékek, szerszámok, mérőeszközök és egyéb technikai feltételek) biztosításának folyamata,
- i<sub>4</sub>** – az **élőmunkával való** ellátás folyamata.

INFORMÁCIÓK ÉS FOLYAMAT BEÁLLÍTÁSOK: B

**CAD inf.** – CAD információk (műszaki rajzok)

**CAM inf.** – CAM információk (technológiai paraméterek, hőmérséklet, ciklus idő, stb.)

OUTPUTOK: C

- O<sub>1</sub>** – a megmunkálási folyamat **végtermékének felhasználási**, hasznosítási folyamata
- O<sub>2</sub>** – megmunkálási **hulladék** kezelése (recycling)
- O<sub>3</sub>** – **szennyvíz** tisztítás
- O<sub>4</sub>** – **hő keletkezés**, a keletkezett hő egy részének hasznosítása
- O<sub>5</sub>** – **gáz emisszió** kezelése

MINŐSÉG ELLENŐRZÉS, BIZTOSÍTÁS:

- Q** – a megmunkálási folyamatot elhagyó végtermékek ellenőrzésének, minőségbiztosításának rendszere

VISSZACSATOLÁSOK

- fb<sub>1</sub>** – visszacsatolás a **nyers- és segédanyagokkal**, félkész termékekkel és kereskedelmi árukkal való ellátás folyamatába
- fb<sub>2</sub>** – visszacsatolás az **energiával** való ellátás folyamatába
- fb<sub>3</sub>** – visszacsatolás a **gyártóberendezések**, gépek, készülékek, szerszámok, mérőeszközök és egyéb technikai feltételek biztosításának folyamatába
- fb<sub>4</sub>** – visszacsatolás az **élőmunkával** való ellátás folyamatába.

A technológiai folyamat megvalósítása során **keletkező hulladék és elhasznált energia megítéléséhez három feladat** megoldása útján jutunk el. Így

- meg kell határozni a folyamatot **meghatározó elemeket** mind mennyiségi, mind minőségi szempontból (pl.: erő-, alakváltozás-, eszközkopás-, súrlódás-, hőfolyamatok, stb.),
- meg kell határozni a folyamatból **távozó**, különböző funkciójú **anyagokat** (termék, hulladék, hűtő-kenő anyagok, stb.) és **energiaarányokat** is,
- **függvénykapcsolatot** kell felírni az **outputok és inputok között**. pl.: anyag, munkaerő, energia, gyártóeszközök és a hasznosítási tényező kapcsolatát. Hasonlóan **függvénykapcsolat írható fel** a megmunkáló rendszerben **lezajló** erő-, alakváltozás-, hő-, súrlódás-, kopás, stb. **folyamatok**, a kinematikai viszonyok és a **pontosság között**. De ugyanez másként valósul meg pl. hűtés-kenés, minimális hűtés-kenés, vagy száraz forgácsolás esetén.

A **módszer első lépése** megkívánja minden input és output anyag és energia pontos **számszerűsíthetőségét**. A **második lépés** megkívánja az első lépésben ismertetett input és output energia mennyiségek ill. **arányok pontos ismeretét**. A **módszer harmadik lépése** megkívánja az **output függvény felállítását az inputok függvényében**. Ez a faktoriális kísérlettervezés módszerével hatékonyan megvalósítható.

Manapság, a **hűtő-kenő folyadékokkal kapcsolatban egyre növekvő igényeket** támasztanak környezetvédelmi és ipari higiéniai szempontból. Sutherland és Günter [1.14]

szerint gyártási szempontból legalább öt **általános feladatot** kell megoldani a felelősségteljes környezetvédelem biztosításához.

Ezek a **következők**:

1. Elvégezni a kívánt folyamat megvalósítására a különböző lehetséges **műveleti terveket**.
2. A kiválasztott terv lehetséges **sorrendváltozatainak** elkészítése.  
El kell végezni a kiválasztott sorrendű terv **kritikai vizsgálatát**. Vizsgálni kell tehát a **folyamat bemenetét**, a **folyamat megvalósíthatóságának** körülményeit, feltételeit, az **anyag visszaforgatás** (recycling) lehetőségét, és a folyamatszabályozást.
3. Utasítást kell biztosítani a **termék helyes felhasználására**.
4. Utasítást kell biztosítani a **hulladékkezelésre**.
5. Magas színvonalon kell megvalósítani az **oktatást és postgraduális képzést** Számos nemzetközi vállalat jelentős fejlesztésbe kezdett, melybe beletartoznak a környezetvédelemi szempontok minél nagyobb mértékű érvényesítése is. Az **ipari tevékenységek** és a megvalósításukkal kapcsolatos műveletek ugyanis alkalmanként a **dolgozók egészségére, a munkakörnyezetre károsak lehetnek**.

A **levegő-, a víz-, és a talaj minőségének a megőrzése**, azaz szennyezésüknek az elkerülése, tehát a természeti források megőrzése minden gyártási folyamattal szemben támasztott alapvető követelmény. Ez a tevékenység ugyanis a lokális környezeti hatásokon (pl. földalatti tartályok kilyukadása, olajkiömlés, stb.) túl még globális hatású is lehet. Befolyásolhatja ugyanis földünkön észlelt globális klímaváltozásokat, az ózonréteg vastagságát vagy hiányát, stb.

A megmunkáló eljárások tekintetében a **környezetvédelmi feladatok** megoldásakor **két terület** okoz jelentősebb gondot. Úgy mint a gyárüzemi

- **szilárd és folyékony hulladékok** (pl.: öntödei, kovácsüzemi porok, revék, öntödei homok, szennyvizek, szétfolyt olajok és hűtő-kenő anyagok), valamint
- **légtörő szennyeződések** (különböző anyagok káros párái-, gőzei, füstterhelés, stb.).

A gépipari üzemek okozta környezetterhelés elkerülése, vagy csökkentése jelentős műszaki, gazdasági és biológiai hatású lehet. Ezért **az alkalmazott folyamatok**, segédanyagok megválasztása, visszaforgatása, ártalmatlanítása, vagy biztonságos megsemmisítése az **egészséges emberi környezet fenntartásának biztosítását is jelenti**.

#### **4.1.1. Bevezetés a környezetbarát technológiák témakörébe**

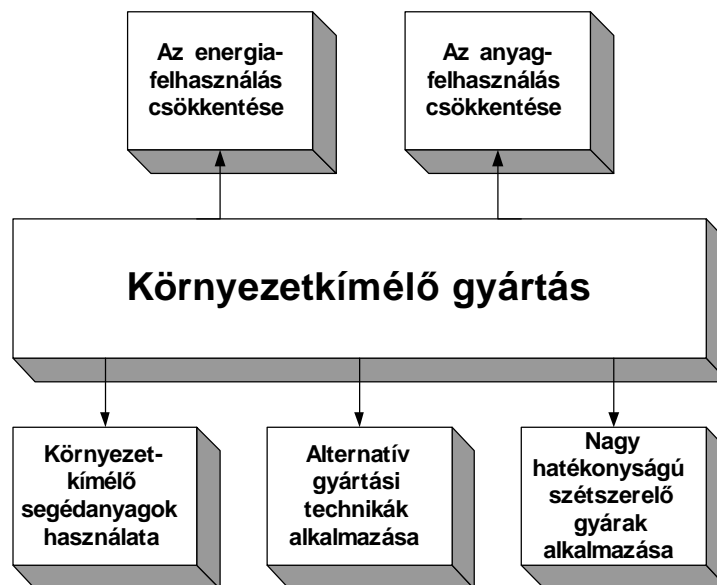
Irodalomkutatás szintjén megvizsgáltuk az elmúlt 50 év forgácsolástechnológiájában megvalósított főbb fejlesztési irányokat. Az irodalomkutatás szerint az anyagleválasztási folyamatok meglehetősen nagy anyagleválasztási teljesítményeken mentek végbe, mely elérheti a  $Q_w=150-1500 \text{ cm}^3/\text{min}$  értéket is a legtöbb munkadarab anyagminőség esetén, ahol a forgácsolósebesség a 8000 m/min értéket is felvehetette. A száraz, a majdnem száraz, és a minimál kenéses forgácsolásnak egyre jobban terjed az alkalmazása. A szuperkemény szerszámanyagok a 3000-9000 HV keménységtartományból választhatók, miközben a szívósságuk meghaladja az 1000 MPa-t. A bevonatolt szerszámanyagok megteremtik a lehetőségét a megmunkáló szerszám anyag és a megmunkálandó munkadarab anyagminőség finom összehangolásának. A megmunkálási pontosság 10  $\mu\text{m}$  érték alatt elérhető a hagyományos forgácsolási folyamatok esetén, melyeket CNC szerszámgépeken végeznek, amíg ultraprecíziós forgácsolás esetén a 0,1 $\mu\text{m}$  érték alatti a pontosság.

A forgácsolást számos esetben szárazon, azaz a **hűtő-kenő anyagok** kedvező hatásának felhasználása **nélkül** végezzük. Ez a megoldás általános a **keményfém és kerámia szerszámok alkalmazásakor**, vagy öntöttvasak forgácsolásakor [1.15]. Sok esetben azonban célszerű **hűtő-kenő folyadékot** alkalmazni: esztergáláskor, gyaluláskor és furatok előállításakor. Ilyenkor **egyszerű vízbázisú hűtő-kenő** anyagok előnyösen alkalmazhatók.[1.4]

Azon **bonyolultabb műveletek**, mint az üregeles, leppelés, menetvágás, mélyfuratok kialakítása, fogazatok marása a legigényesebb kenést kívánják meg. Ilyenkor **egyszerű olajbázisú hűtő-kenő** anyagok előnyösen alkalmazhatók. Műhelykísérletekkel a hűtő-kenő folyadék minőségének és optimális mennyiségének kiválasztása megállapítható.

A környezetvédelmet figyelembe vevő gyártástechnológiai folyamatot egységesen kell szemlélni (4.2. ábra).

Ennek szükségszerű kihatásai vannak a tulajdonképpeni termelési láncra, de a termelés filozófiájára is. Világos, hogy a **környezettudatos gondolkodás a technológiai fejlesztések** majd **minden területére kihat**. Egyrészt az anyaggal, energiával és segédanyagokkal való takarékos bánásmód követelménye befolyásolja a termékek és termelési folyamatok alakítását. Példaként említendő itt a Near-Net-Shape (kis ráhagyású) technológia, amellyel a különböző forgácsolási folyamatok megvalósítási idői lecsökkenthetők. [1.4] Másrészt az újrahaznosíthatóság követelménye új műszaki megoldások keresésére kényszerít az új termékek konstrukciós megoldásaiban és az ehhez kapcsolódó esetlegesen új technológiai megoldások kidolgozásában is. Természetesen figyelemmel kell lenni arra is, hogy a karbantartáshoz vagy az elhasználást követő megsemmisítés során van-e újrahaznosítható részegység vagy nincs, keletkezik-e környezetre káros hulladék, avagy nem.



4.2. ábra

A „környezetkímélő gyártás” elemei

Ez esetben új feladatok adódnak, melyekből - különösen a jövőben - technológiai előny szerezhető a nemzetközi versenyben. A teljes folyamatnak a tisztán műszaki irányultságú szempontja mellett mindenképpen képviselni kell a nemzetgazdasági szemléletet is. Ez társadalompolitikai feladat, mert a környezetvédő termelés követelményét a vállalkozások ma még többlet ráfordításként érzékelik.

Még **nagyobb súlyt kell helyezni az egészségügyi szempontokra**. Ez különösen a gép közvetlen környezetét érinti, ahol a gőz, gáz és a köd a dolgozó egészségkárosodását okozhatja.

A környezettel való bánásmód növekvő felelősségtudata, valamint az egyidejűleg szigorúbbá váló törvényes előírások egyre nagyobb terheket jelentenek a vállalkozásoknak a hűtő-kenő anyagok kezelésében. A **legegyszerűbb megoldás a hűtő-kenő anyag elhagyása volna**. Ennek azonban az a következménye, hogy a hűtő-kenőanyagok alkalmazásával együtt járó előnyös, hasznos hatások, funkciók (így a hűtés, a kenés és a forgács eltávolítását megoldó öblítés) nem valósulnak meg.

A forgácsolástechnika fejlődésének hajtóereje mindig a szerszám alaptípus (monolit, lapkás, forrasztott, szerelt) és a szerszámanyag (időrendben: ötvözött szerszámacél, gyorsacél, keményfém, cermet, vágókerámia, köbös bórnitrid, a természetes és mesterséges gyémánt, stb.) majd a különböző bevonatok alkalmazása, valamint a gyártóberendezések és kiegészítő gyártóeszközök kölcsönhatása. Egyik húzza a másikat.

A **teljesítőképességük növelésében** azonban **jelentős szerepet kap a hűtési-kenési technika fejlődése is**, amely a hűtő- és/vagy kenőanyagok munkadarab és szerszám érintkezési zónájába való bevitelének módját, valamint az alkalmazott mennyiséget jelenti. Ez utóbbi jellemzésére a [liter/min] dimenzió szolgál. A mennyiségi változás mértéke az időben jelentősen megváltozott. **A XX. század közepén szokásos 5÷10 l/min-ről u.n. teljes sugarú hűtésről napjainkra – több újszerű szempont miatt – esetenként 20-25-szörösre nőtt**, amit **árasztásos hűtés-kenésnek** is neveznek. A fontosabb azonban az, hogy ez a forgácsolástechnikai, gépkialakítási, valamint a hűtés-kenés technika módosítását is maga után vonja.

A hűtő-kenő anyagok hűtő-kenő hatása is javult, ami elsősorban a különböző adalékanyagok kifejlesztésével valósult meg. Itt főként a poláris adalékokat és a nyomásállóságot segítő „EP”-adalékokat említhetjük meg, melyek a klór, a foszfor és a kén kémiai vegyületein alapulnak. Ezen **EP-adalékok** és más további adalékok - százalékos részarányától függően - a komplex anyagkeverékek **kenést növelő, súrlódást és kopást csökkentő hatása** meggyőzően beigazolódott.

A XX. század 90-es éveinek kezdetén a **hűtő-kenőanyagok fogyasztása** például a **Német Szövetségi Köztársaságban meghaladta az 1 millió tonna mennyiséget**, amelyet az irányelvek szerint is el kellett távolítani, jelentős költséggel.

A szállítási és szivárgási veszteségek, az emisszió, a halogénezett tisztítószeres és **mérgező károsanyagok** amelyek az előállítás, a szállítás és a használat, valamint a szokásos módon étetéssel történő megsemmisítés során keletkeznek, állandóan növekvő mértékben **veszélyeztetik a talajt, a vizet és a levegőt**.

A hűtő-kenőanyag adalékanyagai, a baktérium- és gombaölő szerek, valamint a képződő reakciótermékek, a közvetett környezetszennyezésnél jelentősebben mérgezőek, de a benedvesítés és belélegzés útján a bőr valamint a légutak rosszindulatú megbetegedéseinek a közvetlen okozói is.[3.13]

A hűtő-kenőanyagok növekvő ára és a környezetszennyező volta miatt megváltozott azok használatával kapcsolatos állásfoglalás. A törvényhozó testületek **kötelezővé tették, hogy a hűtő-kenőanyagokban lévő veszélyes anyagok mennyiségét korlátozzák vagy teljesen szüntessék meg**, mint ahogy azt például a klórparafinra, a nitrózaminokra, biocidokra, vonatkozó általános tilalom kimondja. Továbbá a szerszámgépek környezetében keletkező hűtő-kenőanyag gőzök és aeroszolok koncentrációjára vonatkozó limitált határértéket is megadják. Ez a veszélyes anyagokkal kapcsolatos rendeletekben és a hűtő-kenőanyagok kezelésére és a megelőző óvintézkedésekre vonatkozó előírásokban, szabályozások többségében már meghonosodott.

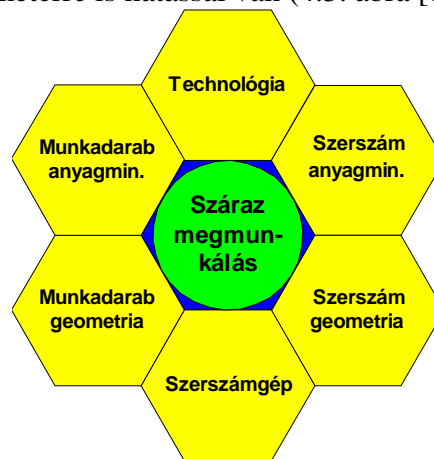


Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy a hűtés-kenés mennyiségi és anyagminőségi összetétele az ökológia és az egészség veszélyeztetését épp olyan drasztikusan megnövelte, mint ahogy az adagolásukkal és eltávolításukkal a rájuk fordítandó költségeket is. A hűtő-kenőanyagok vonatkozó költségeit alábecsülni, elhanyagolni nem lehet. Mint ahogy azt a gépkocsigyártásban a munkadarabra gyártásköltség-struktúra elemzéséből megtudható, a hűtő-kenőanyagok költsége összességében minden alkatrésznél 7-17 %, míg a szerszámköltség csak 2-4 % [1.3].

A hűtő-kenőanyagról való lemondás kihat a szerszám, munkadarab és a gép hőterhelésére, ami viszont a szerszám éltartamát és a megmunkálási pontosságot is befolyásolja. Ezáltal módosul a szerszám gép tervezés és kialakítás amiatt, hogy a hűtő-kenő anyag nélküli forgácsolási folyamat megvalósításának feltételeit megteremtsek.

#### 4.1.2. A környezetbarát megmunkálás jellemzői

Az eddigiekből is kitűnik, hogy a hűtő-kenő anyag egyszerű elhagyása nem jelent megoldást. Sok egymást befolyásoló paraméter összehatásáról van szó, melyek megváltoztatása a többi paraméterre is hatással van (4.3. ábra [1.12 felhasználásával]).



4.3. ábra

*A száraz megmunkálási folyamatot befolyásoló főbb paraméterek*

A hűtő-kenőanyagok elhagyása a súrlódási és hőmérsékleti viszonyok megváltozását eredményezi, a forgács leöblítéssel történő eltávolítása nem valósul meg, azaz az egész folyamat megváltozik. Ez megkívánja a szerszám dolgozó részétől (anyagminőség), hogy megfelelő termikus-, kémiai-, és mechanikai stabilitással rendelkezzen.

Bár a száraz megmunkálásnál a szerszám éltartamidő érték majdnem minden esetben alacsonyabb, mint hűtő-kenőanyag felhasználása esetén, de ezt a hátrányt a hűtő-kenőanyagról való lemondás következtében keletkező költségcsökkenés teljesen, vagy részben ellensúlyozza.

A hűtő-kenő anyag nélküli megmunkálás az egész gyártási folyamat átalakítását eredményezi. Ez annál a kérdésfeltevésnél kezdődik, hogy az eddig alkalmazott gyártási folyamat egyáltalán helyes-e, és a helyes technológiai paraméterek megválasztásával befejeződik-e.

A termelő vállalatok egyre növekvő mértékben mutatkoztak érzékenyek a környezet kímélésére és annak védelmére. A gyártási folyamat ökológiája és ökonómiája megerősödvé, egyenrangúan beépült a vállalkozói szemléletbe.

A **szárazmegmunkálás** és a minimális mennyiségű hűtés-kenéssel történő kvázi szárazmegmunkálás felé a **következő módokon juthatunk el:**

- **biológiai úton lebontható**, toxikológiailag jelentéktelen és környezetet nem károsító alapolajok és adalékanyagok használatával,
- **a vízzel nem elegendő hűtő-kenőanyagok** alkalmazására való fokozott törekvéssel, vagy
- az **adagoló fúvóka optimalizált kialakítása** révén a hűtő-kenőanyag átfolyási mennyisége csökkentésének sokrétű lehetőségeivel.

Így a veszélyeztetettség remélhetőleg elkerülhető, azonban ehhez a kapcsolódó technológiai és műszaki intézkedéseknek egymással is összhangban kell lenniük. Ezen **intézkedések** legyenek komplexek és **hassanak a forgácsolási** folyamatban közvetlenül és közvetve részt vevő **minden komponensre**. A hűtő-kenőanyag nélküli megmunkálás megvalósításának **további lényeges eleme** az ehhez szükséges **szerszámgép és a megfelelő környezet**.

A mai gyártóberendezéseket régebben úgy tervezték meg, hogy a munkatérből a hűtő-kenő anyag kimossa a forgácsot és a központi forgácskihordó rendszerbe juttatja. A hűtő-kenő anyagról való lemondás ezért a gép alapkoncepciójára valamint a központi forgácskezelő rendszerekre is hatással van, mivel folyadék forgácschordozóként már nem áll rendelkezésre.

#### **Megoldási javaslatok:**

- A **forgács kezelését**, munkatérből való eltávolítását, központi helyen való gyűjtését gravitációs úton, speciális gépi eszközökkel kell megvalósítani. A hűtő-kenőanyag a gép alkatrészeinek temperálására is szolgálhat. A **hűtő-kenőanyag hiánya** esetén **megváltozik a gép hőegyensúlya**.
- A technológiai szemléletben következetes változtatások végrehajtása kívánatos:
  - megfelelő **szerszám anyagok kiválasztása** a nagy hőállóságot, nagy melegkeménységet és kopásállóságot, továbbá megfelelő szerszámbevonat rendszert illetően, amelyek tovább növelték a szilárdsági és hőálló funkciókat,
  - a **szerszámgeometria olyan kialakítása**, mely a szerszám-forgács és a szerszám-munkadarab érintkezési felületeinek minimalizálását eredményezi,
  - a **forgácsolási feltételek optimalizálása**, amely a munkadarabra jutó hő eloszlására, áramlásának befolyásolására szolgál.
- A **gyártóberendezések fejlesztése** során törekedni kell arra, hogy
  - a magas hőmérsékletre felhevült **forgács** a munkatérből **gyorsan eltávozhasson**, (pl. ferde fúrás alulról felfelé) [3.16]
  - a **hőterhelés** szempontjából **szimmetrikus** legyen a **gép felépítése**, mely hőmérsékletkompenzáló berendezéssel a hőtágulásokat tolerálhatóbbá és kézmentarthatóbbá teheti,
  - **elszívó berendezésekkel** az esetleges fémporok, és káros anyag kibocsátás ellen eredményes védelemmel rendelkezzen.

Kismértékű hűtés-kenés alkalmazása során célszerűen kialakított fúvókával kell a hűtő-kenőanyagot adagolni.

A felsorolt feladatok megoldásához szárazmegmunkálás esetén a véges elemes szimulációs módszer különösen hasznosan alkalmazható, és a lezajló jelenségek jobb megértését is szolgálja [1.4.].

Korábbi eredményekről számos konferenciakötet, szakkönyv és szakmai cikk (pl. [1.5], [1.6], [1.11], [1.16]-[1.21]) tájékoztat. A szárazmegmunkálásra vonatkozó részekhez az [1.3], [1.8], [1.9] és [1.13] irodalmakat is felhasználtuk.

## 4.2. A KÖRNYEZETBARÁT MEGMUNKÁLÁS ALAPJAI

A környezetvédelem alapvető célja, hogy a jó környezet minősége révén biztosítsa az egészséges emberi élet, a biológiai sokféleség és a gazdasági-társadalmi fejlődés feltételeit. Ezen belül alapvető követelmény a gazdasági fejlődés és a környezet harmonikus – a természeti erőforrásokkal észszerűen és takarékosan gazdálkodó – kapcsolatrendszerének megvalósítása. Ma a **legnagyobb problémát a városi közlekedés, az ipari és lakossági energiatermelés által okozott légszennyezés** jelenti. A **zajterhelés a környezeti hatások legvárosiasabb formája**. Nagyon speciális környezeti probléma – elsősorban a nagy népsűrűségű városi térségben – a **hulladékok képződése, kezelése**.

A fent leírt **környezetkárosító** módozatok – **légszennyezés, zajterhelés, hulladékképződés** – a gépipar területein is sorra fellelhetők.

### 4.2.1. A környezetpolitika kiemelt feladatai

A Második Európai Környezet és Egészség Konferencián (1994. június, Helsinki) elfogadott Európai Környezet-egészségügyi Akcióterv kimondja (338. paragrafus): „A környezet-egészségügyi politika integrálása a gazdasági szektor politikájába a régió valamennyi országának közös problémája, és **érinti** a mezőgazdaságot, az energiaipart, **az ipart, a turizmust és a közlekedést**. Az Európai Környezet és Egészség Bizottság egyik **feladata** lesz az Egyesült Nemzetek Európai Gazdasági Bizottságával (UN/ECE) és az Európai Bizottsággal (EC) közösen **feltárni** más, releváns nemzetközi szervezetekkel való **együttes tevékenység lehetőségeit, amelynek célja segíteni** a tagországokat **olyan politika kialakításában, amely megfelelőképpen védi a környezetet és az egészséget anélkül, hogy akadályoznák a gazdasági fejlődést.**” [2.7]

A polgároknak a környezeti témák iránti általános érzékenysége jelentős hatással volt az Európai Unió környezetpolitikájára, nevezetesen e politika valamennyi más politikába való integrálására vonatkozó általános szándék révén, amint azt például a környezetvédelmi célú pénzügyi eszköz, a LIFE+ [2.16] bevezetésével kapcsolatban folytatott tevékenység tanúsítja. Az Unió környezetpolitikája jelenleg az Unió hatodik cselekvési programjában [2.15] leírt **prioritási területeket** követi, melyek a következők:

- az **éghajlatváltozás** elleni küzdelem;
- a természet és a **biológiai sokféleség** védelme;
- a környezet, az egészség és az **életminőség megőrzése**;
- a természeti **erőforrások megőrzése**.

Ez a tíz évre tervezett **cselekvési tervben** hét tematikus stratégia kidolgozására került sor a következő **témakörökben**:

- a **levegőszennyezés**;
- a **hulladékkezelés** megelőzése és a hulladékok újrafeldolgozása;
- a **tengeri környezet** védelme és megőrzése;
- a **talajvédelem**;
- a **növényvédő szerek** ésszerű felhasználása;
- az **erőforrások** fenntartható **használata**;
- a városi **környezet**.

A rövid távú környezetvédelmi prioritások [2.5]:

- Az emberi egészséget és a természeti értékeket közvetlenül és súlyosan, **nagy kiterjedésben károsító tevékenységet – üzemeket – fel kell deríteni**.

- Fontos feladat a **termelési profiljukat, technológiájukat korszerűvé kell tenni, azaz át kell alakítani**, vagy be kell szüntetni a tevékenységét.
- Be kell tartatni, illetve alkalmazni kell a Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) és az Európai Unió ajánlását, valamint előírását tartalmazó környezeti minősítő, auditálási rendszereket, és ki kell alakítani a vállalatok környezeti menedzsment rendszereit.
- **Az ipari és a lakossági szennyezés mérséklése mellett kiemelt hangsúlyt kell fektetni a közlekedés légszennyező hatásainak mérséklésére.**
- Ehhez pótlólagos műszaki és szervezési, **üzemeltetési intézkedések**, valamint,
- **Monitoring rendszer kiépítésére** is szükség van a levegő tisztaságának az ellenőrzéséhez. Nálunk még nem általánosan elfogadott és működő az a gondolat, hogy a hulladékgazdálkodáshoz kapcsolódó folyamatok, objektumok, eszközök rendszerét és ki kell alakítani az ehhez szükséges gondolkodást.

A **hulladékgazdálkodás** feladatkörén belül érvényesíteni kell ezt az elvet, hogy:

- **előzzük meg** a hulladék **keletkezését**,
- ha keletkezett hulladék azt **hasznosítani kell** [2.23] és,
- a nem hasznosítható hulladékot **meg kell semmisíteni**.

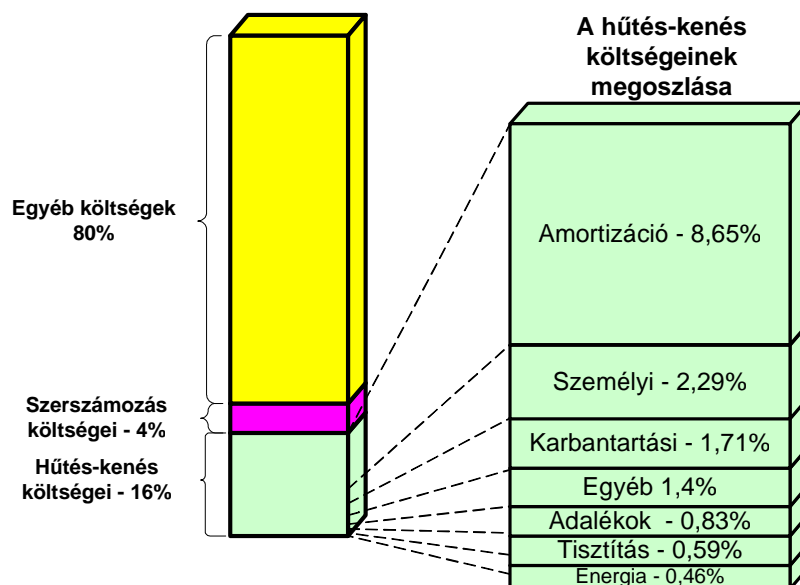
Külön ki kell emelni a második elvet, ugyanis a hasznosítás azt jelenti, hogy egy már korábban kisajátított természeti erőforrást minél tovább a termelés-fogyasztás-termelés körforgásban kell tartani.

Fel kell oldani azt az ellentmondást, ami a teljesítőképesség, megbízhatóság gazdaságosság és az ökológiai követelmények egyidejű teljesítése között van.

Környezetünk apránként erősen megterhelt ökoszisztémát alkot, az adódik, így **egyre nagyobb a környezethez alkalmazkodó** termékek és **technológiák** iránti igény.

A **múltban**, a forgácsolás hatékonyságában bekövetkező javulásokat, amelyek a szerszáméltartam növekedését vagy az időegység alatt forgácsolt térfogat növekedése révén a **főidő csökkenését** jelentették, gyakran egyenlővé tették a **gazdasági nyereséggel**. Ma a forgácsolási folyamatot megváltozott környezetben vizsgálják, amelyben a növekedő környezet- tudatosság és a környezetet védő törvényhozás fontos szerepet játszanak. A megmunkálási folyamatban a hűtő-kenőanyagok használatával elért **lehetséges teljesítménynövekedést egybe kell vetni** a keletkező **környezetvédelmi költségekkel**. Nem lebecsülendő azonban a dolgozók egészségének veszélyeztetése sem, amelyet az olajok és emulziók, melyek az allergiák és bőrbántalmak kiváltói okoznak.

Mindenekelőtt az autóiiparban végzett elemzések igazolják azt, hogy központi hűtő-kenőanyag berendezéseknél a transzfersorokon a hűtő-kenőanyagok beszerzési, kezelési és hulladéktávolítási valamint a megfelelő tisztító berendezések üzemeltetési és amortizációs költségei a szerszám költségek sokszorosát jelenthetik (4.5. ábra) [2.3].



4.5. ábra  
Autóipai hűtőanyag használat költségszerkezete [2.3]

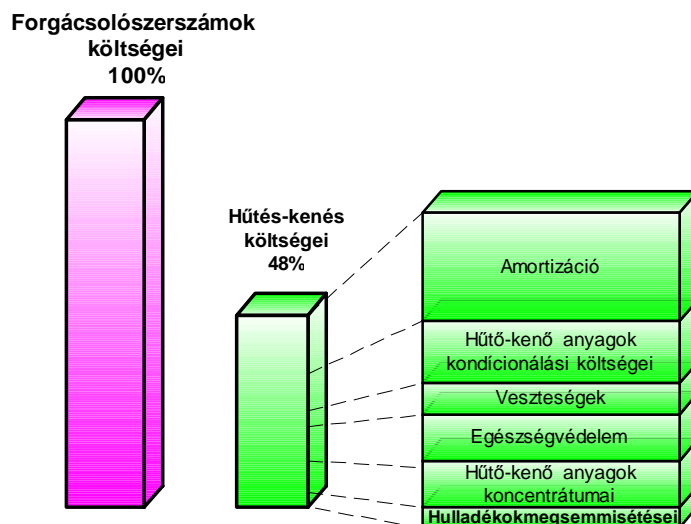
Konkrét számpélda az előzőekben mondottak megértésének megkönnyítésére:

A német iparban 1995-ben több mint 750 000 t/év hűtő-kenőanyagot kellett megsemmisíteni. A semlegesítés becsült átlagköltsége 1 500 €/t volt, amely változhatott az adalékanyag fajtájától, ill. a szennyezettségi fokától. Így a semlegesítés költségei kb. 1.125 milliárd €/év értékre becsülhető. A német fémfeldolgozó autoipar évi összköltségeinek 16%-t képezik a hűtőanyag költségei (4.5. ábra).

Ezeknek a számértékeknek az átvitele közepes- ill. kisvállalkozásokra közvetlenül nem lehetséges. Az üzem nagyság, a gyártási szerkezet, a hűtő-kenőanyagellátás típusa szerint a költséghelyzet teljesen eltérő képet mutathat. Ez érvényes a költségtételek nagyságára és a gyártási költségekben való százalékos részesedésükre is.

A 20 dolgozót foglalkoztató maróüzemben végzett vizsgálatok, azt mutatják, hogy az üzemben a nem robotizált adagolású marógépeknél a szerszámköltségek közel felét a hűtő-kenőanyagok (HKA) költségei teszik ki (4.6. ábra).

A gyorsacél, a keményfém és cermet anyagú marószerszámok viszonylag magas ráfordításai valamint a hűtő-kenőanyagok viszonylag alacsony ráfordításai adják ezt az arányt. Meg kell említeni, hogy ebben az esetben a hűtő-kenőanyag kezelésére és a karbantartására magas a ráfordítás, s a hulladékeltávolítási költségek viszonylag alacsonyak.



4.6. ábra

*Egy maróüzem hűtésre-kenésre fordított költségei*

A két példának az összehasonlítása is azt mutatja, hogy a **hűtő-kenőanyagokat** érintő **költségértékeket** nem lehet általánosan kezelni, hanem **csak egyedi esetekre konkretizáltan lehet vizsgálni**. Kiindulásként elmondható, hogy a német ipar nagy részére vonatkozó költséghelyzet a két példa között mozog. Ez azonban világosan mutatja, hogy nem csak a nagyvállalatoknak, hanem a kis- és közepes üzemeknek is fontos, hogy foglalkozzanak a környezetbarát megmunkálás kérdésével.

#### 4.2.2. A hűtő-kenőfolyadékok szerepe forgácsolásnál

Nyilvánvaló, hogy a hűtő-kenő folyadék hűtő, kenő képessége eredményeként hatékonyan befolyásolhatják a forgácsoláskor jelentkező tribológiai folyamatokat.

**A hűtőanyagok alkalmazása:**

- **a termelékenységet növeli,**
- a megmunkált **felület minőségét, textúráját javítja,**
- **a szerszám-éltartamot növeli,**
- **a megmunkálási időket csökkenti,**
- **a folyamat megbízhatóságát növeli,**
- a forgácsolási folyamatoknál **jelentkező súrlódást, a szerszámkopást, forgácsolóerőt és a forgácsolási hőmérsékletet csökkenti**
- az MKGS rendszer **rezgésérzékenységét csökkenti, stb.**

A kenés hiánya esetén megnő az alakításhoz szükséges és a súrlódás miatt fellépő erő. Ezzel megnő a megmunkáló rendszer labilitása, rezgésérzékenysége, ami miatt megnő a rendszer alakváltozása, a gépzaj és romlik a megmunkált felület minősége is [2.14].

A hűtő-kenőfolyadékok hűtési kapacitása csökkenti a hőmérsékletet és a munkadarab alakváltozását, bár általában a keletkezett hőnek kis része (esztergálásakor 5-10 %) jut a munkadarabba, különösen nagysebességű forgácsolásnál. Ez nagyon fontos a megmunkált alkatrész méretpontossága és a tűrése szabályozásában. A hűtő-kenőfolyadékok segítenek lemosni a forgácsot annak keletkezési helyéről és megóvják az újonnan forgácsolt felületet a korróziótól és a környezeti szennyezéstől. A forgácsolási folyadék hatékonysága függ az alkalmazásának módjától, a forgácsolási sebességtől, a megmunkálási művelet típusától, és a műveletben keletkező hőmérséklettől.

Ha a forgácsolási folyadék olajbázisú, az elsődlegesen kenőanyag. A vízbázisú forgácsolási folyadék nem csak hatékony kenőanyag, de kiváló hűtőanyag is a víz nagy fajlagos hőkapacitási-tényezője, és hővezetési tényezője miatt. Kimutatták, hogy a forgácsolás hőmérséklet növekedése alapvetően a forgácsolósebesség növekedése miatt következik be. Így, 30 m/min forgácsolási-sebesség felett, a szerszám-forgács érintkezési zónájának a hűtése elsődleges fontosságú. Kis forgácsolósebességeknél a kenés a hűtésnél fontosabb, mivel ott a hőmérsékletemelkedés nem jelentős.

Intenzív vizsgálat alá került az a mód, ahogyan a folyadék a forgácsolási zónába jut, és hogy milyen hatással van a forgácskeletkezés mechanizmusára. A folyadék behatolási lehetősége megkívánja a folyadék molekuláris méretének és a felületi feszültségi jellemzők korrekt szabályozhatóságát. Ez azt jelenti, hogy a folyadék kenő tulajdonsága forgácsoláskor megnő a kis nyírési feszültségű film kialakulása miatt, továbbá amiatt, mert kémiai reakciók mehetnek végbe a frissen forgácsolt felület nagy reaktivitása miatt.

Száraz megmunkáláskor nem alkalmaznak hűtő-kenő anyagot. Ezesetben a forgácsolási folyamat során a hűtéshez, a kenéséhez, a forgács eltávolításához, a szerszám gép hűtéséhez szükséges öblítés is hiányzik. A hűtés hiánya azonban hőmérsékletnövekedéshez vezet, melynek következménye lehet nagyobb kopás, a munkadarabban keletkező nagyobb maradó-feszültség, és/vagy nagyobb értékű alak- és mérethibák.

#### 4.2.3. Szárazmegmunkálás

A **környezeti ártalmak csökkentésének leghatékonyabb módszere** lehet a gépipari megmunkálások során, a **szárazmegmunkálás alkalmazása**. A szárazmegmunkálásnak ill. a minimális kenőanyag felhasználásának a főbb előnyei:

- **nincs levegőszennyezés, vízszennyezés, ezért környezetbarát,**
- **nincs hűtő-kenő anyag, így nem okoz allergiás megbetegedéseket és bőrbetegségeket a kiszolgáló-személyzetnél, tehát egészségmegőrző**
- csökkennek a termelési költségek
  - **csökken a forgács tisztítás költsége,**
  - **elmarad a hűtőfolyadék anyag-, adalék- és előállítási költsége,**
  - **elmarad a hűtőfolyadék tisztítási költsége ("recycling"), stb.**

A szárazmegmunkálásnak nyilván vannak hátrányai is, pl. a termelékenységcsökkenés, de ennek anyagi vonzatai messze nem érik el az előnyös megtakarításokat.

A jelenleg túlnyomórészt alkalmazott **teljessugarú hűtéssel-kenéssel** összehasonlítva a **szárazmegmunkálás** következetes irányvonalat képvisel.

Technológiailag nagyon kívánatos mindenféle olyan hűtő-kenőanyag teljes elhagyása, amihez valamennyi lehetséges környezetet, embert és szerszámgépet veszélyeztető tényező csökkentése kapcsolódhat. Ugyancsak kiterjedtek azonban azok a technológiailag nem kívánatos hatások, melyeket a szárazmegmunkálás okoz:

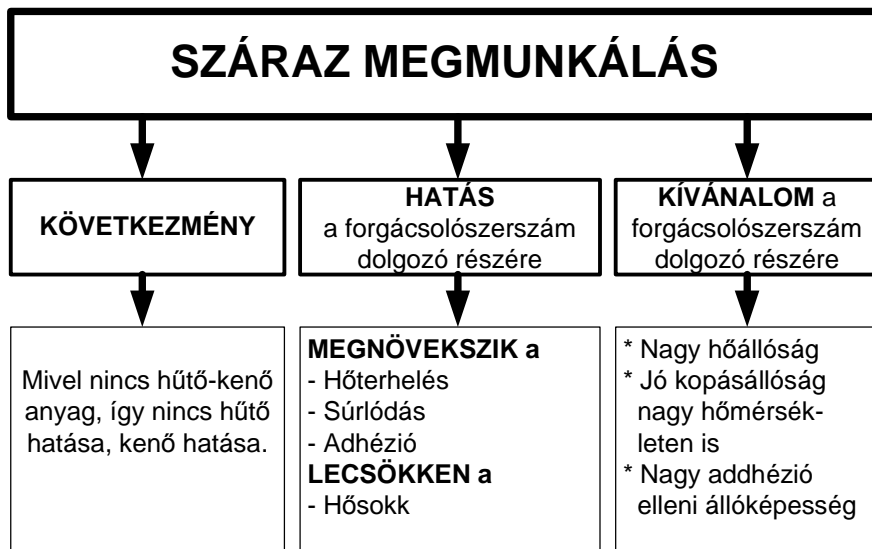
- A három elsődleges funkció, a hűtés, kenés és öblítés elvész, és a folyamat hőmennyiségei és hőáramai megváltoznak és **a gép kialakításával kell megvalósítanunk a forgács eltávolítását is**. Ez különösen fontos változás automatikus megmunkáló rendszerek esetén.

A forgácseltávolítás funkció hiánya elvezethet a forgács szerszámra és a munkadarabra történő felrakódásához, a forgácselvezetők eltömődéséhez, és a már

megvalósult felületek minőségének romlásához, melyet a forgácsolóél és a munkadarab közé szorult forgács okozhat [2.8].

Az öblítő hatás hiánya (a forgács forgácseltávolító berendezéshez való mozgatása) a gép tisztántartása ellen hat. A bennmaradó forgács és a por befogási hibához vezethet. A szárazforgácsoláskor keletkező fémpor megkárosíthatja a szerszám vezetőket. Olyan modern szerkezeti anyagok, mint például szénszál-erősítésű műanyagok (Carbon Forced Composite - CFK) megmunkálásánál a finomporokon túl még száldarabkák vagy részecskék szabadulnak fel, amelyek további egészségügyi problémát jelentenek.

- A szerszám és a munkadarab közötti rosszabb súrlódási és adhéziós viszonyok miatt **mező a forgácsoló folyamat által termelt hőteljesítmény** (4.7. ábra).



4.7. ábra

*A száraz megmunkálás jellemzői*

Ez nagyobb hőterhelést eredményez, ami miatt:

- a **szerszámkopás** drasztikus mértékben **mezővekedik**,
- a munkadarab **felületközei rétegének termikus károsodásai** mezőnek és nagyobb lesz a munkadarab geometriai eltéréseinek mértéke is,
- **negatív kihatással** van a szerszámgépre, annak munkaterére, a termikus stabilitásra, a hőterjedésre valamint az **alkatrész pontosságára**.

A technológia kialakításánál mindezek ismerete és figyelembevétele oda vezetett, hogy a **geometriailag határozott élű forgácsoló-szerszámmal végzett számos forgácsoló eljárás „szárazon” is mezővalósítható**. Ezek között mezőmlíthető az esztergálás, marás, lefejtőmarás, a fúrás és süllyesztés is, amikor a kisebb mezőmunkálási túrések illesztések reprodukálhatóan biztosíthatóak néhány korrekció alkalmazásával [2.1], [2.21].

A forgácsolásnál a domináns problémák és így a folyamat követelmények nagyon különböznek minden anyag és mezőmunkálási eljárás kombinációra.

Például a hosszú furatoknál  $\left(3 \leq \frac{L}{d} \leq 10\right)$  és mély furatoknál  $\left(10 \leq \frac{L}{d}\right)$  nagyon fontos a hűtő-kenőfolyadék használata, mert a forgácsolási zóna vizuálisan nem ellenőrizhető, de a



furatban lévő forró forgács is terheli a munkadarabot és a szerszámot is. Ilyen esetekben a belső hűtőcsatornás szerszámok alkalmazása kedvező, mert a hűtőanyag közvetlenül a forgácsolás helyére jut. A hűtőhatás a hűtő-kenőfolyadék nyomásának növelésével még tovább fokozható. Ezért a korszerű CNC megmunkáló központokba minimum 4,0 MPa nyomással dolgozó szivattyúkat építenek be.

#### *A szárazmegmunkálás jellemzői*

Manapság a száraz megmunkálások az érdeklődés középpontjában vannak, és nagy sikereket lehet velük elérni a környezetbarát forgácsolás-technológiák területén [2.10]. A szárazforgácsolási folyamatok speciális igényeinek kielégítése érdekében több különböző hatású változót kell figyelembe venni. **A forgácsolószerszámot optimalizálni kell a geometria és a bevonat tekintetében. A keményfémek, cermetek, kerámiák, CBN és PCD alapú szerszámanyagok nagy hőszilárdsága és kopás állósága a legnagyobb mértékben alkalmassá teszik a száraz forgácsolási műveletek végzésére.**

Egy száraz **forgácsolási folyamatot** úgy kell megtervezni, hogy az alkatrészben **minimalizálják a keletkezett hőmennyiséget**. Ez elérhető a forgácsolóerők minimalizálásával, és a hőeloszlás befolyásolásával. A forgácsolóerők pozitív élszögekkel rendelkező forgácsolószerszám geometriákkal csökkenthetők, míg az alkatrész irányú hőeloszlás pozitívan befolyásolható nagy forgácsoló-sebesség alkalmazásával. Bár a hőterhelés megnő a forgácsolósebesség növelésével, de a gyors forgácslefutás miatt a munkadarab hőterhelése összességében csökken.

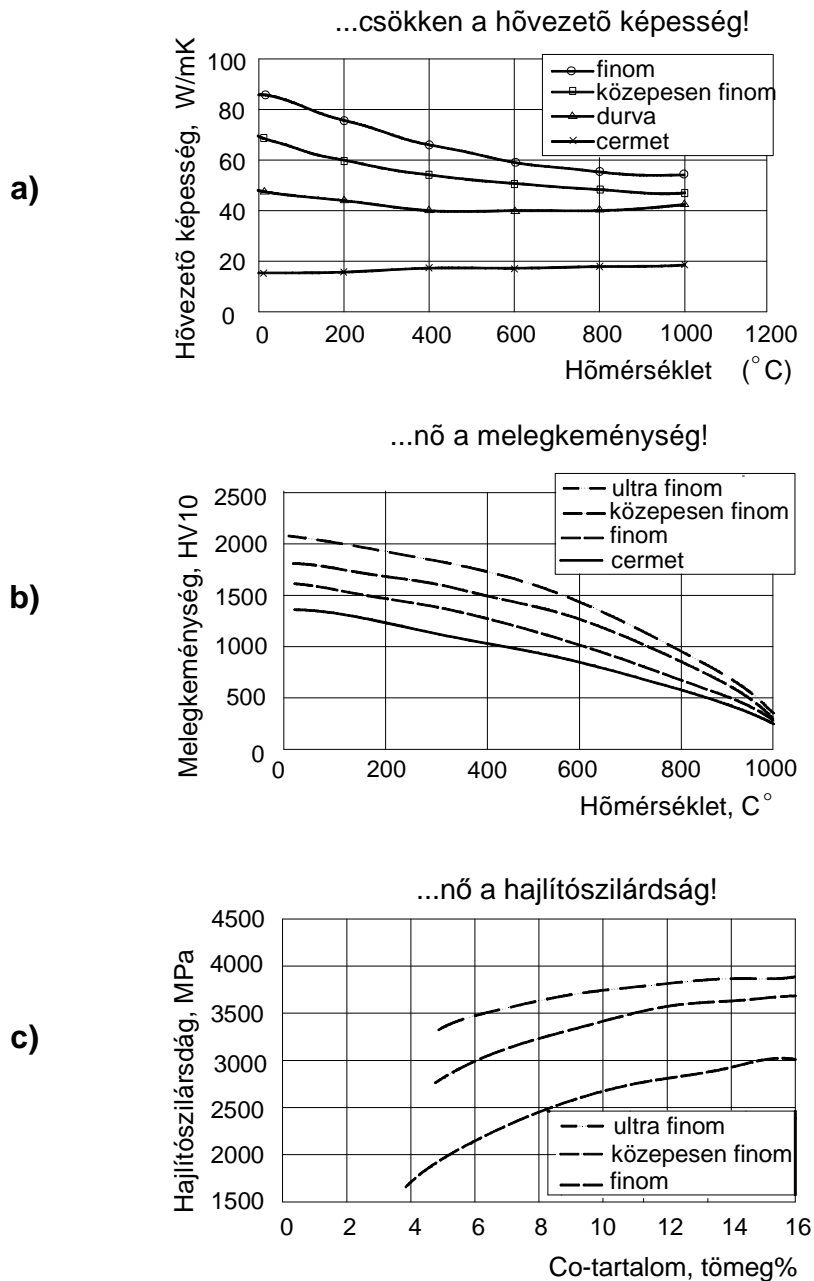
A szárazmegmunkálás gyakorlati bevezetéséhez általában semmilyen különleges műszaki intézkedés és ráfordítás nem szükséges. A szerszáméltartam meg nem engedett mértékű csökkenése, a munkadarab termikus sérülése és az előírt geometriai paramétereinek romlása nem engedhető meg. Ezért **a technológiai jellemzők optimalizálását célszerű elvégezni.**

A szárazmegmunkálásra való alkalmasságot javította az is, hogy **sikerült a finom, közepesen finom és ultrafinom szemcséjű anyagokat kifejleszteni és ezzel hőszilárdságukat, valamint szívósságukat** (4.8. ábra) tovább **növelni.**

A különböző szemcsefinomságú anyagok hővezetőképessége, mint a 4.. ábrából is látható, azonban csökken (a finomtól a durva szemcse irányába) ami lehetővé teszi, hogy a forgáccsal nagyobb hőmennyiség vezetődjön el. Ha a forgácson keresztül történő megnövekedett hőelvezetést TiAlN alapú PVD-keményanyag bevonattal megtámogatjuk, a hőállóság még nagyobb mértékben növelhető a közepesen finom és ultrafinom szemcséjű keményfémekkel a TiN bevonatokhoz képest. A TiN hőszilárdsága kisebb, így akadályozza a szerszám forgácsoló-élébe történő hőbevitelt (4.9. ábra) [2.12].

Különösen magas szigetelő hatás érhető el az un. szupernitrid bevonatokkal jelentősen megnövelt, 70 - 80 mol% fölötti AlN-tartalom mellett (4.10. ábra)

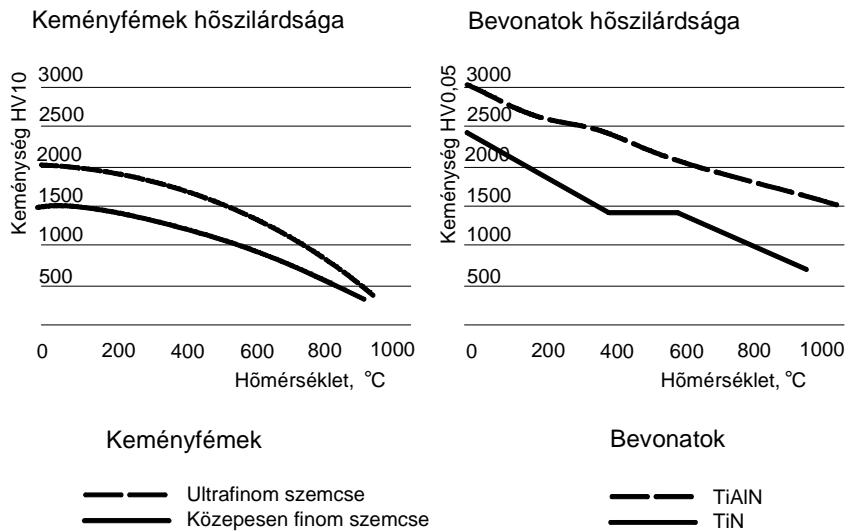
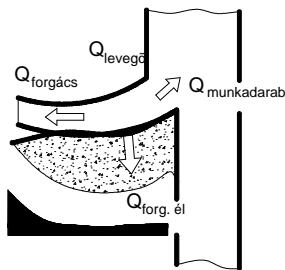
A keményfém alapanyagok, „szubsztrátok”, **finom és ultrafinom szemcsézetével** együtt a szerszám geometriai kialakításához is **nagyobb szabadság járul.** A kisebb szerszám élszögek, az élesebb forgácsolóélek, a kisebb élsugár és az optimalizált forgácstörő geometriai csökkenti a szerszám és a munkadarab, a szerszám és a forgács érintkezési felületét.



4.8. ábra

*Keményfémek szemcsemérettől függő mechanikai és hőfizikai tulajdonságai változása, a) hővezető képesség, b) melegkeménység, c) hajlítószilárdság [2.13]*

Végül, amennyiben a szabadon választható technológiai paraméterekkel is szándékosan befolyásolhatjuk a forgácsképződést és a hőeloszlást, és ha a komplexebb elemzésekbe bevonjuk a hősokk elmaradásának előnyeit, akkor a szárazmegmunkálás nem csak szabályozható és reprodukálható, hanem figyelemre méltó teljesítmény növekedéssel és tartalékkal rendelkező folyamat, amely egészen a Nagy Sebességű Forgácsolások-ig [High Speed Cutting (HSC)], valamint a Nagy Termelékenységű Forgácsolások-ig [High Performance Cutting (HPC)] és a keménymegmunkálásig terjed.

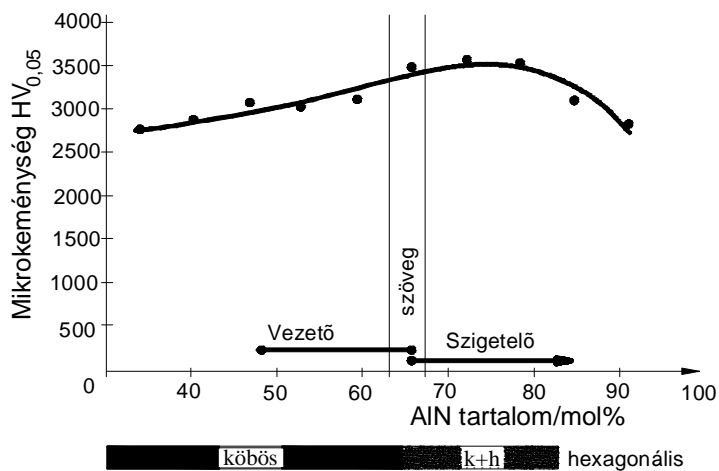


**TiAlN tulajdonságai**

- Nagy hőmérséklet szilárdság
- Kis hővezető képesség
- Magas oxidáció állóság

4.9. ábra

*A TiAlN keménybevonatok tulajdonságai [2.12]*



A max. 80 mol % AlN tartalmú szupernitridek előnyei

- Magasabb oxidáció állóság
- Lényegesen jobb melegkeménység
- Nagy sűrűség
- Változtatható összetétel

4.10. ábra

*A szupernitrid bevonatok tulajdonságai [2.12]*

## *A szárazmegmunkálás paramétereit és az alkalmazott szerszámok jellemzői*

Annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy a száraz megmunkálás milyen **peremfeltételek** között lehetséges, szükségessé teszi, hogy a folyamatból kiindulva lehetőleg minden, a **megmunkálás eredményét befolyásoló paramétert vizsgáljunk meg** és a kölcsönhatásokat vegyük figyelembe (4.11. ábra) [2.20].

A vizsgálódás kereszttüzeiben most az alkatrész áll. Célkitűzés, hogy adott termelési feltételek mellett, száraz forgácsolással előállított alkatrészek gazdaságosan előállíthatók legyenek. A sokféle befolyásoló tényező miatt ez azonban szükségessé teszi minden munkafeladatnál annak vizsgálatát, hogy a különböző kiindulási paraméterektől (mint például munkadarab anyagminőségétől, geometriájától, a pontossági követelményektől, a felületi és felületközeli rétegek jellemzőitől valamint az elvégzendő megmunkálási műveletektől) függően a szárazmegmunkálás kivitelezhető-e a rendelkezésre álló szerszámokkal és szerszámgépekkel. **Megvizsgálendók** az adott esetben az olyan szükséges intézkedések bevezetései, mint például a **forgácsolási jellemzők optimalása**, ill. száraz vagy **minimális mennyiségű hűtés-kenés kiválasztása**.

Alapvetően a szárazmegmunkálás akkor jöhet szóba, ha az alkatrészek **pontosságával szemben nem túl magasak a követelmények**. Különösen az olyan munkadarabok előzetes megmunkálására alkalmas, amelyeknél a végső alak és pontosság elérésére még további megmunkálási eljárásra van szükség.

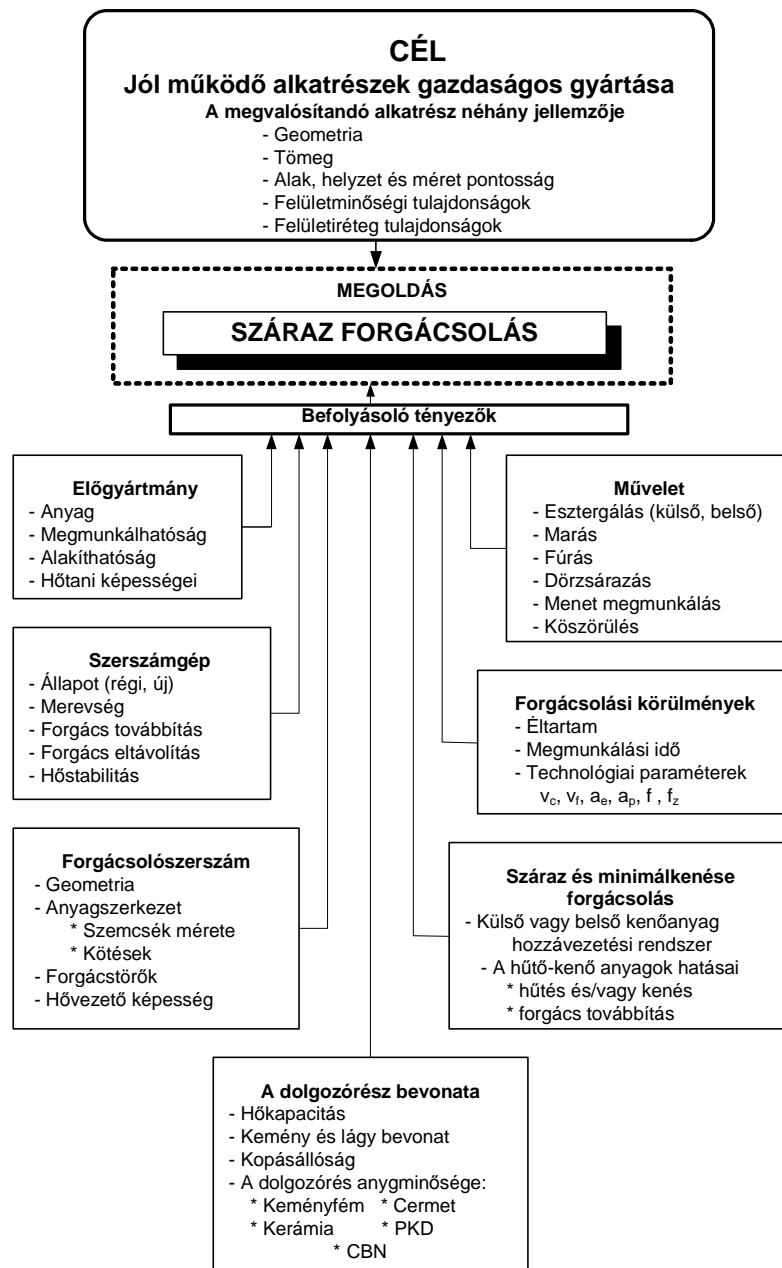
A **munkadarabanyag** megmunkálási eljárástól függő termo-mechanikus tulajdonságai és forgácsolhatósága (szerszám-éltartam, forgácsolóerők, forgácsképződés, felületminőség) révén nagymértékben befolyásolják a száraz forgácsolás elvégezhetőségét és gazdaságosságát (4.11. ábra). **Előnyös az alacsony hővezető képesség, a nagy hőkapacitás**, valamint a **forgácsolandó anyag nagy sűrűsége**, mivel ilyen tulajdonságok esetén az alkatrész kevésbé melegedik fel, ezzel szemben nagyobb forgácsoló erők a keletkezése **ellentétes hatást vált ki**.

A gazdaságos szárazmegmunkálás vonatkozásában központi **jelentősége van a szerszámok dolgozórézének**, valamint az **alkalmazható technológiai paramétereknek**. A száraz megmunkáláshoz kiváló feltételeket kínálnak a keményfémek, cermetek, forgácsoló kerámiák és a sokkristályos bórnitrid, amelyek magas melegkeménységük és kopásállóságuk alapján hűtő-kenőanyagok nélkül is alkalmazhatók (4.12. ábra). A **szerszámgyártók** a termékspektrumukban **olyan szerszámokat kínálnak**, amelyek speciálisan **alkalmasak a szárazforgácsoláshoz**. Egyöntetű állítás, hogy a szárazmegmunkáláshoz szükséges szerszámok kifejlesztésénél a geometria megfelelő változtatása mellett **mindenelőtt a szerszám bevonatának jut központi szerep**. A bevonat két lényeges funkciót tölt be. Egyrészt termikus korlátot képez a dolgozóréz és az anyag között, ami által a szerszám-alapanyag „szubsztrátum” hőterhelése csökken, másrészt egyidejűleg kvázi „szilárd kenőanyagként” is működik, amely a súrlódási és az adhéziós folyamatokat redukálja. Alkalmas bevonó rendszerekkel hagyományos szerszámokat is lehet gazdaságosan a száraz forgácsolásban használni. Általában ilyenkor olyan forgácsolási feladatokról van szó, amelyeket hasonlóan az alacsony forgácsoló sebességgel végzett megmunkáláshoz, mégis magas követelményeket támasztanak a szubsztrátum szívósságával szemben, mint ahogyan ez pl. a menetfúrásnál is előfordul [2.18].

A keményfém bevonatok különböző fizikai tulajdonságai ezen kívül kínálják annak a lehetőségét, hogy a **szárazmegmunkálás követelményeihez speciális tulajdonságú védőbevonatot fejlesszenek ki**.

**Példa erre a molibdén-diszulfidból álló „puha” védőbevonat**, amelyeket a fúróknál és a menetfúróknál a súrlódás és adhézió csökkentésére használnak. A szubsztrátum kemény

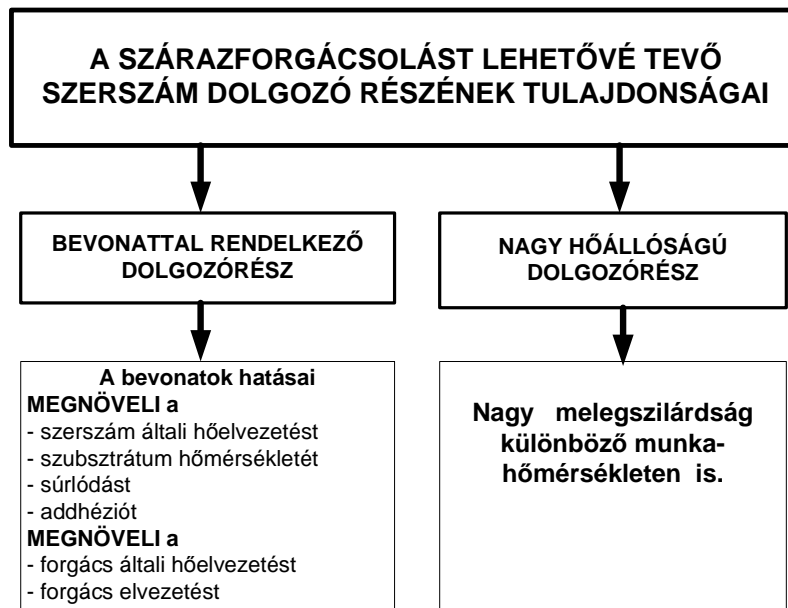
anyaggal történő termikus elszigetelése mindazonáltal a hőáramlás megváltozásához vezet a szerszám és forgács között. Mivel a szubsztrátum kevesebb hőt vesz fel, hasonló energiaátalakításnál több hőt kell a forgácson keresztül elvezetni.



4.11. ábra

*A száraz megmunkálás paraméterei és azok kapcsolata*

Ez ugyanakkor megköveteli, hogy a **szerszámgeometria megfelelő kialakításával a forgácsot lehetőleg gyorsan elvezessék a megmunkálás helyéről**, pl. a menetes felületről. Ugyanez érvényes a forró forgácsnak szerszámgép munkateréből történő elvezetésére is.



4.12. ábra

*A szárazmegmunkáláshoz alkalmazott forgácsolószerszámok dolgozó részével szemben támasztott követelmények*

#### 4.2.4. Megmunkálás minimális hűtés-kenés alkalmazásával

A **minimális mennyiségű hűtés-kenés** ökonómiailag és ökológiailag megfelelő megoldási **alternatívát** kínál a **szárazmegmunkáláshoz képest** az olyan forgácsoló folyamatoknál, melyeknél:

- az eljárástól és a szerszámtól függően **a forgács nem tud akadálytalanul távozni** (például menetfúrás, mélyfúrás, dörzsárazás, stb.),
- az anyagtól függően **a forgács hajlamos az összetapadásra** és a forgácstér növelésére (például alumínium ötvözetek),
- hűtő-kenőanyag adagolása nélkül **nem lehet** eléggé **gazdaságos** forgácsoló **megmunkálást végezni** (pl. nikkel alapú ötvözetek).

A **minimális mennyiségű hűtést**, kenést olyan módszerként lehet definiálni, melynél **a bevezetett hűtő- illetve kenőanyag térfogatáramát addig csökkentjük** egy minimális mennyiségre, **hogy az a forgácsoló folyamat alatt** párolgással, vagy a forgácsra és a munkadarabra tapadással csaknem **teljesen elhasználódjon**. A forgács, a szerszám és a munkadarab „kvázi” száraz marad, és nincs szükség semmilyen utókezelésre. A forgácsot közvetlenül lehet továbbítani újrahasznosításra. Ezért is beszélünk veszteségi- vagy elhasználódási kenésről.

Az elemi funkciók vonatkozásában rögzíteni kell, hogy a hűtőhatás lokálisan az alkalmazott, megfelelően kis hőfelvevő képességű hűtő-kenőanyag minimális mennyiségére korlátozódik. A **kenést** itt erősen kenő hatású hűtő-kenőanyagokat alkalmazva lehet **optimalizálni** és különösen hatékonytá tenni. Az öblítő-hatás a szárazmegmunkáláshoz hasonlóan nem megy végbe.

A szárazmegmunkálásra és a kvázi-száraz megmunkálásra vonatkozó nem egységes, sokféle fogalom, mely a szakirodalomban található, szükségessé teszi a definíciók és megnevezések rendszerezését és egységesítését, alapul véve a [2.2]-t, melyet az alábbiakban mutatunk be és alkalmazunk a továbbiakban:

- **Szárazmegmunkálás (SzM)**

Sűrített levegő nélkül / sűrített levegővel (0,05 ÷ 2,5 MPa)

- **Minimális mennyiségű hűtés-kenés (MMHK)**  
Hűtő-kenőanyag térfogatárama (10 ÷ 100 ml/h)
- **Csökkentett mennyiségű hűtés-kenés (CsMHK)**  
≤ 2 l/min geometriailag határozott forgácsolóélel végzett eljárásokhoz  
≤ 1 l/min a köszörüléshez
- **Teljes sugarú hűtés-kenés (TSHK)**  
≤ 250 l/min geometriailag határozott forgácsolóélel végzett eljárásokhoz (pl. mélyfúrás, haditechnika alkatrészeknél)  
10 ÷ 30 l/min a köszörüléshez

A **minimális mennyiségű hűtés-kenés** során bevezetett hűtő-kenőanyag térfogatárama alulról korlátozott azzal a minimális mennyiséggel, melytől kezdődően **zárt olajfilm alakul ki**. Ez alá nem szabad menni. A **felső határt** az az állapot jellemzi, melytől kezdve a **hűtő-kenőanyag már nem kerül teljesen felhasználásra**, a maradék a forgácsra és a munkadarabra tapadva megmarad, amely a korrózióvédelem miatt mindenképpen kívánt technológiai hatás lehet. Többnyire 50 ml/h középtértékre törekszenek. Sokszor azonban már 30 - 40 ml/h is elegendő.

A **minimális mennyiségű hűtéssel-kenéssel** végzett megmunkálások egyik megoldása szerint, az optimálisan meghatározott minimális mennyiségű hűtő-kenőfolyadékot közvetlenül **porlasztással juttatják a forgácsolási zónára** [2.11]. Jelenleg még csak korlátozott számban található a szakirodalomban minimális hűtéssel, kenéssel foglalkozó publikációk. A forgácsolással foglalkozó vállalatoknál a hűtő-kenőfolyadékok egyre növekvő problémát jelentenek a következő területeken:

- környezet, és az
- egészség megóvása,
- gazdasági hatások, stb.

mert a hűtő-kenő folyadékok olyan vegyi anyagokat tartalmaznak, mint

- a hidrokarbonátok,
- a kén,
- a foszfor,
- a klór,
- az emulgátorok és
- a biocidok, stb.

A hűtő-kenő folyadékok kezelése csökkenti azok környezetet károsító hatását, de a veszély lehetőségét kiküszöbölni nem tudja [2.9].

Másrészt a hűtő-kenő anyagok

- alapanyagainak megvásárlása,
- karbantartása,
- a ködképződés kezelése (hatásának csökkentése), valamint
- a további felhasználásra már nem alkalmas anyagmennyiségek megsemmisítése,

jelentős költségráfordítást igényel, arra ösztönzi a különböző felhasználókat, hogy megvizsgálják ténylegesen szükséges-e (a hűtő-kenő anyagok) alkalmazása, vagy elegendő lenne-e a minimál kenéses megoldás alkalmazása. Ez utóbbi ugyanis az alábbi előnyökkel jár:

- csökken a felhasznált hűtő-kenő folyadék mennyisége és költsége,
- csökken az ipari higiéniai veszély,

- lehetővé válik kevésbé veszélyes hűtő-kenő anyagoknak (pl.: növényi olajok) az alkalmazása,
- a száraz megmunkáláshoz képest nagyobb a forgácsolási folyamat hatékonysága.

Mindezek ellenére **lassan hódít teret a minimál-kenéses** forgácsoló megmunkálás, mert

- **nem ismertek a szükséges ráfordítások,**
- **számolni kell a forgácseltávolítás nehézségeivel,**
- **számolni kell a fémporok gyúlékonyságával [2.18].**

A **minimális mennyiségű hűtés-kenés** alkalmazása megkíván olyan eszközök, adagoló berendezések alkalmazását, melyek megvalósítják a hűtő-kenőfolyadékoknak a munkadarab és szerszám **érintkezési zónájába juttatását**. Számos **technika** létezik a minimális mennyiségű hűtési-kenési módszer létrehozására, mely szükségessé teszi a módszerek és szerszámok megkülönböztetését aszerint, hogy:

- **minimális mennyiségű kenést,**
- **minimális mennyiségű hűtést,** vagy
- a munkadarab és vagy a szerszám **a minimális mennyiségű kenését és minimális mennyiségű hűtését.**

A felsorolt módszerek a várt hatástól függően különböznek a hűtésre és kenésre alkalmazott anyagok hűtési és kenési tulajdonságaiban (kiemelve hőfizikai tulajdonságaikat, vagy összetételüket). A beállított térfogatáram pedig nagyon kicsi mennyiségétől (néhány  $\text{cm}^3/\text{h}$ -tól) a teljes sugarú (árasztásos) hűtéshez szükséges mértékig.

A minimális mennyiségű hűtés-kenés hűtő-kenőanyagai (DIN 51 385: szabvány [2.17]) lehetnek

- **Vízzel nem elegyedőek,** elsősorban a kenőhatást megvalósító anyagokra,
- **Vízzel elegyedőek,** elsősorban a hűtő hatást megvalósító anyagokra (4.13. ábra).

**A hűtő-kenő anyagkombinációk, amelyek alap anyagokból, adalék- és kísérőanyagokból tevődnek össze.**

Az **alap anyagok** adják meg a hűtő-kenőanyagoknak az alaptulajdonságát, hogy kenő és **súrlódáscsökkentő** hatásuk legyen. A vízzel nem elegyedő hűtő-kenőanyagok fő alkotórészét képezik, de részben ( $\leq 20\%$ ) tartalmazzák a vízzel elegyedő hűtő-kenő anyagok is. Ilyenek lehetnek a **növényi és állati olajok** mellett az ásványi olajból kioldott alapolajok, melyeknek a kémiai szerkezete eltérő tulajdonságú szénhidrogének sokaságából tevődik össze, amelyek az összes jelenlévő anyag középértékét képviselik, ezért a szükséges specifikus igényekhez nem igazíthatók hozzá optimálisan.

Ezért a **szintetikus bázisolajok** - szintetikus szénhidrogének, zsíralkoholok, poliglikolok és észterek - **jelentősége egyre nagyobb**. Homogén poláris molekulaszervezetük alapján kínálkozik az a lehetőség, hogy előre meghatározott fizikai és mechanikai tulajdonságokat állíthassunk elő reprodukálhatóan. A szintetikus bázisanyagok további előnye a magas viszkozitás, a jobb munkahigiéncia, valamint az anyag környezetbarát jellege és biológiai lebonthatósága.

A vízzel elegyedő hűtő-kenőanyagoknál a bázisanyagok kitűnő kenőképessége a víz nagy hűtőképességéhez adódik, mely a legnagyobb fajlagos hőkapacitással rendelkezik

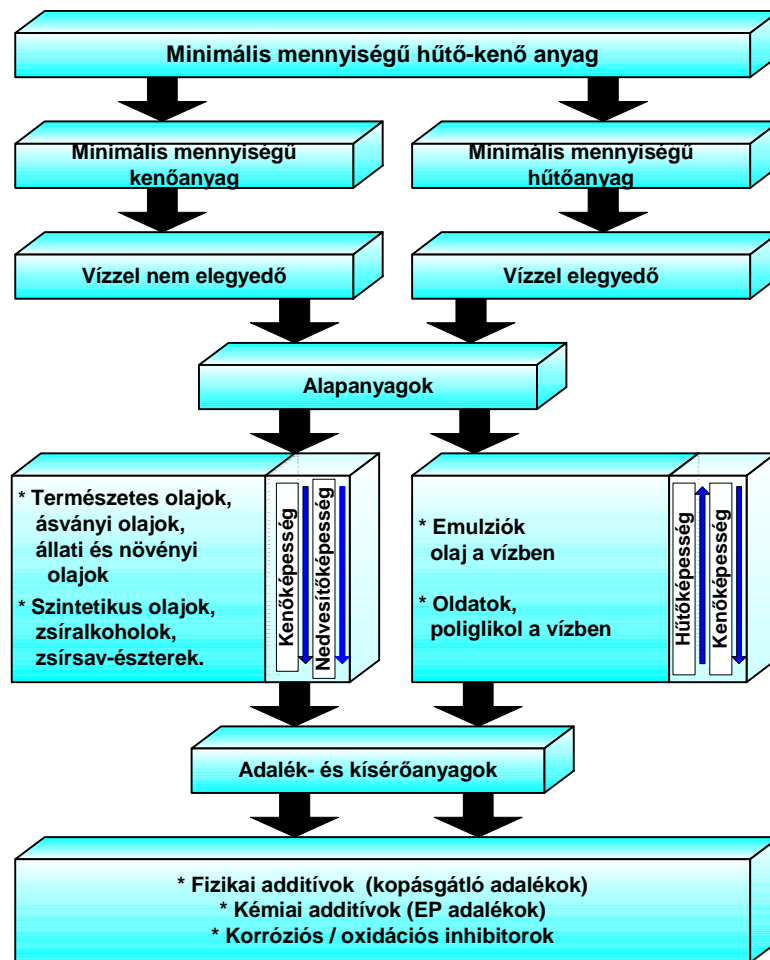
$$(C_{P \text{ VÍZ}} = 4,18 \text{ kJ/kgK},$$

míg az olajé

$$(C_{P \text{ OLAJ}} = 1,92 \text{ kJ/kgK}).$$



**Előnyben részesítik az olaj és a víz emulzióját alkalmazását.** Kösörülési műveletekhez bevált a poliglikol a vízben oldat a poliglikolok nagyon jó kenési tulajdonságai miatt.



4.13. ábra

*A minimális mennyiségű hűtő-kenőanyagok rendszerezése és összetétele*

Az **adalékanyagok** a hűtő-kenőanyagok alkalmazástechnikai tulajdonságainak javítására szolgálnak.

A legfontosabb fizikai és kémiai adalékok közé tartoznak:

- **A súrlódáscsökkentők** (Friction Modifier), megtapadnak a fém felületén és csökkentik a súrlódást (természetes és szintetikus észterek, zsírsavaminok és – amidok, stb.);
- **A kopás ellen védő anyagok** (Anti-Wear-Additive), melyek már szobahőmérsékleten reakcióba lépnek a fémfelülettel és képlékenyen deformálható, kopáscsökkentő kenőfilmet képeznek fémszappanból (foszforsavészterek, foszfátok, stb.);
- **Berágódás ellen védő anyagok** (Extrem-Pressure-Additive), a határsúrlódási tartományban reakcióba lépve magas hőmérséklet- és nyomásállóságú réteget hoznak létre, melyek könnyen nyírhatók és megakadályozzák a fémfelületek közötti mikro-összehegedéseket (a klór, foszfor és kén elemek kémiai vegyületei – klór parafinok, poliszulfidok, stb.).

Ezen túlmenően a **bázisanyagokhoz még oxidációt és korróziót csökkentő inhibitorokat is hozzáadnak** az oxidáció miatti elgyantásodások és korrózió elleni védelem miatt, valamint ködképződést megakadályozó anyagokat, diszperziós anyagokat és habzásgátló adalékokat is. A vízzel elegyedő hűtő-kenőanyagok tartalmazznak még ezen kívül emulgátorokat, biocidokat, oldatközvetítőket, szag- és színanyagokat.

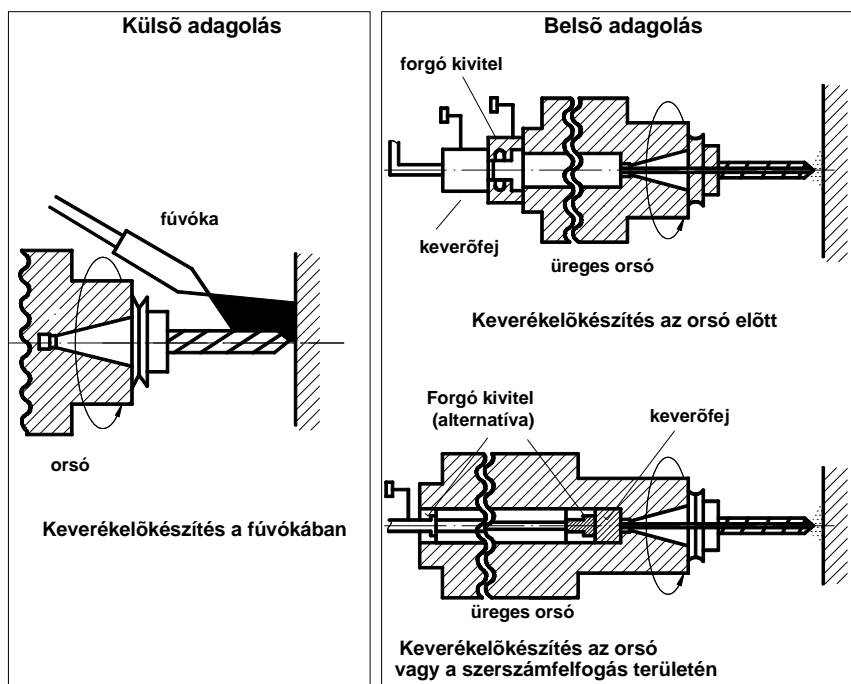
A **kísérőanyagok** végül olyan nem tervezett alkotórészek, melyek a bázis- és az adalékanyagok szintézise során keletkeznek, olyan szennyeződések, **melyekről csak a gyártó rendelkezik pontos adatokkal.**

A hűtő-kenőanyagokat egyre inkább kritikusan ítélik meg toxikológiai és ökológiai szempontból. Míg a bázisanyagokból szinte semmilyen veszély nem származik az emberre nézve, addig a **sokféle adalékanyag**, és az alkalmazás ideje alatt képződő reakciótermékek **magas egészségkárosító hatása** jelentős.

A legtöbbet vitatott reakciótermékek a nitrózaminok, a policiklikus aromatikus szénhidrogének, az ásványi olajok bomlási termékei, a nehézfémek, a fénoxidok és a fémsók. Ezen adalék- és másodlagos anyagok alkalmazásának törvényi szabályozásával korlátozza, illetve megtiltja az olyan anyagok fellépését, mint nitrózaminok, nitridek, policiklikus aromatikus szénhidrogének. A szintetikus, biológiailag lebomló bázis- és adalékanyagok gyakoribb alkalmazásával, azonban - gyártásuk ugyan még drága - az emberrel és a környezettel kompatibilis hűtő-kenőanyag iránti követelménynek már messzemenően megfelelnek.

A hűtő-kenőanyagok minimális mennyiségű hűtés-kenés során történő alkalmazása kapcsán más **problémakör** kerül előtérbe, éspedig az **erős gőz- és aerosol képződés a szerszámgép munkaterében**, mely a kezelőt bőrrel való érintkezés és inhaláció útján veszélyeztetheti. Ez a terhelés függ a hűtő-kenőanyag adagolásának műszaki megvalósítási lehetőségeitől mennyiség és cseppméret szerint, melyet sokféleképpen fejlesztettek és próbáltak ki.

Az adagolásra kerülő hűtő-kenőanyag definíció szerinti kis mennyisége miatt a legfontosabb követelmény az adagolási módszerekre- és rendszerekre nézve az, hogy a hűtő-kenőanyag koncentráltan és pontosan kerüljön a hatásvonába. Ennek a követelménynek számos olyan **készüléktechnikai megoldása** alkalmazható, melyek rendszerezést tesznek szükségessé – korlátozva azokra a változatokra, **melyek hűtő-kenőanyagból és sűrített levegőből álló keveréket hoznak létre.** A keverék adagolásának módját tekintve, a 4.4. ábra szerint, megkülönböztetünk külső és belső adagolást.



4.4. ábra

*A keverékadagolás módszerei minimális mennyiségű hűtés-kenés esetén [2.8]*

A **külső hűtő-kenőanyagadagoló** berendezéssel ellátott készülékek szerkezetileg viszonylag **egyszerű felépítésűek**, szerszámgépre könnyen felszerelhetőek, és a rugalmas fúvókakialakítás révén azok számát és elrendezésének lehetőségeit tekintve változtathatóan lehet igazítani a szerszám – munkadarab pár geometriai méreteihez.

A **belső hűtő-kenőanyag adagolás mindig akkor válik szükségessé**, ha a fogásban lévő forgácsolóélek nem hozzáférhetőek (pl. furatmegmunkáló szerszámok) vagy, ha a keletkező léggöpeny például forgó szerszámmal végzett nagy sebességű forgácsolásnál (HSC) **kívülről nagyon nehezen hatolható át**. Ezekre az esetekre ajánlanak a szerszámgépgyártók **belső hűtő-kenőanyag adagolóval** ellátott orsókat, amelyeknél a nyomással beömlő levegőáramot adagolt hűtő-kenőanyaggal úgy feldúsítják, hogy az a munkaorsó által a szerszámfelfogáson keresztül az egy- vagy kétcsatornás kivitelű szerszám-forgácsolóélekre kerül.

A hűtő-kenőanyag a forgácsolási folyamat megkezdésének időpontjában elegendő mennyiségűnek kell lennie. A folyamat stabilitására negatívan hat, ha túl késő a rendelkezésre állás/szállítás vagy a megmunkálás kezdetén anyagtöbblet áll fenn. Ezért **előnyös a minimális mennyiségű kenőanyag rendszert a gépvezérlésbe integrálni**. A külső hűtő-kenőanyagadagolóhoz az adagolás és a keverék előkészítés fajtájától függően a következő rendszereket kínálják [2.8]:

- **alacsony nyomású porlasztórendszerek,**

melyek az injektor elv alapján 0,02 ÷ 0,06 MPa közötti alacsony levegőnyomással dolgoznak, és csak kb. 2 ÷ 3 l/min közötti csekély levegőfogyasztást tesznek szükségessé. A hűtő-kenőanyagot vákuumban egy levegőáramba szívják be és finom cseppekre porlasztják szét. Max. 8 különböző kivitelű fúvókafej minden feladathoz hozzáigazítható és így sokoldalú alkalmazást garantál pontszerű vagy felületi hűtési-kenési feladatokra is [2.22].

Mágnesszelep biztosítja a folyamatos - egyenletes porlasztást és a rendszertől függő térfogatáramot 10 ÷ 1000 ml/h tartományban lehet beállítani. A készülék rendszere

kompakt felépítésű, nagyon hamar felszerelhető és átszerelhető, tiszta munkakörnyezetet biztosít. Túlnyomórészt emulziók porlasztásához alkalmazzák, melynek során ködképződéssel kell számolni.

- **túlnyomásos porlasztórendszerek,**

melyeknél a hűtő-kenőanyagot és a levegőt a fúvókából való kilépésig általában külön vezetik, és csak ott keverednek össze porlasztmánnyá. Ez a rendszer elsősorban közepes viszkozitású olajok porlasztására alkalmas. A kenőanyag és a levegőmennyiség külön szabályozása révén a felhasználó számára nagyon jó adagolási lehetőségeket és jobb hatásfokot kínál. A hagyományos fúvókáknál a levegő-olaj keverék kb. 15° nyílásszögben lép ki. A speciálisan kifejlesztett fúvóka a kétanyag fúvóka elve alapján működik, melynél a keveréksugarat egy gyűrűs fúvókán át még egy levegősugár is körülveszi köpenyszerűen, így a hűtő-kenőanyag nagyobb távolság esetén is stabilan irányítottan kerül a hatáshelyre, anélkül hogy keverékcseppek kerülnének a környező levegőbe.

A levegő és a hűtő-kenőanyag nyomásának közvetlen kapcsolódása lehetővé teszi, hogy az anyagáram és a keverési arány egyszerű módon tűszelepekkel legyen beállítható. Bonyolultabb nyomásszabályozó- és szivattyúrendszerekre nincs szükség. A térfogatáram 10 ÷ 100 ml/h között állítható be. A ködképzésre való hajlam alacsony.

- **levegő nélküli („airless”) porlasztórendszerek, vagy cseppadagoló rendszerek;**

melyek a tiszta hűtő-kenőanyagot adagolva, nem folyamatosan, levegő hozzákeverése nélkül irányítják a forgácsolási helyre.

Az olaj egy tartályból nyomásmentesen folyik az adagolóegységbe, melyből dugattyúnyomással cseppalakban préselődik ki a fúvókából. A fúvóka furatától, a dugattyúnyomástól és a hűtő-kenőanyag viszkozitásától függően 0,01 ÷ 0,08 cm<sup>3</sup> közötti cseppméret érhető el percenkénti max. 120 (260) löketnél. A fúvóka kimenete és a beesési hely közötti távolság az anyag felületi feszültségétől függően 60 -500 mm lehet. A fúvókára felhelyezhető szórófejek segítségével különböző porlasztási képek állíthatók elő: teljes kör, kúpos, gyűrű alakú sugár alakban, és a mindenkori alkalmazási feltételekhez optimálisan alakíthatók ki.

A fent leírt porlasztórendszerek közül a **túlnyomásos rendszerek a leginkább elterjedtek a gyakorlatban.**

## 5. Elméleti modellek felállítása, végelemes vizsgálatok

A környezetkímélő gépipari megmunkálások irodalmának átfogó elemzése után különböző elméleti kopás modellt tanulmányoztunk. Ezen modellek némelyike valamilyen geometriai tulajdonság változáson, míg mások olyan fizikai mennyiségek változásán alapultak, mint a terhelés, anyagi keménység, stb. Mi a száraz kopást tanulmányoztuk. A legjellemzőbb szárazkopási modellt Archard állította fel. Elemeztük és modelleztük a súrlódást mechanikai szempontból. Tanulmányoztuk a különböző szerszámkopási kritériumot.

Tanulmányoztuk a felület geometria Fourier elemzését. A felületek három dimenziós jellemzésére az ISO 14 különböző jellemzőt négy fő csoportba osztályozott: amplitúdó paraméterek, térbeli paraméterek, hibrid paraméterek, és funkcionális paraméterek. Különböző technológiai paraméterek mellett végzett környezetkímélő eljárással készített fűrt munkadarab-felületek megvizsgálására került sor. Ezekből következtetéseket lehetett levonni a szerszámkopás és a felületi érdesség különböző paramétereiben bekövetkező változásokra.

A környezetkímélő gépipari megmunkálások irodalmának átfogó elemzése, tanulságok levonása. Elméleti tribológiai-, kopási vizsgálatok. A különböző kopás-modellek tanulmányozása.

A száraz megmunkálás energetikai alapú vizsgálata: érintkező felületek 2D vizsgálata, a felület geometriájának Fourier-elemzése, a meglévő kopásmodellek (pl. Archard, Mulhearn, Samuels, Murray, Mutton, Wattson, Moore, stb. modellek) továbbfejlesztése, új kopásmodellek alkotása.

A forgácsolási folyamat modellezése. A forgácsolási folyamat mechanikája (szabad forgácsolás, kötött forgácsolás esetén). A hűtő-kenő folyadék környezeti hatásának elemzése. Feature alapú elemzés (mikro- és makro módszer).

### 5.1 A forgácsoló-erő modellezése minimálkenés esetén

A forgácsoló-erő ismerete feltétlenül szükséges a forgácsolási hőmérséklet megbecslésére, a szerszám-éltartam előre jóslására, a forgácsolási folyamat tervezésére, és a rezgéselemzésre, stb. A megmunkálási folyamat mechanizmusát és a forgácsoló-erők előrejelzését széles körben elemezte és modellezte évtizedeken át számos kutató. Bár nagyon sok tanulmányt dokumentáltak ezen a területen, de ezek a modellek nem felelnek meg a minimálkenéses feltételeknek, a kis mennyiségű forgácsolási zónába juttatott forgácsolási folyadéktól eredményeződő kenő- és hűtő hatás figyelmen kívül hagyása miatt. Azért, hogy a minimálkenéses megmunkálási folyamat tervezését, optimalizálását és szabályozását támogassuk, szükséges felállítani előzetes hő-mechanikai modellek készletét a forgácsolóerők megbecslésére minimális kenési paraméter és a technológiai paraméterek függvényében. Az erőmodell kidolgozása az [5.1] felhasználásával történt.

Kimutatjuk, hogy a legtöbb minimál-kenéses megmunkálásra vonatkozó tanulmány empirikus és kvalitatív erőképleteket tartalmazott [5.3]. Itt egy analitikai megközelítés következik a minimálkenésnél ébredő forgácsoló-erők kvantitatív modelljének meghatározására, mely az Oxley-féle erő modellben tartalmazza a hűtő és kenő hatást. Az elemzés továbbá ki lett terjesztve úgy, hogy felhasználható legyen a forgács-szerszám érintkezési hosszúság, és nyírési szög meghatározására, a forgácsolóerők megbecslésére a Waldorf modellre alapozottan a szerszámkopás alapján, azt feltételezve, hogy a nyírési szög és a forgács vastagság nem változik jelentősen a szerszámkopás függvényében [5.4]. A forgácsoló erők

kiszámíthatók az éles szerszámra jellemző forgácsoló-erők és a hátkopásra jellemző forgácsoló-erők összegeként [5.5], [5.6].

A minimálkenéses megmunkáláshoz tartozó forgácsoló-erők becsült értékei meghatározhatók mind az éles szerszám és a kopott szerszám alkalmazása esetén. A minimálkenéses megmunkálás elvére alapozva az Oxley modell [5.2] módosítását elvégeztük az éles szerszámra vonatkozóan és a Waldorf modelljét [5.5] alkalmaztuk a kopott szerszámra. Először a súrlódási kúp félkúpszögét számítjuk ki, amelyből a szerszám-forgács érintkezésénél lévő tangenciális és normál erők arányát határozzuk meg a Kato és társai [5.7] féle határkenés modellre alapozva. Az eredményeződő súrlódási szöget aztán az Oxley modellben használjuk fel, hogy figyelembe vegyük a minimálkenés kenő hatását.

A nyírási sík becsült hajlásszögét és a feszültségáramot aztán a Waldorf modellben használjuk fel az erő becslésére a szerszámkopás hatását is figyelembe véve.

### 5.1.1. Erőmodell éles szerszám esetén

#### 5.1.1.1. A határkenés elméletre alapozott minimálkenéses súrlódási együttható

A minimálkenéses megmunkálásnál alkalmazott levegő-olaj keverék szembetűnő hatása a kenés, amely megváltoztatja a szerszám-forgács érintkezésénél a súrlódási tényező értékét. A minimálkenéses megmunkálásnál, a hidrodinamikai kenéselmélet modell nem alkalmazható a forgácsolóerők értékének pontos előrejelzésére a minimális mennyiségű kenőanyag mennyiséget figyelembe véve. Ilyen feltételeknél egy forgácsoló-folyadék film nem tételezhető fel. E helyett a határkenés elmélet egy sokkal helyénvalóbb leírása a minimálkenéses megmunkálási feltételeknek. Határkenésnél, a terhelés kis részét viszi az érdes felületű érintkezés és a további részt a forgácsoló folyadék. A súrlódó erő és a normál erő a határkenésnél a következőképpen fejezhető ki [5.8]:

$$F_s = s_f A_f + s_k A_k \quad (5.1)$$

$$F_n = p_f A_f + p_k A_k \quad (5.2)$$

$F_s$	Súrlódási erőkomponens
$F_n$	Normál erőkomponens
$A_k$	Adszorbeált kenőfilm érintkezési területe
$A_f$	A fémes érintkezés területe
$s_k$	Nyírófeszültség az érintkezési felületen lévő adszorbeált filmnél
$s_f$	Nyírófeszültség a fémes érintkezési területnél
$p_k$	Átlagos érintkezési nyomás az adszorbeált kenőfilmmel rendelkező érintkezési felületnél
$p_f$	A fémes érintkezésnél ható nyomás

Azután a súrlódási együttható az (5.1) és (5.2) egyenletekből számítjuk a következőképpen

$$\mu = \frac{s_f A_f + s_k A_k}{p_f A_f + p_k A_k} = \frac{C_1 A_f + C_2 C_3 A_k}{A_f + C_2 A_k} \quad (5.3)$$

ahol

$$C_1 = \frac{s_f}{p_f}, \quad C_2 = \frac{p_k}{p_f}, \quad C_3 = \frac{s_k}{p_k} \quad (5.4)$$

A fémes érintkezési terület  $A_m$  és az adszorbeált kenőfilm érintkezési területe  $A_b$  a következőképpen számítható a Kato és társai [5.7] által bemutatott modell alapján:

$$A_f = C_4 a_s^3 \quad (5.5)$$

$$A_k = C_4 \left\{ (a_s + t_k)^3 - a_s^3 \right\} \quad (5.6)$$

ahol:  $C_4 = \frac{\pi R n_0 D^2}{6 H_{\max}^2}$

$H_{\max}$	Érdességmagasság eloszlása
$R$	Érdességmérő csúcssugara
$n_0$	Teljes érdesség szám
$D$	Az eloszlásfüggvény hajlásszöge
$a_s$	A két felület közeledése
$t_k$	Hatékony adszorbeált kenőfilm réteg

Az (5.5) és (5.6) egyenleteket behelyettesítjük az (5.1) egyenletbe, egy harmadfokú egyenlet a két felület becslésének megközelítésére,  $a_s$  kiadódik:

$$a_s^3 + 3C_2 t_k a_s^2 + 3C_2 t_k^2 a_s + \left( C_2 t_k^3 - \frac{F_n}{p_m Q} \right) = 0 \quad (5.7)$$

ahol

$$Q = \frac{\pi R n_0 D^2}{6 H_{\max}^2} \quad (5.8)$$

Az (5.3), (5.5) és (5.6) egyenletekből, a súrlódási együttható számítható:

$$\mu = \frac{C_1 a_s^3 + C_2 C_3 \left\{ (a_s + t_k)^3 - a_s^3 \right\}}{a_s^3 + C_2 \left\{ (a_s + t_k)^3 - a_s^3 \right\}} \quad (5.9)$$

### 5.1.1.2. Az Oxley forgácsolási elmélet módosítása minimálkenéses forgácsolásra

Azért, hogy kiterjesszük a forgácsolóerő a minimálkenéses forgácsolás feltételére, megpróbálunk módosításokat tenni figyelembe véve mind a kenő, mind a hűtő hatást.

A következő fejtegetésben az Oxley forgácsoláselmélet módosítását használjuk kenő hatás súrlódási szögére való hatásának számbavételére. Az (5.7) egyenletben lévő  $F_n$  normál terhelés kezdeti sejtése megkapható az Oxley modellel teljesen száraz esetre. Azt szintén észrevették, hogy amikor az adszorbeált kenőfilm vastagság  $t_k$  nullával egyenlő, akkor a kenés hiányzik a forgácsolási folyamatból, azaz a teljesen száraz eset. Továbbá, amikor  $t_k$  nullával egyenlő, az (5.9) egyenlet

$$\mu = C_1 \quad (5.10)$$

alakú lesz. Éppenezért, az (5.9) egyenletben lévő  $C_1$  együttható a súrlódási szöggel becsülhető az Oxley modelből a teljesen száraz megmunkálási esetre. A  $C_2$  és  $C_3$  együtthatókat kísérleti adatokból és az anyagi tulajdonságokból határozhatók meg. Ezek, ezen fejezetben később lesznek megvitatva.

A második módosítás a forgácsolási hőmérséklet modellezésére vonatkozik egy mozgó hőforrás módszer alkalmazásával, az Oxley munkájában [5.2] megjelenő kísérleti egyenletek helyett.

### 5.1.1.3 Az egyenértékű forgácsoló ék modell ferde szabadforgácsolás esetén

Azért, hogy az előzetes ortogonális modell előnyeit alkalmazzuk, az egyenértékű forgácsolóél elvét adaptáljuk [5.9] amikor ferde szabadforgácsolás esetét tekintjük. Ezt a háromdimenziós ferde szabadforgácsolási modellt számos kutató elfogadta, beleértve Oxleyt [5.2] és Arsecularatne és társait [5.9], [5.10] is. A forgácsolóerő meghatározásának a javasolt egyenértékű forgácsolóél módszerével a ferde szabadforgácsolásnál röviden a következők. Az egyenértékű forgácsolóél a forgács áramlás irányában van meghatározva. A számolt forgács áramlás irányának meghatározásának kifejlesztése egy ismert csúcssugárral, homlok éllel, homlokszöggel, terelő szöggel rendelkező szerszámon a kísérleti megfigyelésekre van alapozva [5.2]. A csúcssugár hatása a forgácsáramlás irányára meghatározható egy képzeletbeli szerszámon nulla homlokszöggel és nulla terelő szöggel. Az ekvivalens forgácsolóél a forgácsolás irányára merőleges irányban van felvéve. A képzeletbeli vonalat aztán vetítjük a szerszám homlokfelületéhez.

Az ekvivalens forgácsoló éllel és a  $C_c^*$  mellékforgácsoló éllel a  $t^*$  ekvivalens deformálatlan forgácsvastagság és a  $w^*$  ekvivalens forgácsszélesség a következő egyenletekkel adott:

$$t^* = f \cos C_s^* \quad (5.11)$$

$$w^* = \frac{d}{\cos C_s^*} \quad (5.12)$$

Ha egyszer a forgács áramlási irányát meghatároztuk, a forgács áramlási szög  $\eta_c^*$ , amely az ekvivalens forgácsolóél és a forgács áramlási iránya között van a szerszám homlokfelületén meghatározható Stabler áramlási törvénye [5.11] alapján:

$$\eta_c^* = t^* \quad (5.13)$$

Ezután a főforgácsoló erő és az elötolás irányú erő,  $F_c$  és  $F_t$ , az ekvivalens ortogonális forgácsolás kiszámítható az ekvivalens elméleti forgácsvastagsággal, forgács szélességgel és a megfelelő szerszám szögekkel. A forgácsoló erők átranszformálhatók az ortogonális forgácsolásból a 3D-s diagonális forgácsolássá a következő egyenletekkel [5.9]:

$$P_1 = F_c \quad (5.14)$$

$$P_2 = F_t \cos C_s^* + F_r \sin C_s^* \quad (5.15)$$

$$P_3 = F_t \sin C_s^* - F_r \cos C_s^* \quad (5.16)$$



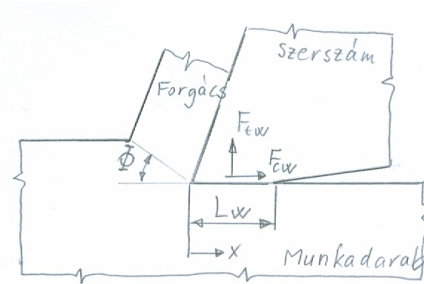
ahol  $P_1$ ,  $P_2$  és  $P_3$  a forgácsoló sebesség, az előtolás irányú és a passzív forgácsoló erő komponens, és

$$F_r = \frac{F_c (\sin i^* - \cos i^* \sin \alpha_n^* \operatorname{tg} \eta_c^*) - F_t \cos \alpha_n^* \operatorname{tg} \eta_c^*}{\sin i^* \sin \alpha_n^* \operatorname{tg} \eta_c^* + \cos i^*} \quad (5.17)$$

A forgácsolóerőkre vonatkozó részletes egyenletek a diagonális esetre Arsecularatne és társai [5.9] munkájában találhatóak.

#### 5.1.1.4. Erőmodell kopott szerszám esetén

A kopott szerszámokhoz tartozó forgácsoló erők számíthatók úgy, hogy összeadjuk az éles szerszámra jellemző forgácsoló erőkhöz a hátkopás területtel [5.5] rendelkező szerszám hatását. Ez a rész megvitatja a módszert, hogyan találjuk meg a szerszám hátkopása miatti erőket. Az előtolás irányú erők  $F_{fw}$  és főforgácsoló erő irányában  $F_{cw}$  számítható a normál hátfeszültség és a nyíró hátfeszültség külön-külön [5.5], [5.6]. A hátkopás miatti erők az 5.1. ábrán láthatók.



5.1. ábra

A szerszám hátkopás miatti forgácsoló erők ortogonális forgácsolási modell esetén [5.6]

Így a szerszám hátkopása miatti forgácsoló erők a következőkkel adóttak:

$$F_{fw} = w \int_0^{L_{VB}} \sigma_w(x) dx \quad (5.18)$$

$$F_{cw} = w \int_0^{L_{VB}} \tau_w(x) dx \quad (5.19)$$

Ahhoz, hogy szerszám hátkopás miatti forgácsoló erőket becsülni tudjuk, először a normál feszültséget és a nyíró feszültséget kell meghatározni. Waldorf [5.5] a polinom alakú eloszlást javasolta mind a normál mind a nyíró feszültségre. Azon feszültségeloszlásokra szintén hatással van a kritikus hátkopás szélesség,  $L_{VB}^*$ , amelynél képlékeny áramlás megkezdődik a kopott rész elején. Ha a szerszám hátkopás terület szélessége kisebb, mint a kritikus érték, ( $L_{VB} \leq L_{VB}^*$ ), tisztán rugalmas érintkezés van a szerszám kopott része és a munkadarab között. Ha, ( $L_{VB} > L_{VB}^*$ ), mind rugalmas és képlékeny érintkezés létezik. A kísérleti megfigyelésekre alapozva, Smithey [5.6] javaslata szerint acél estén a kritikus kopási szélesség az  $L_{VB}^*$  értékére 0.38mm. A különböző kopás felület szélességekre, a normál és a nyíró feszültség kifejezések az alábbi megfelelő egyenletekkel kiszámíthatók:

Ha

$$\begin{array}{l}
 (L_{VB} \leq L_{VB}^*) \\
 \sigma_w(x) = \sigma_0 \left( \frac{L_{VB} - x}{L_{VB}} \right)^2 \quad \text{a} \quad 0 < x < L_{VB} \quad \text{tartományra} \\
 \tau_w(x) = \tau_0 \quad \text{a} \quad 0 < x < L_{VB} \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_0}{\sigma_0}} \right) \quad \text{tartományra} \\
 \tau_w(x) = \mu \sigma_w(x) \quad \text{az} \quad L_{VB} \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_0}{\sigma_0}} \right) < x < L_{VB} \quad \text{tartományra}
 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array}} \right\} (5.20)$$

Ha

$$\begin{array}{l}
 (L_{VB} > L_{VB}^*) \\
 \sigma_w(x) = \sigma_0 \\
 \sigma_w(x) = \sigma_0 \left( \frac{L_{VB} - x}{L_{VB}} \right)^2 \quad \text{az} \quad L_{VB} - L_{VB}^* < x < L_{VB} \quad \text{tartományra} \\
 \tau_w(x) = \tau_0 \quad \text{a} \quad 0 < x < L_{VB} - L_{VB}^* \sqrt{\frac{\tau_0}{\sigma_0}} \quad \text{tartományra} \\
 \tau_w(x) = \mu \sigma_w(x) \quad \text{az} \quad L_{VB} - L_{VB}^* \sqrt{\frac{\tau_0}{\sigma_0}} < x < L_{VB} \quad \text{tartományra}
 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}} \right\} (5.21)$$

ahol a  $\sigma_0$  és  $\tau_0$  feszültség áramokat az éles szerszámra jellemző módosított Oxley erőmodellből kapjuk. A Waldorf modellbe [5.5] szükséges egyéb információ, mint például a nyírási sík hajlásszöge, szintén a módosított Oxley féle forgácsolás elméletből [5.2] kapható.

Ortogonalis esetben, egy kopott szerszámra a teljes főforgácsoló erőkomponens és a teljes előtolás irányú erőkomponens megkapható, ha összegezzük az éles szerszámra és a kopott szerszámra vonatkozó erőkomponenseket. Diagonális forgácsolásra az ekvivalens forgácsoló él modellel Arsecularatne és társai [5.9] alapján a teljes forgácsoló erő komponensek tangenciális, axiális és radiális irányokban az (5.14), (5.15) és a (5.16) egyenletekkel becsülhető.

### 5.1.2. Esztergálás során fellépő rezgési jelenségek stabilitásának vizsgálata

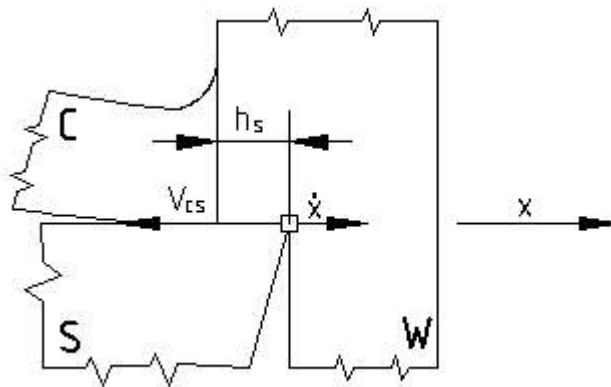
A forgácsolás során megfigyelhető rezgéseket a rendszer lengése okozza. A fellépő rezgéseknek az alábbi káros hatásai vannak:

- rontja a munkadarab felületének minőségét
  - a szerszám töréséhez vezethet
  - határt szab a forgácsolási teljesítménynek
- stb.

Egy rendszer lengő mozgását okozó gerjesztő erőt a nyugvásbeli és a mozgásbeli súrlódási tényezők különbsége okozza. A forgácsolás folyamatában elsődleges és másodlagos gerjesztő erőket különböztetünk meg.

### Elsődleges gerjesztő erők

Ha a forgácsolási erők és a rendszer rugalmas deformációinak az egyensúlya megbomlik a szerszám és a munkadarab között relatív elmozdulás jön létre. Az elmozdulás közben belső gerjesztő erők is ébrednek. Ha a csillapítás kicsi és a belső gerjesztő erők erősítik az elsődleges lengéseket, akkor öngerjesztett lengés keletkezik.

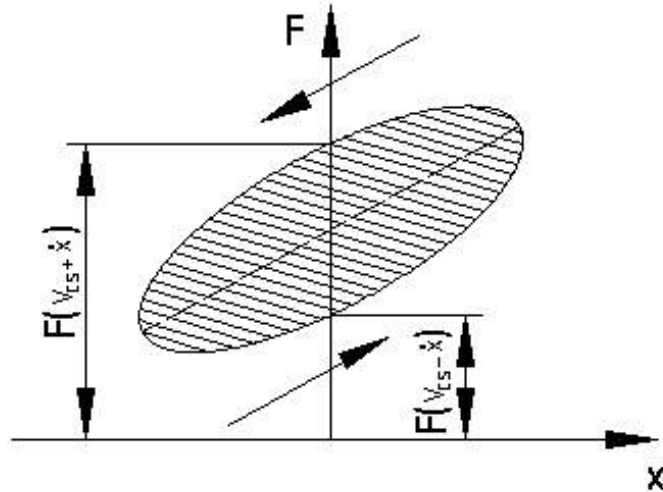


5.2. ábra

A kés anyagban végbemenő lengő mozgásának hatása a szerszámon mozgó forgács sebességére [6.2]

A forgácsoló erő lefolyása egy periódus alatt a kés helyzetétől függően a 5.3. ábrán látható. Az ellipszis területe arányos a rendszerbe bevezetett energiával:

$$E = \int_{x_1}^{x_2} F dx \quad (5.22)$$



5.3. ábra

Az elsődleges gerjesztő erők függése a szerszámcsúcs egy periódusa alatt elfoglalt helyétől [6.2]

### Másodlagos gerjesztő erők

Az elsődleges gerjesztő erők analízisének feltételeztük, hogy a leválasztandó réteg vastagsága csak a lengő mozgás következtében változik. A rezgések közben kialakult forgácsolt felület viszont hullámos. További fordulatnál ezért a leválasztandó réteg vastagsága már nemcsak a lengő mozgástól függ, hanem attól is, hogy milyen pályát írt le a forgácsoló él az előző fordulatban. Ha a két fordulat között a lengőmozgások között fáziseltolás van (5.4.a ábra) akkor változik a leválasztandó réteg vastagsága, és periodikus erő keletkezik függetlenül az elsődleges gerjesztő erőktől. Ezt az erőt hívjuk másodlagos gerjesztő erőnek. A másodlagos gerjesztő erő a leválasztandó réteg pillanatnyi vastagságával arányos.

A másodlagos gerjesztő erők erősítik az elsődleges gerjesztő erők hatását. Érthető, ha a lengőmozgások között nincs fáziseltolás (5.4.b ábra), akkor nem keletkeznek másodlagos gerjesztő erők.

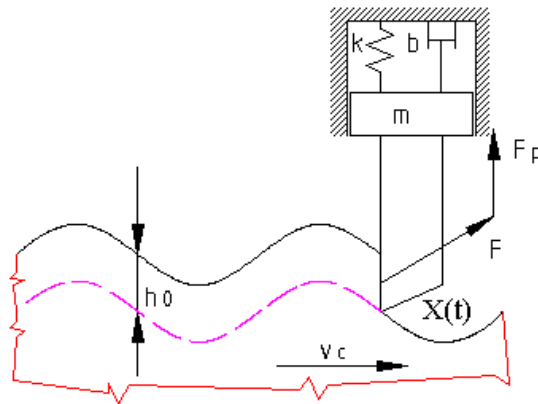


5.4. ábra

A leválasztandó réteg vastagságának alakulása a kés lengő mozgásánál  
a) fáziseltolással, b) fáziseltolás nélkül

## A rezgés stabilitásának vizsgálata lineáris másodrendű differenciálegyenlet való leírás esetén

Esztergálás egy szabadságfokú mechanikai modelljét a 5.5. ábra szemlélteti.



5.5. ábra  
Esztergálás egy szabadságfokú mechanikai modellje

A rezgést leíró differenciálegyenlet:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{1}{m}F_g(t) \quad (5.23)$$

ahol:

- $\zeta$  a relatív csillapítási tényező
- $\omega_n$  a csillapítatlan szabadrezgés körfrekvenciája, 1/s
- $m$  a rezgő tömeg, kg
- $F_g(t)$  a gerjesztő erő, N

A (5.23) inhomogén differenciálegyenlet akkor stabilis, ha a megfelelő homogén egyenlet stabilis. A lineáris stabilitáselmélet szerint a homogén egyenlet akkor aszimptotikusan stabilis, ha a megfelelő karakterisztikus egyenlet összes gyökének valós része stabilis.

A (5.23) karakterisztikus egyenlete:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0 \quad (5.24)$$

Helyettesítsük be  $\lambda = -\alpha + i\beta$  - t a fenti (5.24) egyenletbe. Ekkor kapjuk, hogy

$$\alpha^2 - \beta^2 - 2\zeta\omega_n\alpha + \omega_n^2 + i(2\zeta\omega_n\beta - 2\alpha\beta) = 0 \quad (5.25)$$

Ez a komplex egyenlet két valós egyenlettel ekvivalens:

$$\alpha^2 - \beta^2 - 2\zeta\omega_n\alpha + \omega_n^2 = 0 \quad (5.26)$$

$$2\zeta\omega_n\beta - 2\alpha\beta = 0 \quad (5.27)$$

Mivel  $\beta \neq 0$ , a (5.27) egyenletből, azt kapjuk:

$$\alpha = \zeta \omega_n \quad (5.28)$$

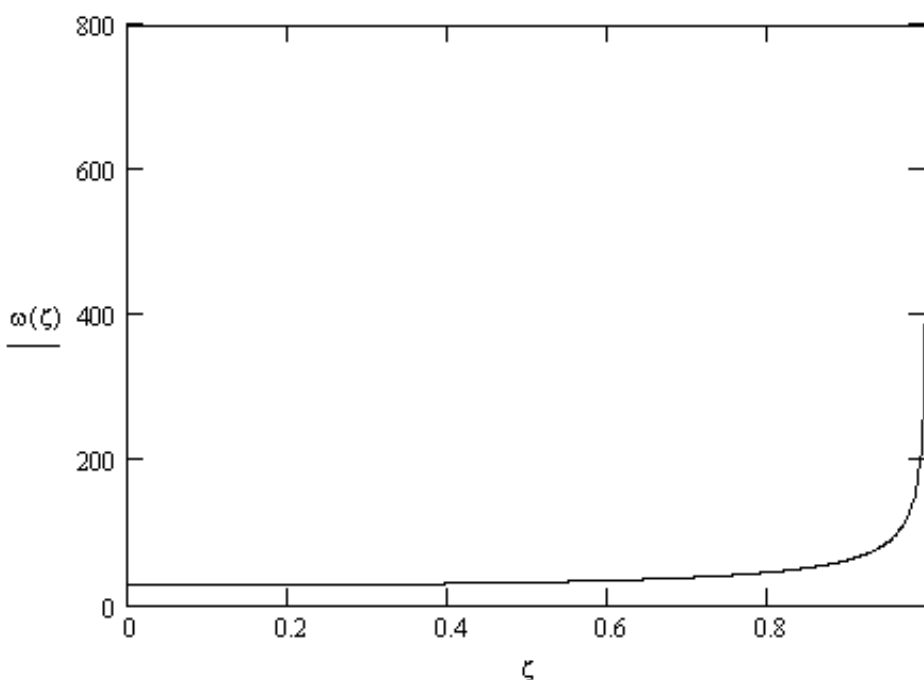
Helyettesítsük be (5.26)-ba  $\zeta \omega_n$ -t (az  $\alpha$  negatív értékét már figyelembe vettük (5.25) – nél. Ekkor az alábbi egyenlet áll elő:

$$\zeta^2 \omega_n^2 - \beta^2 + 2\zeta^2 \omega_n^2 + \omega_n^2 = 0 \quad (5.29)$$

Ezt az egyenletet  $\omega_n$  – re megoldva azt kapjuk, hogy:

$$\omega_n(\zeta) = \frac{\beta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5.30)$$

Ezt a kifejezést ábrázolva megkapjuk a stabilitási karakterisztikát, amit az alábbi 5.6. ábra szemléltet.



5.6. ábra  
Stabilitási karakterisztika

A grafikonból látható, hogy  $\zeta \rightarrow 1$  esetén a rendszer a rendszer stabilitása egyre romlik. Ezért törekedni kell arra, hogy  $\zeta$  értéke minél kisebb legyen.

### **A rezgés stabilitásának vizsgálata lineáris késleltetett differenciálegyenlettel való leírás esetén**

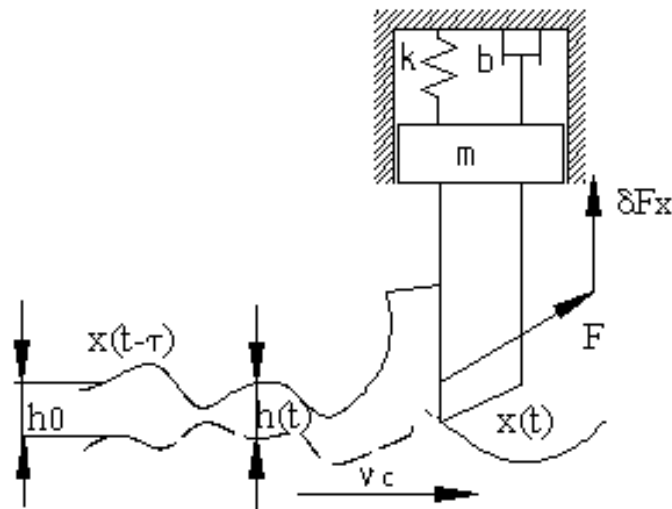
A forgácsolás során fellépő rezgés előzőekben leírt modellezése idealizált eset a szinuszos gerjesztő erő feltételezése miatt. A késleltetett differenciálegyenlet segítségével a valóságot pontosabban megközelítő leírását tudjuk adni a forgácsolás során fellépő rezgésnek.

Az egyik legjelentősebb hatás, amely a rossz felületi minőséget okozza a forgácsolás folyamata során a késleltetésből eredő rezgés. A külső zavarások következtében a szerszám

csillapított rezgésbe kezd így rontva a munkadarab felületi minőségét. A munkadarab egy körülfordulása után a forgácsvastagság változni fog a szerszámmal. Így a forgácsoló erő nem csak a szerszám és a munkadarab pillanatnyi pozíciójától függ, hanem az elmozdulás késleltetett értékétől is.

Ennek a késleltetésnek a hossza a munkadarab egy körülfordulásának időperiódusa amit  $\tau$ -val jelölünk. Ez az úgynevezett regeneratív hatás. A megfelelő matematikai modell a késleltetett differenciálegyenlet. A jelenség tanulmányozását egy szabadságfokú mechanikai modellen végezzük el.

A 5.7. ábra a regeneratív szerszámrezgés egy szabadságfokú mechanikai modelljét mutatja, ortogonális forgácsolás esetében.



5.7. ábra  
1 szabadságfokú mechanikai modell [9]

A fenti modell rezgését leíró késleltetett lineáris differenciálegyenlet:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + (1+p)x - px_\tau = \frac{3p}{10}((x - x_\tau)^2 - (x - x_\tau)^3) \quad (5.31)$$

Az (5.31) egyenlet levezetését lásd pl. [6.5], [6.9] irodalomban.

Az (5.31) egyenletben:

- $x_\tau = x(t-\tau)$  a késleltetett kitérés
- $p$  a bifurkáció paraméter
- $\bar{t} = \omega_n t$  a dimenziótlanított idő
- $\bar{x} = \frac{5}{12h_0} x$  a dimenziótlanított elmozdulás

Az (5.31) differenciálegyenlet stabilitásának az eldöntésére az előzőekben is alkalmazott Ljapunov – féle lineáris módszert alkalmazzuk.

Az (5.31) - nek megfelelő karakterisztikus egyenlet:

$$\lambda^2 + 2\zeta\lambda + (1+p) - pe^{-\lambda\tau} = 0 \quad (5.32)$$

Tegyük fel, hogy a karakterisztikus egyenletnek egy pár tisztán képzetes gyöke van. Ez azt jelenti, hogy a (5.31) egyenlet megoldása stabilis, de nem aszimptotikusan stabil. Az egyensúlyi helyzetet ebben az esetben centrumnak nevezzük.

Ahhoz, hogy a stabilitási karakterisztikát megkapjuk, helyettesítsük be a (5.32) egyenletbe  $\lambda=i\omega$ ,  $\omega>0$  [6.5]

$$1 + p - \omega^2 - p \cdot \cos \omega\tau + i(2\zeta\omega + p \sin \omega\tau) = 0$$

Ez a komplex egyenlet két valós egyenlettel ekvivalens:

$$1 - \omega^2 + p(1 - \cos \omega\tau) = 0 \quad (5.33)$$

$$2\zeta\omega + p \sin \omega\tau = 0 \quad (5.34)$$

Az (5.33) és az (5.34) egyenletekből kiküszöbölve e trigonometrikus kifejezéseket az alábbi összefüggést kapjuk p-re:

$$p = \frac{(1 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega^2}{2(\omega^2 - 1)} \quad (5.35)$$

Az (5.33) és az (5.34) egyenletekből meghatározható a késleltetés is:

$$\tau = \frac{2}{\omega} \left( j\pi - \arctan \frac{\omega^2 - 1}{2\zeta\omega} \right) \quad j=1,2,\dots \quad (5.36)$$

ahol j jelenti a j-ik görbét jobbról a stabilitási karakterisztikán ( j-nek nagyobbak kell lenni nullánál mert  $\tau > 0$ )

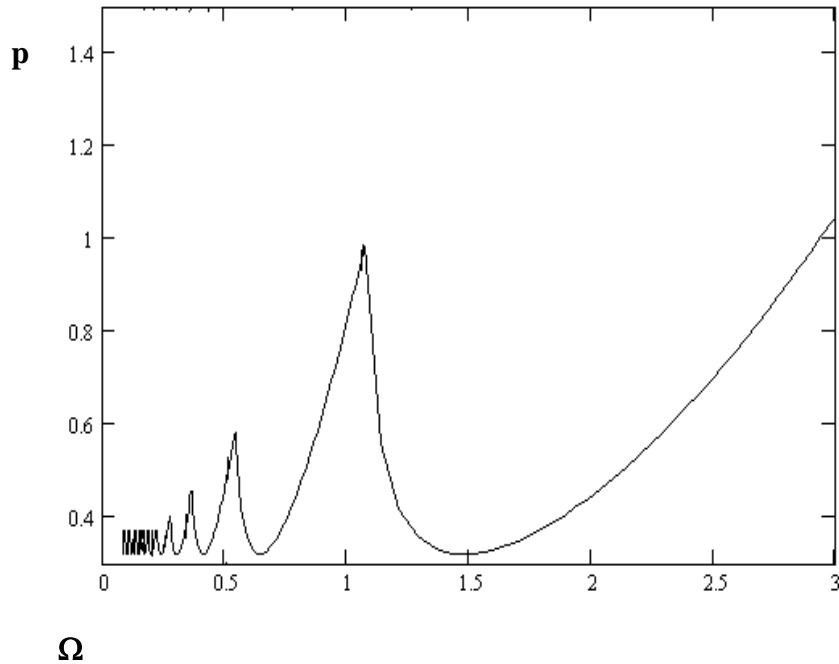
Végül a  $\tau$  ismeretében  $\Omega$  - ra kapjuk:

$$\Omega = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{\omega\pi}{j\pi - \arctan \frac{\omega^2 - 1}{2\zeta\omega}} \quad j = 1,2,\dots \quad (5.37)$$

A 5.8. ábra a stabilitási karakterisztikát szemlélteti.

A görbe alatti terület a stabil tartomány, itt a karakterisztikus egyenlet gyökei tisztán képzetesek.





5.8. ábra  
Klasszikus stabilitási karakterisztika

### 5.1.3. További modellek

A Dudás, Lierath, Varga: Gépgyártástechnológia V. című előkészületben lévő könyvünk tartalmaz további modelleket a szarszámkopásra, felületi érdességre, forgácsolási hőmérsékletre, stb.

## 5.2. Végeselemes vizsgálatok

### 5.2.1. Az ortogonális fémgörácsolás modellezése véges elemes módszerrel

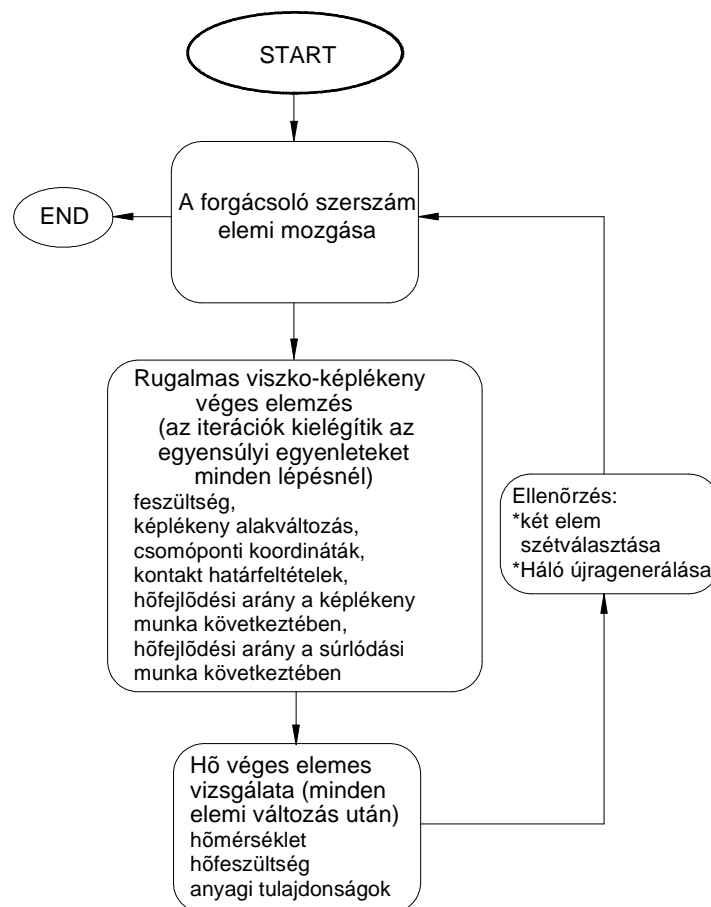
**Minden véges elemes** vizsgálat alapja a kontinuum olyan helyettesítése, amelyben a véges elemek összekapcsolásával a probléma változóit egzaktan meghatározhatják. Ezekben a **változókat** csak **egy ponthalmaz felett határozzák meg, azaz az elemek csomópontjain**. A csomópontok között a változók, vagy mennyiségek értékeit a csomóponti értékekből interpolációval származtatók, határozhatók meg. Így a teljes szerkezetre érvényes közelítést kapunk, amely már csak a csomópontok jellemző elmozdulásait tartalmazza. Ebből kiindulva kiszámítható a teljes szerkezet alakváltozási energiája a csomóponti elmozdulások függvényében. Hasonlóan eljárva, a szerkezetre ható terhelések munkáját is kifejezhetjük a **csomópontok elmozdulásaival**. A szerkezet mozgását korlátozó kényszereket is a csomópontokra vonatkozó kinematikai előírással vesszük figyelembe. Ez azt jelenti, hogy a megfelelő csomópont teljes, vagy egyirányú elmozdulását meggátoljuk.

Energetikai megfontolásokból származtatható a közelítésben felvett összes csomóponti paraméter (elmozdulási koordináták) kiszámítására szolgáló egyenletrendszer, amely lineárisan rugalmas szerkezet egyensúlyát fejezi ki. Az egyenletrendszer megoldása után - a csomóponti paraméterekből kiindulva - meghatározható valamely tetszőleges szerkezeti elem szilárdságtani állapota, azaz tetszőleges pontban megkapjuk az elmozdulási, alakváltozási és feszültségi állapot jellemzőit [7.1].

A fémforgácsolás korábbi modelljeit csak a nyírási sík, vagy a csúszási vonal mező vizsgálatára alapozták [7.2]. **Iwata** [7.3] a súrlódási feszültséget a határfelület normálfeszültsége függvényeként írta fel határfeltételként. A határfeltételt a súrlódási együttható értékére végzett kísérletre alapozták, melyet a **Shih** által [7.4] végzett kísérletből kapták meg. **Shih** állandó értéket használt a súrlódási együttható értékére az akadó súrlódási tartományban a forgács- és szerszám érintkezésnél és a súrlódási tényező lineárisan csökken a nulla értékig a csúszási tartományban. **Később a forgácsolási folyamatokra olyan véges elemes modelleket dolgoztak ki, melyek tartalmazzák mind a forgács-szerszám érintkezésénél lévő súrlódást és az anyagtörvényt, nagy alakváltozásokat, alakváltozási sebességeket és hőmérsékleteket** [7.5].

A szerszám csúcsánál lévő nagyon sűrű hálógenerálás lehetősége és a háló újragenerálás teszi az általuk használt szoftvert alkalmassá a forgácsolási folyamatok véges elemes vizsgálatára. Az anyagi tulajdonságokra feltételezett input adatokat és a súrlódást egészen jól közelítették, a fémforgácsolás szimulációját viszonylag kis erőfeszítésekkel meg kapták [7.6].

Az 1970-es évektől az 1990-es évekig jelentős fejlődés volt tapasztalható a forgácsolási folyamatokat elemző véges elemes technikák kialakításában és tesztelésében. Sok kutatót vontak be a fejlesztésbe. Azért, hogy a geometriában, az anyagminőségben megnyilvánuló nemlinearitásokat, továbbá a forgácsolószerszám és a munkadarab határoló felülete közötti érintkezéseket megfelelően tudják figyelembe venni, azért a véges elemes szimulációt elemi lépések sorozatán hajtják végre [7.7]. A 5.9. ábra [7.8] a szimulációs folyamatot mutatja be a forgácsolószerszám elemi mozgásaira.



5.9. ábra

*A fémforgácsolás véges elemes szimulációjának folyamatábrája elemi lépésekre*

### 5.2.1.1. A rugalmas-képlékeny anyagtörvény alkalmazása

Fémforgácsolás közben, a munkadarabban nagy képlékeny deformáción megy végbe, és az ilyen geometriai és anyagi nemlinearitásokat szükséges tartalmazni a véges elemes képleteknek. A modernizált Lagrange képletekre alapozva, a munkadarabra felírt elemi egyensúlyi egyenletek a rugalmas-viszkoképlékeny véges elemes képletek matrixos alakban felírhatók [7.2] alapján:

$$([K_B] + [K_S])\{\delta\Delta u\} = \{\delta f\} \quad (5.38)$$

és

$$[K_B] = \int_v [B]^T [E^{ep}] [B] dV \quad (5.39)$$

ahol:

- $[K_B]$  – merevségi mátrix,
- $[B]$  – az alakváltozás – elmozdulás mátrix,
- $[E^{ep}]$  – a rugalmas - viszkoképlékeny anyagállandó mátrix,
- $[K_S]$  – a belső feszültségek merevségi mátrixa,
- $\{\delta\Delta u\}$  – az elemi elmozdulások variációjának vektora, és
- $\{\delta f\}$  – a következőképpen van meghatározva

$$\{\delta f\} = \{f\} - \int_v [B]^T \{\delta\} dV \quad (5.40)$$

a kiegyensúlyozatlan erők vektora melyet az iterációs folyamat alkalmaznak az egyensúly eléréséhez.

A **Mises** függvény alapján, az áramlási törvénnyel együtt és a **Prager** keményedési törvény felhasználásával, a rugalmas-viszkoképlékeny anyagmátrix tenzoros alakja  $[E^{ep}]$  kifejezhető az indexes jelöléssel [7.9] szerint,

$$E_{ijkl} = \frac{\delta\sigma_{ij}}{\delta\varepsilon_{kl}} = H_{ijmn}^{-1} D_{mnkl} \quad (5.41)$$

$$H_{ijkl} = \delta_{ik}\delta_{jl} + D_{ijmn} [Q_1\delta_{pm}\delta_{qn} + Q_2(\sigma_{pq} - \alpha_{pq})(\sigma_{mn} - \alpha_{mn})] \left( \delta_{pk}\delta_{ql} - \frac{1}{3}\delta_{pq}\delta_{kl} \right) \quad (5.42)$$

Az (5.42) ben található betűk jelentése, illetve megnevezése a következő:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{P_1}{D} & P_1 &= \frac{3\Theta\Delta t\dot{\varepsilon}_p}{2\sigma} \\ Q_2 &= \frac{P_2}{D\left(D + \frac{4}{9}\sigma^2 H_p P_2\right)} & P_2 &= \frac{9\Theta\Delta t}{4\sigma^2} \left( \frac{1}{F} \frac{d\dot{\varepsilon}_p}{d\sigma_y} - \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\sigma} \right) \\ D &= 1 + \frac{2}{3}rH_p P_1 & F &= 1 - \frac{2}{3}\Delta t\Theta \frac{d\dot{\varepsilon}_p}{d\sigma} H_p (1-r) \end{aligned}$$

ahol:

$D_{ijkl}$	- a rugalmas merevségi tenzor	$\sigma$	- az effektív feszültség,
$\sigma_{ij}$	- a feszültségi tenzor	$\sigma_y$	- folyási feszültség
$\alpha_{ij}$	- a folyási feszültségi felület központja	$\Delta t$	- elemi idő intervallum
$\delta_{ij}$	- a Kronecker delta	$\dot{\epsilon}_p$	- a képlékeny alakváltozási sebesség
$H_p$	- a képlékenységi együttható		

A képlékenyen deformálódott sebességfüggő anyagra, a  $\sigma - \sigma_y$  érték nagyobb mint zérus és túlterhelésnek nevezik.

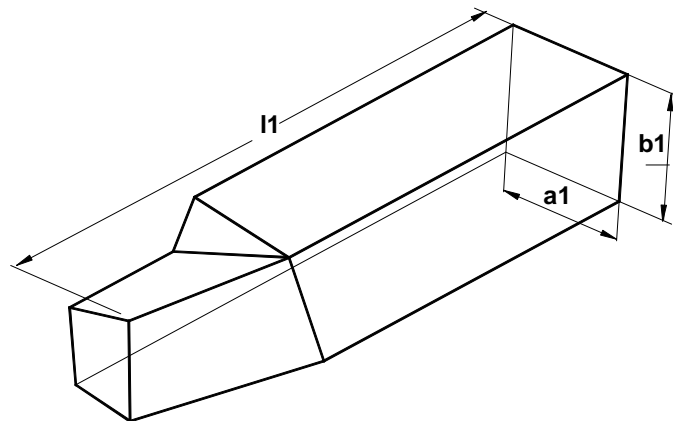
Az (5.41) egyenletben szereplő  $r$  tényező a választott felkeményedési törvényre jellemző. Az  $r = 1$ ,  $r = 0$  vagy  $0 < r < 1$  választásával, a (6) egyenlet egy olyan anyagtörvényt ír le, mely az izotróp, kinematikai, vagy a vegyes felkeményedési törvényt követi külön-külön.

Minden elemi elmozdulás után, amint a forgácsolószerszám előre halad, a deformálódott konfiguráció, azaz a feszültségek, alakváltozások és az érintkezési feltételek aktualizálva vannak. A munkadarabban képződő majdnem minden képlékeny munka és a munkadarab határfelületén felgyülemelő súrlódási munka hővé alakul [7.10].

### 5.2.1.2. A forgácsolószerszám véges elemes modellezése

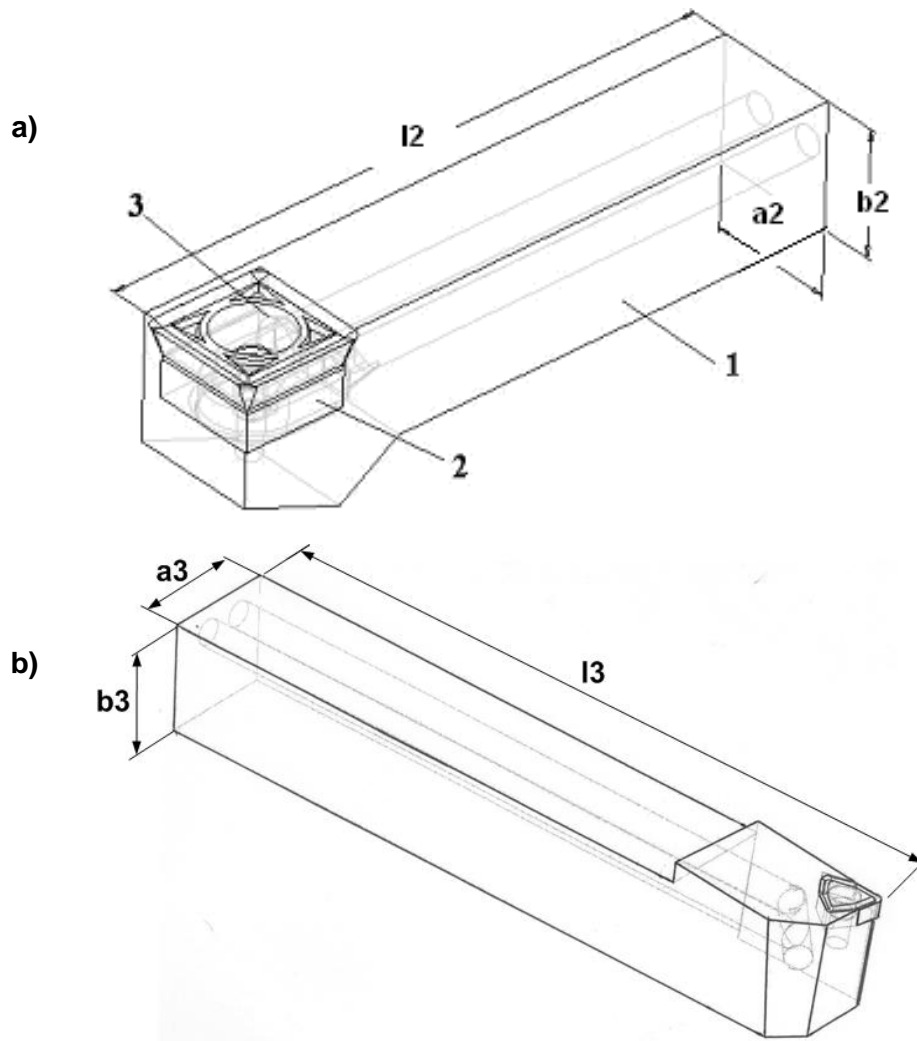
#### 5.2.1.2.1. Különböző típusú forgácsolókések vizsgálata

A forgácsolás megvalósítására különböző típusú forgácsolókések állnak rendelkezésre. Ezek közül bemutatunk néhányat, s a számításokat is elvégezzük rájuk. A véges elemes szilárdsági számítások (szoftver futtatásokat) végeredményeit színskálával ellátott 3D-s ábrákon közöljük. A különbségek érzékeltetésére a legegyszerűbben kezelhető monolit „etalon” forgácsolókést választottuk. A további forgácsolókések hűtött forgácsoló szerzámszárral rendelkeznek, melyek hűtés megvalósításukban különböznek. A monolit forgácsolókések modell vázlatát a 5. ábrán látható.



5.10. ábra  
A monolit forgácsolókések egyszerű modellje

A **belső késszár-hűtésű** fogácsolószerszám a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található..**a. ábrán látható, míg egy hatásosabb hűtést megvalósító a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található..**b. ábrán van bemutatva. A 5.11.a. és 5.11.b. ábrákon bemutatott verziók közötti fő különbség, hogy a két párhuzamos hűtővezeték összekapcsolása különböző módon van megvalósítva. Mind a 5.10. ábrán, mind a 5.11. ábrán a geometriai fő méretek megegyeztek, azaz  $a1=a2=a3$ ,  $b1=b2=b3$ ,  $l1=l2=l3$ .



5.11. ábra

*Forgácsolószerszámok különböző készár-hűtéssel*  
 a) 1. változat (sok elemből épül fel, rádiuszos fordulóval),  
 b) 2. változat (kevés elemből épül fel, sarkos fordulóval)

#### 5.2.1.2.2. A forgácsolókések szilárdsági számításának véges elemes elemzése

A megoldás pontossága az elem és csomópontok számának növelésével valósul meg. Az itt ismertetett elv a következő formulákban fogalmazható meg [7.11]:

**Az x rendszerbeli elmozdulásmező:**

$$u^e = u^e(x) = N^e(x)q^e \quad (5.43)$$

ahol:

- $u^e(x)$  : az elmozdulás mezője,
- $N^e(x)$  : az aproximációs mátrix,
- $q^e$  : a csomóponti elmozdulások vektora.

### Az alakváltozási mező:

$$\varepsilon^e = \varepsilon^e(x) = \partial N^e(x) q^e = B^e(x) \cdot q^e \quad (5.44)$$

ahol:

- $\varepsilon^e(x)$  : az alakváltozás mezője ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ ),
- $\partial$  : a deriválási szabályokat tartalmazó operátor,
- $B^e(x)$  : az alakváltozási elmozdulási mátrix.

### A feszültségi mező a Hook-törvény segítségével származtatható:

$$\sigma^e = \sigma^e(x) = D \cdot \varepsilon^e = D \cdot B^e(x) \cdot q^e \quad (5.45)$$

ahol:

- $\sigma^e(x)$  : a feszültségi mező vektora ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ),
- $D$  : az anyagállandók ( $E, G, \gamma$ ) mátrixa.

### A teljes potenciális energia: ( $\Pi_p$ )

$$\Pi_p = \sum_e \left( \frac{1}{2} \int_{V_e} \varepsilon^{eT} D \varepsilon^e dV - \int_{V_e} u^{eT} \rho k^e dV - \int_{V_e} u^{eT} p^e dA \right) \quad (5.46)$$

Az (5.46) egyenletbe behelyettesítve (5.43)-(5.45) képleteket és elvégezve a kijelölt integrálásokat, megkapjuk a potenciális energia diszkrétizált alakját:

$$\sum_e \Pi_p^e = \sum_e \frac{1}{2} q^{eT} (K^e q^e - 2f^e) = \frac{1}{2} q^T (Kq - 2f) \quad (5.47)$$

ahol:

- $K^e$  : az elem merevségi mátrixa,
- $f^e$  : az elem terhelési vektora, amely a térfogati és a felületterhelésből származik,
- $q^e$  : a szerkezet csomóponti elmozdulásainak vektora.

A teljes potenciális energia ( $\Pi_p$ ) minimum elvéből következik, hogy

$$\delta \Pi_p = 0 = K \cdot q - f, \quad (5.48)$$

azaz

$$K \cdot q = f \quad (5.49)$$

ahol:

- $K$  : a szerkezet merevségi mátrixa,
- $f$  : a szerkezet terhelési vektora.
- $q$  : a szerkezet elmozdulási vektora,

Lineáris algebrai egyenletrendszer adódik. A  $q$  ismeretében a fenti képletek segítségével a feszültségi és alakváltozási állapotok meghatározhatóak az elemekben [7.1], [7.12].

### A véges elemes modul paramétereit

A véges elemes vizsgálatokat a Pro/E Wildfire 2.0 Mechanica program modullal végeztük.

(a) Háló létrehozása

Pro/E Mechanica-ban: automatikus,  
Elemek szabadsági foka.

(b) Anyagtulajdonságok

E: rugalmassági tényező (Young-modulus),  
N: Poisson tényező,  
P: sűrűség.

(3) Peremfeltételek

Megfogások (pont, él, felület)  
Terhelések (erők, nyomatékok, gravitáció, szögsebesség, szöggyorsulás)

(4) Futtatási beállítások

Pontosság, memória használat

A szimuláció során a programban a következő beállításokat rögzítettük, melyek közül az alábbiakat adjuk meg. A futtatás hét műveletben történt, így csak a legutolsó pontos adatokat közöljük.

Csomópont:	27625 db,
Háló sűrűség (tetraéder elemszám):	1261 db,
Felosztás sűrűsége:	3,

Az ismeretlenek száma így:

$$27625 \text{ db} \times 3 = 82875 \text{ db},$$

melyet a program színskálával szemléltet.

A véges elemes szilárdsági számítások folyamatábrája a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található..** ábrán látható.

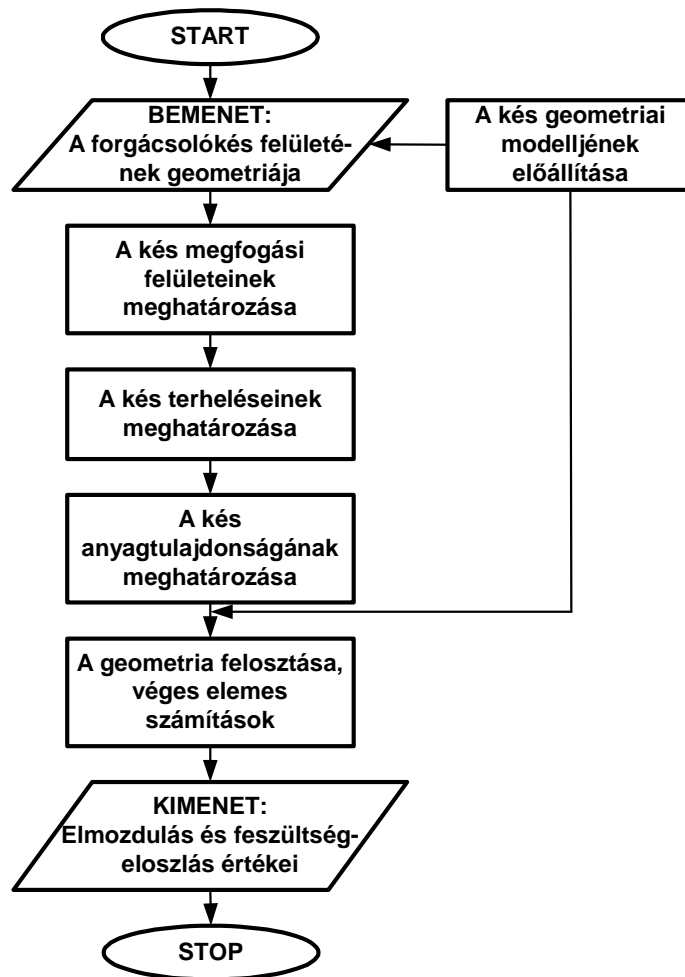
A számításokhoz a következő paramétereiket, beállításokat használtuk:

Alkalmazott terhelés:  $F = 3000 \text{ N}$ , koncentrált függőleges forgácsolóerő.

Befogások: a felső és az alsó felületen: 30 mm x 200 mm felületen mind a 6 szabadságfok lekötve.

Anyagi tulajdonságok: az acél mechanikai tulajdonságai lettek beállítva.





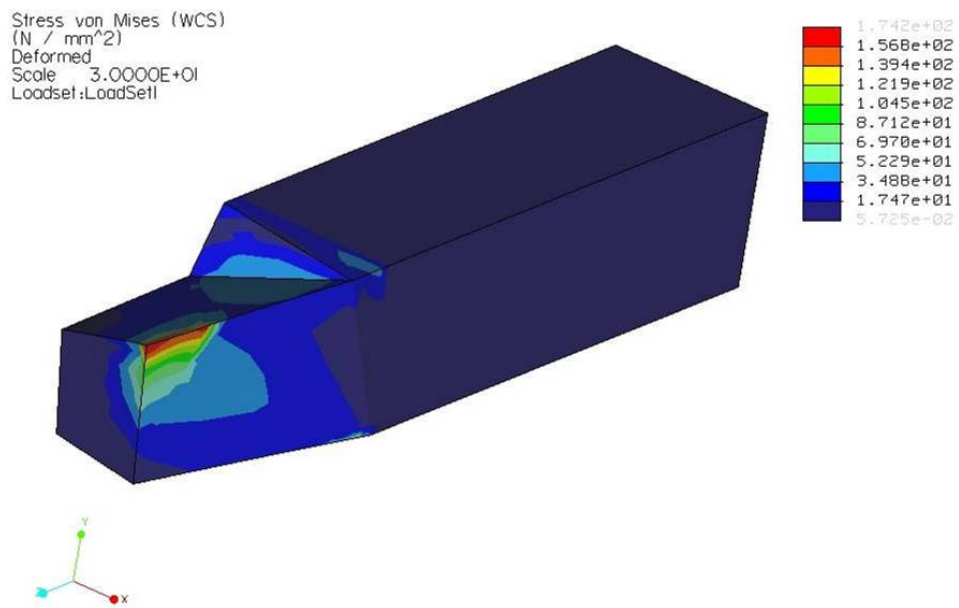
5.12. ábra

*A véges elemes módszer folyamatábrája forgácsolókés szilárdsági vizsgálatokor*

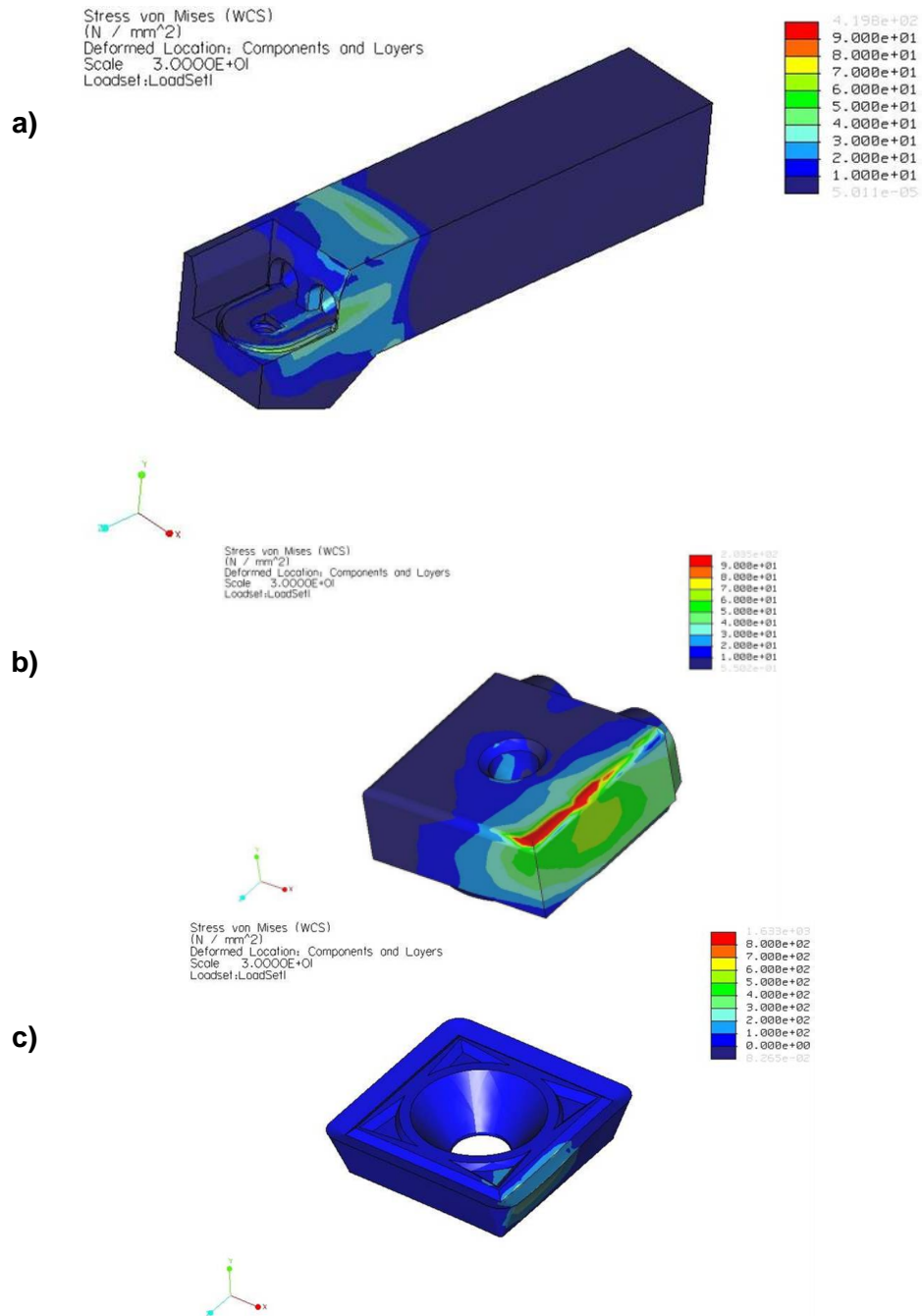
A feszültségszámítások (HMH szerint) értékelései

Feltételezzük, hogy a forgácsolószerszám merev és csak merevtestszerű mozgást végez, azaz a szerszám elmozdulás és szerszámgéprezgés hatását nem vizsgáljuk jelen könyvben. Az elmozdulás elemi értékeit úgy vesszük fel, ahogy a szerszám előre mozog, a deformálható munkadarab és a merev forgácsolószerszám között jönnek létre az elemi feszültségek, az erő és az érintkezési deformáció [7.13].

A következő ábrákon (5.13., 5.14. és 5.15. ábra) az azonos befogású, és terhelésű különböző forgácsoló-szerszámokon keletkező **feszültségeloszlások közötti különbségeket** tanulmányozhatjuk [7.14].

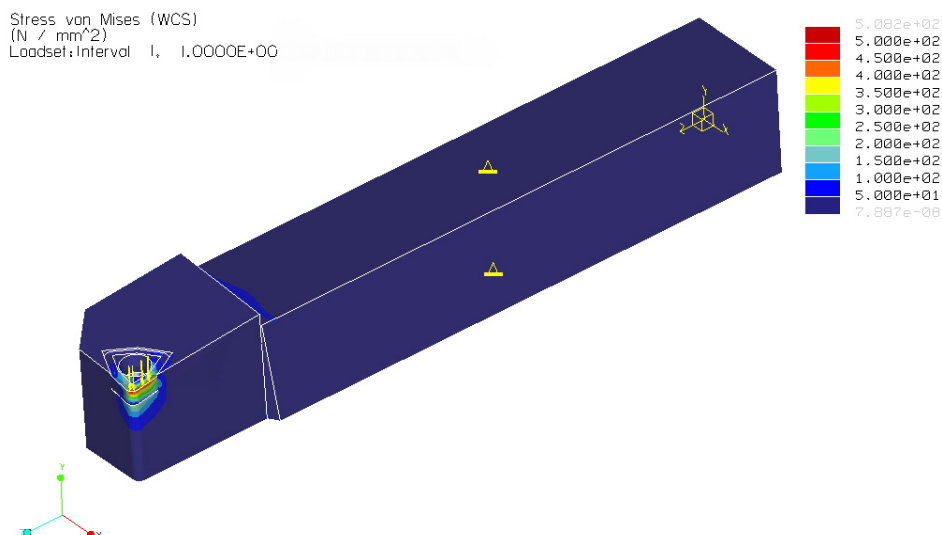


5.13. ábra  
*A monolit szerszám (HMH szerinti) feszültségeloszlása*



5.14. ábra

A hűtött szerszámszárú forgácsolókécs (1. verzió) feszültségeloszlása (HMH szerint) a) furatos alaptest, b) közdarab, c) forgácsoló lapka



5.15. ábra

*A hűtött szerszámszárú forgácsolókés (2. verzió) (HMH szerinti) feszültségeloszlása*

A forgácsolókés-szárban ébredő maximális feszültségekre vonatkozó számítási eredmények az 3.1. táblázatban találhatók.

3.1. táblázat

Maximális feszültségek (HMH szerint) a forgácsolókés szárában

Monolit	Hűtőcsatornás 1. verzió	Hűtőcsatornás 2. verzió
174,2 N/mm <sup>2</sup>	419,8 N/mm <sup>2</sup>	50 N/mm <sup>2</sup>

**Következtetés:** a 2. verzió esetén lehetett a legkisebb értékű maximális feszültséget megkapni. **A késtartórész nagyon stabil, jó változat.**

### 5.2.1.3. A forgácsképződés modellezése – a véges elemes háló szétválasztása

### 5.2.2. Forgácsleválasztás elemzése végeleemes módszerrel

A környezetkímélő eljárások forgácsolási modellezése esetén figyelembe kell venni a speciális feltételeket. Terveink szerint a modellezés kezdetén elsősorban a 2D-s analízissel foglalkozunk. Ez viszonylag könnyebben kezelhető, mivel a modellezési nehézségek kisebbek (pl. az analízis felépítése, a peremfeltételek megadása, a végeleemes hálókészítéskor jelentkező problémák). A tervezett vizsgált megmunkálás típusa szabadforgácsolás. Kezdeti vizsgálatainknál cél a nagy alakváltozásokat tartalmazó végeleemes program vizsgálata, eredményeinek kiértékelése. A modellben a szerszám merevnek tekintett, adott élgeometriával rendelkezik. A munkadarab anyagminősége változtatható a különböző anyagjellemzők módosításával (pl. Young modulusz, hővezetési tényező, sűrűség, stb.). A modellezés eredményeként a szerszám hőterhelése, a szerszámban ébredő feszültségek, a szerszám és a munkadarab felületi rétegében kialakult felületi nyomások kerülnének meghatározásra. Ezen kívül lehetséges forgácsleválasztás folyamatának vizsgálata is. A vizsgálatokból a maradó felületi feszültségek mértéke is meghatározható. A 3D-s analízis során kapott eredmények kiterjesztésével a különféle forgácsolási eljárások modellezhetővé válnak.

A feladat továbbvitele esetén lehetővé válna a finommegmunkálás modellezése is, amelyben már a megmunkálendő fém kristályok vizsgálata történik meg. Ekkor a különböző kristályok különböző tulajdonságait kell figyelembe venni.

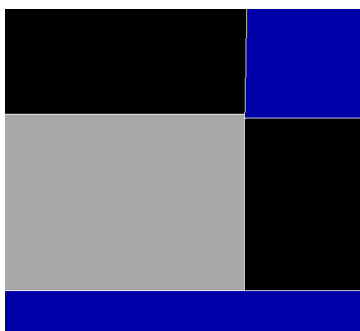
#### 5.2.2.1. Végeselem analízis ismertetése, alkalmazásának jelentősége

A forgácsolás modellezésével már nagyon sokan foglalkoztak, de kezdetben minden vizsgálat makroszinten történt. A későbbiekben a cél a szemcse szinten történő vizsgálatok készítése volt, koncentrálna az anyagszemcse szerkezetének változására. Természetesen nem ugyanaz a helyzet, ha a szemcseméretekről beszélünk, mivel ott már nem a szemcsehatárokon történik az alakváltozás, hanem a szemcsét alakítjuk és abban a pillanatban, megváltozik az anyagnak a tulajdonsága. El kellene érni, hogy megfelelő szerszámkialakítás mellett a szemcséket tudjuk megmunkálni, ne pedig a szemcsehatár mentén alakuljon ki a törés.

#### 5.2.2.2. FORM2D végeselem analízis (egykristály esetén)

##### 5.2.2.2.1. A kiinduló és a kinagyított állapot

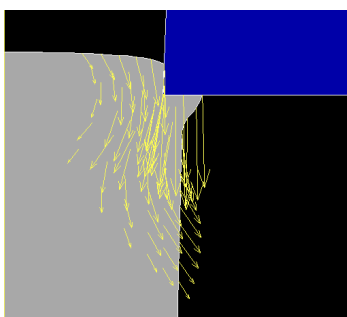
A folyamat kiinduló állapota az 5.16. ábrán látható. Az ábrán a jobb felső rész a szerszám, mely függőleges irányban lefelé mozog. Középen helyezkedik el a munkadarab, amit egykristályként modelleztünk, tehát nincsenek szemcsehatárok, így a diszlokációk szabadon áramolhatnak. Alul pedig a készülék, a tokmány, amely a megfogást biztosítja.



5.16. ábra

##### 5.2.2.2.2. Az alakváltozás sebességének változása

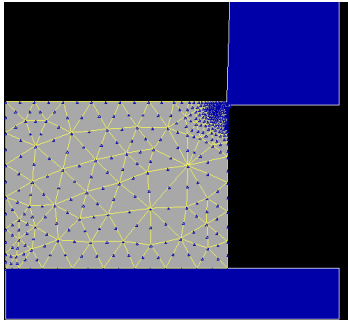
Ez alapján lehet következtetni az alakváltozásokra. A nyilak nagysága és iránya jól mutatja, hogy az anyagrészek milyen irányban és milyen sebességgel áramlanak. Ebből a szemcseszerkezet alakulására is lehet következtetni.



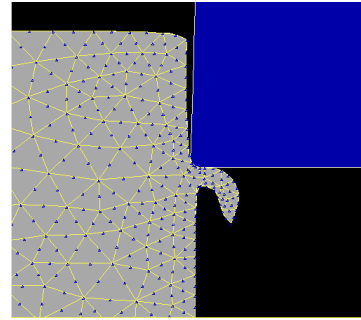
5.17. ábra

### 5.2.2.3. A forgácsolási folyamatra felépített végelem háló

Ez a háló a pontos számítást segíti elő, tulajdonképpen ennek a hálónak a csomópontjai alapján számol a program. Mint általában minden végelem rendszer, ez is sűrűbbé alakítja a hálót a kritikusabb helyeken. Tehát, ahol érzékenyebben viselkedik a forgácsolandó anyag, ahol jelentősebb változás fog bekövetkezni. Ezzel a számítás pontossága növelhető.



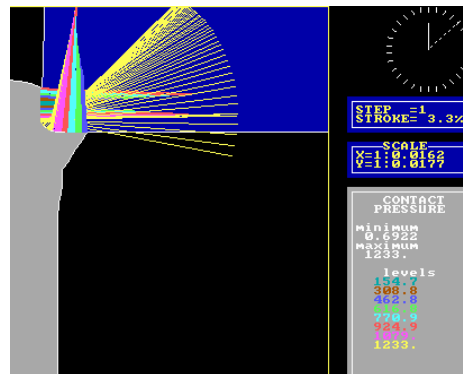
5.18. ábra



5.19. ábra

### 5.2.2.4. A felületi terhelés alakulása

A következő kép a szerszám felületén ébredő feszültségeket mutatja, ezekből lehet következtetni a szerszámkopásra (kráteres kopás, csúcskopás). Az eredmények megmutatják, hogy a szerszámnak mekkora terhelést kell kibírnia és a melyik élhosszon, milyen terhelés jelentkezik. Az analízis is mutatja, hogy a szerszám terhelése folyamatosan változik.



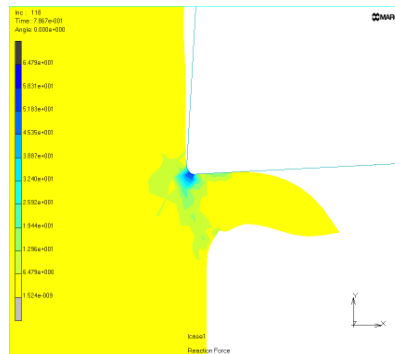
5.20. ábra

### 5.2.2.3. MARC analízis (2D) (egy kristály esetén)

Az eddigi bemutatott 2D-s modellezés más jellegű eredményeket mutatott. A korábbi analíziseknél az anyagfolyást vektorosan szemléltettük, és a vektor nagysága jelképezte a sebesség nagyságát, a nyíl pedig mutatta az irányát. A jelenlegi analízis, megbízhatóbban mutatja a szükséges technológiai paraméterek értékeit (erő, feszültség, nyomás).

Az 5.21. ábra az alakítási erő vizsgálatával foglalkozik. Az ábrából jól látható, hogy a szerszám csúcsánál lesz a terhelés maximuma, és a csúcs körül körgyűrűszerűen épülnek fel a terhelési sávok. Ezen kívül még nagyon jól mutatja az ábra a nyírási sík kialakulását, ami a

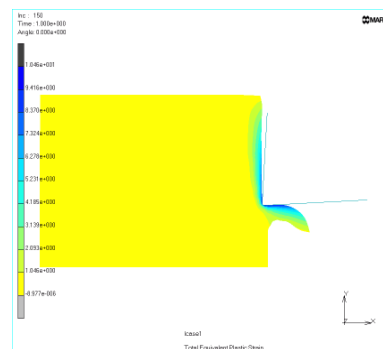
forgácstőből felület felé mutat (halvány sáv) és így szemlélteti a nyírási sík helyét, illetve az anyagáramlást is.



5.21. ábra

Az alakítási erő alakulása a forgácsolási folyamatban

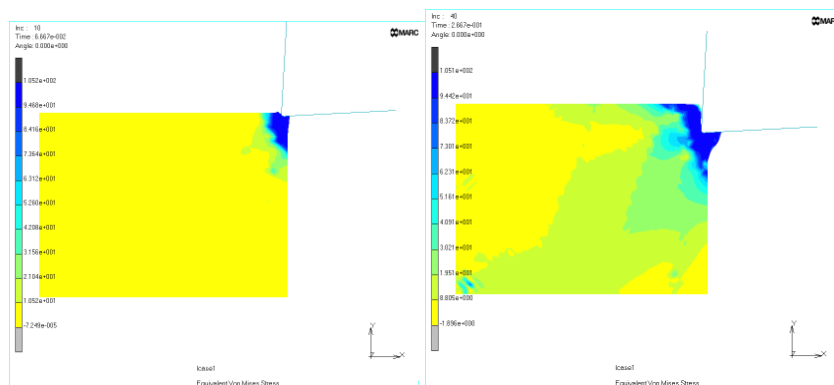
A 5.22. ábra feszültség alakulását mutatja. Jól megfigyelhető, hogy a felület mentén főleg a csúcs közelében, de a felületen jól elnyúlva van a maximális feszültség értékű tartomány. Leginkább arra lehet következtetni, hogy a forgács és a szerszám csatlakozásánál ébred a feszültség legnagyobb része. Ott kúszik fel a feszültség értéke. A szerszám és a forgács érintkezési pontjától távolodva egyre alacsonyabb lesz a feszültség értéke, de a felület mentén maradó feszültség érzékelhető.



5.22. ábra

A feszültség alakulása a felületi rétegben

A 5.23. ábra két képből áll, de mindkét kép a felületi nyomás alakulását taglalja. A baloldali ábra mindjárt a legelején, a belépéskor mutatja a folyamatot, míg a jobboldali egy pár lépéssel később mutatja. Hasonlóképpen a előző ábrákhoz a felületi érdesség is a forgácstőben és a közvetlen környezetében lesz a legnagyobb.



5.23. ábra

A felületi nyomás alakulása a kezdeti állapotban

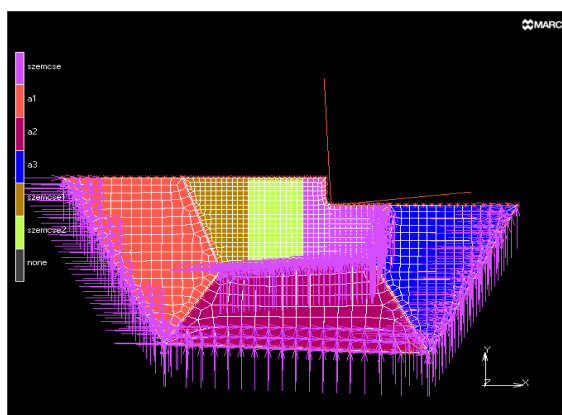
#### 5.2.2.4. MARC analízis (2D): (többkristály esetén):

##### 5.2.2.4.1. Az analízis paramétereit

A fő dolog az volt, hogy a szerszámterhelés hatására, kelljen vizsgálni, a szemcsékre ható erőt és feszültséget. Nagyon fontos az is, hogy a szemcséknek az egymáshoz való viszonyát elemezni kell. Mi is történik a forgácsolás közben? Tehát a kiinduló állapot volt, hogy a szerszámot, mint az eddigi analízis során is mindig, merevnek tekintjük, nem lesz rosszabb a vizsgálat ennek az elhanyagolásával. A modellezési folyamat során több szemcsét vizsgálunk, ezeknek a szemcséknek különböző anyagtulajdonsága van. Egyik keményebb, a másik lágyabb. Ezt a tényt a rugalmassági modulus beállításával valósítjuk meg. Mint tudjuk az anyagtulajdonság milyenségét a rugalmassági modulus jelentős mértékben befolyásolja.

A forgácsolási paramétereket, és a szerszám geometriáját nem módosítottuk. Csak az anyagtulajdonságot változtattuk, és figyeltük a szemcsék egymásra hatását, és a felületi rétegben történő változásokat. A 5.24. ábra mutatja a kiinduló állapotot. Az ábrán a különböző színek a különböző anyagtulajdonságú szemcséket jelentik.

A 3 dimenziós fémgorgácsolás véges elemes elemzésénél a forgácsolandó és a forgácsolás utáni szemcsékre ható erőt, feszültséget vizsgáltuk. A forgácsolási paraméterek, és a szerszám geometriája módosítása nélkül, az anyagtulajdonság megváltoztatásával vizsgáltuk a különböző anyagi részecskék egymásra hatását, továbbá a felületi rétegben végbemenő változásokat. A forgácsolás közbeni feszültségváltozás látható a következő ábrán.



5.24. ábra

A különböző anyagtulajdonságú szemcsék kiindulási állapota

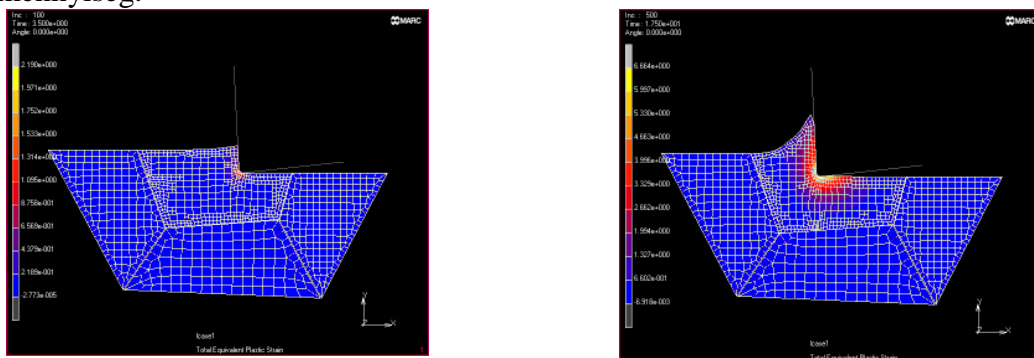


Megvizsgáltuk, hogy a szerszámterhelés hatására, milyen a szemcsékre ható erő és feszültség. Nagyon fontos annak tisztázása is, hogy milyen a szemcséknek az egymáshoz való viszonya. Mi történik a forgácsolás közben? Kiinduló állapotként, a szerszámot, a korábbi analízisekhez hasonlóan, merevnek tekintjük. Nem lesz rosszabb a vizsgálat ennek az elhanyagolásával sem. A modellezési folyamat során több szemcsét vizsgálunk, s a szemcséknek különböző anyagi tulajdonságai vannak. Egyik keményebb, a másik lágyabb. Ezt a tényt a rugalmassági modulus beállításával valósítjuk meg. Mint tudjuk az anyagtulajdonság milyenségét a rugalmassági modulus jelentős mértékben befolyásolja.

A forgácsolási paramétereket, és a szerszám geometriáját nem módosítottuk. Csak az anyagtulajdonságot változtattuk, és figyeltük a szemcsék egymásra hatását, és a felületi rétegben történő változásokat. Az 5.24. ábra mutatja a kiinduló állapotot. Az ábrán a különböző színek a különböző anyagtulajdonságú szemcséket jelentik.

#### 5.2.2.4.2. Az analízis eredményei

A megmunkálási folyamat jól látható a 5.25. ábrán. Az ábra a kialakuló feszültségről ad információt, jól látható az ábrából, hogy a szerszám csúcsánál lesz a terhelés maximuma, és a csúcs körül körgyűrűszerűen épülnek fel a terhelési sávok. Ezen kívül még nagyon jól mutatja az ábra, hogy a feszültség milyen rétegben, hogyan gyűrűződik végig az anyagban. Vajon milyen következményei lehetnek a felületi rétegben és a leváló forgácsban az alakítási folyamatnak, a forgácsolásnak? Az anyagáramlás is jól megfigyelhető az ábrából, szabályos forgácsleválásról van szó, szépen kúszik felfelé a szerszám homloklapján a leváló anyagmennyiség.



5.25. ábra  
A megmunkálási folyamat lépései

## 6. CCD kamerás vizsgálatok

A CCD kamerák és a képfeldolgozás alkalmazási lehetőségeinek és módszereinek kutatása a gépipari mérések területén új eredményeket hozhat. Világszerte erőteljes kutatások folynak a CCD kamerák ipari alkalmazásával, valamint a számítógépes képfeldolgozással kapcsolatban. Ezek a kutatások az elmúlt néhány évben jelentősen felgyorsultak, az alkalmazások területét jelentősen kiszélesítették. Szándékozunk olyan eljárások elméletét kidolgozni, melyek üzemi körülmények között is képesek információt szolgáltatni

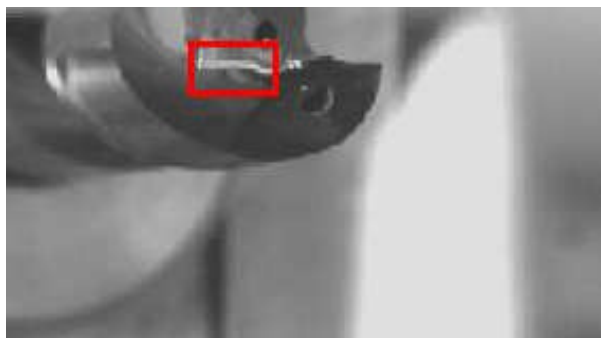
- a gépbeállításokról,
- a munkadarab beállításáról,
- a készülék beállításáról,
- a szerszámkopásokról,
- a munkadarab aktuális méreteiről, megmunkálási pontosságáról,
- stb.

Mindezeket a minőség, a termelékenység, a gazdaságosság, mint célok elérése figyelembevételével végezzük. Feladatunknak tekintjük e területen a képfeldolgozás elveinek rendszerezését a gépipari mérések területén történő felhasználás szempontjából. A képfelismerés, képfeldolgozás feltételeinek feltárását. Eljárás kidolgozását méret, alak és szerszámkopás ellenőrzésére.

Ezen kutatási eredményeket szándékozunk visszacsatolni a környezetkímélő gépipari megmunkálások vizsgálatára, amely kutatásaink fő célkitűzését képezi.

### 6.1. Bevezetés

A kutatás célja egy hatékony módszerrel dolgozó mérőrendszer elkészítése volt. A 6.1. ábrán egy fúró forgácsoló-éle látszik. Ez az a dolgozó terület, ahol a forgácsoló-erő és hő koncentráltan terheli a szerszámot. A mérőrendszernek köszönhetően lehetővé válik a szerszám-éltartam hatékony nyomon követése.



6.1. ábra

A forgácsoló-él (a piros mezőben az ezüstös vonal)

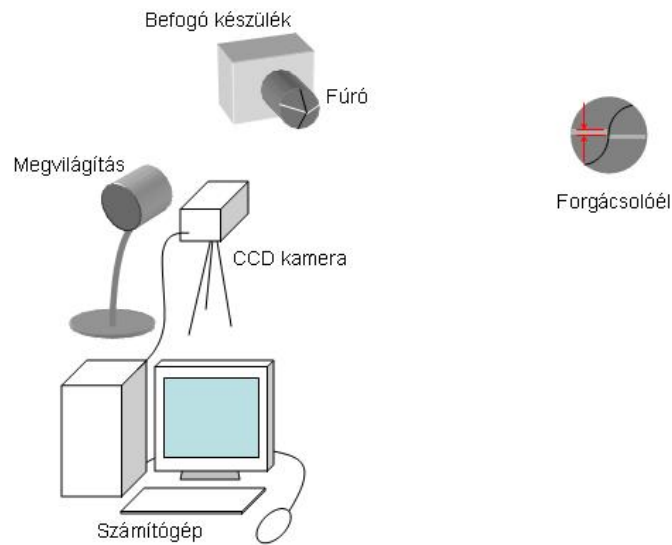
### 6.2. Mérőberendezés

Ez a mérőrendszer CCD kamerából, számítógépből és egy fényforrásból áll. Először a mérőrendszer összességében kerül bemutatásra, később az egyes összetevők.

#### 6.2.1 A mérőrendszer

A 6.2. ábra a berendezést vázolja. A fúrót egy befogó készülékben rögzítjük a megfelelő beállítási pozíció biztosítása érdekében. A CCD kamerát a számítógéphez kapcsoltuk, mely állandóan küldi a fényképeket a gép felé, tehát minden időpillanatban

látható a friss fénykép. A számítógép szerepe, hogy leképezze a fényképet képre. A kép átvitelének programja nem G nyelvben íródott, az a kép feldolgozásában játszik szerepet. A fényforrást a megfelelő szögben állítjuk be, hogy a forgácsoló-él megfelelően látszon.



6.2. ábra

A mérőberendezés sematikus ábrázolása

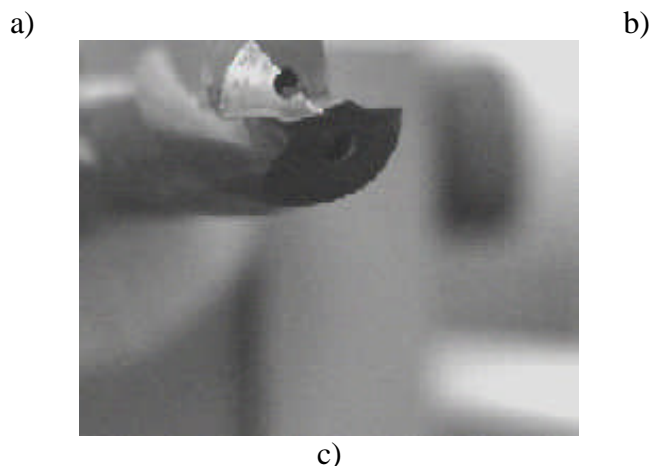
### 6.2.2 Megvilágítás

A fűrő megvilágítására egy 25W-os, 230V –os izzót használtunk. Mivel a kis területű él erre tökéletesen megfelelő a fényforrásunk. A megvilágítást nem befolyásolja a napfény vagy a fluoreszkálás, de a fényforrás pozíciójára figyelmet kell fordítani. Rossz pozícióban használva a fényforrást, a mérés lehetetlenné válik.

A 6.3. ábra sorozat a különböző megvilágításokra ad példát

- pozíció: helytelen, mivel a forgácsoló él nem látható tökéletesen, mivel az élt körülvevő területre több fény esik. Ilyenkor kissé lejjebből kell megvilágítani a céltárgyat.
- pozíció: ez a megfelelő helyzet a számításokhoz, mivel itt jól látható az él.
- pozíció: ebben az esetben, nem használtunk fényforrást. Ebben az esetben a természetes fény nem elegendő megkülönböztetni a forgácsoló élt az őt körülvevő résztől, tehát fényforrást kell használni





6.3. ábra

Megvilágítási példák

a) helytelen fényforrás pozíció, b) megfelelő pozíció, c) megvilágítás nélkül

### 6.2.3. Számítógép

A használt számítógépnek megvolt a képessége a kép file-t kezelni, a PC az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik: Microsoft Windows XP operációs rendszer, Pentium IV 800MHz-es processzor, 512 MB memória.

A rendszer tervezéséhez a G programozási nyelvet telepítettük. Ez a programozási nyelv direkt mérőrendszerek tervezéséhez készült, hogy könnyen és költséghatékonyan lehessen készíteni azt.

### 6.2.4. A CCD kamera

A használt kamera típusa SANYO VCB-3312P, ami megfelelő arra, hogy fényképet készítsünk. A 6.1. táblázat mutatja a kamera specifikációit.

6.1. táblázat  
A kamera specifikációi

Szenzorméret inch (mm×mm)	1/3 (4.8×3.6)
Fényképelem pixel	320,000
Fénykép méret	320(H)×240(V)
Fókusz távolság (mm)	35
Fényerősség (lux)	0.1
F érték	1.2

## 6.3. A képfeldolgozási folyamat algoritmusa

A program algoritmusa a következő. A forgácsoló-él méréséhez megoldandó feladatok, a mérőegységek átalakítása, megvilágítás és a képfeldolgozó szűrő beállítása.

### 6.3.1. A folyamatábra

A 6.4. ábra a számítási folyamatot mutatja be, visszacsatolások nélkül.

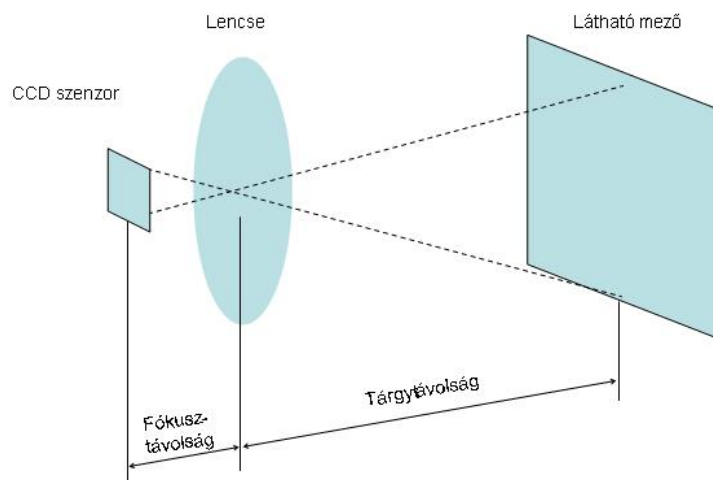
Először a képfájl szükséges a programnak, másodsor ez átalakításra kerül egy mátrixszá, hogy feldolgozható képet kapjunk. Eztán kijelöli a vizsgálandó élt és méri a távolságot köztük. Végül az eredmények a vezérlő panelen megjelennek és a felhasználó számára elérhetővé válnak.



6.4. ábra  
A mérés folyamatábrája

### 6.3.2. A pixel érték valós egységgé konvertálása

A CCD kamera méri az él szélességét, de a mért egység pixel is lehet, ezért szükséges átváltani, SI valós egységekké, pl. mm-ré. A megoldáshoz az 6.5. ábrán látható optikai elrendezés segít, ami mutatja a kapcsolatot a lencsék, a látható mező és a CCD érzékelő közt.



6.5. ábra  
Az optikai elrendezés bemutatása

A következő alapképlet a fent említettek közti kapcsolatot írja le.

$$\frac{\text{szenzorméret}}{\text{fókusz távolság}} = \frac{\text{látható\_mező}}{\text{tárgy távolság}} \quad (6.1)$$

Ezt a képletet használva a távolságot tudjuk számolni pixelenként.

$$\text{távolság\_pixele gységenként} = \frac{\text{szenzorméret} \times \text{tárgy távolság}}{\text{fókusz távolság} \times \text{image\_méret}} \quad (6.2)$$

A szenzorméret, fókusz távolság és a fénykép méret megtalálható a kamera műszaki specifikációjánál, ezért a felhasználó meg tudja határozni a tárgy távolságot. A tárgy távolság kiszámolása után meg kell határozni a távolságot pixelenként és indítani a mérést.

Az eredmény elnyerése után át kell alakítani azt valós egységgé a 3.3 –as egyenletet használva:

$$\text{Forgácsolóél} = \text{mért\_eredmény} \times \text{távolság\_pixelenként} \quad (6.3)$$

Ezeket a paramétereket változtatni kell, ha másik CCD kamerát használunk vagy a tárgy távolság megváltozik.

### 6.3.3. Kalibrálás

A kalibrálás nagy fontossággal bír a mérésben, a megfelelő pontosság elérése érdekében. A kalibrálási folyamatot több módszerre osztályoztuk:

1. Egyszerű beállítás  
Ha a képen kicsi a torzítás, akkor a kamerát merőlegesen vagy közel merőlegesre kell állítani a tárgyhoz képest, ez a megfelelő módszer a képminőség javítására.
2. Perspektivikus beállítás  
Ha a kamera nem merőlegesen helyezkedik el a tárgyhoz képest, akkor a képen látható alakzat kissé kúposan látszik. Ha ilyen eset állna fent, akkor ezt a kalibrálási módot kell alkalmazni.
3. Nemlineáris beállítás  
Ha a kamera lencséjének valami rendellenessége van, akkor ez torzítást fog okozni a kép körül. Ha a képen ilyen torzulás van, ezt a módot kell alkalmazni.

Jelenleg az egyszerű beállítást használtuk, tehát a kamera közel merőlegesen állt a tárgyhoz képest és komoly torzítás nem volt a képen. További előnye, hogy nem szükséges sablonkép a kalibráláshoz.

### 6.3.4. Képszűrők

A vágóél méréséhez fontos az egyes pixelek megkülönböztethetősége, hogy könnyen felismerhető, megtalálható legyen a forgácsolóél a program számára. Ezeket a szűrőket hatásuk alapján osztályoztuk és az összes eljárás benne van az algoritmusban, hogy az él minél jobban elkülöníthető legyen. A következő részben az alkalmazott tipikus mátrixok kerülnek bemutatásra.

1. Laplace szűrő

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Laplace+image szűrő.

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

2. Prewitt

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

3. Sobel

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}$$

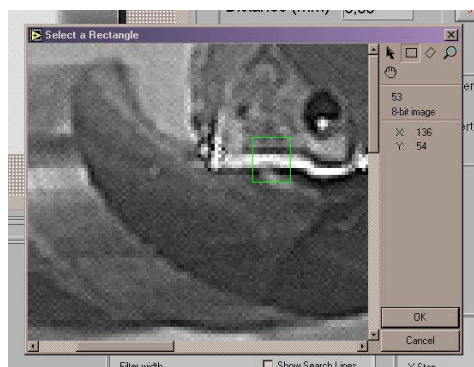
4. Gradiens

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -2 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

5. Gauss-féle

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

6.3.5. A vizsgált rész kiválasztása



6.6. ábra

A vizsgált mérési terület kiválasztása

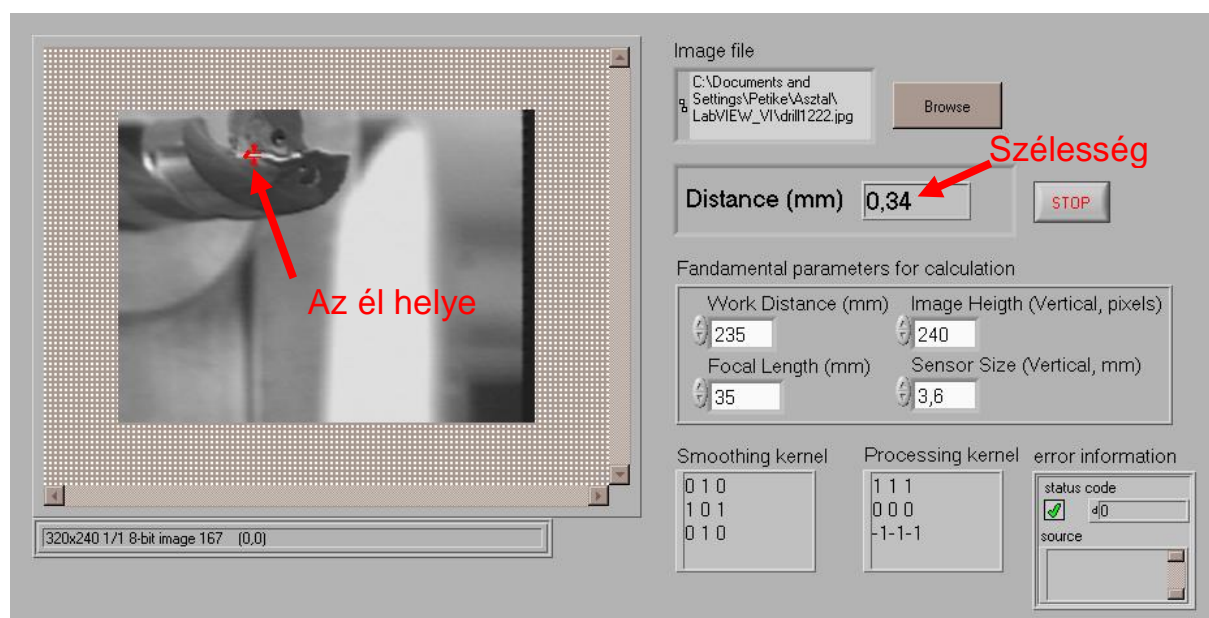
A szűrő beállítása után a vizsgálandó terület kiválasztása következik. Mikor megvan a terület, figyelmet kell fordítani a méretére. Minél nagyobb területet választunk ki, a mérés pontatlansága is romlik mivel több zaj férkőzik be. A 6.6. ábra a helyes kiválasztást jelöli a zöld négyzettel.

### 6.3.6. A forgácsoló-él mérése

A program „letisztítja” a minket érdeklő élt és környékét, majd megmutatja azt és méri a távolságot.

### 6.3.7. Eredménykijelzés

A kijelzőn leolvasható a forgácsoló-él szélessége, ami valós egységgé lett konvertálva és az egysége: [mm], a 3.2 és 3.3 egyenletből adódóan. A 6.7. ábra mutatja be a végeredmény képét; a vörös vonal jelzi az élt és a jobb oldalon látható az eredmény.

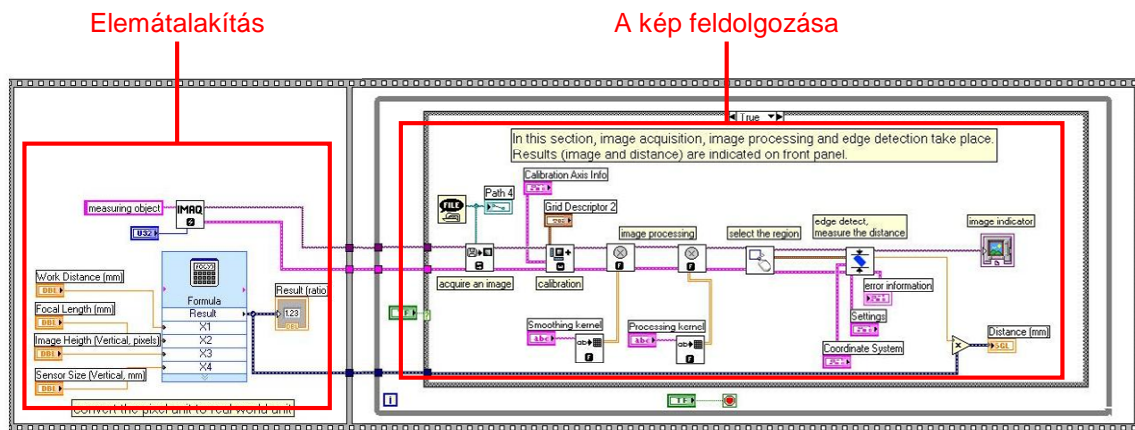


6.7. ábra  
A mérési végeredmény

### 6.4. A „G” nyelv

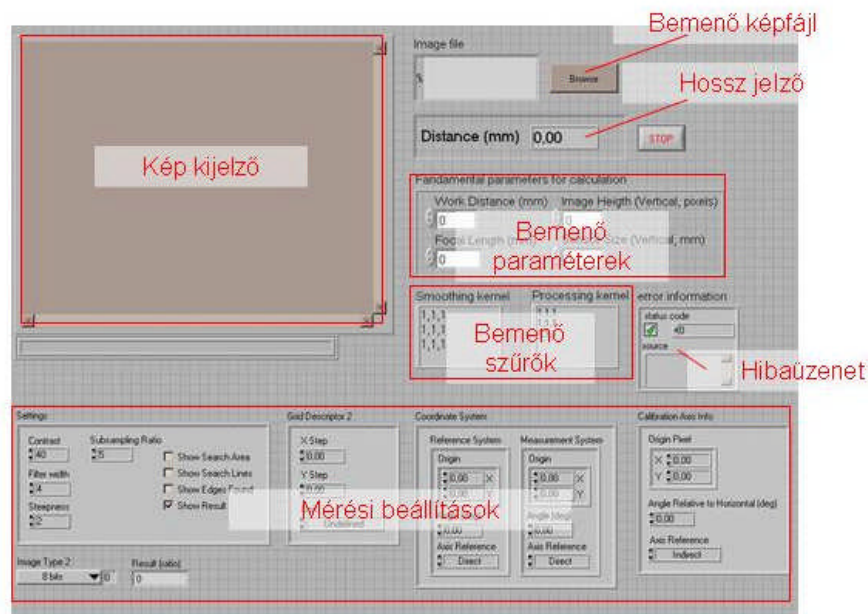
A 6.8. ábra mutatja a vezérlő panelt és a 6.9. ábra a felhasználói panelt az eredménykijelzéssel; az vezérlő panel mutatja be, hogyan épül fel a program. A számítás balról jobbra halad a vezérlőpanelen. Először a minta számítása történik egységgé átalakításához, majd megkapjuk az képet ami a szűrőkön megy át.





6.8. ábra, A vezérlő panel

A felhasználói panel (ld. 6.9. ábra), szerepe a bemenő adatok megadása és a paraméterek beállítása. A paraméterek, melyeket át kell alakítani valós egységekké, számítás előtt meg kell adni. Itt látható a kép, az él szélességének értéke és helye. Szintén itt állítható az éldetektálás érzékenysége, kontraszt állításával, a mintavételezéssel és a szűrő méretével. Ha futtatási hiba van, a hibáüzenetknél fog megjelenni a kiváltó ok.



6.9. ábra  
Felhasználói panel

## 6.5. A kísérleti eredmények

### 6.5.1. A vizsgált fúró

Az 6.10. ábrán látható a tanulmány során vizsgált fúró. Ez egy szabványos,  $\varnothing 10\text{mm}$  méretű csigafúró.



6.10. ábra  
A vizsgált csigafúró

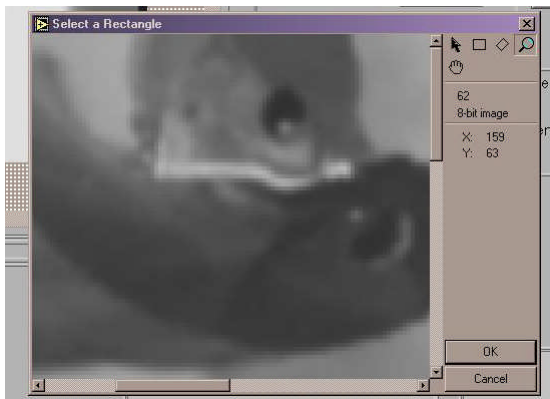
### 6.5.2. A képszűrés után kapott eredmények

A szűrési eljárásnak a lényege, hogy a zajokat eltávolítsuk a képből, ezért a képminőség javulását érzük el. A tisztítás, simítás szűrője a következő:

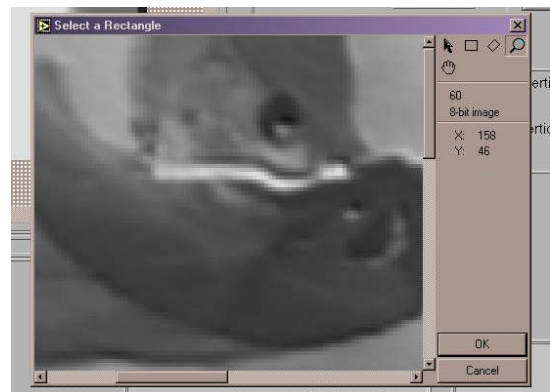
$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Ez egy tipikus mátrix, hasonló a fent említett képszűrőkhöz. Ez a képszűrő minden egyes képfeldolgozás előtt be volt állítva. Azt vizsgáltuk, hogy a program megtalálta-e az élt és a mérés pontos volt vagy sem. Az 6.11. ábraszorozat a feldolgozási eredményeket mutatja szűrés után. A szűrő a durva képet simábbá tette.

A Gauss módszer jó eredményt hozott, de a program hibázhat az él megtalálásakor az elmosódott foltoknál. A Gradiens variációnál a kép eltorzult, annak ellenére, hogy meg lett szűrve, tehát ezt az operátort nem tudjuk alkalmazni rendszerünkél.



Gauss



Prewitt



Gradiens



Sobel



Laplace

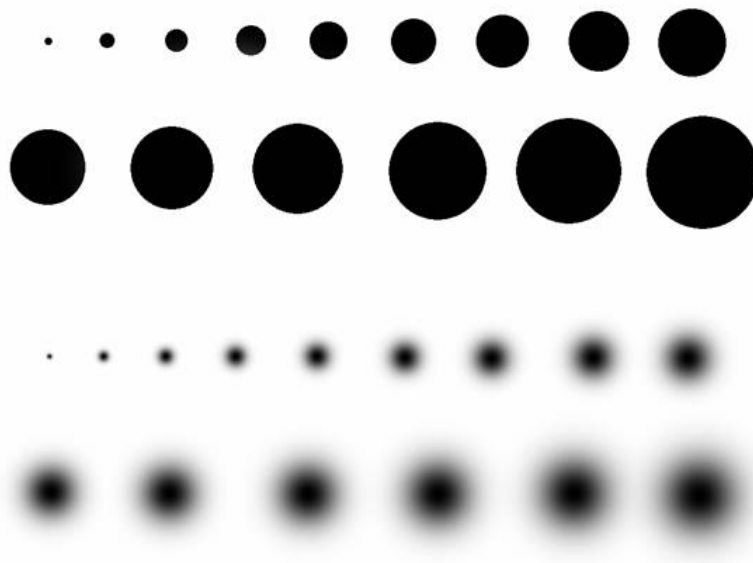


Laplace + image

6.11. ábra  
Eredmények szűrés után

A Laplace-szűrt kép minősége javult és az él tisztán kivehetően látszik egy fehér vonalként. De az él még nem eléggé letisztult ezért megállapítható, hogy nem ez a megfelelő eljárás. A Laplace + kép is javult, de a zajok hibát okoznak. Prewitt és Sobel módszerrel jó eredményt kaptunk, mivel látszik a fűró alakja. Összegzésképpen ezzel a két módszerrel hiba nélkül elvégezhető a mérés. Különösen a Prewitt alkalmas az algoritmusunk számára, mivel a felhasználó sokkal tisztábban látja az élt a Sobel szűrővel kapotténál.

Mivel ezen méréseknél a kép szűrkeségének mértékét nem vizsgáltuk, ezért egy vizsgálati felületet hoztunk létre különböző átmérőjű és pixel méretű körökből (6.11. ábra). A körök átmérői 10 pixeltől 150 pixelig változnak 10 pixelenként. Az 6.11. ábra alsó 2 sorában található körök szélei fehérek, közepei feketék. A szűrkeségi átmenetet az 6.12. ábra mutatja.



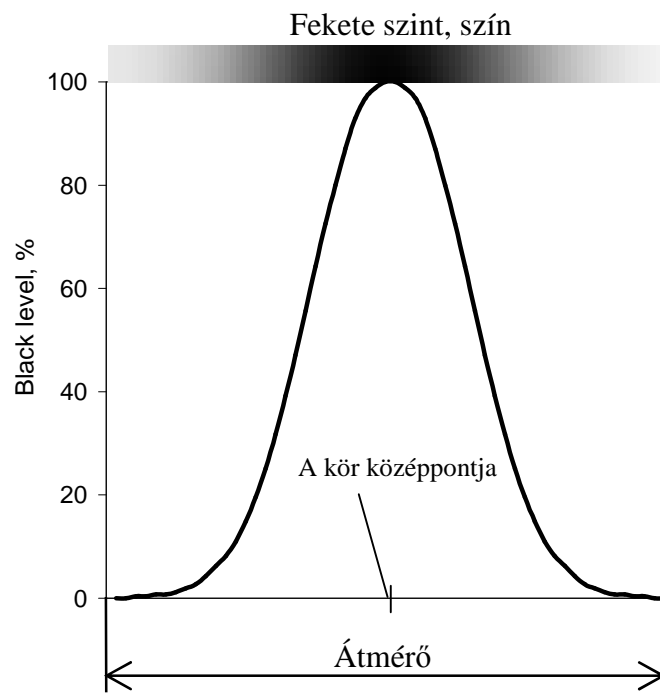
6.11. ábra A teszt mérési felület

A feketeségi szint számítása:

$$\text{Feketeségi szint \%} = \frac{255 - \text{szürkeségi érték}}{255} \times 100\% \quad (4)$$

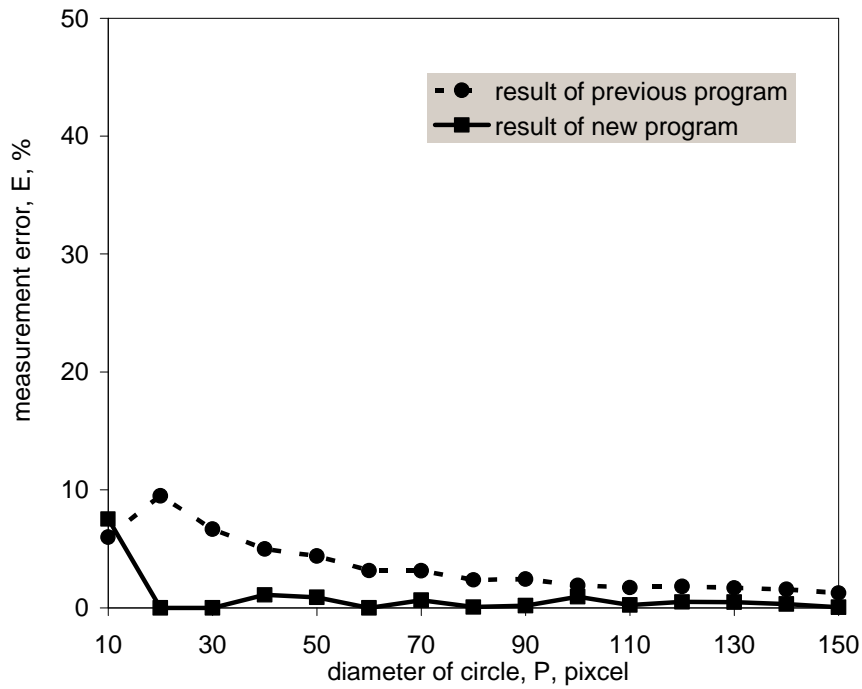
Azután, a becsült mérési hiba az (5) egyenlettel számítható:

$$\text{Mérési hiba \%} = \frac{\text{mért érték} - \text{valódi érték}}{\text{valódi érték}} \times 100\% \quad (5)$$

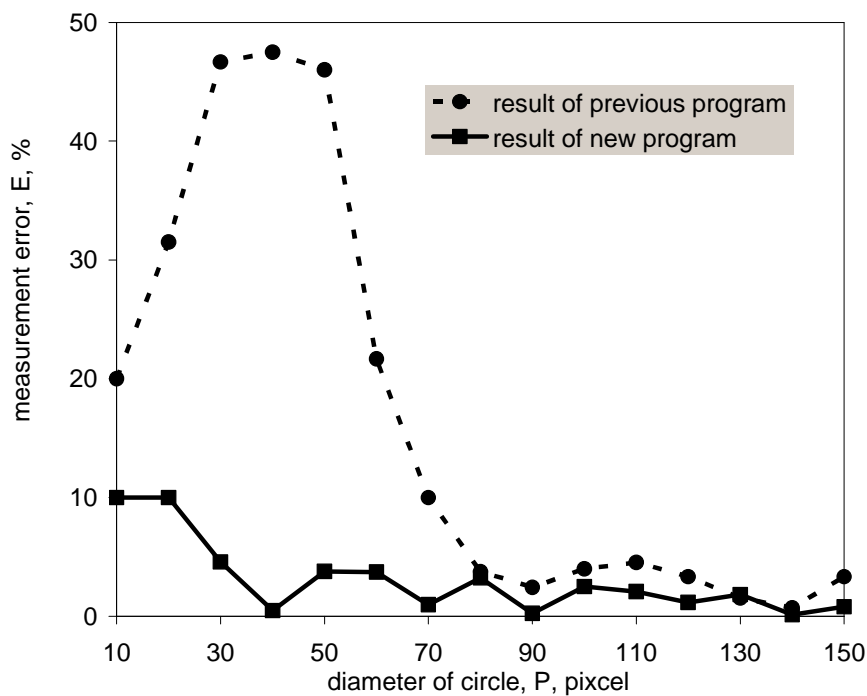


6.12. ábra A körök feketeségi foka

A mérési eredmények hibáit a körök átmérője függvényében a 6.13. és 6.14. ábrák tartalmazzák. A 6.13. ábra a fekete körökre vonatkozik, míg a 6.14. ábra változó feketeségi fokúakra.

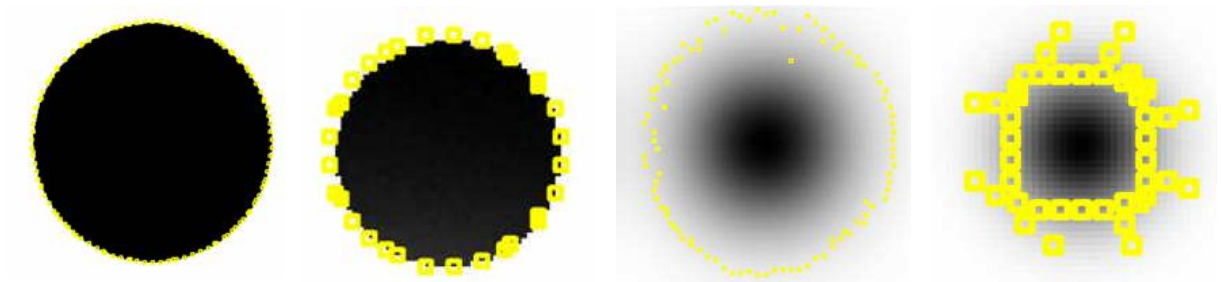


6.13. ábra Mérési eredmények hibái a körök átmérője függvényében (fekete körök esetén) (Jelölések: • régi program, ■ továbbfejlesztett program)



6.14. ábra Mérési eredmények hibái a körök átmérője függvényében (változó feketeségi fokú körök esetén), (Jelölések: • régi program, ■ továbbfejlesztett program)

Az éldetektálásra, automatikus kontúrészlelésre vonatkoznak a 6.15. ábra képei.



6.15. ábra Mérési eredmények, él detektálás, a kontúr automatikus megtalálása,  
[a) átmérő 150 pixel, fekete, b) átmérő 40 pixel, fekete,  
c) átmérő 150 pixel, változó feketeségi fokú, d) átmérő 40 pixel, változó feketeségi fokú]

A 6.15. ábra a), b), és c) esetében az élek (kontúrok) jól érzékelhetőek, míg a d esetben továbbfejlesztést igényel.

## 7. Kísérleti vizsgálatok.

Az elméleti vizsgálatok kiegészítése céljából illetve a megalkotott modellek jóságának ellenőrzése végett a következő kísérleti vizsgálatok elvégzése indokolt. A környezetkímélő megmunkálások (pl. fúrás, esztergálás, marás) kísérleti vizsgálata különböző hűtés-kenés esetén: (pl. szárazon, ill. minimális kenés alkalmazásával Bio-kenőanyagok használatával).

a) A forgácsoláshoz szükséges forgácsolóerő és nyomaték mérése, tribológiai vizsgálatok-modellezések, szerszámkopások elemzése.

b) A megmunkált felület felületi érdességének, alakhibájának, szövetszerkezetének vizsgálata. A kísérleti vizsgálatok előkészítéséhez, az eredmények kiértékeléséhez és megjelenítéséhez (empirikus képletek alkotásához) az aktív kísérlettervezési módszer, a faktoriális kísérlettervezés alkalmazása indokolt. Képletek megalkotásához jól felhasználható a dimenzió analízis is.

### 7.1. Fúrókopás vizsgálata minimálkenésnél

#### 7.1.1 Bevezetés

A Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológia Tanszéke 1994-től kezdődően végzett kutatásokat az Európai Közösség által finanszírozott „Umweltgerechte Zerspanungstechnik – Reduzierung und Ersatz von Fertigungshilfstoffen beim Bohren” c. projekt keretében (Program: STD-2EC, ERB CIPACT 930167). Ennek során minimális hűtő-kenő anyag felhasználása mellett furatmegmunkálási kísérletek végrehajtása történt, melyeknél változtatták a hűtő-kenő anyag mennyiségét, fúróhoz való hozzávetetésének módját (külső- és belső hűtés), valamint a technológiai paramétereket és mérték a felsorolt változók fúróerő- és nyomatékra, szerszámkopásra, valamint a megmunkált furatok makro- és mikrogeometriai jellemzőire gyakorolt hatását [7.1, 7.2, 7.3].

A kutatási téma továbbra is időszerű, hiszen számos érv szól a hűtő-kenő folyadék csökkentése, a minimálkenés megvalósítása mellett. Ennek köszönhető, hogy egyre szélesebb körben terjed a környezetbarát olajok használata, a minimálkenés, illetve a szárazmegmunkálás alkalmazása [7.4, 7.5, 7.6].

A kísérleti tevékenységét az öntvény külső minimálkenéssel történő furatmegmunkálásának vizsgálatára a Nyíregyházi Főiskola Műszaki Alapozó és Gépgyártástechnológia Tanszékén 2006-tól az OTKA kutatási téma megvalósításaként végeztük.

**A kísérletek célja:** *külső minimálkenés* mellett végzett fúrási kísérletek során összehasonlító mérések végrehajtása különböző mennyiségű külső hűtő-kenő folyadék hozzávetetéssel végzett fúrási kísérletsorozatokon, ahol mérjük:

- az axiális fúróerőt ( $F_f$ ) és csavaró nyomatékot ( $M_c$ ),
- a fúrószerszám kopását (sarokkopást,  $VB_E$  és hátkopást  $VB_{3,5}$ ),
- az elkészített furatok felületi érdességét ( $R_a$ ).

A mérési eredményeket összehasonlítjuk a ME belső minimálkenéssel végzett kísérleteinek eredményeivel [7.1, 7.2].

Jelen dolgozatban a fúrókopás vizsgálatára vonatkozó eredményeinket mutatjuk be.

### 7.1.2. A kísérletek körülményei

A fúrási kísérleteket jobbos emelkedésű, hengeres szárú, belső hűtő-kenő csatornával rendelkező, 10,2 mm-es átmérőjű, TiAlN-el bevonatolt monolit keményfém csigafúróval végeztük (szabványos jelölése: Ø 10,2 K20 Gühring WRDG DIN 6537).

A kísérletekhez használt próbatest anyaga: szürkeöntvény, EN-GJL-200 (MSZ EN 1561), amelybe 30 mm hosszúságú furatokat készítettünk a sorozatkísérletek alkalmával.

A *minimálkenés megvalósítása külső hűtéssel*, a hűtő-kenő folyadéknek a fúró külső palástjára való hozzáféréseivel történt, „NOGA MINI COOL” típusú porlasztó berendezéssel, amelynél a térfogatáram 10 cm<sup>3</sup>/h és 250 cm<sup>3</sup>/h között fokozatmentesen állítható.

A forgácsolási kísérletekhez „OMV cut XU” típusú, klórmentes olajat használtunk hűtő-kenő folyadékként, amely különleges adalékokkal ellátott minőségi hűtő-kenő anyag.

A fúrási kísérletek végrehajtása MU-250 típusú egyetemes marógépen az alábbi technológiai paraméterek beállításával történt:

Maróorsó fordulatszám:	$n = 2250$ ford/perc
Előtolás:	$f = 0,18$ mm/ford
Forgácsolási sebesség:	$v_c = 72,06$ m/perc
HKF mennyiség:	$Q = 10$ és $28$ cm <sup>3</sup> /p
Előtolás sebessége:	$v_f = 405$ mm/perc
Gépi főidő:	$t = 0,074$ perc

Az axiális fúróerő ( $F_f$ ) és csavaró nyomaték ( $M_c$ ) mérése KISTLER 9271 A típusú kétkomponensű kompakt dinamométerrel történt.

A sarokkopás ( $VB_E$ ) és hátkopás ( $VB_{3,5}$ ) méréséhez a fúrót függőleges helyzetben mérőmikroszkópon lefényképeztük, majd a kopásértékeket a digitális foto számítógépes program segítségével történő feldolgozásával határoztuk meg. A fúró mindig azonos helyzetét a mérőmikroszkópon befogó készülékkel biztosítottuk.

### 7.1.3. Mérési eredmények, feldolgozásuk és értékelésük

A fúrási kísérletek végrehajtása során minden mérést azonos paraméterek beállítása mellett legalább háromszor megismételtünk. A mérési eredményeket a matematikai statisztikai módszerek felhasználásával dolgoztuk fel (meghatároztuk a mért értékek átlagát, szórását, a relatív szórást). A mért átlagértékeket a fúrási út függvényében ábrázoltuk majd regresszióanalízissel meghatároztuk a mérési pontokra legjobban illeszkedő közelítő görbe egyenletét, valamint a korrelációs indexet.

A külső hűtés mellett mért eredményeket minden esetben összehasonlítjuk a Miskolci Egyetemen mért belső hűtés során regisztrált eredményekkel (a fúrási kísérletek minden más paramétere azonos volt, így az eredmények összevethetők).

### 7.1.4. A szerszámkopás mérésének eredményei

A csigafúró főelei a legnagyobb forgácsoló sebesség helyén, az élszalaggal való találkozási pontokon kopnak erősebben, ezt a kopásformát sarokkopásnak ( $VB_E$ ) nevezzük. Rideg anyagok, pl. öntöttvas fúrásakor, keményfém fúróknál ez a jellemző, emellett azonban hátkopás is tapasztalható. A sarokkopás megengedett értéke HM fúrónál: 0,9 – 1,2 mm [7.7, 7.8].



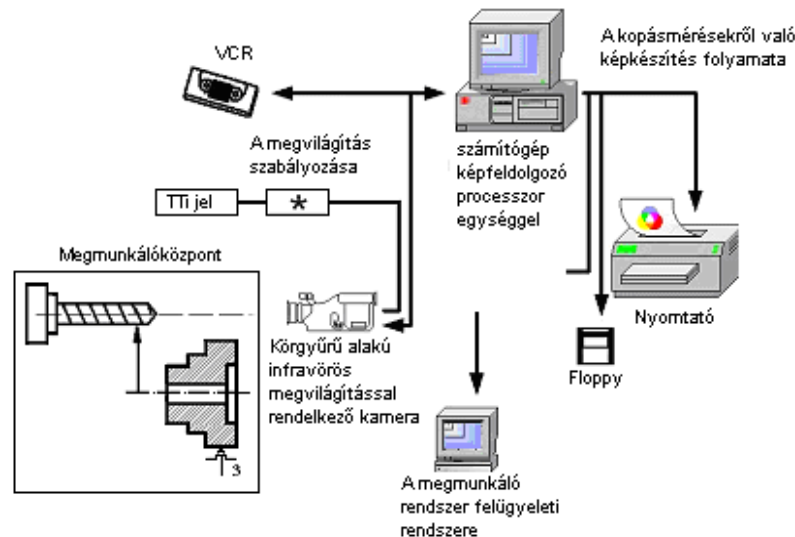
A fúró elhasználódásának jellemzésére ezért a sarokkopást ( $VB_E$ ) és a hátkopást ( $VB_{3,5}$ ) választottuk. A hátkopást 3,5 mm-es sugáron mértük, a főéltől a hátfelületre nyúló kopási sáv szélességeként.

A szerszámkopást mindig 5 méter fúrási úthossz megtétele után mértük, mindkét főélen. A fúrási úthossz: átmenő furatok esetén a csigafúróval kifúrt furatok számának és a fúrandó próbatest vastagságának szorzata ( $s = Z_f \cdot L_p$ ).

A kopásértékek meghatározása  $N = 300$ -szoros nagyítású digitális fotón történt Corel számítógépes program segítségével. A szerszámot kopott állapotban a méréshez felvett referencia vonalakkal az 1. ábra mutatja, amelyen a mért kopásértékeket is bejelöltük.

A szerszám kopásának mérése történhet CCD kamera felhasználásával is. Egy csigafúró konkrét kopásmérése megvalósításának vázlatát a 7.1. ábrán mutatjuk meg.

A mérés során a főélek vízszintes helyzetűek és a hátkopás helye be van jelölve. A sáv szélessége optikai úton – mikroszkópon vagy CCD kamerák segítségével volt mérhető [3].



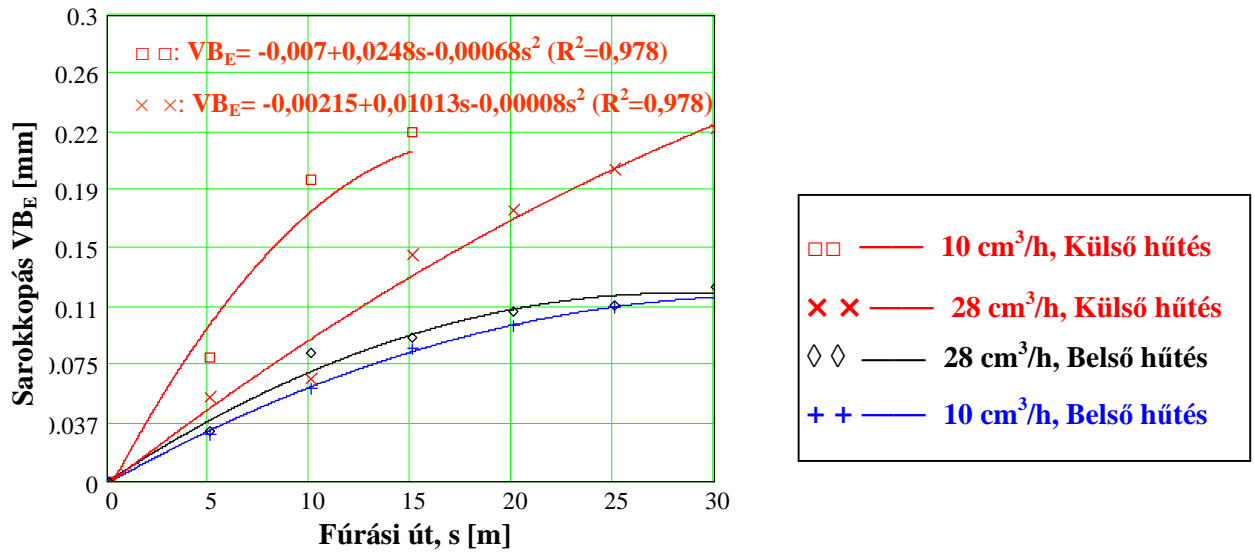
7.1. ábra

Fúrószerszám hátkopásának a mérése CCD kamerával [3]

A 7.2. ábrán a sarokkopás ( $VB_E$ ), a 7.3. ábrán a hátkopás ( $VB_{3,5}$ ) átlagértékeinek fúrási út függvényében történő változását ábrázoltuk külső- és belső hűtés [7.1] mellett. ( $10 \text{ cm}^3/\text{h}$  külső hűtésnél 15 m fúrási út megtétele után a szerszám kicsorbult, így ebben a beállításban a kísérleteket nem folytathattuk tovább).

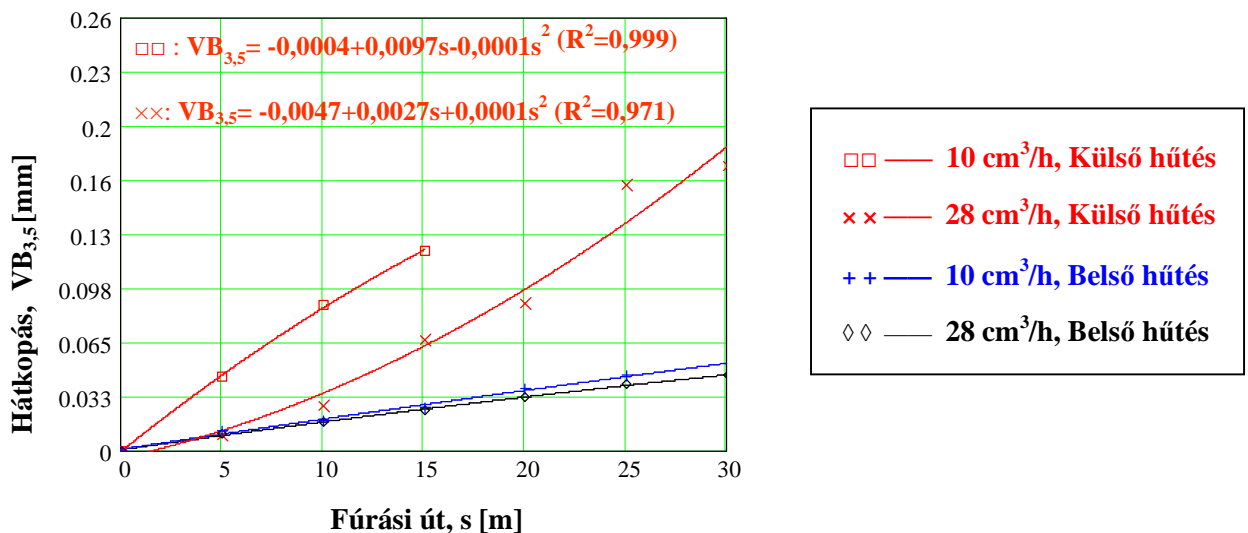
*Külső hűtésnél* a két főélen mért kopásértékek jelentős eltérést mutattak. A 7.2. és 7.3. ábrán jól látható, hogy főként a sarokkopás ( $VB_E$ ), de a hátkopás mért értékei is erőteljesen növekednek a fúrási úttal. A hűtő-kenő folyadék mennyiségének  $10 \text{ cm}^3/\text{h}$ -ról  $28 \text{ cm}^3/\text{h}$ -ra történő emelésével a  $VB_E$  értékei kb. 30-50 %-kal, a  $VB_{3,5}$  értékei kb. 50-70 %-kal csökkennek 15 m fúrási út alatt. A csökkenés mértéke a fúrási úttal nő 15 m fúrási útig.

A mérési eredmények elemzéséből kitűnik, hogy a szerszámkopás mérési eredményei összhangban vannak az előtolóerő és fúrónyomaték mérési eredményeivel: a nagyobb szerszámkopás ( $10 \text{ cm}^3/\text{h}$  külső hűtésnél) jelentős előtolóerő és fúrónyomaték növekedést eredményez [7.9].



7.2. ábra

A sarokkopás ( $VB_E$ ) változása a fúrési út függvényében (külső és belső hűtés)



7.3. ábra

A hátkopás ( $VB_{3,5}$ ) változása a fúrési út függvényében (külső és belső hűtés)

A belső és külső hűtés szerszámkopásra gyakorolt hatásának összehasonlítása alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- Azonos mértékű HKF adagolás mellett a sarokkopás ( $VB_E$ ) és a hátkopás ( $VB_{3,5}$ ) minden esetben kisebb belső hűtésnél ( a fúró hűtése itt egyenletes, folyamatos).
- Amíg a belső hűtésnél a HKF mennyiség növelése nem csökkentette jelentősen a szerszámkopást (sőt,  $28 \text{ cm}^3/\text{h}$  hűtésnél  $10 \text{ cm}^3/\text{h}$  hűtéshez képest a sarokkopás nőtt), addig külső hűtésnél a HKF mennyiség növelése jelentősen redukálta a szerszámkopást.
- Amíg belső hűtésnél  $10 \text{ cm}^3/\text{h}$  mennyiségű HKF elegendő a fúró kenéséhez (a hűtés-kenés egyenletes, folyamatos, a HKF közvetlenül a vágóélekhez jut), addig külső hűtésnél a megfelelő hűtés-kenés biztosításához, a szerszámkopás csökkentéséhez a

HKF mennyiség legalább  $28\text{cm}^3/\text{h}$ -ra történő növelése szükséges ( a fúró hűtése kívülről szakaszos).

Ezen megállapítások változnak  $L = 50$  mm vagy  $100$  mm vastagságú munkadarabok fúrásánál, mivel  $L \geq 5d$  fúrt furathossz után a külső kenés hatása jelentősen lecsökken.

### **7.1.5. Összefoglalás**

Kísérleteink során öntvény külső minimálkenéssel történő furatmegmunkálásának vizsgálatát végeztük el, majd eredményeinket összehasonlítottuk a Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológia Tanszékén hasonló paraméterekkel végrehajtott, belső minimálkenés mellett végzett fúrési kísérleteinek eredményeivel. A kísérletek legfontosabb következtetéseit az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- A hűtő- kenő anyag mennyiségének jelentős csökkentése mellett, külső minimálkenéssel sikerült megfelelő forgácsolási feltételeket biztosítani szürkeöntvény furatmegmunkálásánál.
- Amíg belső hűtésnél  $10\text{cm}^3/\text{h}$  mennyiségű HKF elegendő a fúró hűtés- kenéséhez, addig külső hűtésnél a HKF mennyiségének legalább  $28\text{cm}^3/\text{h}$ - ra történő növelése szükséges a megfelelő hűtés- kenés biztosításához.

### **7.2. Fúróerő, felületi érdesség, rezgés mérése**

A kísérletek részletes leírása a készülő könyvben, illetve a szakcikkekben megtalálhatók. (terjedelmi korlátok miatt [ max. 5 MB] itt nem áll módunkban közölni).

## **8. Eredmények**

- \* Az eredmények folyamatos publikálása referált folyóiratokban, nemzetközi és hazai konferenciákon megtörtént.
- \* A fenti kutatás eredményei három TDK dolgozatban, illetve három diplomatervben kerültek hasznosításra,
- \* A kutatási eredmények a készülő szakkönyvbe, az oktatásba, PhD disszertációba s Professzori Habilitációba épülnek be a közeljövőben.

A vizsgálatok során kapott eredmények nagy részét a mellékelt publikációs jegyzékben közölt publikációk lefedik

## FELHASZNÁLT IRODALOM

### Irodalom a 4.1. fejezethez

- [1.1] Ambos, E.; Lierath, F.; Molitor, M.: Quo vadis Fertigungstechnik? – 50 Jahre IFQ. Magdeburger Fertigungstechnisches Kolloquium, Tagungsband, Magdeburg 2003
- [1.2] Autorenkollektiv: Fachtagung Innovation und Tradition – 45 Jahre Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Tagungsband, Magdeburg 1998
- [1.3] Cselle, T.: Is the Eco tooling on the way in? The pros and cons of dry machining techniques, Modern Cutting Tools Technology, Gühring, Vol. 14, (9419-VII-03), 1994, pp.: 5-14,
- [1.4] Dudás I.: Gépgyártástechnológia I., A gépgyártástechnológia alapjai, Műszaki Kiadó, 2004. p.583. ISBN 963 16 4030 2
- [1.5] Eckbrecht, J.: Umweltverträgliche Gestaltung von spanenden Fertigungsprozessen. Dissertation, Bremen 2000
- [1.6] Eversheim, W. u. a.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996
- [1.7] Herzhoff, P.: Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung beim Wälzfräsen mit HSS-Werkzeugen. Dissertation, Universität Magdeburg 2003
- [1.8] Klocke, F.; Weck, M.: Trockene Zahnradvorbearbeitung Seminarvorträge, Aachen 2002
- [1.9] Kühnle, H.; Lierath, F.; Herold, H.: Die wissensintensive Produktion. Magdeburger Produktionstechnisches Kolloquium, Tagungsband, Magdeburg 1999
- [1.10] Opley, L.: Trockenbearbeitung, Expert Verlag München, Wien, 1988, ISBN 3-8169-1518-5
- [1.11] Pfeifer, T. u. a.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993
- [1.12] Schulz, H.: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Carl Hanser Verlag München, Wien, 1996
- [1.13] Sukaylo, V.: Numerische Simulation der thermisch bedingten Werkstückabweichungen beim Drehen mit unterschiedlichen Kühlschmiermethoden. Dissertation, Universität Magdeburg, 2003
- [1.14] Sutherland, J. W., Gunter, K. L.: Environmental Attributes of Manufacturing Processes, in the book of Madu, C., N.: Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2001, pp.: 293-316.
- [1.15] Trent, E. M.: Metal Cutting, Butterworth Heinemann, 1991.
- [1.16] Verein Deutscher Ingenieure: Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung – Herausforderung an die Fertigungstechnik. VDI-Berichte 1240, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996
- [1.17] Verein Deutscher Ingenieure: Praxis der Trockenbearbeitung. VDI-Berichte 1458, VDI-Verlag, Düsseldorf 1999
- [1.18] Verein Deutscher Ingenieure: Trockenbearbeitung: Drehen, Fräsen, Bohren. VDI-Berichte 1532, VDI-Verlag, Düsseldorf 2000
- [1.19] Verein Deutscher Ingenieure: Trockenbearbeitung prismatischer Teile. VDI-Berichte 1375, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998
- [1.20] Verein Deutscher Ingenieure: Umweltfreundlich zerspanen. VDI-Berichte 1339, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997
- [1.21] Weinert, K.K. Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung. Springer Verlag 2000

### Irodalom a 4.2. fejezethez

- [2.1] Autorenkollektiv: Saubere Fertigungstechnologien – Ein Wettbewerbsvorteil von morgen? In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven, Aachener WZM-Kolloquium. Tagungsband, pp.: 4-35 ÷ 4-108, VDI-Verlag Düsseldorf, 1996
- [2.2] Beno, J., Theory of Metal Cutting, VIENALA, Kosice, 1999, (Szlovák nyelven)
- [2.3] Cselle, T.: Is the Eco tooling on the way in? The pros and cons of dry machining techniques, Modern Cutting Tools Technology, Gühring, Vol. 14, (9419-VII-03), 1994, pp.: 5-14,

- [2.4] Cselle, T.: Cutting without cooling – is it a vision or reality, IX. Nemzetközi Szerszámkonferencia, 1996. szeptember 03-05, Miskolci Egyetem, Miskolc, pp.: 523-536, ISBN: 963 661 279 X
- [2.5] Dudás I.: Gépgyártástechnológia I., A gépgyártástechnológia alapjai, Műszaki Kiadó, 2004. p.583. ISBN 963 16 4030 2
- [2.6] Dudás, I., Varga Gy., Csermely, T., Tolvaj, I., Bányai K.: Umweltgerechte Zerspanungstechnik - Reduzierung und Ersatz von Fertigungshilfsstoffen beim Bohren (STD - 2EC jelű, ERB CIPACT 930167 témaszámú), Európai Közösség által finanszírozott kutatási projekt, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék, 5-6. Jelentés, 1996., pp.: 57,
- [2.7] Európai Környezet-egészség-ügyi Akcióterv. Koppenhága, WHO Európai Területi Irodája, 1994. (Dokumentum: EUR/ICP/CEH 212(A)), <http://www.antsz.hu/oki/gazdasag.pdf>
- [2.8] Garbrecht, M.: Einsatzpotenziale der Minimalmengenkühlschmierung und Trockenbearbeitung, 10. Österreichische HSC-Tagung, Vortragsunterlagen, Steyr 2002
- [2.9] Hands, D.M., Sheehan J., Wong B., Lick, H. B., Comparison of Metalworking Fluid Mist Exposures from Machining with Different Levels of Machine Enclosure, American Industrial Hygiene Association Journal, 1996, 57/12, pp.: 173-1178
- [2.10] Klocke F.: Dry Cutting, Annals of the CIRP, 46/2, pp.: 519-526, 1997.
- [2.11] Klocke, F., Eisenblaetter, G., Dry Cutting, Annals of the CIRP-Manufacturing Technology, 1997, 46/2, pp.: 519-526
- [2.12] Knodt, St.; Markworth, L.: Werkzeug- und Formenbau – Freiformflächenbearbeitung heute und morgen. In: Perspektiven der Zerspantechnik, Tagungsband, Aachen 2002, pp.: 123-155,
- [2.13] Krieg, T.: Entwicklungstendenzen bei Zerspanwerkzeugen. In: Perspektiven der Zerspantechnik. Tagungsband, Aachen 2002, pp.: 21-35,
- [2.14] Nachtman, E. S., Kalpakjian, S.: Lubricants and Lubrications in Metalworking operations, Marcel Dekker Inc, New York & Basel, 1985,
- [2.15] N.N. 1600/2002/EK határozat (HL [L 242.](#), 2002.9.10.), Decision No 1600/2002/EC of the European Parliament and of the Council of 22 July 2002 laying down the Sixth Community Environment Action Programme, <http://eur-lex.europa.eu/JOHtml.do?uri=OJ:L:2002:242:SOM:en:HTML>
- [2.16] N.N. COM(2004) [621.](#), Javaslat AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS RENDELETE a környezetvédelmi célú pénzügyi eszközről (LIFE +), [http://ec.europa.eu/prelex/detail\\_dossier\\_real.cfm?CL=hu&DosId=191760](http://ec.europa.eu/prelex/detail_dossier_real.cfm?CL=hu&DosId=191760)
- [2.17] N.N.: DIN 51385: Schmierstoffe – Kühlschmierstoffe, Begriffe. Berlin, Beuth-Verlag, 1991
- [2.18] N.N.: Handbuch der Gewindetechnik und Frasetechnik, Anwendungen, Tipps, Tabellen, herausgegeben von EMUGE-FRANKEN, Verlag: Publicis Corporate Publishing, Publicis Kommunikations Agentur GmbH, GWA, Erlagen, 2004, Best.-Nr. A19100-L531-B882, ISBN 3-89578-232-7
- [2.19] N.N. Szolidaritás a jövő nemzedékeivel és fenntartható fejlődés, Környezetvédelem, <http://europa.eu/generalreport/hu/2005/rg64.htm>
- [2.20] Opley, L.: Trockenbearbeitung, Expert Verlag München, Wien, 1988, ISBN 3-8169-1518-5
- [2.21] Popke, H.; Knoche, H.-J.: Einsatz der Minimalschmiertechnik beim Wälzfräsen. In: Magdeburger Fertigungstechnisches Kolloquium. Tagungsband, pp.: B09/01 ÷ B09/07, Magdeburg, 1999
- [2.22] Schulz, J.; Walter, A.; Janssen, R.: Schmierstoffkonzepte für eine wirtschaftliche Minimal- oder Mindestmengenschmierung bei der Zerspanung, Tribologie und Schmierungstechnik (46) 3, 1999, pp.: 15-23
- [2.23] Sutherland, J. W., Gunter, K. L.: Environmental Attributes of Manufacturing Processes, in

the book of Madu, C., N.: Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2001, pp.: 293-316.

### Irodalom a 5.1.1. fejezethez

- [5.1] Kuan-Ming Li, Predictive Modeling of Near Dry Machining: Mechanical Performance and Environmental Impact, PhD Dissertation, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, August 2006
- [5.2] Oxley, P.L.B., 1989, *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, E. Horwood New York.
- [5.3] Liang, S.Y. and Sutherland, J.W., 2002, "Research Status of MQL in Machining," *Proceedings of the First International Workshop on High Performance Cutting*, Paris, pp. 39-49.
- [5.4] Boothroyd, G. and Knight, W.A., 1989, *Fundamentals of machining and machine tools*. 2nd ed, M. Dekker, New York.
- [5.5] Waldorf, D.J., 1996, "Shearing, Ploughing and Wear in Orthogonal Machining," Ph.D. thesis, Mechanical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign.
- [5.6] Smithey, D.W., Kapoor, S.G., and DeVor, R.E., 2001, "A new mechanistic model for predicting worn tool cutting forces," *Machining Science and Technology*, 5(1), pp. 23-42.
- [5.7] Kato, S., Marui, E., and Hashimoto, M., 1998, "Fundamental study on normal load dependency of friction characteristics in boundary lubrication," *Tribology Transactions*, 41(3), pp. 341-349.
- [5.8] Moore, D.F., 1975, *Principles and Applications of Tribology*. 1st ed, Pergamon Press, Oxford, New York.
- [5.9] Arsecularatne, J.A. and Mathew, P., 2000, "Oxley modeling approach, its applications and future directions," *Machining Science and Technology*, 4(3), pp. 363-397.
- [5.10] Arsecularatne, J.A., Mathew, P., and Oxley, P.L.B., 1995, "Prediction of chip flow direction and cutting forces in oblique machining with nose radius tools," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 209(B4), pp. 305-315.
- [5.11] Stabler, G.V., 1951, "The Fundamental Geometry of Cutting Tools," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 165, pp. 14-26

### Irodalom a 5.1.2. fejezethez

- [6.1] Dudás Illés : Gépgyártástechnológia I., Miskolci Egyetemi Kiadó, 2002
- [6.2] Dudás Illés : Gépgyártástechnológia II. Miskolci Egyetemi Kiadó, 2001
- [6.3] Francis C. Moon, Tamás kalmár-Nagy : Nonlinear models for complex dynamics in cutting materials, The Royal Society 10.1098/rsta.2000.0751
- [6.4] Fridrik László : Forgácsolás I. (Forgácsoláselmélet), Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 1992
- [6.5] Nagy-Kalmár Tamás, Gábor Stépán, Francis C. Moon : Subcritical Hopf Bifurcation in the Delay Equation Model for Machine Tool Vibrations, *Nonlinear Dynamics* 26: 121-142, 2001
- [6.6] Nagy-Kalmár Tamás, Jon R. Pratt , Matthew A. Davies, Michael D. Kennedy : Experimental and analytical investigation of the subcritical instability in metal cutting, *Proceedings of DETC'99, 17th ASME Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise*, September 12-15. 1999. Las Vegas, Nevada. USA
- [6.7] Rontó Miklós, Mészáros József, Raisz Péterné, Tuzson Ágnes : Differenciál- és integrálegyenletek komplex függvénytan variációszámítás Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998
- [6.8] Stépán, G. : Delay-differential equation models for machine tool chatter in *Nonlinear Dynamics of Material Processing and Manufacturing*, Ed.: F. C. Moon, John Wiley & Sons, New York, 1998, 165 – 192.

- [6.9] Stépán, G., Tamás Insperger, Róbert Szalai : Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 15, No. 9 (2005) 2783-2798
- [6.10] Ráczkői László: Fémforgácsolásnál fellépő rezgési jelenségek vizsgálata, Tudományos Diákköri Dolgozat, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Miskolc, 2006, (Konzulensek: Dr. Varga Gyula egyetemi docens, Prof. Dr. Dudás Illés, tanszékvezető, egyetemi tanár, ME, Gépgyártástechnológia Tanszék)

### **Irodalom a 5.2.1. fejezethez**

- [7.1] Páczelt, I.: Végeelem-módszer alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 1993
- [7.2] Lee, E. H., Shaffer, B.W.: The theory of plasticity applied to a problem of machining, *Journal of Applied Mechanics*, 18, 1951, pp.: 405–413.
- [7.3] Iwata, K., Osakada, K., Terasaka, Y.: Process modeling of orthogonal cutting by the rigid-plastic finite element method, *ASME Journal of Engineering for Industry* 106, 1984, pp.: 132–138.
- [7.4] Shih, A.J., Chandrasekar, S., Yang, H.T.: Finite element simulation of metal cutting process with strain-rate and temperatures effects, *ASME Publication PED* 43, 1990, pp.: 11–24.
- [7.5] Ueda, K., Watanabe, K.: Rigid-plastic FEM analysis of three-dimensional deformation field in chip formation process, *Annals of the CIRP* 42, 1993, pp.: 35-38
- [7.6] Kumar, S., Fallbohmer, P., Altan, T.: Computer simulation of orthogonal metal cutting processes: determination of material properties and effects of tool geometry on chip flow, *Technical Papers of NAMRI/SME* 25 (177), 1997, pp.: 1–6.
- [7.7] Özel, T., Altan, M. T.: Determination of workpiece flow stress and friction at the chip–tool contact for high-speed cutting, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 2000, pp.: 133–152.
- [7.8] Shih, A. J., Yang, H. T. Y.: Experimental and Finite Element Predictions of Residual Stresses Due to Orthogonal Metal Cutting, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 1993, Vol. 36, pp.: 1487-1507.
- [7.9] Oxley, P. L. B.: *Mechanics of Machining*, Ellis Horwood, Chichester, 1989.
- [7.10] Nagtegaal, J. C., Rebelo, N.: On the development of a general purpose finite element program for analysis of forming process, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 25, pp.: 1988, 113-131.
- [7.11] Varga G.: Metrology in Environmentally Conscious Intelligent Manufacturing Systems, ISMTII 2001, Proceedings of the Fifth International Symposium on MEASUREMENT TECHNOLOGY and INTELLIGENT INSTRUMENTS, 2001, Sept. 25 - 29, Giza - Cairo, Egypt, pp.: 323 - 328.
- [7.12] Szabó, T.: *Alkalmazott mechanika, végeelem-módszer alkalmazásai*, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2003
- [7.13] Varga, G., Dudás, I.: Modelling and Examinations of Environmentally Friendly Machining Processes, Proceedings of the 9th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, TMT 2005, Antalya, Turkey, 26-30 September, 2005. pp.: 121-124. ISBN: 9958-617-28-5
- [7.14] Gépipari környezetkímélő megmunkálási eljárások vizsgálata, modellezése, OTKA No.: T 0042843, Témavezető: Dr. Varga Gy., Kidolgozásban résztvesznek: Dudás I., Bányai K., Nyíró J., Felhő Cs., Faragó M.

## Irodalom a 6. fejezethez

- [8.1] Kazumi Murata /Optics/ Saiensu Co., Ltd.
- [8.2] Toshi Minami, Osamu Nakamura /Image Science and Technology/ CORONA, PUBLISHING CO., LTD
- [8.3] National Instrument /NI Developer Zone/ <http://zone.ni.com/zone/jsp/zone.jsp>
- [8.4] Y. Inoue, Introduction of LabVIEW programming, Morikita publisher Ltd., 1995
- [8.5] T. Sasaki, Bevel measurement system I, 2005, Research Report, University of Miskolc, (Supervisor: Dr. Gyula Varga)
- [8.6] O. Khalifa et al, Image processing for chatter identification in machining processes, Int. Journal Adv. Manufacturing technology, pp.443-449, 2006
- [8.7] National Instrument, NI Developer Zone, <http://zone.ni.com/zone/jsp/zone.jsp>  
T. Iyama, Bevel measurement system, 2006, Research Report, University of Miskolc, (Supervisor: Dr. Gyula Varga)

## Irodalom a 7. fejezethez

- [9.1] Dudás, I., Varga Gy., Csermely, T., Tolvaj, I. Umweltgerechte Zerspanungstechnik - Reduzierung und Ersatz von Fertigungshilfsstoffen beim Bohren (STD - 2EC jelű, ERB CIPACT 930167 témaszámú), Európai Közösség által finanszírozott kutatási projekt, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék, 4. Jelentés, 1995., pp.: 27
- [9.2] Dudás, I., Tolvaj, I., Varga, Gy. and Csermely, T.: Measurements applied at the experiments of environmentally clean drilling manufacturing operations, Proceedings of the Fourth International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Miskolc-Lillafüred, Hungary, September 2-4, 1998, pp.: 487-492
- [9.3] Varga, G., Dudas, I.: Modelling and Examinations of Environmentally Friendly Machining Processes, Proceedings of the 9th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, TMT 2005, Antalya, Turkey, 26-30 September, 2005. pp.: 121-124. ISBN: 9958-617-28-5
- [9.4] Weinert, K.: Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung. Springer Verlag 2000
- [9.5] Opley, L.: Trockenbearbeitung, Expert Verlag München, Wien, 1988, ISBN 3-8169-1518-5
- [9.6] Klocke, F.; Lung, D.: Minimalmengen Kühlschmierung – Systeme, Werkzeuge und Medien. In VDI-Berichte 1532, pp.: 137–154, VDI-Verlag Düsseldorf, 2000
- [9.7] Dudás I.: Gépgyártástechnológia I., A gépgyártástechnológia alapjai, Műszaki Kiadó, 2004. p.583. ISBN 963 16 4030 2
- [9.8] Dudás, I.: Gépgyártástechnológia III. Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2003. p. 539.
- [9.9] Dudás, I., Varga Gy., Szigeti, F., Péter, L., Százvai, A.: Furatmegmunkálás minimálkenéssel, Műszaki Tudomány az Észak Alföldi Régióban c. konferencia(DAB) , Nyíregyháza, 2006.nov.16. Műszaki Füzetek,2.kötet, pp.:77-92,  
[http://store1.digitalcity.eu.com/store/clients/release/musz\\_fuz\\_02.pdf](http://store1.digitalcity.eu.com/store/clients/release/musz_fuz_02.pdf)

[1] Kazumi Murata /Optics/ Saiensu Co., Ltd.

[2] Toshi Minami, Osamu Nakamura /Image Science and Technology/ CORONA

[3]

[7.7]

[7.8]

[7.9]