

MISKOLCI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



## AZ ABRAZÍV VÍZSUGARAS VÁGÁS MINŐSÉGÉNEK ÉS HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

**DR. MAROS ZSOLT**

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA  
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMATERÜLET  
GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

**DR. TISZA MIKLÓS**

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

**DR. DUDÁS ILLÉS**

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

**DR. TÓTH LÁSZLÓ**

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

**Miskolc, 2011.**

## **BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG**

elnök: Dr. Tisza Miklós DSc, egyetemi tanár (ME)  
titkár: Dr. Szabó Szilárd CSc, egyetemi tanár (ME)  
tagok: Dr. Dobránszky János CSc, egyetemi docens (BME)  
Dr. Mátyási Gyula CSc, egyetemi docens (BME)  
Dr. Pálincás István CSc, egyetemi docens (Szent István Egyetem, Gödöllő)

## **HIVATALOS BÍRÁLÓK**

Dr. Takács János CSc, egyetemi tanár (BME)  
Dr. Jakab Endre CSc, egyetemi docens (ME)

## 1. BEVEZETÉS

### 1.1 ELŐZMÉNYEK

A vízsugár ipari méretű első alkalmazását az 1870-es években jegyezték fel Alaszkában, ahol vízfecskendőket használtak az aranyat tartalmazó homokos kőzet feltárásához. Ezek a nagyon kisnyomású fecskendők egyszerűen levezették a vizet a munkaterület fölötti hegyről, lehetővé téve a homok nagytermelékenységgű átmosását az arany kinyerése céljából.

A vízsugaras technológiák alkalmazása ezen korai kezdetektől igen nagy fejlődésen ment keresztül, az egyre nagyobb és nagyobb nyomású rendszerek kifejlesztésének köszönhetően, egészen a napjainkban alkalmazott abrazív vízsugaras vágóberendezésekig.

A vízsugaras vágás ipari felhasználása akkor vált igazán hatékonyá, amikor a 80-a évek elejére kifejlesztették azokat a nyomásfokozó rendszereket, amelyek képesek voltak 3000 bar fölötti víznyomást is előállítani. Ekkor kezdődtek meg azok a kísérletek, amelyek során az addig tiszta vízsugárhoz már abrazív port is adagolnak. Az első ipari vízsugaras vágógépek megjelenése a 80-as évek közepére tehető. Ma világszerte egyre szélesebb körben alkalmazzák ezt a technológiát.

Magyarországon a vízsugaras vágás 1996-ban jelent meg, elsőként a miskolci Bay Zoltán Logisztikai és Gyártástechnikai Intézetben, ahol egyébként akkoriban magam is dolgoztam. Így kerültem személyesen is kapcsolatba ezzel a technológiával és kezdtem el e területtel kapcsolatos kutatásaimat. Mivel a vízsugaras vágás területén magyar nyelvű szakirodalom gyakorlatilag nem állt és ma sem áll rendelkezésre, munkám során az eljárás sajátosságainak elméleti és kísérleti elemzésén túlmenően egyik meghatározó célom az volt, hogy elősegítsem e technológia magyarországi megismerését és elterjedését.

### 1.2 A VÍZSUGARAS VÁGÁS KUTATÁSÁNAK JELLEGZETES IRÁNYAI

Megjelenése óta az abrazív vízsugaras vágást számtalan kutató vizsgálta és kutatja ma is. Lévéen az eljárás viszonylag fiatal technológia, a tématerület legismertebb kutatói napjainkban is tevékenyek és néhányukkal személyesen is módomban állt találkozni. Jelentős iskolák kötődnek az Egyesült Államokban *M. Hashish* környezetéhez, aki, mint a FLOW cég vezető fejlesztő mérnöke, a vízsugaras vágás számtalan területét vizsgálta. Európában kiemelkedőek a németországi *A.W Momber* kutatásai és *H. Louis* iskolája a hannoveri egyetemen, Olaszországban *R. Ciccu és Monno* professzorok tevékenysége. Ugyancsak jelentős kutatások kötődnek az indiai *M. M. Vijay* illetve olyan távol keleti kutatók nevéhez mint, *T. Sawamura, R. Kobayashi, J. Wang, W.C.K. Wong, J. Zeng, T.J. Kim*.

A téma fő kutatási területeit tekintve a vizsgálatok több irányban folynak [1, 2]. A vágó sugár összetételére irányuló kutatások különböző adalék polimerek [3], abrazív anyagok [4, 5, 6], illetve olyan különleges eljárások vizsgálatára irányulnak, mint például a jéggel segített vízsugaras vágás [7, 8] vagy a folyékony nitrogénnel illetve CO<sub>2</sub>-al végzett vágások [9, 10].

A különböző eljárások területén nagy jelentőségűek az ún. szuszpenziós [11, 12] illetve injektoros vágás alkalmazhatóságára vonatkozó elemzések és az olyan újszerű megmunkálások vizsgálata, mint a vízsugaras esztergálás vagy marás [13, 14, 15].

Az abrazív vízsugaras vágás során lejátszódó folyamatok meglehetősen összetettek és teljes részleteiben ma sem tisztázottak, ezért jelentős energiákat fordítanak ezek modellezésére [16, 17] illetve az anyagleválasztás során lejátszódó folyamatok elemzésére [18, 19].

A kutatások egy része a technológiai körülmények és paraméterek vizsgálatával foglalkozik. A vágó sugár karakterisztikáját számos tényező befolyásolja (az elsődleges és másodlagos fűvóka anyaga és geometriája, az abrazív anyag minősége és szemcsenagysága, a vágófej előtoló sebessége, az abrazív anyagáram nagysága, az alkalmazott víznyomás, a megmunkáló gép jellegzetességei és lehetőségei, stb.). Ezért ezen vizsgálatok rendkívül szerteágazóak, és alapvetően felhasználó szempontú megközelítéssel, egy adott anyagminőség és anyagvastagság optimális vágásának meghatározására irányulnak akár pontossági, felületminőségi, hatékonysági, vagy akár gazdasági célkitűzéseken alapulnak.

### 1.3 CÉLKITŰZÉS

Az értekezés célja az abrazív vízsugaras vágás hatékonyságának és minőségének (beleértve a vágórés alakját és felületminőségét) vizsgálata azon technológiai paraméterek függvényében, amelyek egy átlagos felhasználó számára is változathatók. Ezek a vágófej előtoló sebessége ( $f$ ), az abrazív anyagáram nagysága (időegység alatt adagolt abrazív tömege) ( $\dot{m}_a$ ) és az alkalmazott víznyomás ( $p$ ).

Kiemelten kívánok foglalkozni az értekezésben a vágott felület érdességi jellemzőivel, ugyanis az átlagos érdesség tekintetében kapott irodalmi értékek meglehetősen ellentmondásosak, illetve nem egyértelműek. Ugyancsak kevésbé vizsgált terület a vágórés ferdeségének a technológiai adatoktól való függése, amelyet a szerzők többnyire nem komplexen kezelnek, jellemzően csak egy-egy paraméter függvényében vizsgálnak.

Az értekezés elkészítésével nem titkolt céloom volt az is, hogy hozzájáruljak az abrazív vízsugaras vágás magyar nyelvű szakirodalmának megteremtéséhez, terminusz technikuszainak kialakításához.

Kutatási feladatként az alábbiakat fogalmaztam meg:

1. A mérnöki gyakorlatban jól használható számítási módszer kidolgozása az abrazív vízsugaras vágás hatékonyságának növelésére. A modell segítségével az abrazív vízsugaras vágás anyagleválasztási folyamatainak elemzése és konkrét összefüggések felállítása a technológiai paraméterek és a hatékonyságot jellemző bevágási mélység között, azaz számítási módszer kidolgozása az átvágható anyagvastagság meghatározására.
2. A technológiai paraméterek és a felületi érdesség kapcsolatának vizsgálata. A vágott felület érdességét leginkább jellemző érdességi mérőszámok kísérleti meghatározása, összehasonlítása irodalmi adatokkal, az eredmények egyezőségének, esetleges eltéréseinek bemutatása és értékelése, illetve az eltérések okainak feltárása. A vizsgált anyagokra olyan matematikai összefüggés kidolgozása, amely a felületi érdesség változását a különféle technológiai paraméterek lehetőleg minél komplexebb figyelembe vételével képes leírni.
3. A vágórés alakjának (ferdeségének) vizsgálata az egyes technológiai paraméterek függvényében, valamint a paraméterek együttes hatásának elemzése az energia-bevitel és a vágórés-ferdeség kapcsolatának vizsgálatával, a vágott felület pontosságának egyértelműbb leírása céljából.

## 2. A FELADAT MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

A kutatási célok elérése érdekében ún. bevágási és átvágási kísérleteket végeztem különböző anyagokon a felhasználók által változtatható technológiai paraméterek, azaz a vágófej előtoló sebessége ( $f$ ), a víznyomás ( $p$ ) és az abrazív anyagáram ( $\dot{m}_a$ ) változtatása mellett. A bevágási kísérleteknél a bevágás maximális mélységét ( $h_{max}$ ), az átvágási kísérleteknél a felületi érdesség jellemző paramétereit, illetve a vágórés szélességi méreteit és az oldalak ferdeséget vizsgáltam.

A kutatáshoz szükséges megmunkálási kísérleteket a miskolci Bay Zoltán Kutatóintézet tulajdonában lévő abrazív vízsugaras vágóberendezésen végeztem. A vágógép 1996-ban került telepítésre az intézetben és Magyarország első vízsugaras vágóberendezése volt, amelyen éveken át folytattam kutatómunkát.

### 2.1 AZ ABRAZÍV VÍZSUGARAS VÁGÁS HATÉKONYSÁGA

A vágás minősége és hatékonysága különböző paraméterekkel jellemezhető: ilyenek például a megmunkált felület érdessége és pontossága, a vágórés mérete és alakja, szélessége, mélysége és ferdesége. A vízsugaras vágás hatékonyságának jellemzésére az irodalomban széles körben [14,15, 20, 21, 22] elfogadott paraméter az ún. bevágási mélység [23].

A vágási kísérletek során a technológiai paramétereket két csoportba soroltam, un. állandó és változtatott paraméterek csoportjába. Az állandó paraméterek értékeit a gép adottságai határozták meg, a változó értékeket előkísérletek alapján választottam meg. A vizsgált anyagminőségek az alábbiak voltak: AlMgSi<sub>0,5</sub> (EN AW 6060, DIN 3.3206) alumíniumötvözet, S235JR (1.0037) melegén hengerelt általános rendeltetésű ötvözetlen szerkezeti acél (MSZ EN 10025: 1998), X12Cr13 martenzites korrózióálló acél (MSZ EN 10088/2), Ti6Al4V titán ötvözet (ISO 5832-3: 1996), fehér márvány (Carrara márvány).

A vágási kísérleteket követően mértem a bevágási mélység nagyságát és megvizsgáltam, hogyan függ az értéke a változtatott technológiai paraméterektől. A kísérleti eredményeket kiértékelve megállapítottam az egyes technológiai paramétereknek a bevágási mélység változására gyakorolt hatását.

A paraméterek együttes hatásának vizsgálatára egy empirikus modellt alkalmaztam, amely

$$h = A \cdot \frac{p^B \cdot \dot{m}^C}{f^D} \quad (1)$$

alakban keresi a bevágási mélység ( $h$ ) nagyságát, ahol:

A – a függvény többváltozós regresszióval meghatározandó konstansa,

B,C,D – a függvény többváltozós regresszióval meghatározandó konstans kitevői,

h – bevágási mélység, mm

p – nyomás, MPa

$\dot{m}$  – abrazív tömegáram, g/min

f – előtoló sebesség, mm/min

A kísérleti eredmények alapján többváltozós regresszió alkalmazásával meghatározhattam az (1) összefüggés konstansait. Az így felállított matematikai összefüggések segítségével a bevágási mélység, és ezen keresztül az átvágható anyagvastagság, előzetesen számítható.

## 2.2 AZ ABRAZÍV VÍZSUGÁRRAL VÁGOTT FELÜLET ÉRDESSÉGE

A vízsugárral vágott felület minőségén elsősorban annak felületi érdességét, míg a pontosságán a vágórés ferdesége miatt kialakuló méreteltéréseket szokták érteni. A megmunkálás hatékonysága érdekében minden felhasználó törekszik a vágófej előtolásának értékét a lehető legnagyobbra megválasztani, de az előtolás növelése együtt jár a makro- és mikrogeometriai hibák növekedésével.

Az abrazív vízsugárral vágott felületek jellegzetessége, hogy a növekvő vágási mélység során a megmunkáló sugár veszít energiájából, aminek eredményeként a megmunkálás „lemerad” a sugár haladási sebességéhez képest, vagyis a sugár „elhajlik” és ez a változás a vágott felületen jól látható deformálódást okoz, ezért kialakulnak a valamennyi sugaras megmunkálásra jellemző elhajlási vonalak. A felületek egyenetlenségeinek különbözősége a belépő és kilépő oldalon általában szemmel is jól látható, az érdességi mérőszámok ezt a különbözőséget azonban nem mindig igazolják.

Az abrazív vízsugaras vágással megmunkált felületek érdességét számos szerző vizsgálta [24, 25, 26]. Kovacevic szisztematikusan elemezte a felületi érdesség változását a víznyomás függvényében, a vágott felület különböző mélységeiben [24].

A felületet jellemző érdességi paraméterek közül a gépészetben legáltalánosabban használt mérőszám az átlagos érdesség ( $R_a$ ). Az átlagos érdesség vonatkozásában közölt irodalmi adatok nem egyértelműek. Krajny [27] az átlagos érdesség sajátos változását írja le. Megállapítása szerint az átlagos érdesség változása különböző nyomások és előtoló sebességek mellett nem egyértelmű, bizonyos esetekben növekszik, máskor csökken a rétegmélység függvényében. Arola és Ramolu [28] öt különböző anyagminőség kísérleti vágásakor az átlagos érdesség 3-4  $\mu\text{m}$  közötti változását észlelte a rétegmélységtől szinte függetlenül. Hasonlóan az átlagos érdesség nem egyértelmű változásáról számol be Jegaraj és Babu [29], egy háromszintű kísérlet eredményeként, amelyben többek között a technológiai paramétereknek az átlagos érdességre gyakorolt hatását vizsgálták.

A megmunkált felület topográfiájának vizsgálatára átvágási kísérleteket folytattam 10 mm vastagságú AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben. A kísérletek eredményeiből következtetéseket vontam le arra vonatkozóan, hogyan függ az átlagos érdesség és a hullámosság nagysága a technológiai adatoktól, illetve ajánlást fogalmaztam meg a vízsugaras vágással megmunkált felület egyenetlenségeit legjobban jellemző mérőszám megválasztására. Meghatároztam azokat az empirikus összefüggéseket, amelyekkel a megmunkált felület hullámossága számítható.

Az elvégzett kísérleti vizsgálatok alapján elmondható, hogy a vízsugaras vágás technológiai adatainak megválasztásakor figyelemmel kell lenni a megmunkált felülettel szemben támasztott minőségi követelményekre. Ennek kapcsán fontos kérdés, hogy az elvárt felületminőséget milyen mérőszámmal jellemezzük. Bár az átlagos érdesség ( $R_a$ ) ma az iparban legelterjedtebben használt érdességi mérőszám, a kísérleti eredmények egyértelműen igazolják, hogy az abrazív vízsugárral megmunkált felületek minősítésére a kizárólag mikrogeometriai mérőszámok használata nem megfelelő. Így az átlagos érdesség helyett sokkal inkább ajánlható a hullámosság ( $W_t$ ) vagy a teljes profilhiba ( $P_t$ ) alkalmazása.

### 2.3 A VÁGÓRÉS ALAKJA ÉS FERDESÉGE

A vízsugaras vágás egyik meghatározó problematikája a vágórés alakja, amely alapvetően meghatározza a vágás pontosságát. A vágórés alakja összetett, de a vágott felületek szinte sosem párhuzamosak egymással és a sugár behatolásának irányával, hanem minden esetben alapvetően ferdeknek tekinthetők.

A vágórés alakját általában ferde síkokkal modellezzik. A vágórés jellemzésére a belépő és kilépő oldali vágórés szélességet ( $w_t$ ,  $w_b$ ) illetve az oldalferdeség szögét szokták használni ( $\Theta$ ). A vágórés fémes és kemény anyagoknál a gyakorlati vágásoknál legtöbb esetben a munkadarab felső részénél szélesebb, mint az alsó oldalon, ahol a sugár távozik a megmunkált darabból. Lágy anyagoknál (szivacsok, gumi, stb.) a széttartó vágórés is kialakul. Bizonyos esetekben az össze-, majd széttartás is megfigyelhető.

A vágórés alakját több szerző is vizsgálta. Öjmertz [15] megállapítása szerint a vágórés alakjának kézbentartása meglehetősen nehéz, mert az számos paramétertől függ. A technológiai adatok és a vágórés alakjának kapcsolatát mennyiségileg nem jellemzi, csak karakterisztikájukat közli. Más szerzők [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37] ha ismertetnek is konkrét mérési eredményeket, azokat mindig csak egyetlen technológiai adat függvényében elemezik, így összességében nehéz képet alkotni a technológiai paramétereknek a vágórés alakjára gyakorolt komplex hatásáról.

Chung és társai [35] szivós anyagokon végzett vizsgálataik alapján nem találtak egyértelmű összefüggést a víznyomás, illetve az abrazív anyagáram és a ferdeség között. Wang és Wong [36] megállapításai szerint a nyomás enyhén növeli a ferdeséget, de nagyobb nyomások alkalmazása mellett, amikor is a belépő oldali vágórés csaknem állandó, vagy akár csökken is, ez a tendencia nem egyértelmű. Az előtoló sebesség növelése növeli a ferdeség nagyságát, az abrazív anyagáram nagysága és a ferdeség között viszont nem sikerült egyértelmű kapcsolatot találniuk. Arola és Ramolu [38] szerint nagyobb (15 mm felett) anyagvastagságok esetén az egyes paraméterek hatása nem egyértelműsíthető a különböző paraméterek együttes – egymásnak akár ellentmondó - hatása miatt.

A vágórés ferdeségének meghatározására átvágási kísérleteket folytattam 10 mm vastagságú AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben és 25 mm vastagságú Ti6Al4V (ISO5232-3) titán ötvözetben. Vizsgálataim során a technológiai adatoknak a vágórés alakjára gyakorolt hatását elemeztem, oly módon, hogy megmértem a vágórés szélességét a be ( $w_t$ ) és a kilépő ( $w_b$ ) oldalon, és meghatároztam a vágórés ferdeségét ( $\Theta$ ).

Az elvégzett kísérletek alapján meghatároztam az egyes technológiai paramétereknek a vágórés alakjára gyakorolt hatását. Energia-bevitelen alapuló vizsgálattal elemeztem továbbá a technológiai paraméterek együttes hatását a vágórés alakjára. Ez a megközelítés magyarázatot ad a lágy anyagok vágásakor jelentkező lefelé bővülő vágórés kialakulására is. A bevitt energia és a vágórés alakjára vonatkozó elemzések azt mutatták, hogy a vágórés ferdesége, és ezen keresztül a vágás pontossága – alapvetően a vágás során bevitt energia mennyiségétől, illetve a megmunkált anyag minőségétől függ. Ily módon adott anyagminőségre és anyagvastagságra meghatározható, hogy milyen energia bevitellel kaphatunk párhuzamos vágott felületet.

### 3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az abrazív vízsugaras vágás témakörében elvégzett kutatásaim alapján az alábbi új tudományos eredményeket fogalmaztam meg.

I. A vizsgált megmunkált anyagokra gépspecifikus empirikus összefüggést határoztam meg a technológiai adatok és a vágás hatékonysága között. Ennek keretében:

- Az irodalomban ismert anyagleválasztási modellek közül, egy a végfelhasználók számára jobban használható, kísérleteken alapuló empirikus modell felhasználásával összefüggést határoztam meg a technológiai adatok és a vágás hatékonysága között. Meghatároztam az adott megmunkáló gépre és anyagokra érvényes paramétereket. A felállított összefüggésekkel adott vágási feladathoz szükséges technológiai paraméterek a vizsgált anyagminőségekre tervezhetők.
- A különböző anyagok megmunkálhatóságának vizsgálata alapján igazoltam, hogy az anyagleválasztás alapvetően szívós illetve rideg erózió révén történik; a fémes anyagok vágása jellemzően szívós, a rideg anyagoké alapvetően rideg erózióval történik, ezért adott esetben nagyon kemény anyagok is jól megmunkálhatók.

II. Meghatároztam azokat a jellegzetes felülettopográfiai mérőszámokat, amelyekkel az abrazív vízsugárral megmunkált felületek célszerűen jellemezhetők. Ennek során a következőket állapítottam meg:

- Meghatároztam, hogy egyértelmű összefüggés mutatható ki a technológiai adatok és a felület hullámossága és teljes profilhibája között. Az előtolás növelése dominánsan növeli a felület hullámosságát, az abrazív anyagáram és a nyomás növelése viszont csökkenti azt. Meghatároztam a hullámosság számítására alkalmas matematikai modell állandóit. Ezek az összefüggések az adott gépre és adott körülményekre érvényesek.
- Megállapítottam, hogy az abrazív vízsugárral megmunkált felület érdességének jellemzésére, az iparban ma széles körben használt átlagos érdesség helyett más mérőszámot, pl. a hullámosságot vagy a teljes profilhibát, célszerű alkalmazni.

III. Energia-beviteli megközelítés alapján, megállapítottam, hogy a vágórés alakja a bevitt energia nagyságával szabályozható, ezért meghatározható annak az energia-bevitelnek a nagysága, amely esetén közel párhuzamos vágott felületek biztosíthatók. Ennek keretében:

- Megállapítottam, hogy a megmunkált felület pontosságát alapvetően a vágórés mérete és alakja határozza meg. A vágórés alakja szinte mindig ferde, a ferdeség iránya jellemzően a megmunkált anyag minőségétől függ.
- Megállapítottam, hogy a vágórés ferdeségének mértéke alapvetően a megmunkálás során bevitt energia mennyiségétől függ, azzal szabályozható.



- Az energia-beviteli megközelítés segítségével megmagyaráztam a nehezen vágható anyagoknál tapasztalt szűkülő és a könnyen vágható anyagoknál tapasztalható bővülő vágórés kialakulását is.
- Bizonyítottam, hogy a közel párhuzamos vágási felületek elérése lehetséges, és adott energia-bevitel mellett a megfelelő technológiai paraméter együttes ehhez megválasztható.

#### 4. NEW SCIENTIFIC RESULTS

On the basis of my research work performed in abrasive waterjet cutting the following new scientific results were achieved.

- I. I defined a machine-tool specific empirical relationship between the technological parameters and the efficiency of the cutting.
  - An empirical model based on the experiments has been set up to define the relationship between the technological parameters and the cutting efficiency. The proposed model is more convenient to use by the end-users comparing to those models published in the professional literature. I have determined the parameters valid for the applied machine-tool and given material qualities. Using these expressions, the technological data for a given task and investigated materials can be planned.
  - On the basis of machinability of different materials I proved that material removal basically occurs either by ductile or brittle erosion. Cutting of metallic material mainly occurs by ductile erosion while rigid materials are cut by brittle erosion. This is the reason why very hard materials can be cut easily.
- II. I specified those surface topography parameters, suitable for characterization of the surfaces machined by abrasive waterjet cutting.
  - I determined a unique and unambiguous relationship between the technological parameters of cutting and the waviness and total profile error of the surface. Increasing the feedrate significantly increases the waviness of the surface, while the increase of the pressure and the mass flow rate decreases it. I have determined the constants of the mathematical model suitable to calculate the waviness. These expressions are valid for the applied machine-tool under given circumstances.
  - I have pointed out that for the characterisation of the surface roughness of surfaces created by abrasive waterjet cutting, the waviness or the total profile error is more appropriate than the average surface roughness, which is widely used in the industry.
- III. On the basis of energy-input approach I have concluded that the form of the cutting gap can be controlled by the volume of the input energy, thus the amount of the energy input to provide near parallel cut surfaces can be determined.

- I have pointed out that the accuracy of the cut surface is basically defined by the size and form of the cutting gap. Cutting gap is usually tapered, orientation of the taper is mainly depends on the quality of machined material.
- I established that the extent of tapering of the cutting gap basically depends on the quantity of the energy-input, and can be controlled by it.
- Applying the energy-input approach I explained the formation of narrowing and expanding cutting gap forms at different materials (e.g. hard to cut and easy to cut materials).
- I proved that near parallel cut surfaces can be reached and the appropriate technological parameters for given energy-input can be determined.

## 5. A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

Az értekezésemben megfogalmazott új eredmények több szempontból is hasznosíthatók a gyakorlati felhasználók számára. A vizsgált anyagminőségek vonatkozásában olyan ténylegesen használható matematikai összefüggéseket állítottam fel, amelyekkel előre meghatározhatók adott technológiai adatokkal átvágható anyagvastagságok.

A felületi érdesség tekintetében felhívtam a figyelmet, hogy a szokásosan használt átlagos érdesség nem alkalmas az abrazív vízsugárral vágott felületek minősítésére.

A vágórészel kapcsolatos megállapítások pedig rávilágítanak arra, hogy anyagminőségtől függően ugyan, de lehetséges olyan technológiai adatok megválasztása, melyekkel olyan energia-bevitel érhető el a megmunkálás során, mellyel közel párhuzamos vágórés biztosítható.

A disszertációmban ismertetett kutatómunka számos irányban továbbfejleszthető.

A hatékonyság vizsgálata témakörben a továbbfejlesztés egyik lehetséges útja, hogy többféle anyagminőségre meghatározva az alkalmazott empirikus modellt, összefüggést keressünk a modell konstansai és a megmunkált anyag mechanikai tulajdonságai között. Szívós anyag esetén ez a mechanikai jellemző vélhetően a keménység, rideg anyag esetén pedig valamely törési jellemző, pl. a törési szívóosság lehet.

A felületminőség tekintetében továbblépési lehetőség további matematikai modellek felállítása más anyagminőségekre, illetve további érdességi mérőszámok bevonása a vizsgálat körébe (pl. hordozóhossz viszonyszám). Itt elsősorban az átlagos érdesség véletlenszerű változása szorul további magyarázatra, ami megítélésem szerint elektronmikroszkópos vizsgálatok, illetve a szemcse és a felület ütközésekor lejátszódó jelenségek elemzése révén lehetséges.

A vágórés ferdeségének témakörében további elemzés tárgya lehet, hogy a belépő illetve kilépő oldali vágórészek milyen energia-bevitel esetén azonosak különböző megmunkált anyagok esetén és hogyan változik ezen pontok helye a megmunkált anyagminőségek függvényében, illetve mi ennek a változásnak a kapcsolata az anyag mechanikai jellemzőivel.

## 6. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN

### Folyóiratcikk

1. Bodnár, K – Maros, Zs, *A vízsugaras vágás technológiai paramétereinek meghatározása felhasználóbarát webes felületen*; Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek Műszaki kiadvány, XIII. évfolyam – 2008/2., pp8-11
2. Maros, Zs.: *A vágórés pontosságának és alakjának vizsgálata vízsugaras vágáskor*, Gépgyártás XLVI. Évf., 2006 1-2 sz., pp3-6
3. Maros, Zs.: *Vízsugárral vágott felület érdessége*, GÉP LV évf., 2004/4-5, pp 19-22
4. Deszpoth, I - Maros, Zs.: *Vízsugaras vágás alkalmazása*, GÉP LV évf., 2004/4-5, pp 36-39
5. Geiger, M. – Kach, A. - Hohenstein, R. - Maros, Zs.: *Fuzzy-Logic Based Knowledge Representation for Water Jet Cutting of Light-Weight Composites*, Machining Science and Technology, Volume 7, Issue 3 January 2003 , pages 349 – 360
6. Maros, Zs.: *Experimental Investigation of Efficiency and Quality of Abrasive Waterjet Cutting*, Production Processes and Systems, Publications of the University of Miskolc, Miskolc University Press, Volume 1 (2002), pp229-236
7. Maros, Zs.: *Az abrazív vízsugaras vágás hatékonyságának és minőségének kísérleti vizsgálata*, Gépgyártás XLII évf. 2002. 1-2., pp51-56
8. Deszpoth, I. - Maros, Zs.: *Különböző anyagok vágása abrazív vízsugárral*, Hegesztéstechnika, 2001/1, pp26-28
9. Deszpoth, I. - Maros, Zs.: *Waterjet Cutting Machine for Cutting Different Materials*, Gépgyártástechnológia, XXXVIII./9 1998., pp34-39

### Konferencia megjelent anyaga

10. Bodnár, K - Maros, Zs: *User Friendly Determination of Technological Parameters at Waterjet Cutting*, microCAD2009 International Scientific Conference, 19-20 March 2009, Section M, pp93-98
11. Maros, Zs: *Accuracy of Surfaces Cut by Abrasive Waterjet*, ICT-2007, International Conference on Tools, Miskolc, 2007, pp.339-344.
12. Bodnár, K-Maros, Zs: *Mathematical Estimation of Depth of Kerf at Waterjet Cutting*, ICT-2007, International Conference on Tools, Miskolc, 2007, pp.333-338.

13. Bodnár, K-Maros, Zs: *Connection Between the Efficiency and the technological Parameters at Waterjet Cutting*, microCAD 2007 International Scientific Conference, Miskolc, 22-23 March 2007, Section L, pp37-42
14. Maros, Zs.: *Form of Cutting Gap at Waterjet Cutting*, Annals of MteM for 2005 & *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference Modern Technologies in Manufacturingce*, Cluj-Napoca, 6-8 October 2005, pp281-284
15. Maros, Zs. - -Tóth, L: *Experimental Investigation of Model for Material Removal at Abrasive Waterjet Cutting*, 11<sup>th</sup> International Conference on Tools, ICT-2004, Sept. 9-11, Miskolc, pp213-218
16. Maros, Zs.: *Quality and Efficiency at Abrasive Waterjet Cutting of an Aluminium Alloy*, 6<sup>th</sup> International Conference of Modern Technologies in Manufacturing MteM 2003, Kolozsvár, pp307-310
17. Geiger, M – Kach, A. – Hohenstein, R. – Maros, Zs.: *Fuzzy-Logic knowledge representation for water jet cutting of light-weight composites*, 3<sup>rd</sup> CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, ICME 2002, 2002, Ischia, Italy, pp189-194
18. Maros, Zs. – Monno, M.: *Method for Optimization of Technological Parameters at Waterjet Cutting*, microCAD 2001 International Scientific Conference, Miskolc 1-2 March 2001, section H, pp107-112
19. Brandt, S. - Maros, Zs. - Monno, M.: *AWJ Parameters Selection - a Technicaland Economical Evaluation*, 15<sup>th</sup> International Conference on Jetting Technology, Ronneby, Sweden, 6-8 September 2000., pp353-366
20. Maros, Zs.: *Abrasive Water Jet - an Efficient Cutting Tool for Difficult-to-Machine Materials*, 10<sup>th</sup> International Conference on Tools ICT-200, 6-8 September 2000., Miskolc, Hungary, pp353-358
21. Deszpoth, I - Maros, Zs.: *Nontraditional Machiningby Abrasive Waterjet Cutting*, Intelligent Machines and Technologies DAAM-Cepus Workshop, Miskolc, 1999. május. 27-29, pp121-126
22. Deszpoth, I. - Maros, Zs.: *Waterjet Cutting Machine for Cutting Different Materials*, XIII. Szerszámgép Konferencia, Miskolc, 1998. Október 26.-27.

## A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- 1 Hashish, M.: *Trends Towards New Applications of Waterjet Technology*, Abrasive Water Jet, A View on the Future, Associazione Italiana Waterjet, Edited M. Monno, M. Strano 2000, pp1-31
- 2 Kovacevic R. - Hashish M. - Mohan R. - Ramulu M. - Kim J. - Geskin S.: *State of the Art Research and Development in Abrasive Waterjet Machining*, Transactions of ASME, 119(1997), pp65-75
- 3 Lombardi, R.: Ultra High Pressure Non-Abrasive Polymer Jetting, A Production Environment Implementation, Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, WJTA, Detroit, Michigan, August 1997, pp251-256
- 4 Agus, M. – Bortolussi, A. – Viccu, R.: *Abrasive Performance in Rock Cutting with AWJ and ASJ*, Proceedings 8th International Conference on Jet Cutting Technology, Water Jet Techn. Assoc., Vol1 1995, pp259-282
- 5 Vasek, J. – Martinec, P., Foldyna, J.: *Influence of Properties of Garnet on AWJ Cutting Process*, Proceedings of the 7th American Waterjet Conference, Water Jet Techn. Assoc., Vol1 1993, pp365-387
- 6 Foldyna, J. – Martinec, P.: *Abrasive Material in the Process of AWJ Cutting*, Jet Cutting Technology (ed. Lichtarowic), 1992, pp135-147
- 7 Geskin, E.S. - Timenetskiy L. - Li, F. - Meng, P. – Shishkin, D.: *Investigation of Icejet Machining*, Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, WJTA, Detroit, Michigan, August 1997, pp281-290
- 8 Galeck, I. – Vickers, G.W.: *The Development of Ice Blasting for Surface Cleaning*, Proceedings of the 6th International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA 1982, pp59-79
- 9 Svanick, G.: *Liquid Nitrogen Jets Remove Rocket Propellant*, WJTA Jet News 1994, pp1-4
- 10 Dunskey, C.M. – Hashish, M.: *Feasibility Study of Machining with High Pressure Liquefied CO<sub>2</sub> Jets*, Manufacturing and Science Engineering Book ASME 1994, pp453-460
- 11 Brandt, C – Louis, H. – Meier, G. – Tebbing, G.: *Abrasive Suspension Jets at Working Pressure up to 200 MPa*, 12th International Conference on Jetting Technology, 1994, London: Mechanical Engineering Publications Limited S, pp489-510
- 12 Brandt, C. – Louis, H. – Ohlsen, J. – Tebbing, G.: *Process Control of Abrasive Suspension Jets*, Jetting Technology, BHR Group, 1996, pp563-581

- 13 Zeng, J. – Wu, S. – Kim, T.J.: *Development of a Parameter Prediction Model for Abrasive Waterjet Turning*, Proceedings 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen France, 1994, pp601-617
- 14 Hashish, M.: *The Waterjet as a Tool*, 14th International conference on Jetting Technology, Brugge, Belgium, 21-23 September 1998, ppXX-iXLIV
- 15 C. Öjmertz: *A Study on Abrasive Waterjet Milling*, Thesis for the Degree of PhD Chalmers University of Technology Göteborg Sweden, 1997, p81
- 16 Fukunishi, Y. – Kobayashi, R. – Uchida, K.: *Numerical Simulation of Striation Formations on Water Jet Cutting Surface*, Proc. of 8th American Waterjet Conference, Houston, 1995, pp657-670
- 17 Sawamura, T. – Fukunishi, Y. – Kobayashi, R.: *Three Dimensional Model for Waterjet Cutting Simulation*, Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, WJTA, Detroit, Michigan, August 1997, pp15-27
- 18 Bittar J.: *A study of erosion phenomena – Part I, II*, Wear, 6(1963), pp 5–21 and pp 169–90.
- 19 Chen F. L. - Siores E. - Morsi Y. - Yang W.: *A study of Surface Striation Formation Mechanisms Applied to Abrasive Waterjet Process*, Proceedings of the CIRP, (1997), pp570–575.
- 20 Louis, H.: *Abrasive water jets: a review*, 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, February 3-5, 1998, New-Delhi India, pp321-329
- 21 Mombert, A.W. - Kovacevic, R.: *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer-Verlag London Limited, 1998, p394
- 22 Summers, D.A.: *Waterjetting Technology*, Alden Press Oxford, 1995, p875
- 23 Brandt, S. - Maros, Zs. - Monno, M.: *AWJ Parameters Selection - a Technical and Economical Evaluation*, 15th International Conference on Jetting Technology, Ronneby, Sweden, 6-8 September 2000., pp353-366
- 24 Kovacevic, R.: *Surface Texture in Abrasive Waterjet Cutting*, Journal of Manufacturing Systems, 1991, 10(1), pp16-32
- 25 Guo, N.S. – Louis, H. – Meier, G.: *Surface Structure and Kerf Geometry in Abrasive Water Jet Cutting: Formation and Optimization*, 7th American Water Jet Conference, Seattle, Washington, 1993, pp1-25
- 26 Hashish, M.: *Characteristics of Surfaces Machined with Abrasive-Waterjets*, Journal of Engineering and Technology, Vol113, 1991, pp354-362
- 27 Krajny, Z.: *Vodný lúč v praxi.*, Bratislava, EPOS, 1998, , p384

- 28 Arola, D. - Ramulu, M. : *Material Removal in Abrasive Waterjet Machining of Metals Surface Integrity and Texture*, Wear 210 (1997), pp50-58
- 29 Jegaraj, J.J.R. - Babu, N.R.: *A soft computing approach for controlling the quality of cut with abrasive waterjet cutting system experiencing orifice and focusing tube wear*, Journal of Materials Processing Technology 185 (2007), pp217–227
- 30 Annoni, M.-Monno, M.- Vergari, A.: *The Macrogeometrical Quality of the Kerf in the AWJ Process Parameters Selection*, 2nd International Conference on Water Jet Machining (WJM 2001), Kracow, November 2001, pp56-63
- 31 Hamatani, G. – Ramulu, M.: *Machinability of High Temperature Composites by Abrasive Waterjet*, Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of the ASNE, 1990 112(4), pp381-386
- 32 Hocheng, H. – Chang, K.R.: *Material Removal Analysis in Abrasive Waterjet Cutting of Ceramic Plates*, Journal of Material Processing Technology, 1994 40(3-4), pp287-304
- 33 Chen, L. – Siores, E. – Wong, W.C.K.: *Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Cutting of Ceramic Materials*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(11), pp1201-1206
- 34 Arola, D. - Ramulu, M. : *A Study of Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Machining of Graphite/Epoxi Composite*, Journal of Engineering Material and Technology, Transaction of the ASNE, 1996 118(2), pp256-265
- 35 Chung, Y. -, Geskin, E.S. - Singh, P.: *Prediction of the Geometry of the Kerf Created in the Course of Abrasive Waterjet Machining of Ductile Materials*. In: Jet Cutting Technology, Kluwer, Dordrecht, 1992, pp525-541
- 36 Wang, J. – Wong, W.C.K.: *A Study of Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Coated Sheet Steels*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(6), pp855-870
- 37 Wang, J: *A Machinability Study of Polymer Matrix Composites Using Abrasive Waterjet Cutting Technology*, Journal of Material Processing Technology, 94 (1999) pp30–35
- 38 Arola, D. - Ramulu, M. : *A Study of Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Machining on Graphite/Epoxi Composite*, Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of the ASNE, 1996 118(2), pp256-265