

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



AZ ABRAZÍV VÍZSUGARAS VÁGÁS MINŐSÉGÉNEK ÉS HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

PhD ÉRTEKEZÉS

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.

**„A legszebb, amit átélhetünk, a dolgok titokzatossága”
(Albert Einstein)**

TARTALOM

A TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA.....	4
JELÖLÉSEK	6
1. BEVEZETÉS.....	7
1.1 Előzmények	7
1.2 A vízsugaras vágás kutatásának jellegzetes irányai.....	7
1.3 Célkitűzés	8
2 A VÍZSUGARAS VÁGÁS ELMÉLETI ALAPJAI	9
2.1 A vízsugaras vágás jellegzetes eljárásai	9
2.2 A vízsugár sajátosságai.....	11
2.3 Anyagleválasztás abrazív vízsugárral.....	14
2.4 A vízsugaras vágás hatékonysága.....	19
2.5 A megmunkált felület érdessége.....	22
2.6 A vágórés alakja és ferdesége.....	25
3 A KUTATÁSI FELADAT MEGFOGALMAZÁSA	28
4 KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK.....	29
4.1 A vízsugaras vágási kísérletekhez használt berendezés	29
4.2 Abrazív por	30
4.3 Mérőberendezések és eszközök	31
4.4 Megmunkált anyagok	33
5 AZ ABRAZÍV VÍZSUGARAS VÁGÁS HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA.....	36
5.1 A bevágási kísérletek kiértékelése.....	36
5.1.1 Alumíniumötvözet.....	36
5.1.2 Szerkezeti acél	41
5.1.3 Fehér márvány	45
5.1.4 A különböző anyagok összevetése	49
5.2 A technológiai adatok és a bevágási mélység matematikai kapcsolata	50
5.3 Következtetések.....	53

6	A MEGMUNKÁLT FELÜLET MINŐSÉGE ÉS PONTOSSÁGA	56
6.1	Abrazív vízsugárral vágott felület érdessége	56
6.1.1	Kísérleti eredmények	57
6.1.2	A felületi érdesség matematikai modellje	66
6.1.3	Következtetések	67
6.2	A vágórés pontossága	69
6.2.1	Kísérleti eredmények	70
6.2.2	A vágórés ferdeségének vizsgálata az energiabevitel alapján	74
6.2.3	Következtetések	77
7	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	79
8	A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI	81
9	ÖSSZEFOGLALÁS	82
10	SUMMARY	84
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	86
	PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN	87
	IRODALOM	89
	FÜGGELÉK	94

A TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA

Maros Zsolt

A VÍZSUGARAS VÁGÁS MINŐSÉGÉNEK ÉS HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

Maros Zsolt PhD értekezésének témája hazánkban az 1990-es évek végén meghonosodott új technológiához, a vízsugaras vágáshoz kötődik. A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány vezetése alapításától kezdve (1992-1993) tudatosan törekedett arra, hogy unikális berendezésekkel hozzájáruljon a hazai technológiai vagy vizsgálati színvonal emeléséhez. E törekvés egyik eredménye volt az, hogy 1996-ban beszerzésre került hazánk első vízsugaras vágóberendezése, amely a miskolci egységbe, a Logisztikai és Gyártástechnikai Intézetben került felállításra. E tény természetesen előnyökkel és hátrányokkal is járt az intézet technológiai eljárásokkal foglalkozó szakemberei, így Maros Zsolt számára is. Előnyként kiemelhető az, hogy megjelent egy technológia hazánkban, és aki először bekapcsolódik ennek kutatásába az mindenképpen meghatározó „történelmi alakja” lesz a hazai technológia ezen ágának. A hátrány viszont abból adódott, hogy nem volt semmilyen hazai tapasztalat, semmilyen szakirodalom magyar nyelven és mindenfajta szakmai építkezést a külföldi szakemberek bázisán kellett megkezdeni. Maros Zsolt nyelvtudása, korábbi szakmai ismeretei, kapcsolatrendszere lehetővé tette azt, hogy számára nem jelentett túlságosan bonyolult akadályrendszert az említett hátrányok leküzdése. A berendezés felállítását követően kitűnő szakember állomány csoportosult a vízsugaras vágóberendezéshez, amelyen a korábban nem, vagy csak körülményesen és egyszerű alakzatokban vágható anyagok is egyszeriben tetszés szerinti síkbeli alakzat formájában vághatóvá váltak. Ez a tény – más kézenfekvő előnnyel – és a technológiához kötődő reklámkampányok (mert az intézetnek egyik bevételi forrását jelentette a berendezés folyamatos üzemeltetése) inficiálták, kikényszerítették a technológiában rejlő lehetőségek tudományos szintű kutatását. Maros Zsolt volt az, aki időben és kellő intenzitással kezdett a témával foglalkozni olyan szinten is, hogy az EU által finanszírozott kutatásokba is bekapcsolódott. E tény lehetővé tette számára, hogy tudatosan felépítse kutatási tervét. Ebben nyilvánvalóan segítségére voltak azon szakemberek is, akik az EU finanszírozású projektben társként dolgoztak. Az ilyen projekteknél vállalt feladatok megoldásának eredményeit egyrészt a nemzetközi szakmai élet értékelte, másrészt ezek szolgálták Maros Zsolt további kutató munkájának biztos alapjául és – a Jelöltre jellemző alaposságú – további kérdésfeltevéseinek kiindulópontjául. Így a technológia sajátosságait, határainak korlátait feszegető olyan kérdések fogalmazódtak meg, hogy

- miképpen és hogyan definiálható a vágott felület minősége az anyagi sajátosságok figyelembe vételével,
- hogyan alakul a vágórés alakja az anyagok minőségének és a vágás technológiai paramétereinek függvényében,
- milyen vágási, technológiai korlátok adódnak a vágandó anyag sajátosságainak figyelembevételével?

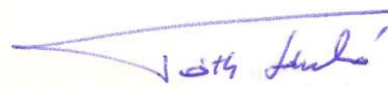
A kérdéseket még lehetne sorolni, hiszen egy munkát csak abbahagyni lehet és nem tökéletesen befejezni. Maros Zsolt is ezt tette, és számos újabb kérdést felvetve (pl. a vágás mikro-mechanizmusának megismeréséhez kötődő OTKA támogatású kutatásaiban) egyes részfeladatokat kellő mélységgel megválaszolva lépett fokozatosan előbbre és előbbre. Eredményeit publikálva, ill. a munkahely, a BAY-LOGI reklámtevékenységével elérte azt, hogy a vízsugaras vágási technológia hazánkban kivívta az őt megillető helyet. Az intézet korábbi partnerei (akiknek a BAY-LOGI szolgáltatott egyedi megbízás, szerződés alapján) többen belátták, hogy piaci tevékenységüket nagyban segítheti az, ha önállóan üzemeltetnek vízsugaras vágó berendezést. Tipikusan ilyen példának tekinthető a gerincprotéziseket gyártó egri cég, amelytől az intézet évi 30-40 mFt-os megbízást kapott még az elmúlt évtized elején is. Napjainkban a hazánkban üzemeltetett ilyen típusú berendezések száma a tíz körül van.

Maros Zsolt tudományos igényű és mélységű kutatásainak eredményei röviden a következőkben foglalhatók össze:

- Elindította hazánkban egy unikális, előzmények nélküli technológiai jellegű tématerület kutatásait.
- Olyan eredményeket ért el, amelyek kiindulási pontjai lehetnek a további hazai kutatásoknak.
- Az eredményeit képes volt tudományos igényű, tézisekben összefoglalni.
- Az eredményei, felállított modelljei nem mondanak ellent a tapasztalatoknak következésképpen a leírt jelenségek, tapasztalatok egy lehetséges modelljeként elfogadhatók.
- Eredményeihez saját munkájával jutott, azt sajátjának tekintheti.

Az előzők figyelembevételével, jó szívvvel javaslom az értekezés elfogadását és sikeres védelem esetén a PhD fokozat megítélését a Miskolci Egyetem Sályi István Doktori Iskola döntéssel felhatalmazott képviselőinek.

Miskolc, 2011. április 24.



Tóth László, DSc
egyetemi tanár, tudományos vezető

JELÖLÉSEK

b:	résszélesség,	mm
C_l :	leválasztási konstans,	-
C_f :	súrlódási együttható,	-
d_m :	abrazív fúvóka átmérője,	mm
d_n :	vizes fúvóka átmérője,	mm
d_{str} :	a vágó sugár átmérője,	mm
e:	anyagegyüttható,	-
E_m :	a sugár által a vágás során bevitt elméleti energia	J
f:	vágófej előtoló sebessége,	mm/min
g:	nehézségi gyorsulás,	m/s ²
h:	bevágási mélység,	mm
h_b :	a fúvókába lépés magassága,	mm
h_c :	vágási zóna mélysége,	mm
h_d :	deformációs zóna mélysége,	mm
h_k :	a fúvókából történő kilépés magassága,	mm
h_{max} :	maximális bevágási mélység,	mm
$\dot{m}_a$:	abrazív anyagáram nagysága,	g/s
p:	víznyomás,	MPa
p_{at} :	az atmoszférikus nyomás,	MPa
P_t :	teljes profilhiba,	μm
R_a :	átlagos érdesség,	μm
R_t :	maximális érdesség,	μm
R_z :	egyenetlenség magasság,	μm
t_a :	a sugár behatási ideje,	s
t_n :	anyagvastagság,	mm
T_R :	belépő és kilépő oldal közötti vágórés különbség,	mm
v:	a kiáramló víz (közeg) sebessége,	m/s
v_p :	a víz sebessége a fúvóka előtt,	m/s
w_b :	vágórés szélessége a kilépő oldalon,	mm
$w_{p,}$:	a részecske sebessége,	m/s
$w_{p,A}$:	részecske ütközési sebessége,	m/s
$w_{p,C}$:	részecske forgácsoló sebessége,	m/s
W_t :	hullámosság,	μm
w_t :	vágórés szélessége a belépő oldalon,	mm
η:	konstans,	-
σ:	az anyag folyáshatára,	MPa
μ:	veszteségi tényező,	-
θ:	vágórés ferdeség,	°
ρ:	közeg sűrűsége,	kg/m ³
ρ_w :	a víz sűrűsége,	kg/m ³

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

A vízsugár 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 nagytermelékenységű 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 lehetségessé, amikor a 80-as évek elejére kifejlesztették azokat a nyomásfokozó rendszereket, amelyek képesek voltak 3000 bar fölötti víznyomást is előállítani. Ekkor kezdődtek meg azok a kísérletek, amelyekben az addig tiszta vízsugárhoz már abrazív port adagoltak. 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 a területtel kapcsolatos kutatásaimat. Mivel a vízsugaras vágás területén magyar nyelvű szakirodalom gyakorlatilag nem állt és ma sem áll rendelkezésre, egyik célom éppen 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 CO₂-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 a lejátszódó folyamatok 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 anyagminősége és szemcsenagysága, a vágó fej előtoló sebessége, az abrazív anyagáram nagysága, az alkalmazott víznyomás, a megmunkáló gép jellegzetességei és lehetőségei stb.). Ezért ezen vizsgálatok rendkívül szerteágazóak, és alapvetően felhasználó orientált megközelítéssel, egy adott anyagminőség és anyagvastagság optimális vágásának meghatározására irányulnak, akár pontossági, felületminőségi, hatékonysági vagy akár gazdasági célokat kitűzve maguk elé.

1.3 CÉLKITŰZÉS

Az értekezés célja az abrazív vízsugaras vágás hatékonyságának és pontosságának (beleértve a vágórés alakját és felületminőségét) vizsgálata a technológia paraméterek függvényében. Az elsődleges és másodlagos fűvókák anyagának és geometriájának vizsgálata, tekintettel a fűvókák árara és a levonható következtetésekhez szükséges kísérletek (vagyis fűvókák) számára, gyakorlatilag csak a nagy gyártók számára elérhető [20, 21, 22, 23]. Az abrazív anyag minőségének változtatása, a későbbi felhasználásokat figyelembe véve (gyakorlatilag az egész világon gránát port használnak), nem tűnik a gyakorlat számára célravezetőnek, az abrazív szemcsék nagyságának változtatása pedig, szintén a fűvókák átmérőjének változtatását vonná maga után, ami az előbb említettek miatt e kutatásban nem valósítható meg. Ezért jelen kutatás, azon technológiai paraméterek függvényében vizsgálja a vágás hatékonyságát és pontosságát, amelyek egy átlagos felhasználó számára is változathatók. Ezek a vágó fej előtoló sebessége (f), az abrazív anyagáram (időegység alatt adagolt abrazív tömege) nagysága ($\dot{m}_a$) 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 függősége, amelyet a szerzők nem komplexen kezelnek, többnyire csak egy-egy paraméter függvényében vizsgálnak.

Az értekezés elkészítésével nem titkolt célom volt az is, hogy hozzájáruljak az abrazív vízsugaras vágás magyar nyelvű irodalmi alapjainak és terminusz technikuszainak kialakításához.

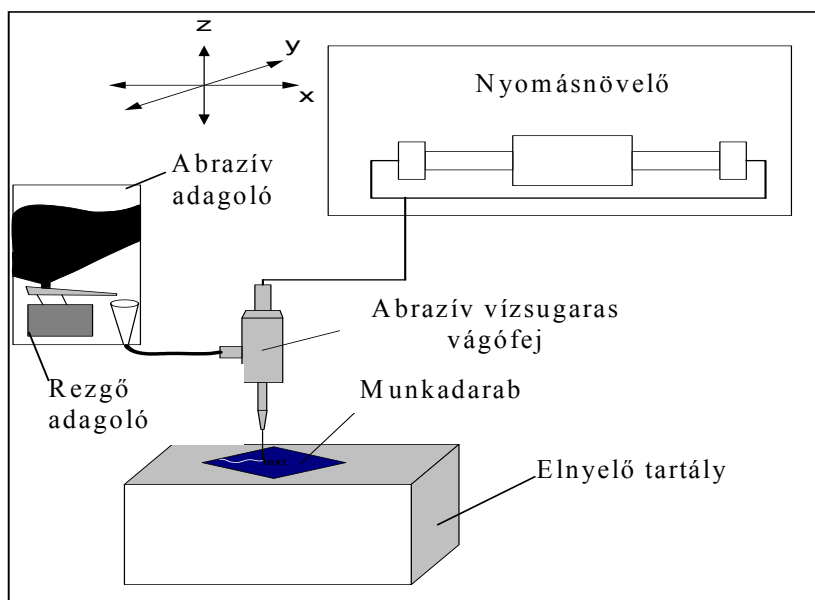
2 A VÍZSUGARAS VÁGÁS ELMÉLETI ALAPJAI

A nagynyomású abrazív vízszugaras vágás napjainkra a különböző elveken működő nem hagyományos megmunkálásoknak (lézersugaras- és plazmasugaras vágás, szikraforgácsolás, stb.) egyre inkább vetélytársává vált. A vízszugaras vágás annak köszönheti egyre fokozódó népszerűségét, hogy csaknem valamennyi anyag megmunkálható ilyen módon, és az átvágható anyagvastagság alig limitált. Összehasonlítva a hőenergiát hasznosító sugaras megmunkálásokkal (lézer, plazma, lángvágás stb.) az abrazív vízszugaras vágás egy szélesebb körben alkalmazható, környezetbarát megmunkálásnak tekinthető. Gyakorlatilag minden anyag megmunkálható, az átvágható anyagvastagság jóval kevésbé limitált, a megmunkálási hőmérséklet alacsony, így nem érik káros behatások a megmunkált felületet és nem keletkeznek egészségre ártalmas melléktermékek sem.

A vízszugaras vágás előnyei illetve hátrányai alapján jól kiegészíti a hőhatást hasznosító vágási eljárásokat. Ott alkalmazható sikerrel, ahol a hőhatással működő eljárások technikai vagy gazdaságossági korlátokba ütköznek.

2.1 A VÍZSUGARAS VÁGÁS JELLEGZETES ELJÁRÁSAI

A hagyományos vízszugaras vágórendszer fő részei az 1. ábrán láthatók: nyomásnövelő szivattyú (nagy nyomású vízszugár előállítás), abrazív poradagoló rendszer, vágó fej (abrazív vízszugár előállítás), CNC vezérlésű manipulátor és tartály, mely a munkadarabból kilépő vízszugár energiáját nyeli el.



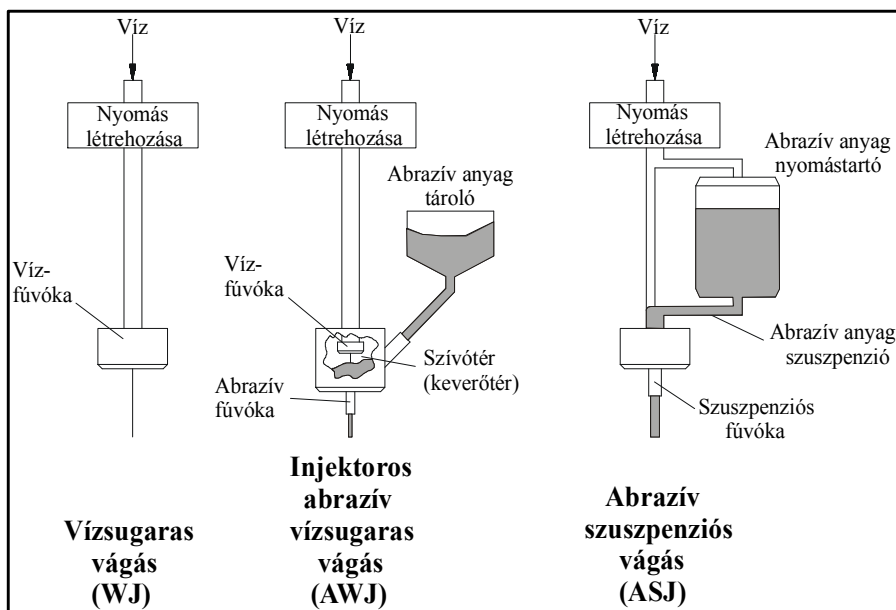
1. ábra: *Abrazív vízszugaras vágórendszer elemei*

A vízszugaras vágási technológia alapvető jellemzője az igen nagy nyomás (300-400 MPa) és a kis folyadékszállítás (1-3 l/min). A megmunkáló sugár alapvetően kétféle típusú lehet [25] (2. ábra):

- Tiszta vízszugaras (WJ - Waterjet) vágás

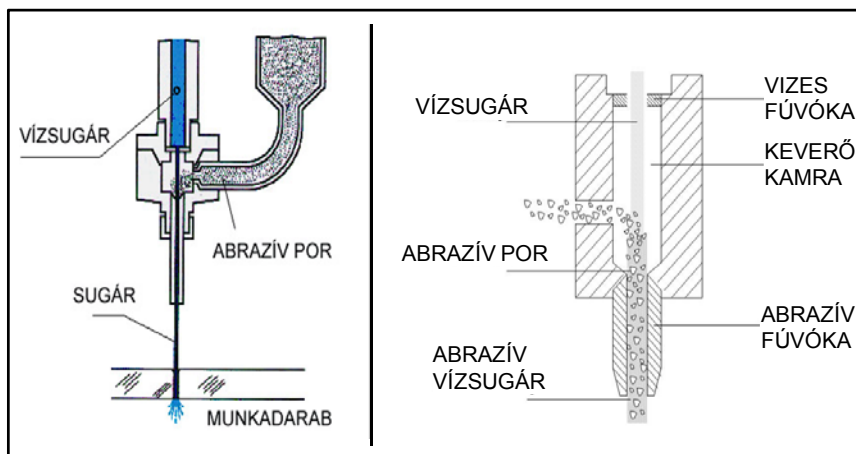
- Abrázív vízszugaras vágás:
 - Injektoros abrazív vízszugaras (AWJ - Abrasive Waterjet) vágás
 - Abrázív szuszpenziós (ASJ Abrasive Suspension Jet) vágás

Tiszta vízszugaras vágásnál a víz eróziós hatását használják fel anyagleválasztásra [14]. A nagynyomású vizet igen kis átmérőjű fűvókán (0,08...0,4 mm) átvezetve egy igen nagy energia sűrűségű és nagy sebességű (500...1000 m/s) sugart kapunk. A tiszta vízszugár gyakorlati alkalmazása a viszonylag kis anyagleválasztási képessége miatt, erősen korlátozott és elsősorban a nemfémek és nem keramikai anyagok (műanyagok, gumi, fa, papír, élelmiszerek stb.) vágására jellemző. A vízszugár vágási tulajdonságai hosszúlánccú folyékony polimerek hozzáadagolásával javíthatók.



2. ábra: Víz- és abrazív vízszugár előállítási módjai

Az abrazív vízszugaras vágásnál az abrazív port kétféleképpen adagolhatjuk a vízszugárhoz (2. ábra). Az AWJ eljárásnál a port egy ún. keverő kamrában adagoljuk a vizes fűvókából kilépő sugárhoz (3. ábra), és a por egy másodlagos fűvókában (vagy másképp fókuszáló csőben) gyorsul fel azután a víz részecskéihez közel hasonló sebességre.



3. ábra: Injektoros rendszerű (AWJC) abrazív vágófej kialakítása

Az ASJ eljárás esetén előzetesen összekevert víz és por alkotta iszapot juttatunk a vízszugárba. Míg az előbbi módszer esetén levegő is jelen van a sugárban (amely a sugár térfogatának akár 90%-át is elérheti [24]), addig ASJ eljárásnál a sugár csak két fázisból (víz és abrazív por) áll. Ebből következik, hogy az ASJ módszer hatékonysága jóval nagyobb, ugyanakkor több technológiai nehézséget vet fel a sugár előállításánál, ezért az ipari gyakorlatban mégis az injektoros rendszerek az elterjedtebbek.

Az elsődleges vagy vizes fúvóka rendkívül rideg, ezért nagyon érzékeny a vízben lévő szennyeződések illetve kemény részecskék jelenlétére, ezért a vizet a vágófejbe való vezetés előtt többszörösen szűrni, illetve lágyítani kell.

Abrazív vízszugaras vágásnál az anyagleválasztás erózióval történik. Ekkor a szilárd és folyékony részecskékkel való ütközés következtében jön létre anyagleválasztás [25]. A folyadékban lévő részecskék és a munkadarab ütközésekor az ütközés és az anyag jellemzőitől függően különféle jelenségek játszódnak le: nyírásos alakváltozás, képlékeny deformáció, repedések keletkezése és növekedése, keményedés, rideg törés, az anyag helyi megolvadása stb.

2.2 A VÍZSUGÁR SAJÁTOSSÁGAI

A nagy sebességű vízszugár létrejöttének lényege, hogy egy nagynyomású vízoszlopot egy kis átmérőjű fúvókán bocsátunk keresztül, vagyis a nagy nyomást nagy sebességű mozgássá alakítjuk át.

A fúvókából kilépő sugár sebessége a Bernoulli összefüggés alapján számítható:

$$p_{at} + \frac{\rho_w}{2} \cdot v^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_b = p + \frac{\rho_w}{2} \cdot v_p^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_k \quad (1)$$

ahol:

- p_{at} : az atmoszférikus nyomás
- p : a víznyomás
- ρ_w : a víz sűrűsége
- v : a kiáramló víz sebessége
- v_p : a víz sebessége a fúvóka előtt
- g : nehézségi gyorsulás
- h_b : a fúvókába lépés magassága
- h_k : a fúvókából történő kilépés magassága

Mivel a közeg eredeti sebessége elhanyagolhatóan kicsi az átáramlás utáni sebességhez képest, valamint az atmoszférikus nyomás is nagyságrendekkel kisebb a folyadék fúvóka előtti nyomásánál, és a fúvóka méretei elhanyagolhatók, így $h_b = h_k$ és $p_{at} \ll p$ valamint $v_p \ll v$ figyelembe vétele után a vízszugár kilépő oldali sebességére a következő egyszerű kifejezést kapjuk [25]:

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (2)$$

A gyakorlatban a víz kilépésekor kialakuló veszteségeket egy μ veszteségi tényezővel figyelembe véve a

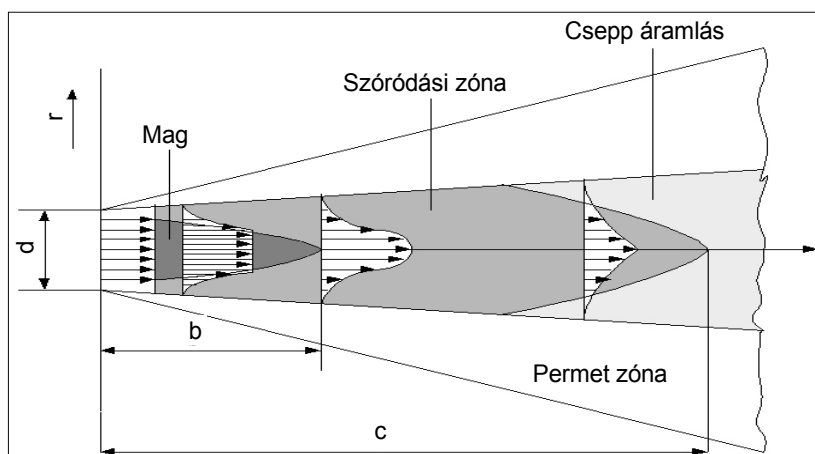
$$v = \mu \cdot \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (3)$$

használatos a víz sebességének meghatározására. Vagyis egy meglehetősen egyszerű összefüggést kapunk a vízsugár sebessége valamint a hidrosztatikus nyomás és a víz sűrűsége között. ($\rho_{\text{viz}}=1000 \text{ kg/m}^3$). A μ veszteségi tényező a víz összenyomhatóságát, a fúvókával való súrlódását és az áramlás divergenciáját fejezi ki, gyakorlati értékei 0,83 és 0,93 közé tehetők [25]. Így a sebesség tényleges értékei általában 500-1000 m/s tartományba esnek.

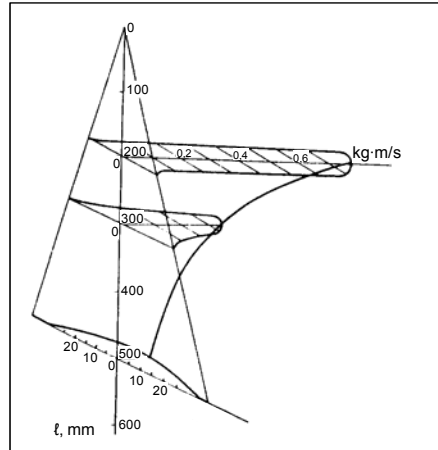
A vízrészecskék belső- illetve a körülvevő külső közeggel (fúvóka, levegő) való súrlódása miatt fellépő nyomáscsökkenés következtében, a valóságban a sugár sebessége mindig kisebb, mint az elméletileg meghatározható érték. A fúvóka geometriai kialakításától függően a vízsugár átmérője a fúvókát elhagyva mindig csökken (kontrahál), ezért átmérője is kisebb a fúvóka átmérőjénél. Mindezt az áramlás számításakor egy kiömlési tényezővel szokás figyelembe venni, amelyet kísérleti úton lehet meghatározni. A kiömlési együttható gyakorlati értékei 0,6-0,98 értékek között változnak, ahol az alsó érték éles, a felső lekerekített vizes fúvóka bemenetet jelöl.

Amikor a sugár kilép a fúvókából, kölcsönhatásba lép a környezetével, ami pl. vízsugár és levegő kölcsönhatás esetén az alábbiakat eredményezi [26] (4. ábra):

- A sugár folyamatossága (koherenciája), akár egy-, vagy kétfázisú, részben megszakad, ami azt jelenti, hogy mind a tiszta vízsugár mind a szuszpenziós abrazív sugár cseppekre esik szét, azaz a sugárban kiegészítő összetevőként megjelenik a levegő.
- A befecskendezéssel előállított háromfázisú sugárban megnő a levegő mennyisége.
- Minden sugárban széttartás (divergencia) lép fel (4. ábra).
- A divergencia eredményeként megnő a sugár által fedett (támadott) felület, ami a bevitt fajlagos energiát csökkenti [27] (5. ábra).
- Változik a sugár hatásának mechanizmusa, a koherens sugár cseppekre esése miatt a terhelő hatás statikusról dinamikusra változik.
- A környezettel való kapcsolat miatt a sugár energiát veszít (5. ábra).

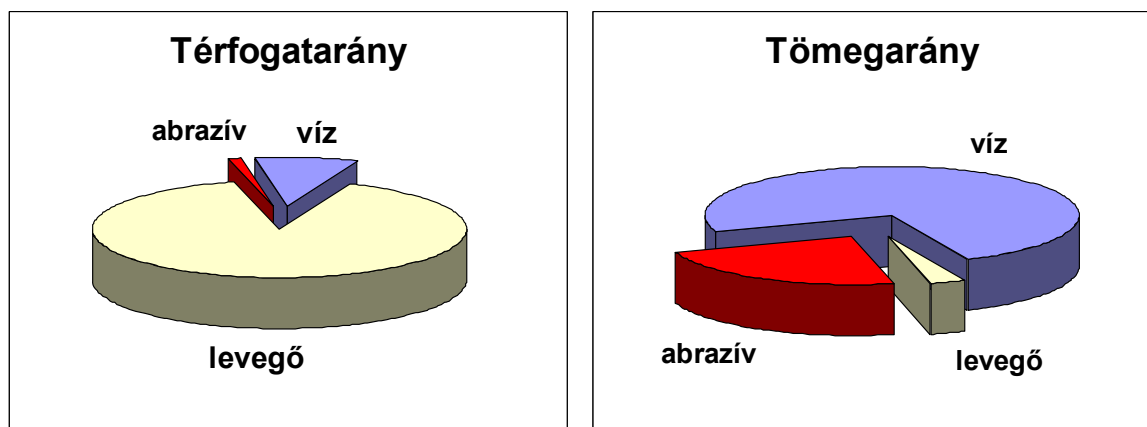


4. ábra: A fúvókából kilépő vízsugár szerkezete [26]



5. ábra: Impulzus eloszlás a sugárban [27]

A fűvókából történő kilépéskor a sugár, típusától függően, egytől-három fázisból állhat. Az egyszerű vízszugár (WJ) csak vizet tartalmaz a kilépéskor. A korábban említettek szerint az ún. szuszpenziós abrazív vízszugarat (ASJ) előzetesen összekevert abrazív por és víz elegyből állítják elő, és két fázist tartalmaz, míg az ún. abrazív vízszugarat (AWJ) befecskendezéssel állítják elő, ezért ez három fázisból, vízből, abrazív porból és levegőből áll (6. ábra). A levegő természetesen erősen csökkenti a vágás hatékonyságát, ezért is hatékonyabb egy szuszpenziós sugár még kisebb nyomások alkalmazása esetén is az ún. Bernoulli típusú sugárnál



6. ábra: Abrázív vízszugár összetevőinek tömeg és térfogataránya [24]

A sugár tulajdonságait a leírtakon túl nagyban befolyásolja:

- a sugár közege,
- a fűvóka geometriája és vízellátása,
- a közeg, amelybe a sugár érkezik

Minden alkalmazásnál a sugár energiát veszít a munkadarabbal való kölcsönhatás miatt. Ez azt eredményezi, hogy létezik egy optimális behatási idő, amíg a sugár a munkadarab egy

adott pontjával érintkezésben van, ami a gyakorlatban egy optimális sugár előtoló sebesség létezését jelenti.

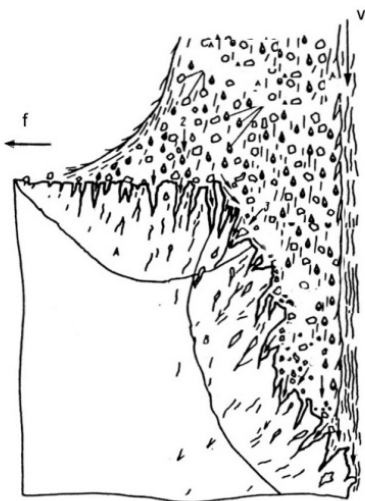
Ez azt jelenti, hogy két vágás kétszer akkora sebességgel, hatékonyabb lehet, mint egy vágás. Fentiekből következik, hogy mindig figyelembe kell venni az alábbiakat:

- A sugár struktúráját annak keletkezési körülményei, és az a közeg befolyásolja, amelybe a sugár a fúvókából való kilépés után érkezik.
- Ezek a hatások részben csökkenthetők, de megszüntetni azokat nem lehet.
- Célszerű és lehetséges a munkadarabbal való kölcsönhatás és a hatékonyság optimalizálása. Felületi réteg eltávolítása esetén el kell kerülni az alapanyag roncsolódását, ezért ekkor is nagyon fontos a megfelelő energia bevitel és terhelési idő megválasztása.

Figyelembe véve a leírtakat, a paraméterek helyes megválasztása előfeltétele a vízsugaras technológiák eredményes alkalmazásának.

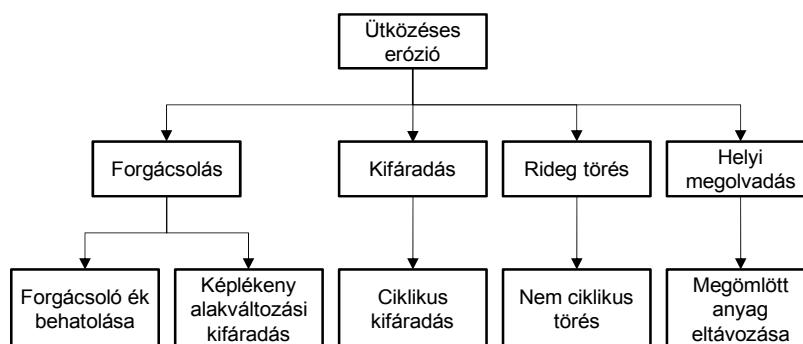
2.3 ANYAGLEVÁLASZTÁS ABRAZÍV VÍZSUGÁRRAL

Az abrazív vízsugaras vágással történő megmunkálás lényege a neve ellenére nem abrazív megmunkálás, hanem egy ún. szilárd eróziós folyamat. Ezen erózió alatt a szilárd és folyékony részecskékkel való ütközés következtében bekövetkező anyagvesztéset értünk. Mivel a folyamat térben, időben és energiában erősen koncentrált (ezért is nevezik nagy energia sűrűségű megmunkálásnak) ezért az erózió felgyorsul és anyagleválasztás, azaz megmunkálás jön létre. A folyadékban lévő részecskék és a munkadarab ütközésekor az ütközés és az anyag jellemzőitől függően különféle jelenségek játszódnak le: nyírásos alakváltozás, képlékeny deformáció, repedések keletkezése és növekedése, keményedés, rideg törés, az anyag helyi megolvadása [25,39] (7. ábra).



7. ábra: A megmunkáló sugár és a munkadarab kölcsönhatása

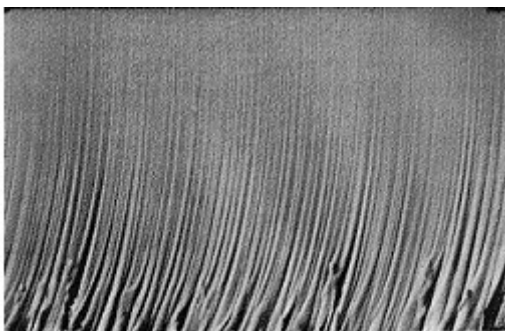
Meng és Ludema [28] szerint a 8. ábrán látható mechanizmusok eredményezik az anyagleválasztást a szilárd részecskékkel való ütközéses erózió során, vagyis forgácsolás, kifáradás, megolvadás és rideg törés.



8. ábra: Szilárd-részecske erózió során végbemenő anyagleválasztási folyamatok

A megmunkálás során ezen folyamatok kombinációja eredményezi az anyagleválasztást. Az egyes folyamatok jellege és megvalósulása számtalan olyan tényezőtől függ, mint pl. a támadási szög, a részecske kinetikus energiája, a részecske alakja, a munkadarab anyagának tulajdonságai és egyéb környezeti hatások.

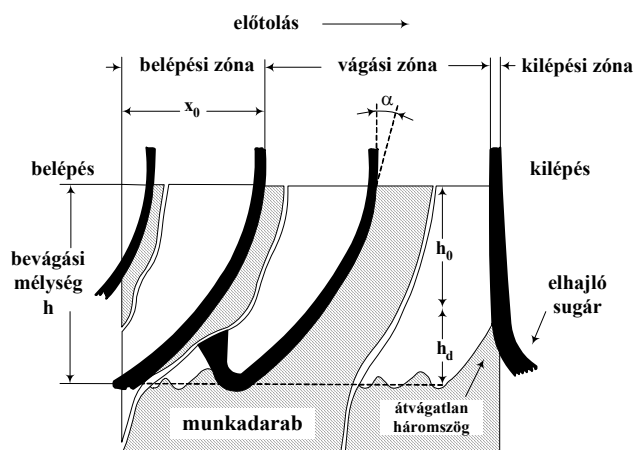
A növekvő vágási mélység során a megmunkáló sugár veszít energiájából, aminek eredményeként a megmunkálás „leamarad” a sugár haladási sebességéhez képest, vagyis a sugár „elhajlik” és ez a változás a vágott felületen jól látható deformálódást okoz (9. ábra), kialakulnak a valamennyi sugaras megmunkálásra jellemző elhajlási vonalak, azaz a vágási front meggömbül.



9. ábra: Abrázív vízsugárral vágott fém felülete a jellegzetes elhajlási vonalakkal

Az elhajlási vonalak magyarázatára többféle elmélet létezik. Elemzésükkel Hashish foglalkozott elsőként [29,30]. Plexi anyagon végzett bevágási kísérletek nagysebességű fényképezését követően a 10. ábrán látható kétdimenziós modellt állította fel.

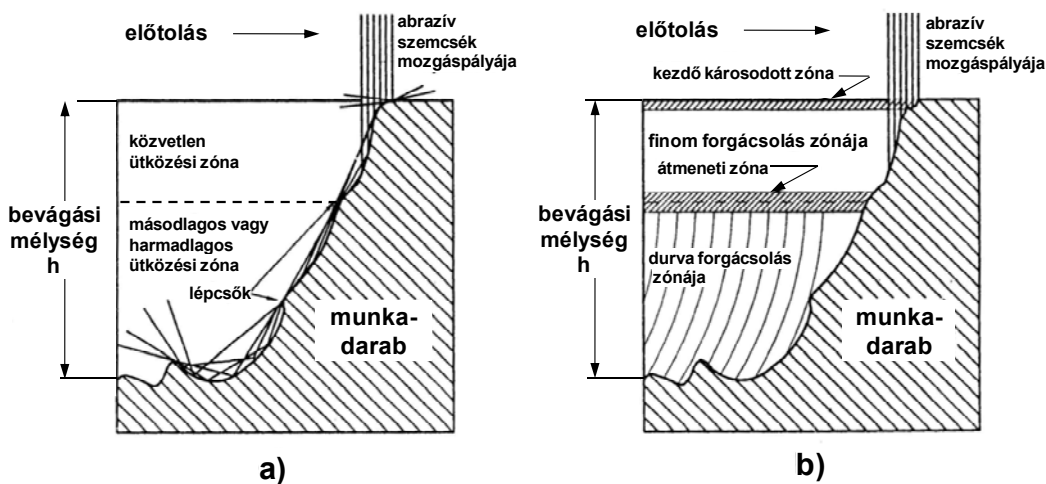
Az előtolás mentén a folyamatot három részre osztotta: belépési zóna, vágási zóna és kilépési zóna. A belépési fázisban a bevágás mélysége kisebb, mint a maximálisan lehetséges érték. Ebben a fázisban hatol be a sugár függőleges irányban a munkadarabba és megkezdődik az anyagleválasztás folyamata. Amikor a sugár eléri az állandósult mélységet, megkezdődik a vágási fázis. Ezt a folyamatot a ciklikus anyagleválasztás jellemzi. A munkadarab végét elérve a sugár hirtelen kilép annak anyagából, ami egy jellegzetes megmaradó („átvágatlan”) háromszöget eredményez a vágott felületen. Ezt nevezzük kilépési fázisnak.



10. ábra: Az abrazív vízsugaras vágási folyamat fázisai Hashish szerint

A vágási fázisban egy-egy vágási ciklus is több lépcsőre osztható. Hashish az első lépcsőt „vágási-kopási” zónának nevezi (h_0). Ebben a lépcsőben az abrazív részecskék kis szög alatt csapódnak a vágási frontba és a folyamat alapvetően mikroforgácsolással megy végbe. Amikor a sugár támadási szöge meghalad egy adott értéket, az anyagleválasztás ún. „deformációs kopás” folyamatába megy át (h_d). Ezt a folyamatot a kisebb mértékű anyagleválasztás jellemzi, amely elsősorban nem forgácsolás révén, hanem a mélység növekedésével egyre inkább képlékeny deformációt követő keményedéssel, repedések keletkezésével és összenövése következtében létrejövő kopással megy végbe. Ezt a lépcsőt a szemmel is jól látható elhajlási vonalak megjelenése jellemzi.

Zeng és Kim [31] továbbfejlesztve Hashish elméletét az első lépcsőt „közvetlen ütközési” zónának nevezi (11. a) ábra), ahol is az abrazív részecskék közvetlenül a munkadarabbal ütköznek. Ahogy a sugár továbbhalad, a mélyebben lévő részekben, a sugár mögött kialakul egy ún. „másodlagos ütközési” zóna, amelyet az eltérített szemcsékkel való ütközés eredményez. Ez egy hirtelen változást eredményez a vágási front geometriájában. Így módon több lépcső is kialakul a vágási front mentén.



11. ábra: A vágási front jellegzetes modelljei

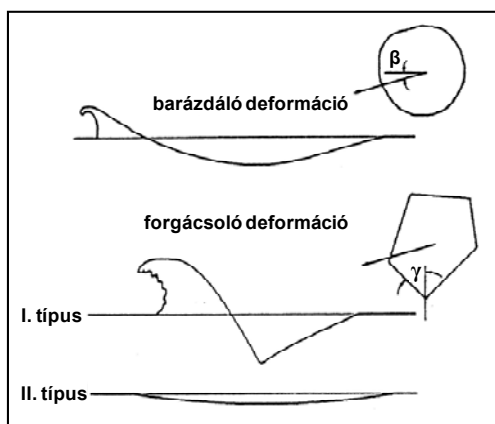
a) kétlépcsős ütközési modell b) háromlépcsős ütközési modell

Arola és Ramulu [32] továbbfejlesztették a modellt, egy háromlépcsős vágási front formájában (11. b) ábra). Ebben elkülönítenek egy „belépési” vagy „roncsolt” zónát is, ahol, a részecskék csaknem merőlegesen ütköznek a felületnek, ezáltal képlékeny deformációt, roncsolódást létrehozva a felületen. Guo [33] és Kovacevic [34] szintén beszámolnak ezen zóna meglétéről. A másik két zóna az ún. finom, illetve durva forgácsolás zónája, ami arra utal, hogy elsősorban a felület jellege változik meg, de nem a leválasztás mechanizmusa (mikroforgácsolás).

Bár az abrazív vízsugaras vágás során lejátszódó mikro-folyamatok rendkívül összetettek (8. ábra), a vágási mechanizmust illetően mégis két különböző típust szokás megkülönböztetni, az ún. *szívós* illetve *rideg eróziót*.

Szívós erózió

Mint az előbbieken láttuk, abrazív vízsugaras vágáskor a részecskék és a munkadarab ütközésekor többféle folyamat is lejátszódik: mikroforgácsolás, képlékeny deformáció, rideg törés, kifáradás, helyi megolvadás. Szívós anyagok magmunkálásakor a jelenségek aránya, a részecskék és a munkadarab ütközésekor, a forgácsolás, illetve a képlékeny alakváltozás irányába tolódik el. A sugár részecskéi a munkadarab anyagába hatolva, egyenként kismértékű képlékeny alakváltozást okoznak, a becsapódás helyén apró aszimmetrikus kráterek keletkeznek [35]. A benyomódás során a szemcse translációs és rotációs mozgást végez. A szemcse rotáció iránya alapján a folyamatot két típusba sorolhatjuk (12. ábra.).



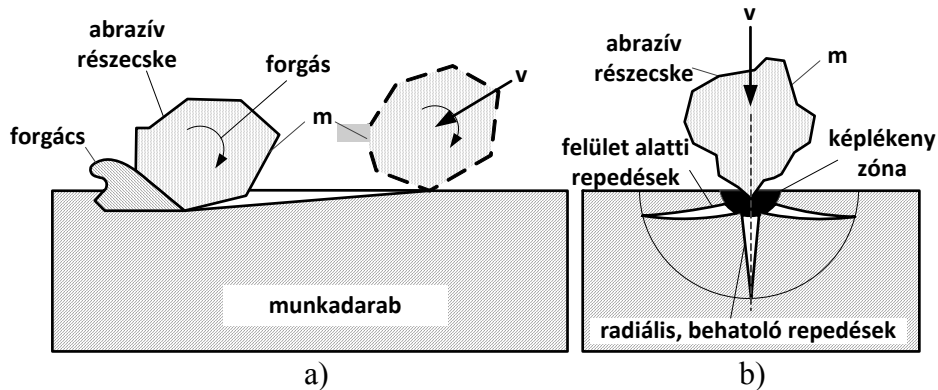
12. ábra: Anyagleválasztás abrazív részecske és szívós anyag ütközésekor

Az előre irányuló rotáció (I. típus) esetében a szemcse behatol a munkadarab anyagába és a becsapódási kráter peremén egy, a kráter térfogatának megfelelő kitüremkedést okoz. Ezt aztán többnyire a következő szemcse választja le. A hátrafelé rotáló szemcse becsapódása (II. típus) azonnali anyagleválasztást eredményez és a munkadarabon keskeny, hosszú barázdát okoz.

A sugár részecskéi a munkadarab anyagába hatolva, egyenként kismértékű képlékeny alakváltozást okoznak, a becsapódás helyén apró aszimmetrikus kráterek keletkeznek. A növekvő vágási mélység során a megmunkáló sugár veszít energiájából melynek eredményeként az anyagleválasztás a mikroforgácsolásból egyre inkább a „deformációs kopás” mechanizmusába megy át, amelynek látható eredménye a már tárgyalt elhajlási vonalak megjelenése.

Rideg erózió

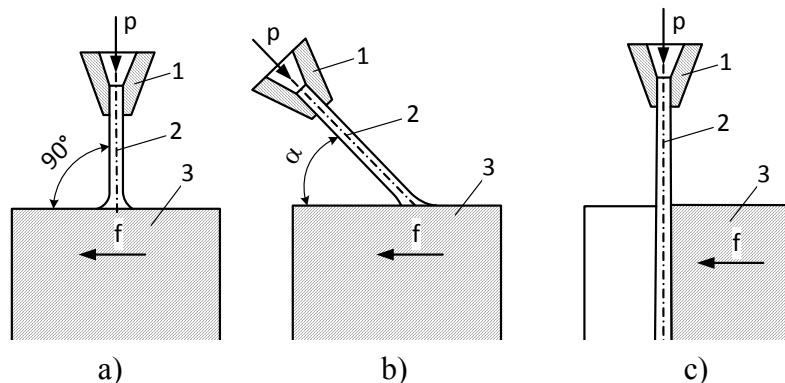
A 13. ábra a szívós és rideg erózió közötti különbségeket szemlélteti. Rideg anyagok eróziójakor a részecskék és a munkadarab ütközéskor lejátszódó jelenségek képlékeny alakváltozás túlsúlyából a repedések keletkezése, illetve ridegtörés irányába mozdulnak el [25]. Az anyagleválasztás az abrazív részecskével való ütközés hatására keletkező felület alatti repedések keletkezése, növekedése és metsződése (összenövése) következtében megy végbe (13. ábra).



13. ábra: Ütközéses erózió jellegzetes típusai
a) mikroforgácsolás [36] b) felület alatti repedések [37]

A rideg erózió egy összetett folyamat, amely nagymértékben az ütközési energiától függ. A repedések terjedésének területe és mélysége elméletileg meghatározható, de egymással való metsződésük - ami anyagleválasztást eredményez - valószínűségének meghatározása statisztikai módszereket igényel.

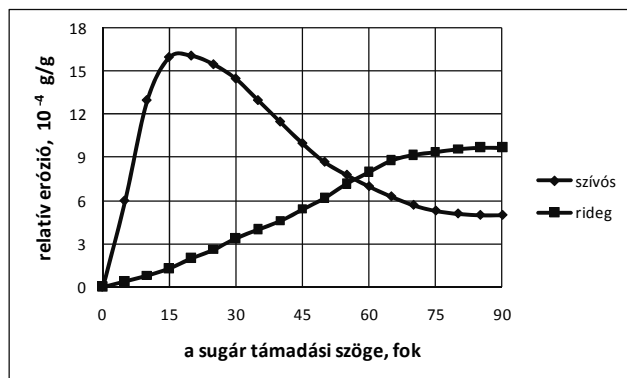
A megmunkáló sugár többféle támadási szögben kerülhet érintkezésbe a megmunkálandó felülettel (14. ábra).



14. ábra: A megmunkáló sugár támadási szögének értelmezése [39]

Az (1) fúvókából kilépő (2) sugár a (3) munkadarabot támadhatja közel derékszögben (a), vagy tetszőleges α szögben (b) illetve a már átvágott felület esetén a vágási frontot közel zérus szög alatt. Ennek azért van jelentősége, mert az egyes erózió típusok, más-más szög alatt a leghatásosabbak. A rideg erózió akkor maximális, amikor a részecske merőlegesen

ütközik a felületnek. A szívós erózió viszont – mivel a forgácsleválasztáshoz hasonlítható, kis támadási szögek alatt a legkedvezőbb. Erre mutat példát a 15. ábra, amelyen a relatív erózió (a leválasztott anyagtömeg/abrazív anyag mennyisége) változása látható a becsapódási szög függvényében [15].



15. ábra: Az elméleti erózió változása a becsapódási szög függvényében szívós anyagok esetén

Pontosan a kétféle eróziós mechanizmus (rideg és szívós erózió) az oka annak, hogy gyakorlatilag bármilyen anyag megmunkálható abrazív vízsugaras vágással. Ugyanis a nem túlságosan nagy keménységű anyagoknál a szívós erózió képes beindulni, míg a nagyon kemény – tehát ugyanakkor rideg – anyagoknál a rideg erózió biztosítja a megmunkálhatóságot.

2.4 A VÍZSUGARAS VÁGÁS HATÉKONYSÁGA

Az abrazív vízsugaras vágás minőségét és pontosságát számos tényező határozza meg, amelyeket az 1. táblázatban foglaltam össze.

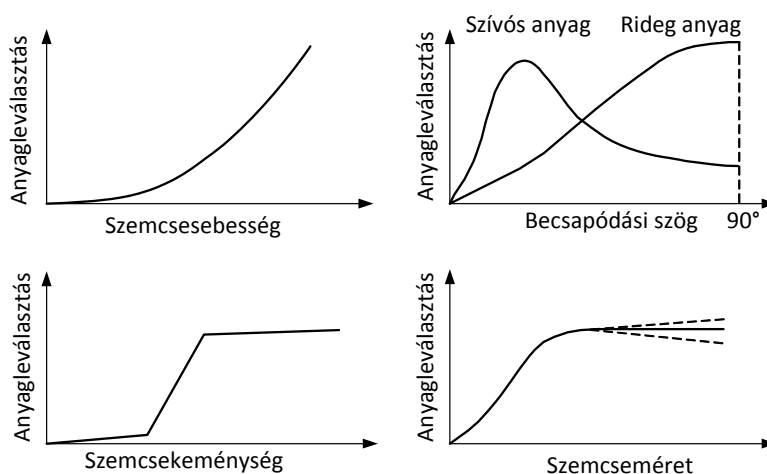
1. táblázat: Vízsugaras vágás paramétereit

Sugár	Berendezés	Anyag	Eredmény
abrazív anyag szemcseméret fúvókák átmérője abrazív fúvóka hossza víznyomás	előtoló sebesség fúvóka magasság	keménység szívósság ridegtörési hajlam repedési tulajdonság	hatékonyság pontosság felületi érdesség vágórés szélesség vágórés alak

Az 1. táblázatból látható, hogy a vágás eredménye a paraméterek széles tartományaitól függ. Nem egyszerű közben tartani a vágórés formáját és méretét valamint a megmunkált felület minőségét különösen, ha figyelembe vesszük a további elvárásokat, úgy mint a technológia gazdaságossága és hatékonysága. A vízsugaras vágás egyik nagy hátránya éppen a megmunkált felület jellemzőit befolyásoló nagyszámú paraméter kézbentartása, ami adott esetben a folyamat kontrollját nehezítheti.

Az eróziós anyagleválasztás mértéke - és ezzel a vágás hatékonysága - számos paramétertől függ. A folyamatra döntő hatással van a részecskék sebessége, tömege,

becsapódási szöge, a szemcse és a munkadarab keménységének aránya, a részecskék formája valamint a kölcsönhatásban résztvevő anyagok anyagjellemzői. Mindezek együttesen határozzák az anyagleválasztás jellegzetességeit. A 16. ábra az anyagleválasztás mértékét a fenti tényezők függvényében szemlélteti [25].



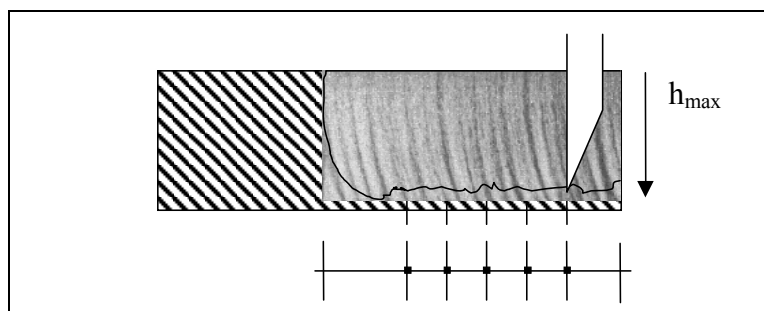
16. ábra: Az anyagleválasztás intenzitásának változása a technológiai jellemzők függvényében

A megmunkáláshoz szükséges energia-, víz- és abrazív anyag mennyisége a szivattyúk és nyomásfokozók teljesítményének növelésével, a fúvókák minőségének javításával és a technológiai paraméterek megfelelő megválasztásával szabályozható. A megmunkálás folyamata számos tényezőtől függ. A vágás hatékonysága különböző módokon növelhető:

- a technológiai paraméterek megfelelő megválasztásával,
- a szivattyúk és nyomásfokozók teljesítőképességének növelésével,
- a vizes és az abrazív fúvókák geometriájának változtatásával,
- az abrazív anyagának és szemcseméretének változtatásával.

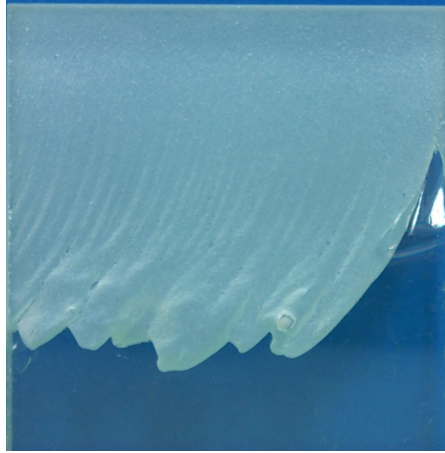
Fenti tényezők közül a technológiai paraméterek kivételével egyik tényező sem vizsgálható, csak egészen rendkívüli anyagi befektetésekkel. Ezért van az, hogy pl. a fúvóka geometriák vizsgálatáról szinte kizárólag a vízsugaras vágóberendezéseket gyártó nagy világcégek kutatói (pl. Hashish, FLOW International [20]) számolnak be.

A vágás minősége és hatékonysága különböző paraméterekkel jellemezhető: így például a megmunkált felület érdessége és pontossága, a vágórés mérete és alakja, szélessége, mélysége és ferdesége. A vízsugaras vágás jellemzésére az irodalomban széles körben elfogadott [14,15,24,25,26] paraméter az ún. bevágási mélység [38] (17. ábra).



17. ábra: A bevágási mélység értelmezése és mérése

A bevágási mélység kísérleti vizsgálatakor az anyagot nem vágjuk át teljes keresztmetszetében (18. ábra), csak egy bevágást készítünk, és azt vizsgáljuk milyen mélység érhető el a technológiai paraméterek változtatásával. A bevágási mélység mérésekor a hossz mentén elvégzett több mérés átlaga adja az adott paraméterekkel elérhető maximális bevágási mélységet ($h_{\max}$).



18. ábra: Bevágás üveg anyagban

A bevágási mélység modellezésével számos kutató foglalkozott az irodalomban, annak érdekében, hogy a várható bevágási mélységet – és ezen keresztül adott anyag átvághatóságát – becsülni tudjuk. A használatos modelleket a 2. táblázatban három különböző csoportba soroltam, úgy mint elméleti, fél empirikus és empirikus modellek. Elméleti összefüggéseknek tekinthetők azok a modellek, melyeket tisztán fizikai megfontolások alapján írnak fel. A fél-empirikus összefüggések valamilyen fizikai megfontoláson alapulnak, de a tényleges korreláció felírása kísérletek alapján történik. Az empirikus összefüggések a bemenő paraméterek és a kimenő paraméter közötti összefüggést kísérletek alapján elvégzett regresszió segítségével közelítik.

2. táblázat: A bevágási mélység meghatározására használatos modellek

Modell		
Elméleti	Fél-empirikus	Empirikus
Tikhomirov [39]	Oweinah [40]	Chung [41]
Hashish [35]	Blickwedel [42]	Kovacevic [43]
Zeng and Kim[44]	Matsui [45]	Babu [46]
	Momber [47]	Monno [48]

A teljesség igénye nélkül érzékeltetesként emeljük ki mindhárom csoportból egyet-egyet. Hashish (mint a vízsugaras vágás kutatásának egyik legnagyobb alakja) modellje [35] nyújtja az egyik legkomplexebb megközelítést a szívós erózióval való leválasztásra:

$$h = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_m \cdot \sigma_c \cdot f}{2C_1 \cdot \dot{m}_a (w_{P,A} - w_{P,C})^2} + \frac{C_f}{d_{Str}} \frac{w_{P,A}}{(w_{P,A} - w_{P,C})}} \quad (4)$$

ahol:

- d_m : abrazív fűvóka átmérője
- d_{str} : a vágósugár átmérője
- σ : az anyag folyáshatára
- f : előtoló sebesség
- C_f : súrlódási együttható
- C_1 : leválasztási konstans
- $w_{p,A}$: részecske ütközési sebessége
- $w_{p,C}$: részecske forgácsoló sebessége
- $\dot{m}_a$: abrazív tömegáram

Az ilyen jellegű összefüggések egy ipari végfelhasználó számára gyakorlatilag nem használhatók.

Fél-empirikusnak tekinthető Oweinah képlete, aki a következő összefüggést használta a bevágási mélység számítására:

$$k = \eta \frac{0,5 \cdot \dot{m}_a \cdot w_p^2}{f \cdot b \cdot e} \quad (5)$$

ahol:

- f : előtoló sebesség
- w_p : a részecske sebessége
- $\dot{m}_a$: abrazív tömegáram
- b : a vágórés szélessége
- e : anyagegyüttható
- η : konstans

Az ipari gyakorlatban jobban alkalmazhatók a tapasztalati összefüggések, mint pl. Monno modellje [48], mely szerint:

$$h = A \cdot \frac{p^B \cdot \dot{m}^C}{f^D} \quad (6)$$

ahol:

- h : bevágási mélység
- f : előtoló sebesség
- p : a vízoszlop nyomása
- $\dot{m}$: abrazív tömegáram
- A, B, C, D : mérési eredmények alapján meghatározandó konstansok, kitevők

A bevágási mélység meghatározása lehetőséget nyújt arra, hogy az átvágható anyagvastagságot, adott technológiai paraméterekkel végzett vágás esetén előre meghatározzuk.

2.5 A MEGMUNKÁLT FELÜLET ÉRDESSÉGE

A megmunkálás hatékonysága mindig hatással van a megmunkált felület minőségére és pontosságára. A költségek csökkentése érdekében minden felhasználó törekszik a vágófej

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

Az abrazív vízsugárral vágott felületek topográfiája szinte minden esetben a 9. ábrán látható jellegzetességeket mutatja. A korábban leírtak szerint az átvágott vastagság függvényében a vágott felületet legalább két zónára szokták osztani: finom forgácsolás övezete és durva forgácsolás zónája. Ez utóbbiban jelennek meg a korábban már tárgyalt ún. elhajlási vonalak.

Az abrazív vízsugaras vágással megmunkált felületek érdességét számos szerző vizsgálta [49, 50, 51]. Kovacevic szisztematikusan vizsgálta a felületi érdesség változását a víznyomás függvényében, a vágott felület különböző mélységeiben [49]. Vizsgálatai azt mutatták, hogy a vágott felület felső részén a nyomás hatása nem szignifikáns, ugyanakkor a mélység növekedésével a nyomás szerepe növekedni kezd. Általánosságban megállapítható, hogy a nyomás növekedésével az érdesség általában csökken. Ez azzal magyarázható, hogy a nyomás növekedése a részecskék nagyobb sebességét eredményezi, ami kedvező lehet a vágott felület érdessége szempontjából. Ugyanakkor a nyomás túlzott növelése az abrazív szemcsék túlzott fragmentációját (törését) eredményezheti a keverő kamrában, ami viszont rontja a részecske megmunkáló képességét és ezáltal a felületi érdességet is.

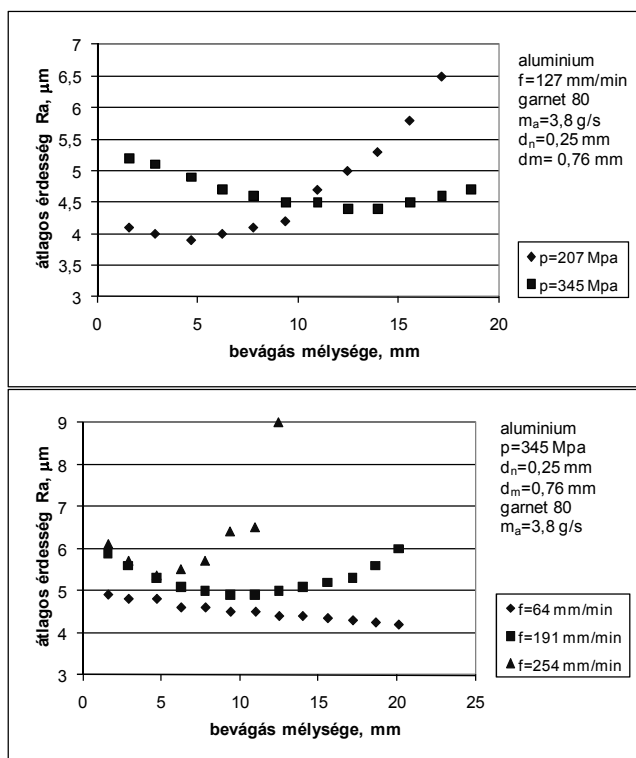
Ramolu és Arola [52] hasonló eredményre jutott grafit és epoxi rétegelt anyag vágásakor. Megállapításuk szerint a nyomás növekedése a vágási front nagyobb mélységeiben is biztosítja a megfelelő kinetikus energiát az abrazív szemcse számára a megfelelő felületminőség biztosításához.

Kissé más eredményekre jutott Wong és Wang [53]. Megállapításuk szerint a nyomás egy bizonyos határon túli növelése rontja a megmunkált felület érdességét.

Az előtoló sebesség hatását vizsgálva [51,53,54] a szerzők általában megegyeznek abban, hogy az előtolás nagysága relatíve csekély hatást gyakorol a felületi érdesség alakulására a vágás felső tartományában. A vágófej előtoló sebességének növelése általában növeli a felületi érdességet, de a csökkentése egy bizonyos határ alatt már nem okoz érzékelhető változást.

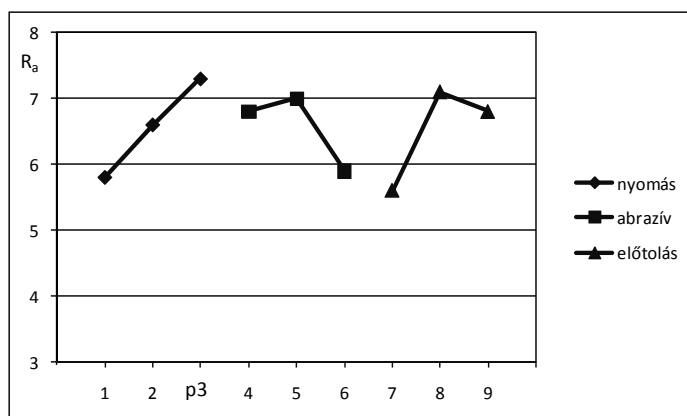
Az abrazív anyagáramnak a felületi érdességre gyakorolt hatását a szerzők [51,53,54] általában úgy összegzik, hogy az abrazív anyagáram növelése javítja a felület érdességét, ugyanis a nagyszámú abrazív részecske becsapódása elősegíti az érdességi csúcsok eltávolítását. A vágási mélység növekedésével az abrazív anyagáram nagyságának hatása egyre jelentősebb.

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 [55] az átlagos érdesség sajátos változását írja le. A 19. ábrán alumínium anyagon végzett vágási kísérleteinek eredménye látható. Az ábra alapján megállapítható, hogy az átlagos érdesség változása különböző nyomásokon és előtoló sebességek mellett nem egyértelmű, bizonyos esetekben növekszik, máskor csökken a rétegmélység függvényében, az adott anyagnál.



19. ábra: Abrázív vízsugárral vágott alumínium anyag átlagos érdességének változása a rétegmélység függvényében

Hasonlóan az átlagos érdesség nem egyértelmű változásáról számol be Jegaraj és Babu [56], egy háromszintű kísérlet eredményeként, amelyben többek között a technológiai paramétereknek az átlagos érdességre gyakorolt hatását vizsgálták (20. ábra).



20. ábra: Az átlagos érdesség változása a nyomás, az abrazív anyagáram és az előtoló sebesség függvényében (anyag: 6063-T6 alumínium ötvözet, $p=100, 175, 250\text{ MPa}$; $\dot{m}_a=0.5, 2.5, 4.5\text{ g/s}$; $f=30, 60, 90\text{ mm/min}$)

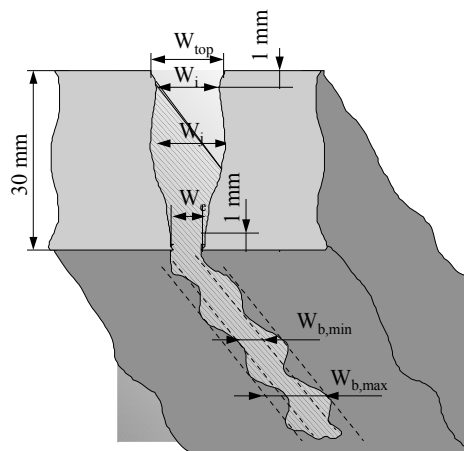
A rétegmélység függvényében ugyancsak nem egyértelmű eredményeket kapott Arola és Ramolu [57], akik 5 különböző anyagminőség kísérleti vágásakor az átlagos érdességnek 3-4 μm közötti változását észlelték a rétegmélységtől szinte függetlenül.

A vágott felületet a durva forgácsolás zónájában elsősorban a szemmel is jól látható elhajlási vonalak megjelenése jellemzi (9. ábra). Az elhajlási vonalak annál inkább megjelennek a felületen minél kisebb a becsapódó abrazív szemcse kinetikus energiája az

adott mélységben. A víznyomás növelése csökkenti, az előtoló sebesség növelése növeli az elhajlási vonalak méretét [54, 58, 59]. Wang [54] megállapítása szerint az előtoló sebesség növelése növeli a hullám amplitúdóját, mivel az előtolás növelésével csökken a becsapódó abrazív szemcsék mennyisége. Az abrazív anyagáram növelése jelentősen változtatja a hullámosságot, és nagy értékei mellett az előtoló sebesség változtatása kisebb jelentőséggel bír.

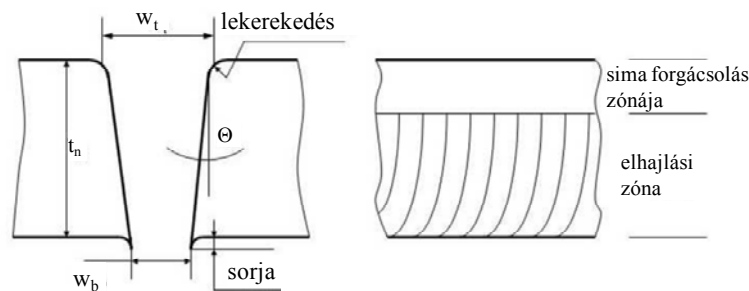
2.6 A VÁGÓRÉS ALAKJA ÉS FERDESÉGE

A vízugaras vágás egyik meghatározó problematikája a vágórés alakja, amely alapvetően meghatározza a vágás pontosságát. A vágórés alakja összetett, (21. ábra) de a vágott felületek szinte sosem párhuzamosak egymással és a sugár behatolásának irányával, hanem minden esetben alapvetően ferdének tekinthetők.



21. ábra: A vágórés jellegzetes metszete vízugaras vágásnál

A vágórés alakját általában ferde síkokkal modellezzük, melyek jellegzetes alakja és paraméterei a 22. ábrán láthatók. A vágórés jellemzésére a belépő és kilépő oldali vágórés szélességet (w_i , w_b) illetve az oldalferdeség szögét szokták használni (Θ). A vágórés fém 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.

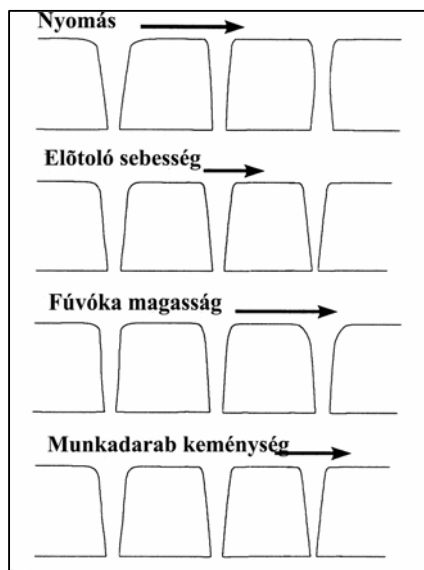


w_i : vágórés szélessége belépő oldalon w_b : vágórés szélessége kilépő oldalon
 t_n : anyagvastagság Θ : ferdeségi szög

22. ábra: A vágórés elméleti alakja és jellegzetes paraméterei

A vágórés ferdesége pontossági problémákat okoz a megmunkálás során. Ezen hiba kiküszöbölése rendkívül nehéz, a nagyszámú vágási paraméter miatt, különösen, ha tekintettel kívánunk lenni a megmunkálás gazdaságosságára is. A ferdeség okozta hiba már egy 20-50 mm vastagságú lemez esetén elérheti a 0,3 mm értéket, ami a vízszugaras vágási technológia gépészeti alkalmazhatóságának egyik korlátja lehet.

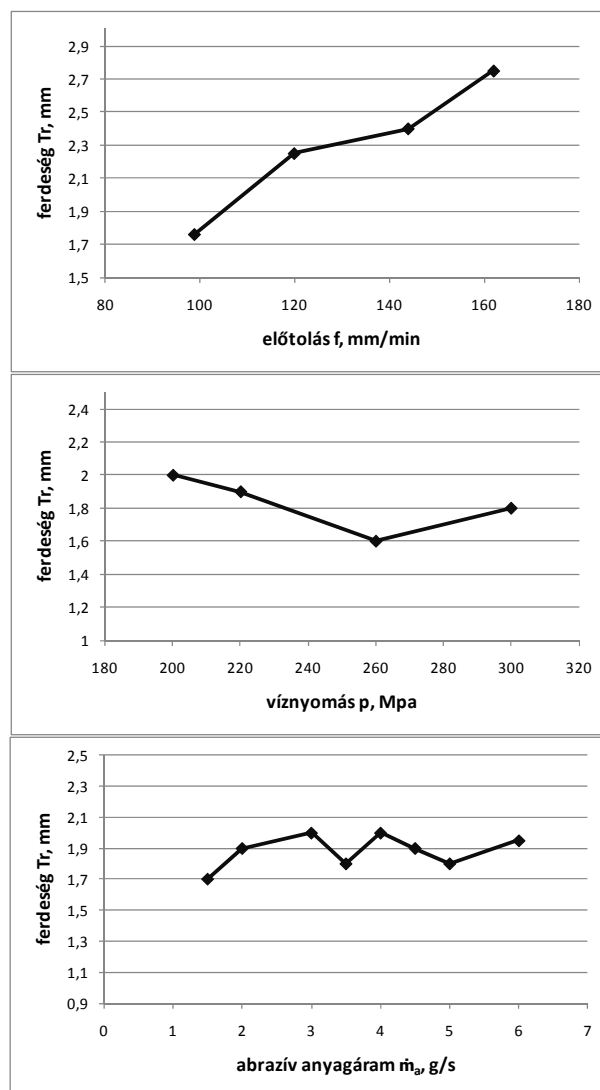
A vágórés alakját több szerző is vizsgálta. Öjmertz [15] megállapítása szerint a vágórés alakjának kézbentartása meglehetősen nehéz, mert az számos paramétertől függ. Megítélése szerint a legfontosabbak ezek közül a 23. ábrán látható paraméterek, azok mennyiségi jellemzését nem adja meg, csak karakterisztikájukat közli.



23. ábra: A technológiai paraméterek hatása a vágórés alakjára

Más szerzők [41, 53, 54, 60, 61, 62, 63, 64] ha adnak is konkrét mérési eredményeket, azokat mindig egyetlen technológiai adat függvényében elemzik, így összességében nehéz képet alkotni a technológiai paramétereknek a vágórés alakjára gyakorolt komplex hatásáról.

Chung és társai [41] szívos anyagokon végzett vizsgálataik alapján megállapították, hogy a vágórés ferdesége arányos az előtoló sebességgel és a vágófej magasságával, ami ugyan szinte nincs hatással a kilépő oldali szélességre, de a belépő oldalon változást gyakorol annak szélességére. A nyomás növelése megállapításaik szerint alapvetően csökkenteni látszik a vágórés ferdeségét. Ugyanakkor nem találtak egyértelmű összefüggést a víznyomás, illetve az abrazív anyagáram és a ferdeség között (24. ábra).



24. ábra: A vágórés ferdeségének változása az előtoló sebesség, a nyomás és az abrazív anyagáram függvényében Chung szerint [41]

Wang és Wong [53] 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.

Hasonló megállapításokra jutott Hocheng és Chang [62] rideg anyagok vágásakor. A vágórés ferdesége növekszik az előtoló sebesség növelésével. Nagy nyomások esetén azonban az abrazív szemcsék kellő energiával rendelkezhetnek a kilépő oldali rés megmunkálásához is, vagyis a ferdeség nagyobb nyomásokon akár csökkenhet is. Az abrazív anyagáram hatását szintén nem egyértelműsítik.

Arola és Ramolu [64] szerint nagyobb anyagvastagságok (15 mm felett) esetén az egyes paraméterek hatása nem egyértelműsíthető a különböző paraméterek együttes – egymásnak akár ellentmondó - hatása miatt.

3 A KUTATÁSI FELADAT MEGFOGALMAZÁSA

A vízsugaras vágás elméleti alapjait, valamint a vágás hatékonyságára és a vágott felület minőségére vonatkozó szakirodalmat áttekintve a következő megállapítások tehetők.

A bevágási mélység – ezáltal a vágás hatékonyságának – meghatározására kialakított modellek elméleti megfontolások vagy empirikus közelítések, illetve ezek vegyes alkalmazása révén születtek. Az irodalmakban közölt matematikai modellek a mérnöki gyakorlatban a megmunkálás tervezése során kevésbé használhatók.

A vágott felület érdességéről az irodalmak elsősorban az átlagos érdesség (R_a) vonatkozásában nem egyértelmű eredményeket közölnek. A szemmel érdesebbnek tűnő felületek olykor kisebb érdességi mérőszámmal bírnak, mint azt várnánk.

A vágás pontosságát alapvetően meghatározza a vágórés ferdesége, mellyel több szerző is foglalkozott. Ennek ellenére a technológiai paramétereknek a vágás ferdeségére gyakorolt hatása nem egyértelmű.

Fentiek alapján kutatási feladatként az alábbiakat fogalmaztam meg:

1. A mérnöki gyakorlatban jól használható számítási módszer létrehozása az abrázív vízsugaras vágás hatékonyságának növelésére. A modell segítségével az abrázív 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. Kísérleti úton meghatározni a vágott felület érdességét leginkább jellemező érdességi mérőszámot, összehasonlítani irodalmi adatokkal, bemutatni és értékelni az eredmények egyezőségét, illetve feltárni az eltérések okait. A vizsgált anyagokra összefüggés megadása a felületi érdesség változásának leírására.
3. A vágórés alakjának (ferdeségének) vizsgálata a különböző technológiai paraméterek függvényében, valamint a paraméterek együttes hatásának elemzése az energia-bevitel és a vágórés-ferdeség kapcsolatának vizsgálatával, a vágott felület pontosságának egyértelműbb leírására.

4 KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK

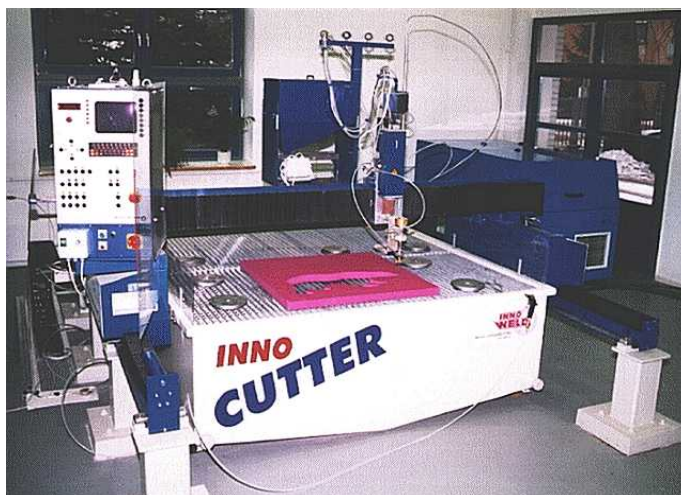
A kutatási célok elérése érdekében ún. bevágási és átvágási kísérleteket végeztem különböző anyagokon a felhasználók által állítható technológiai paraméterek, azaz a vágófej előtoló sebessége (f), a víznyomás (p) és az abrazív anyagáram ($\dot{m}_a$) változtatása mellett. A bevágási kísérleteknél a bevágás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

4.1 A VÍZSUGARAS VÁGÁSI KÍSÉRLETEKHEZ HASZNÁLT BERENDEZÉS

A kutatáshoz szükséges megmunkálási kísérleteket a miskolci Bay Zoltán Kutatóintézet tulajdonában lévő abrazív vízsugaras vágóberendezésen végeztem. A vágógép 1996-ban került telepítésre az intézetbe és Magyarország első vízsugaras vágóberendezése volt, melyen éveken át folytattam kutatómunkát. A gép a 25. ábrán látható és legfontosabb műszaki jellemzőit a 3. táblázat foglalja magába.

3. táblázat: Az abrazív vízsugaras vágóberendezés műszaki adatai

BERENDEZÉS	
Géptípus	INNO PUMP-36HD
Nyomásfokozó típusa	alternáló dugattyú
Teljesítmény [kW]:	30
Maximális vízáram [l/min]:	2
Maximális víznyomás [MPa]:	360
Maximális olajszivattyú nyomás [MPa]:	28
Nyomás akkumulátor térfogata [l]:	1,25
Vízkezelés	szűrés és lágyítás
VÁGÓFEJ	
Gyártó	INNOWELD
Elsődleges fúvóka átmérők [mm]:	0,25; 0,3
Abrazív fúvóka hossza [mm]:	70
Abrazív fúvóka átmérője [mm]:	0,8
Abrazív adagolás típusa	Vibrációs asztal
Maximális abrazív anyagáram nagysága [g/s]:	8
MOZGATÓ RENDSZER	
Vezérlés típusa:	Messer-Griesheim, Cortina DS 2600
Vezérelt tengelyek száma:	2 (X, Y)
Maximális előtoló sebesség [mm/min]:	7000
Munkatér:	X[mm]: 2100 Y[mm]: 1900 Z[mm]: 125
Pozicionálási pontosság [mm]:	$\pm 0,15$



25. ábra: A vízsugaras vágási kísérletekhez használt berendezés

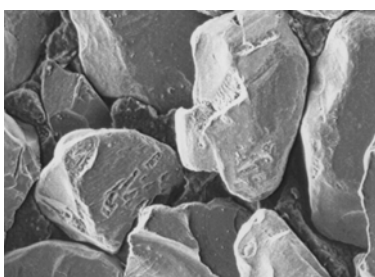
A berendezésen állítható paraméter a vágófej előtoló sebesség, az alkalmazott víznyomás, és az abrazív anyagáram nagysága is. A vágófej magasság a korábban elmondottaknak megfelelően nem került változtatása, lévén annak értékét 2 mm-re állítottuk be.

4.2 ABRAZÍV POR

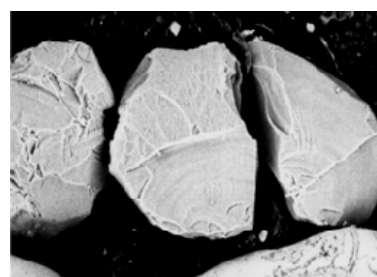
A megmunkálási kísérletekhez GARNET #80 típusú gránátport használtam. A por scanning elektronmikroszkóppal készített felvételei a 26. ábrán láthatók



N=25x



N=150x



N=250x

26. ábra: Az alkalmazott gránát por elektronmikroszkópos felvételei

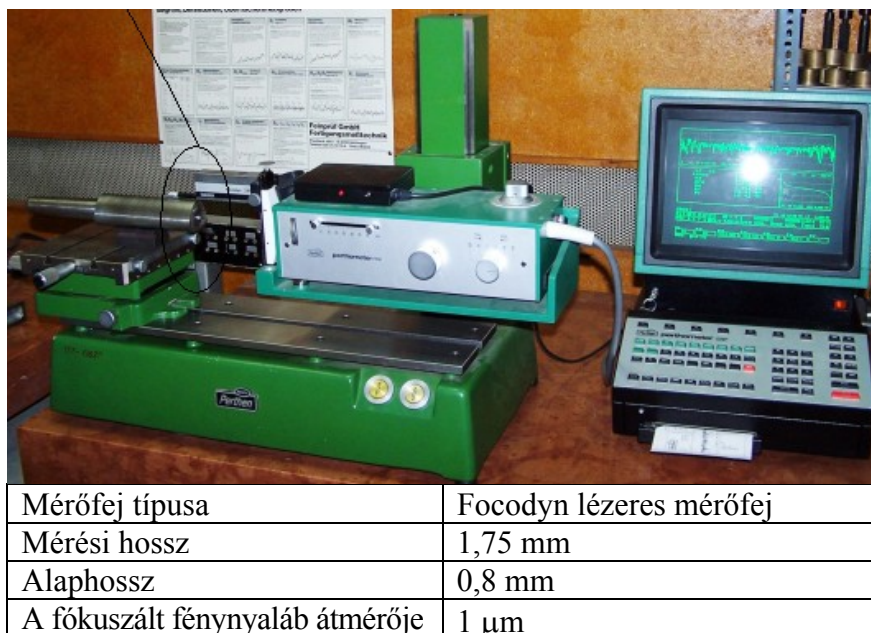
A gránát – nem keverendő össze a gránittal - azon szilikátok (SiO_4) összefoglaló neve, melyek tetraéderesen kristályosodnak pl. Mg, Ca, Fe, Mn vegyületei. Ilyenek pl. az almadin pyrope ($\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$) vagy az andradit uvarovit $\text{Ca}_3\text{Cr}_2[\text{SiO}_4]_3$). Bár a vízsugaras vágáshoz elvileg sokféle abrazív por felhasználható, pl. olivin, kvarc homok, korund (Al_2O_3), SiC, a világban 90%-ban a gránátport használják – esetleges kutatásokat kivéve – szinte kizárólagosan [65]. Ez a gránátpor költséghatékonyságával – tulajdonságaihoz képest olcsó, illetve technológiai megfelelőségével magyarázható. Ez zárja ki pl. az Al_2O_3 alkalmazását, amelynek használata esetén bár maga a vágás hatékony lehet, de a másodlagos vagy abrazív fúvóka élettartama a 60-80 üzemóráról, néhány percre csökken.

Az általam használt porban a szemcsék mérete 150-300 μm -ig terjed, a jellemző szemcsemérete 200 μm . A szemcsék jellemző sűrűsége 3,95 g/cm³, keménységük a Mohs skála szerinti 7,5, a por színe vörösesbarna.

4.3 MÉRŐBERENDEZÉSEK ÉS ESZKÖZÖK

Érdességmérés

A vágott felületek érdességét a Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszékén található S8P típusú Perthometer-rel mértem (27. ábra). Valamennyi vizsgált felületen rögzítésre került az átlagos érdesség (R_a), a maximális érdesség (R_t), az egyenetlenség magasság (R_z), a hullámosság (W_t) és a teljes profilhiba értékei (P_t). Az alkalmazott Perthometer és műszaki adatai az ábrán látható.



27. ábra: S8P típusú Perthométer

Bevágási mélység mérése

A bevágási mélységet MITUTOYO 536-121, 0,05 mm-es leolvasási pontosságú, kihegyezett végű mélységmérő pengével rendelkező tolómérővel ellenőriztem. Ez a módszer széles körben elfogadott a vízsugaras vágással foglalkozó szakemberek körében, lévén a vágási mélység fenékrészének egyenetlenségei messze meghaladják a mérési módszer pontosságát.

A vágórés szélességének mérése

A vágórés szélességét a belépési és kilépési oldalon MF-1030 TH típusú egyetemes hosszmérőgéppel végeztem.



28. ábra: MF-1030 TH típusú egyetemes hossz mérőgép

A hossz mérőgép mérési tartománya 300x100 mmxmm. A lehetséges optikai nagyítások $N=3-10\times$, a leolvasási pontosság 0,01mm.

Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

Az abrazív szemcsék vizsgálatára, valamint a vágott felületek topográfiájának elemzésére pásztázó elektronmikroszkópot használtam. Az értekezésben bemutatott felvételek a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék TESLA BS 343 típusú hordozható pásztázó elektronmikroszkópján készültek (29. ábra).



Felbontási határ:	min. 18 nm
Nagyítás a képernyőn:	15-50 000x
Próbatest elmozdulás	16x16 mm
Próbatest mérete:	φ22 mm, magasság 50mm

29. ábra: TESLA BS 343 típusú hordozható pásztázó elektronmikroszkóp és legfontosabb műszaki jellemzői

4.4 MEGMUNKÁLT ANYAGOK

A kutatómunka során az alábbi anyagminőségeken végeztem bevágási, illetve átvágási kísérleteket:

- AlMgSi0,5 (EN AW 6060, DIN 3.3206) alumíniumötvözet,
- S235JR (1.0037) melegen 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).

AlMgSi0,5 alumíniumötvözet

Az AlMgSi0,5 (EN AW 6060, DIN 3.3206) nemesíthető alumíniumötvözet, mely jól hegeszthető, viszonylag nehezen forgácsolható. Vegyi összetételét a 4. táblázat mutatja.

4. táblázat: AlMgSi0,5 alumíniumötvözet kémiai összetétele

	Si, %	Mg, %	Fe, %	Zn,%	Mn%	Ti,%	Cu,%	Cr, %
AlMgSi0,5	0,3-0,6	0,35-0,6	0,1-0,3	≤ 0,25	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,05

Az ötvözet jellemző szakítószilárdsága $R_m = 130-215$ MPa, folyási határa $R_{p0,2} = 56-160$ MPa, fajlagos szakadási nyúlása 8-16 %, keménysége 45-65 HB intervallumban változik. Rugalmassági modulusa 69 GPa, törési szívóssága $34 \text{ MPam}^{1/2}$. A bevágási kísérlethez a próbadarabok 50x50 mm sajtolt négyzetes rúd, az átvágási kísérletekhez 10 mm vastagságú hengerelt lemez formájában kerültek alkalmazásra. A darabok keménysége 48 illetve 52 HB volt.

S235JR melegen hengerelt általános rendeltetésű ötvözetlen szerkezeti acél

Az S235JR jól hegeszthető, jól kovácsolható, hidegalakítással jól megmunkálható és jól forgácsolható ötvözetlen szerkezeti acél. Vegyi összetételét az 5. táblázat mutatja.

5. táblázat: Az S235JR ötvözetlen szerkezeti acél kémiai összetétele (MSZ EN 10025:1998)

Ötvözet	C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	N, %
S235JR	0,17...0,20	≤ 1,4	—	≤ 0,045	≤ 0,045	≤ 0,009

Szakítószilárdsága $R_m = 340-470$ MPa, folyáshatára $R_{eH} = 225-235$ MPa, szakadási nyúlása 21-26 %, legkisebb ütmunkája $T = 20$ °C-on 27 J. A kísérleti darabok 50 mm vastagságú hengerelt lemez formájában kerültek alkalmazásra. A darabok keménysége 130-135 HB volt.

X12Cr13 martenzites rozsdamentes acél

Az X12Cr13 perlites vagy martenzites szövetszerkezetű Cr acél rosszul hegeszthető, jellemzően nemesített állapotban kerül felhasználásra. Vegyi összetételét a 6. táblázat mutatja.

6. táblázat: Az X12Cr13 martenzites korrózióálló acél kémiai összetétele (MSZ EN 10088/2)

Ötvözet	C, %	Cr, %	Mn, %	Ni, %	P, %	S, %	Si, %
X12Cr13	0-0,15	11,5-13,5	0-1	0-1	≤ 0,04	≤ 0,03	0-1

Rugalmassági modulusa 210 GPa, szilárdsága nemesítve a megeresztési hőmérséklettől függően igen széles tartományban változhat, szakítószilárdsága jellemzően 825-950 MPa, folyáshatára 620-700 MPa, míg lágyított állapotban szakítószilárdsága 450-650 MPa, folyáshatára 250-300 MPa. Szakadási nyúlása a különféle hőkezelési állapotokban 12-20 %, törési szívóssága 52-74 MPa·m^{1/2}.

A kísérleti darabok melegen hengerelt állapotúak voltak és a rajtuk mért keménység 198-203 HB volt, ami egy lágyított állapotnak felel meg.

Ti6Al4V titán ötvözet

A Ti6Al4V (ISO 5832-3:1996) titán ötvözet a legszélesebb körben alkalmazott implantátum ötvözet, rendkívül jó biokompatibilitása miatt. Ezt az ötvözetet leggyakrabban emberi testbe ültetendő protézisek gyártásához használják, és nagyoló megmunkálásuk a legtöbb esetben vízsugaras vágással történik, ugyanis hő hatására kristályközi korrózió indulhat el. Vegyi összetételét a 7. táblázat mutatja

7. táblázat: A Ti6Al4V titánötvözet kémiai összetétele (ISO 5832-3:1996)

Ötvözet	Al, %	V, %	Fe, %	C, %	N, %	H, %	Ti, %
Ti6Al4V	5,5-6,75	3,5 – 4,5	≤ 0,3	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,015	~ 90

A mechanikai tulajdonságok a hőkezelési állapottól függően széles tartományban változhatnak: lágyított állapotban pl. a szakítószilárdság 860-1200 MPa, a folyáshatár 780-910 MPa, a szakadási nyúlás 10-12 %, a Vickers keménység HV 340-370, a rugalmassági modulus 111-119 GPa, a törési szívósság 84-107 MPa·m^{1/2}. Ugyanezen jellemzők értéke öregített állapotban a mérőszámok azonos sorrendjében: 1100-1270 MPa; 1000-1080 MPa; 8-13 %; HV 380-420; 111-119 GPa; 82-100 MPa·m^{1/2}, míg oldó izzítást követő öregítés után 896-1140 MPa; 827-1070 MPa; 10-12%; HV 380-420; 110-117 GPa; 82-100 MPa·m^{1/2}. [CES 2009]

A kísérleti darabok keménysége 342-349 HV volt, ami az anyag lágyított állapotára utal.

Fehér márvány

A márvány mészkő, esetenként dolomit átkristályosodásával keletkező kőzet. Ásványi összetétele >95% kalcit (CaCO_3). A tiszta márvány fehér, szennyező anyagoktól változatos (rózsaszín, szürke, fekete, sávosan tarka) színűvé válhat. Szövetét egymáshoz hézagmentesen kapcsolódó kalcitkristályok alkotják, melyek a fényt visszaverve sajátos ragyogást kölcsönöznek a kőnek.

A márvány jellemző nyomószilárdsága 90-150 MPa, hajlítószilárdsága 6-12 MPa, keménysége pedig a Mohs skála szerint 3,5, ami kb. 229 HV keménységnek felel meg. A márvány rugalmassági modulusa 50-70 GPa, törési szívóssága $0,6-1,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ tartományban változik.

5 AZ ABRAZÍV VÍZSUGARAS VÁGÁS HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

A technológiai paraméterek és a vágás hatékonysága közötti összefüggések feltárására vágási kísérleteket végeztem a miskolci Bay Zoltán Kutatóintézet tulajdonában lévő abrazív vízszugaras vágóberendezésen. A kísérletsorozat egyik célja egy olyan módszer kidolgozása, melynek révén a technológiai paraméterek megválasztása segíthető egy végfelhasználó számára. A vizsgált anyagok AlMgSi0,5 alumíniumötvözet, S235JR szerkezeti acél, X12Cr13 rozsdamentes acél és fehér márvány voltak.

A hatékonyságot befolyásoló technológiai paraméter közül az előtolás, a nyomás és az abrazív anyagáram (a vízszugárhoz adalékolt abrazív anyag időegységre eső tömege) hatását vizsgáltam. Az olyan egyéb paramétereket, mint a vizes fűvóka és abrazív fűvóka átmérője, a fűvóka magassága, az abrazív anyag típusa és szemcsemérete, stb állandó értéken tartottam, értékeiket előzetes tapasztalatok illetve irodalmi adatok alapján választottam meg.

5.1 A BEVÁGÁSI KÍSÉRLETEK KIÉRTÉKELÉSE

5.1.1 ALUMÍNÍUMÖTVÖZET

Az AlMgSi0,5 alumíniumötvözet viszonylag széles körben alkalmazott az ipari felhasználásokban, elsősorban ott, ahol a szilárdság nem kap kiemelt szerepet.

Az abrazív vízszugaras vágással foglalkozó kutatók körében elfogadott, hogy a vágás hatékonysága szemléletesen és könnyen jellemezhető az ún. bevágási mélység (h) értékével [14,15,24,25,26] (ld. 2.4 fejezet). A hatékonyság vizsgálatára bevágási kísérleteket folytattam az adott alumíniumötvözeten (30. ábra).



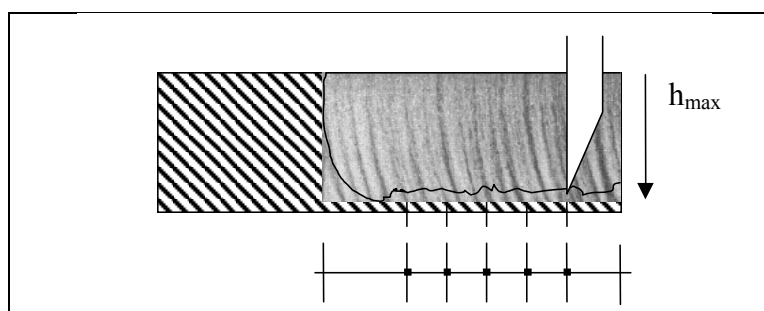
30. ábra: Bevágási kísérletek végzése AlMgSi0,5 alumíniumötvözeten

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 kísérletekhez alkalmazott paraméterek értékei az 8. táblázatban láthatók.

8. táblázat: Vágási kísérleteknél alkalmazott paraméterek alumíniumötvözetben

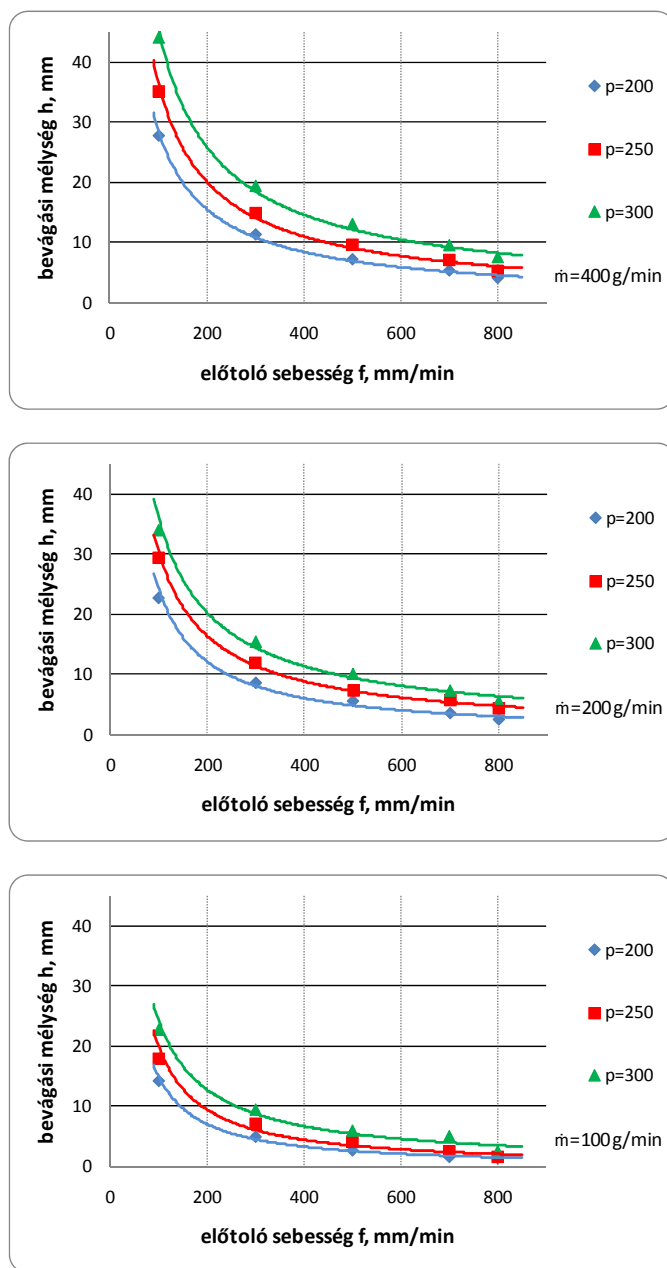
Állandó paraméterek	
Munkadarab anyaga	AlMgSi0,5
Vizes fúvóka átmérője	0,25 mm
Abrazív fúvóka átmérője	0,8 mm
Abrazív fúvóka hossza	70 mm
Alkalmazott fúvóka magasság	2 mm
Abrazív anyag típusa	GARNET #80
Változtatott paraméterek	
Víznyomás, MPa	200-250-300
Abrazív anyagáram, g/min	(100) – 200 – 400
Előtolás, mm/min	100 – 300 – 500 -700- (800)

A bevágási mélységeket (h), a vágás belépő és kilépő oldali 10 mm-ét kihagyva, 30 mm hosszon 5 helyen a 31. ábrán látható módon mértem. A mérési eredmények az I. függelékben láthatók.



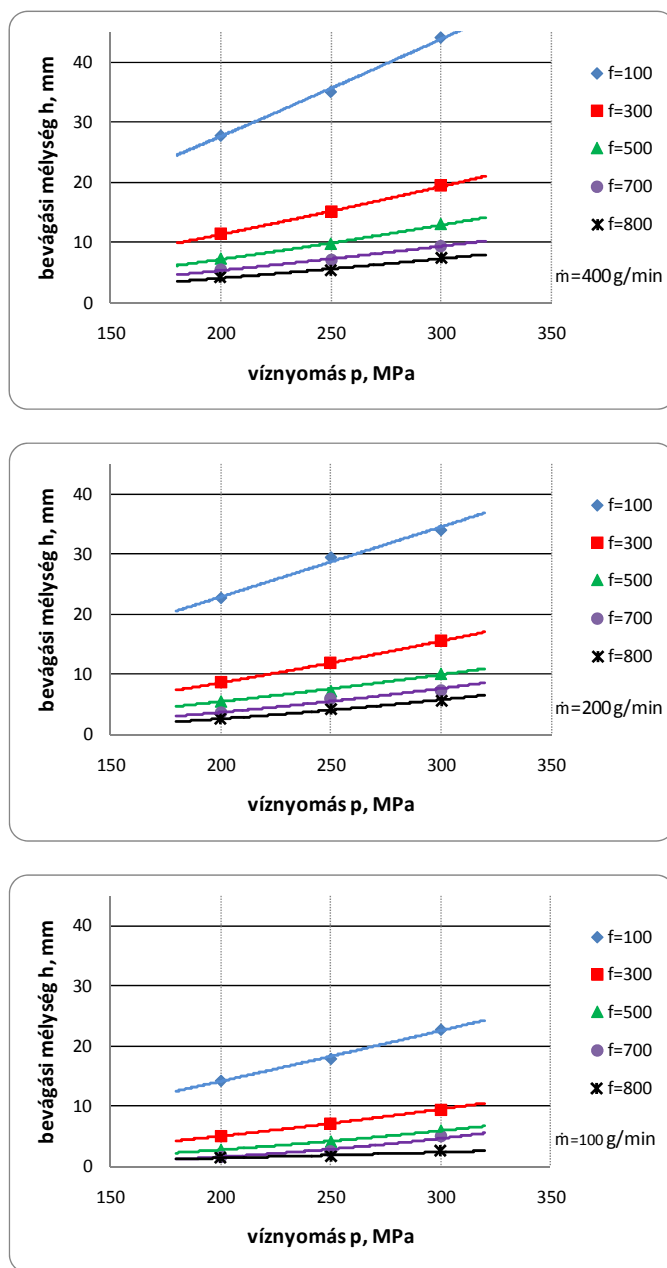
31. ábra: Bevágási mélység mérése

Az AlMgSi0,5 alumíniumötvözet bevágási kísérleteinek eredményeit a 32. 33. és 34. ábrák szemléltetik.



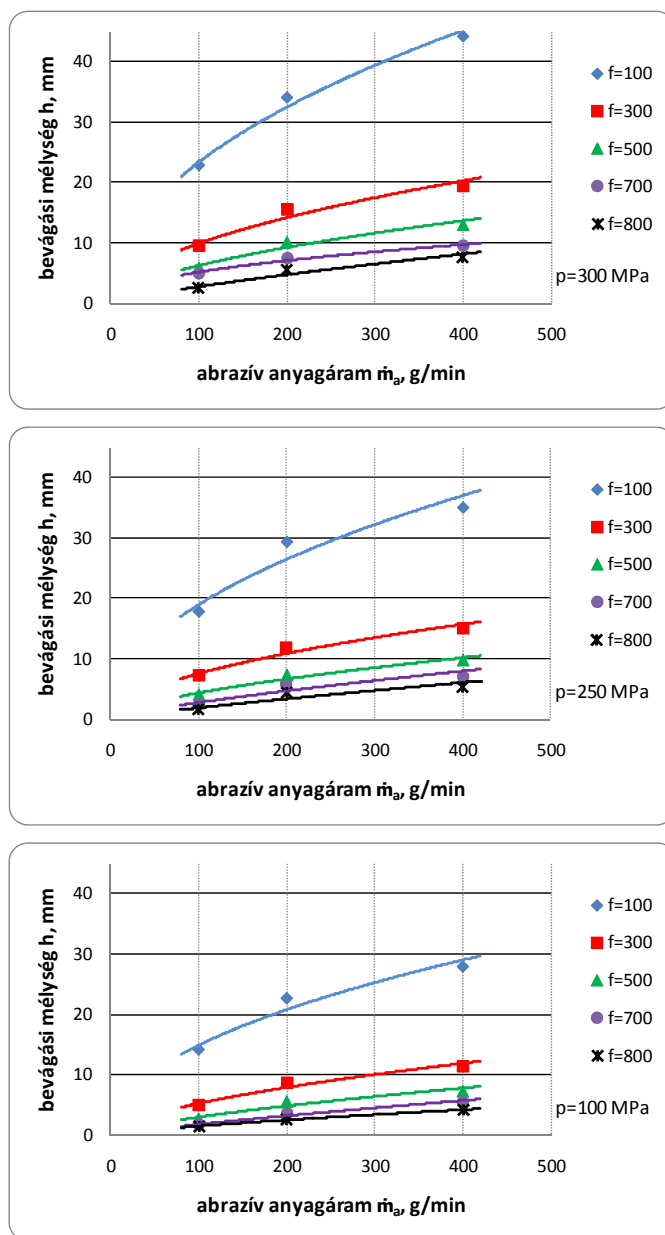
32. ábra: Az előtolás hatása a bevágási mélységre különböző nyomásokon és abrazív anyagáram esetén AlMgSi0,5 alumíniumötvözetten

Mint az a 32. ábrából megállapítható, az előtolás növelésével a bevágási mélység főleg kis sebességeknél meredeken csökken, a görbék hiperbolikus jellegűek, 200-250 mm/min közötti tartományban a bevágási mélység a felére esik. A bevágási mélység változására az előtolás gyakorolja a legnagyobb befolyást. A megmunkálási költségek alakulására a technológiai paraméterek közül az előtolás nagysága van a legmarkánsabb hatással. Az előtolást ezért mindig a lehető olyan legnagyobb értékre kell megválasztani, mellyel a kellő pontosság és felületminőség még biztosítható.



33. ábra: A nyomás hatása a bevágási mélységre különböző előtolások és abrazív anyagáram esetén AlMgSi0,5 alumíniumötvözetén

A nyomás változtatásának hatása a 33. ábra alapján lineáris. Érdekes megfigyelni, hogy míg 100 mm/min előtolás esetén a nyomás változtatásának jelentős a szerepe, addig nagyobb előtoló sebességek mellett (pl. 800 mm/min) a nyomásváltoztatás hatása egyre kisebb (a görbék meredeksége nagyobb előtolásokon egyre kisebb). Ez az ún. behatási idő nagyságával magyarázható. Mivel az előtolás növelésével csökken a behatási idő, így a nagyobb nyomásból eredő részecske sebesség növekedés nem képes hatását kellő mértékben kifejteni.



34. ábra: Az abrazív anyagáram nagyságának hatása a bevágási mélységre különböző előtolások és víznyomás esetén AlMgSi0,5 alumíniumötvözetten

Az abrazív anyagáram mennyisége növeli a bevágási mélység nagyságát (34. ábra), különösen kis abrazív anyagáramok növelésekor. A vizsgált tartományban a bevágási mélység a duplájára nő. Ha az abrazív anyagáram nagysága túllép egy bizonyos értéket, akkor bevágási kísérletek végzésekor a túlságosan sok „visszacsapódó” abrazív szemcse azonban akár csökkentheti is a bevágási mélységet.

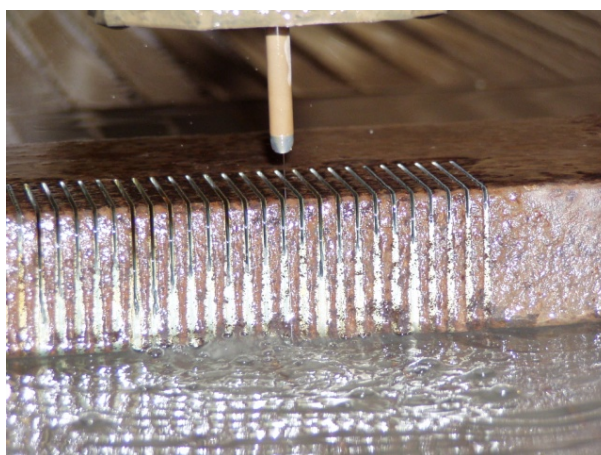
5.1.2 SZERKEZETI ACÉL

Bevágási kísérleteket végeztem S235JR melegen hengerelt ötvözetlen szerkezeti acél anyagon is. A kísérletek során a beállított fix és változtatott paraméterek a 9. táblázatban láthatók. A vágás kivitelezését a 35. ábra mutatja.

9. táblázat: Vágási kísérleteknél alkalmazott paraméterek acél anyagon

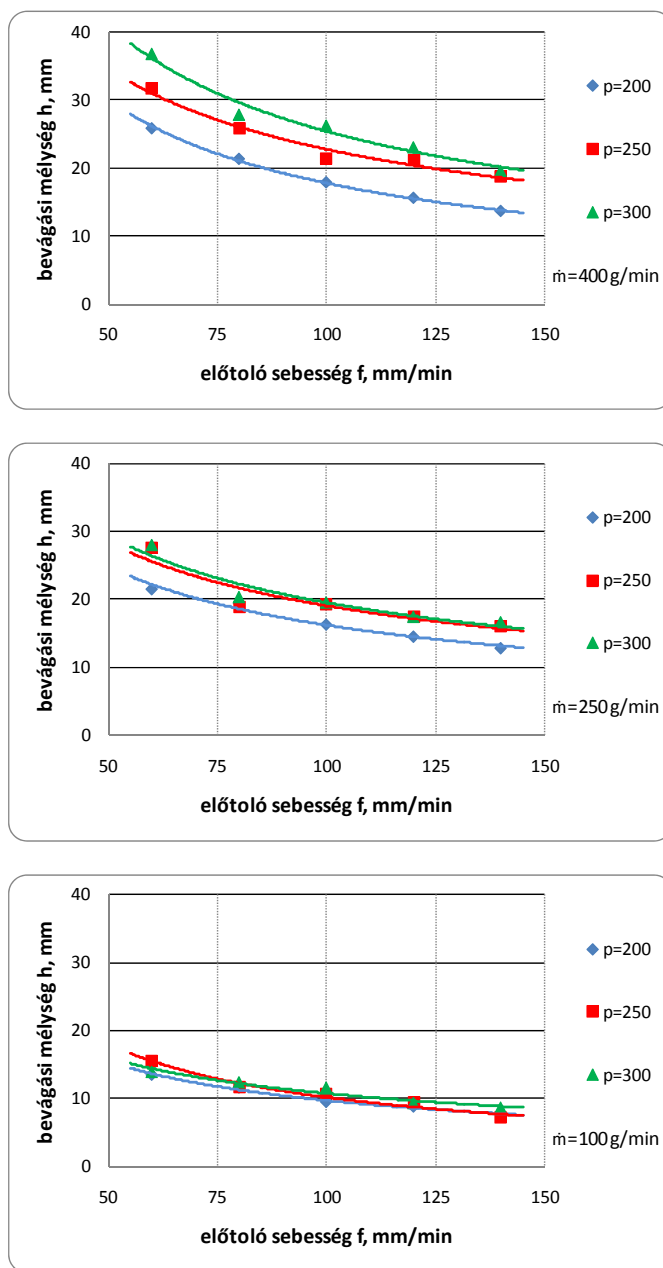
Állandó paraméterek	
Munkadarab anyaga	S235JR
Vizes fűvóka átmérője	0,25 mm
Abrazív fűvóka átmérője	0,8 mm
Abrazív fűvóka hossza	70 mm
Alkalmazott fűvóka magasság	2 mm
Abrazív anyag típusa	GARNET #80
Változtatott paraméterek	
Víznyomás, MPa	200-250-300
Abrazív anyagáram, g/min	(100) – 250 – 400
Előtolás, mm/min	60 – 80 – 100 – 120 - 140

A kísérleteket követően ugyancsak a bevágási mélységet mértem. A mérési eredmények a II. függelékben láthatók.



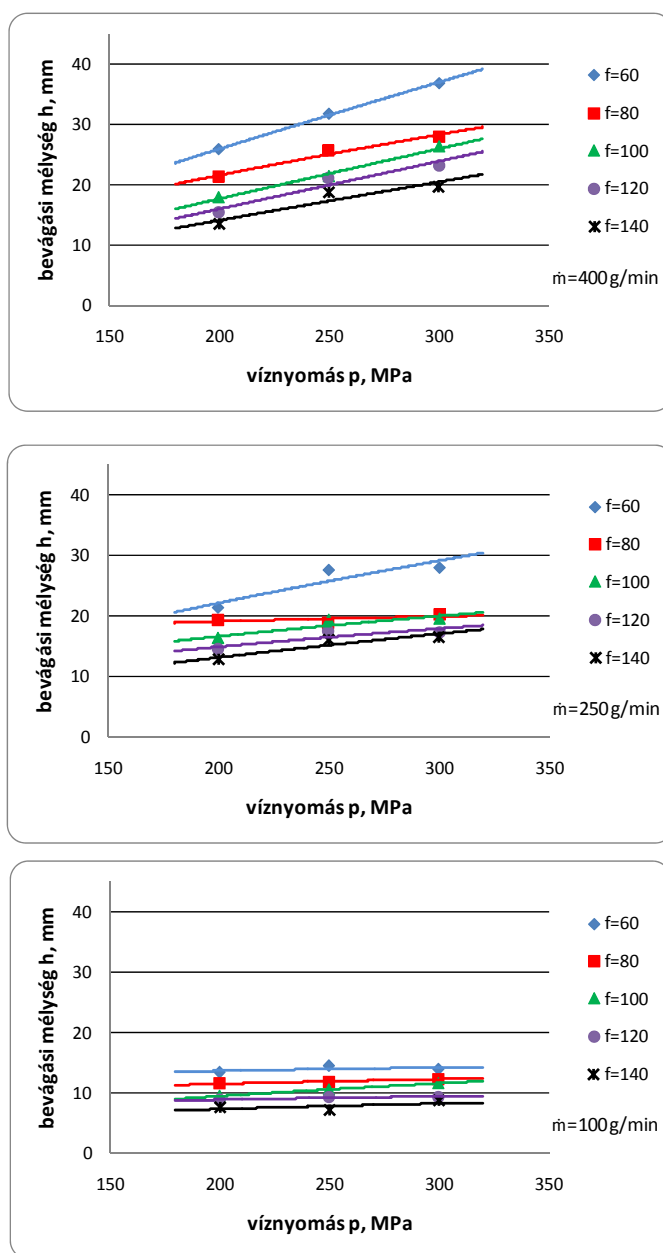
35. ábra: Bevágási kísérletek S235JR szerkezeti acélon

Az S235JR szerkezeti acél bevágási kísérleteinek eredményeit a 36., 37. és 38. ábrák szemléltetik.



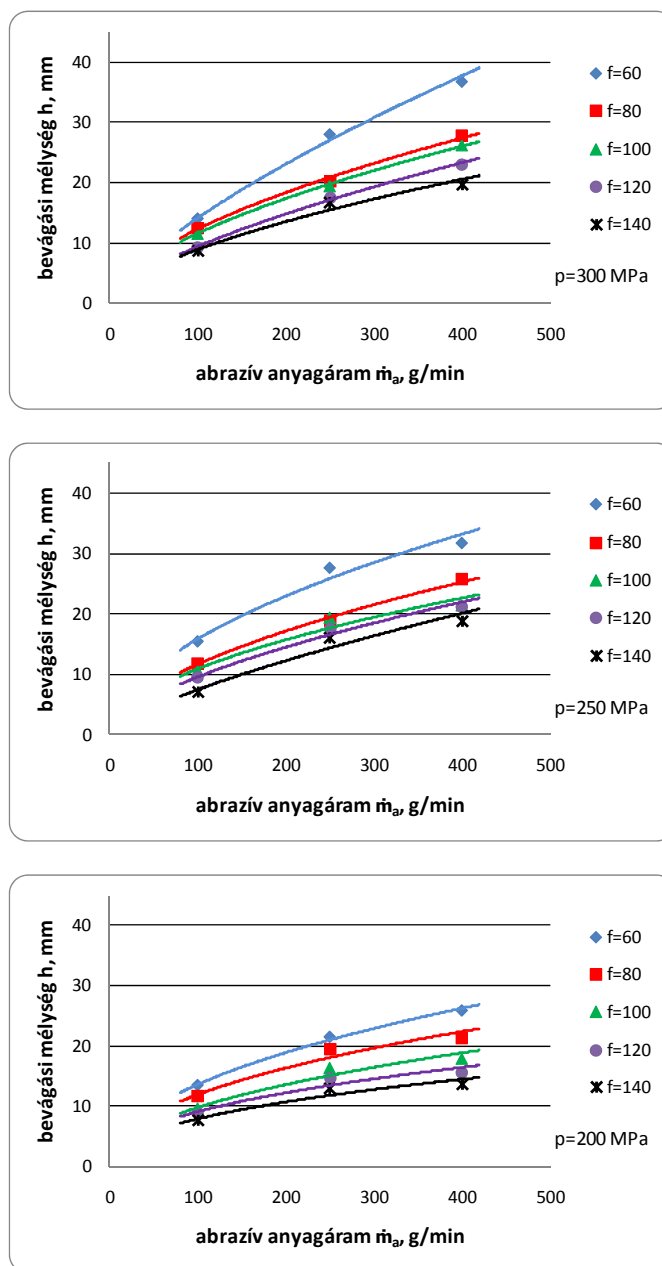
36. ábra: Az előtolás hatása a bevágási mélységre különböző nyomásokon és abrazív anyagáram esetén S235JR acélon

A 36. ábrából jól látható, hogy az előtoló sebesség növelése acél anyag esetén is egyértelműen csökkenti a bevágási mélységet. Ugyanakkor érdemes azt is megfigyelni, hogy kis abrazív anyagáramoknál a nyomás szerepe nem érvényesül, pl. $\dot{m}=100$ g/min esetén a különböző nyomásokon felvett görbék gyakorlatilag együtt futnak, vagyis az abrazív anyag mennyisége acél esetén ilyen mértékben tulajdonképpen nem elegendő.



37. ábra: A víznyomás hatása a bevágási mélységre különböző előtolások és abrazív anyagáram esetén S235JR acélon

Az alumíniumötvözeteknél elmondottakhoz hasonlóan, a 37. ábra alapján megállapítható, hogy a nyomás hatása, csak nagyobb abrazív anyagáramok és kisebb előtolások mellett érvényesül. Ilyenkor a nyomás növelésével egyértelműen nő a bevágás mélysége, különösen, amikor a vágási front haladási sebessége kisebb, azaz a részecskéknek van kellő ideje a megmunkáláshoz és nem az elhajló sugár hatása érvényesül.



38. ábra: Az abrazív anyagáram nagyságának hatása a bevágási mélységre különböző előtolások és nyomás esetén S235JR acélon

Az abrazív anyagáram hatása karakterisztikusabb a nyomás hatásánál a vizsgált tartományban és egyértelműen növeli a vágás hatékonyságát (azaz a bevágás mélységét). Főleg kisebb előtoló sebességek mellett az is megfigyelhető, hogy a görbék meredeksége csökken, ami azzal magyarázható, hogy ha nem vágjuk át az anyagot, akkor a szemcsék mennyiségét növelve, növekszik a vágási front aljáról visszacsapódó részecskék száma, ami látszólag rontja a vágás hatékonyságát. Az anyag teljes átvágása esetén ez a jelenség természetesen nem áll fenn.

5.1.3 FEHÉR MÁRVÁNY

Az előző két anyaghoz analóg módon kísérleteket folytattam fehér márvány anyagon. A vizsgálati paramétereket a 10. táblázat, magát a bevágási kísérletet a 39. ábra mutatja.

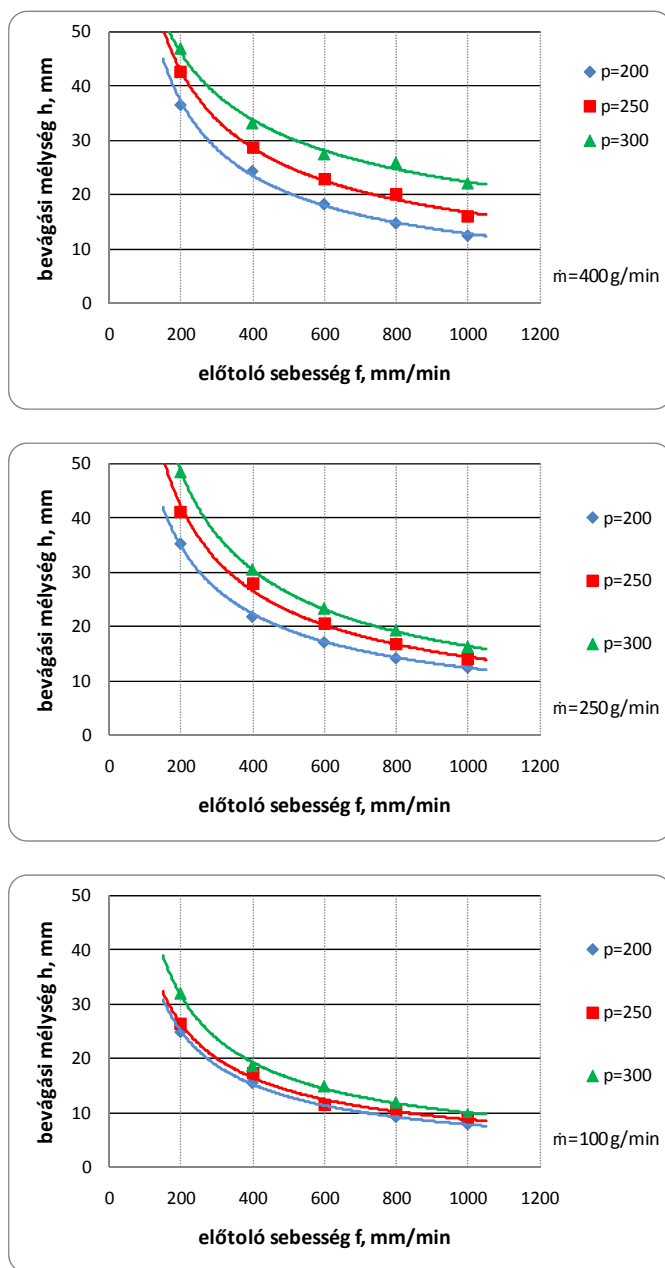
10. táblázat: Vágási kísérleteknél alkalmazott paraméterek fehér márvány anyagon

Állandó paraméterek	
Munkadarab anyaga	fehér márvány
Vizes fűvóka átmérője	0,25 mm
Abrazív fűvóka átmérője	0,8 mm
Abrazív fűvóka hossza	70 mm
Alkalmazott fűvóka magasság	2 mm
Abrazív anyag típusa	GARNET #80
Változtatott paraméterek	
Víznyomás, MPa	200-250-300
Abrazív anyagáram, g/min	100 – 250 – 400
Előtolás, mm/min	200.- 400 – 600 - 1000



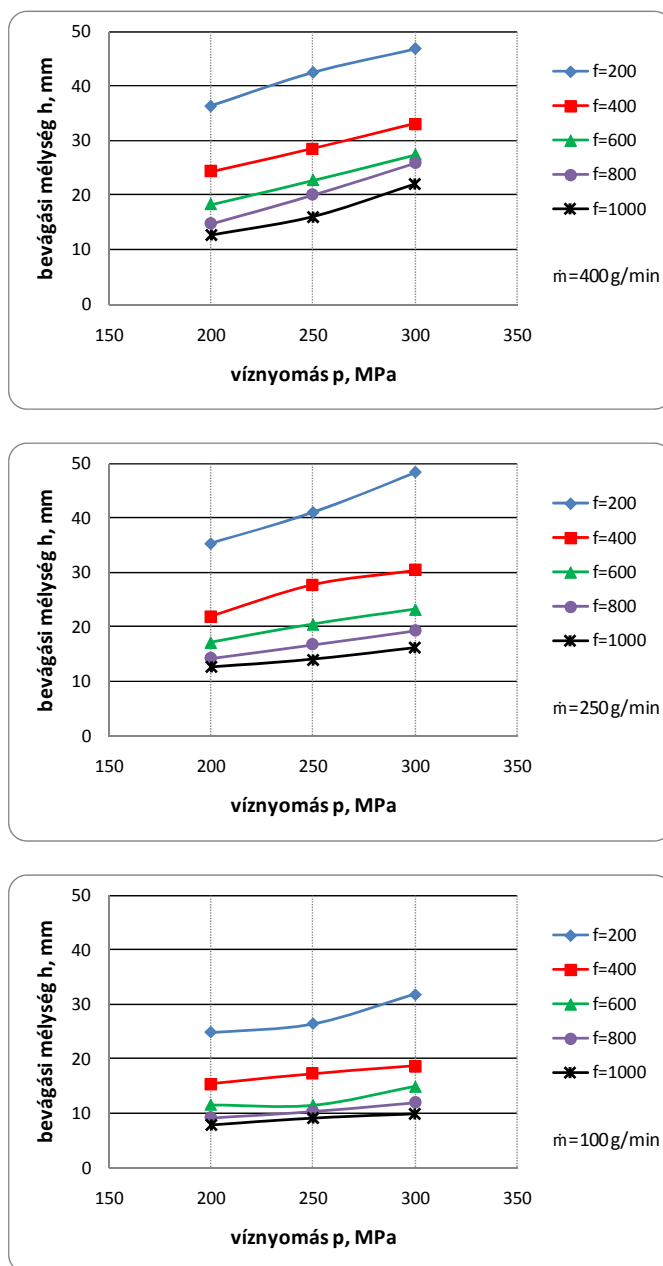
39. ábra: Bevágási kísérletek fehér márvány anyagon

A fehér márvány anyag bevágási kísérleteinek eredményeit a 40., 41. és 42. ábrák szemléltetik. A mérési eredmények a III. függelékben láthatók.



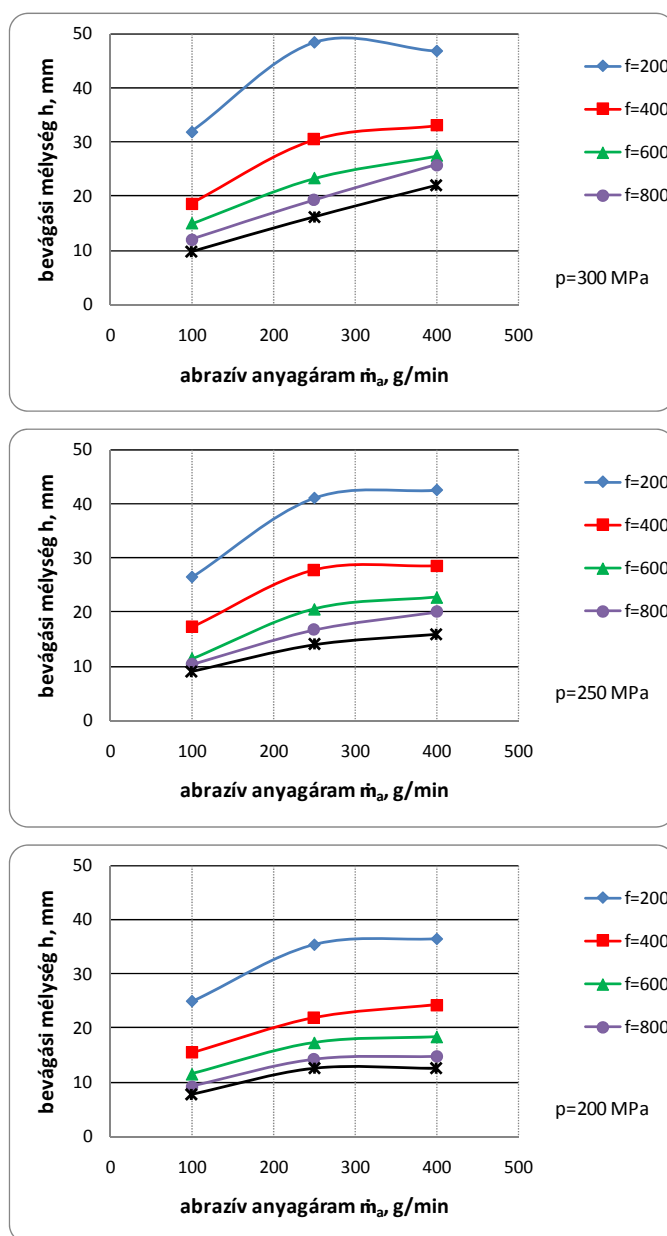
40. ábra: Az előtolás hatása a bevágási mélységre különböző nyomásokon és abrazív anyagáram esetén fehér márvány anyagon

Az előtoló sebesség hatása a márvány anyag esetén is markáns (40. ábra). Növelésével meredeken csökken a bevágás mélysége, ugyanakkor jóval nagyobb mélységek érhetők el, mint az acél vagy alumínium anyag esetén. A sebesség növelésével a csökkenés mértéke nagyobb abrazív anyagáramok és nyomások mellett jelentősebb.



41. ábra: A víznyomás hatása a bevágási mélységre különböző előtoló sebességek és abrazív anyagáram esetén fehér márvány anyagon

A víznyomás növelése márvány anyagon is növeli a vágás hatékonyságát (41. ábra), főleg a kisebb előtoló sebességek alkalmazása mellett. Érdekes megfigyelni, hogy az $\dot{m}=250$ g/min és az $\dot{m}=400$ g/min abrazív anyagáram esetén felvett görbék között szinte alig van különbség, vagyis a márványnál az abrazív anyagáram ilyen tartományban történő növelése már nem ad érdemi javulást a vágás eredményét, a bevágási mélységet illetően.



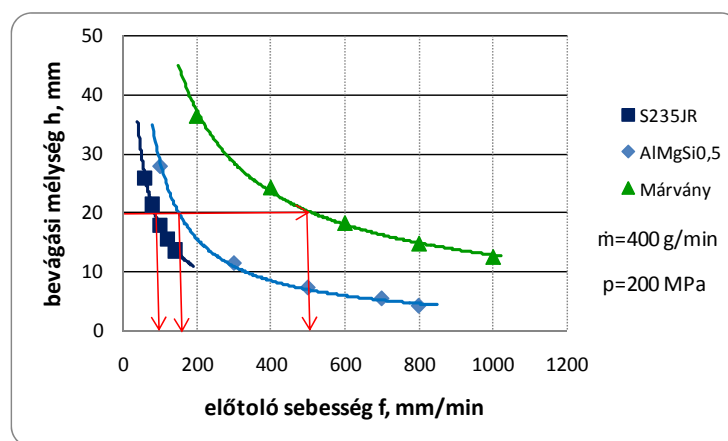
42. ábra: Az abrazív anyagáram nagyságának hatása a bevágási mélységre különböző előtoló sebességek és víznyomás esetén fehér márvány anyagon

Bár alapvetően az abrazív anyagáram nagyságának növelése növeli a bevágási mélység nagyságát (42. ábra), a három vizsgált anyag közül a márvány esetén érzékelhető leginkább az a hatás, hogy bevágások készítésekor (ha nem vágjuk át az anyagot) az abrazív anyagáram növelése egy ponton túl már rontja a vágás hatékonyságát. Ezért van, hogy a görbék – különösen kisebb előtoló sebességeknél – visszahajlanak. Ez a tartomány jelen esetben épp a 300-400 g/min tartományra tehető.

5.1.4 A KÜLÖNBÖZŐ ANYAGOK ÖSSZEVETÉSE

Összehasonlítva a 33.-44., 36.-38. és 40.-42. ábrákat megállapítható, hogy az alumíniumötvözet sokkal könnyebben megmunkálható, mint a rozsdamentes acél, a márvány pedig még az alumíniumötvözetnél is hatékonyabban megmunkálható. Ez természetesen nem meglepetés, hisz az alumínium keménysége és szilárdsága jóval kisebb az acélénál, ezért könnyebben megmunkálható.

A 43. ábrán együtt tüntettem fel acél, alumíniumötvözet és márvány anyag bevágási kísérleteinek eredményeit az előtolás függvényében.



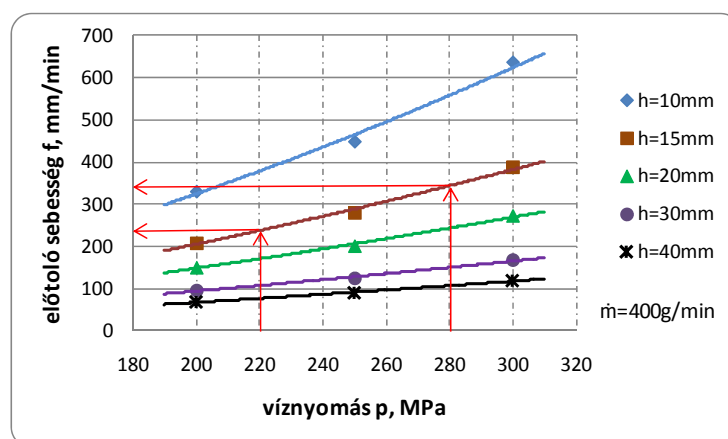
43. ábra: Az előtolás hatása a bevágási mélységre különböző megmunkált anyagokon

Az ábrából jól látható, hogy a márvány, bár keménysége jóval meghaladja az alumíniumét, sokkal könnyebben megmunkálható. Pl. egy 20 mm mélységű bevágás, az ábra alapján, ugyanazon nagyságú nyomás és abrazív anyagáram esetén, acél anyagon kb. 80 mm/min, alumíniumötvözetben kb. 150 mm/min, míg a márvány anyagon 500 mm/min előtoló sebességgel készíthető. Vagyis a márvány több mint háromszor hatékonyabban vágható, mint az alumínium és hatszor hatékonyabban, mint az acél. Ha összevetjük a három anyag HB keménységeire átszámított keménységeit, azt tapasztaljuk, hogy a márvány a legkeményebb (189 HB), valamivel kevésbé kemény az acél (130 HB) és jóval puhább az alumínium (50 HB).

A jelenség magyarázata a következő: Az acél és alumínium anyagoknál az anyagleválasztás alapvetően a korábbiakban leírt ún. szívós erózióval megy végbe, ezért a két anyag közül a keményebb munkálható meg nehezebben. A márvány esetén viszont az anyagleválasztás rideg erózióval megy végbe, itt a keménység nem lényeges, az anyag repedési hajlama befolyásolja a folyamatot. Mivel a márvány nagyon rideg, a rideg erózió a meghatározó, aminek eredménye az, hogy a három anyag közül a márvány munkálható meg a legkönnyebben.

5.2 A TECHNOLÓGIAI ADATOK ÉS A BEVÁGÁSI MÉLYSÉG MATEMATIKAI KAPCSOLATA

A technológiai adatok együttes megválasztását segíthetjük azzal, ha adott abrazív anyagáramnál a kísérleti eredményeket ábrázolva a nyomás-előtolás síkon, ún. izo-bevágási mélység görbéket állíthatunk elő. A 44. ábrán látható görbéken a bevágási mélységek azonosak az AlMgSi0,5 anyagon. Az ily módon megszerkesztett nomogramok rendkívül hasznos segítséget jelenthetnek a vízsugaras vágást az ipari gyakorlatban alkalmazók számára. Az ábrából leolvasható pl., hogy egyaránt 15 mm bevágási mélységet érhetünk el 220 MPa nyomáson kb. 230 mm/min előtolás, vagy 280 MPa nyomáson 340 mm/min előtolás alkalmazásával. A felhasználó szabadon dönthet az izo-görbe mentén a nyomás és az előtoló sebesség alkalmazásáról. Ezen lehetőségnek azért van jelentősége, mert a nagyobb előtoló sebességnél kedvezőbb költségek mellett lehet forgácsolni, míg nagyobb nyomásoknál kedvezőbb lesz a vágott felület minősége. Hasonló izo-bevágási mélység görbék szerkeszthetők az $\dot{m}_a$ -f és a p - $\dot{m}_a$ síkokon is, illetve a további vizsgált anyagminőségekre.



44. ábra: Izo-bevágási mélység görbék a nyomás-előtolás síkon
($\dot{m}=400\text{g/min}$, anyag: AlMgSi)

Hasonlóan megszerkesztett görbék segítségével a felhasználó eldöntheti, hogy adott mélységű bevágást milyen technológiai paraméterekkel biztosít, ami egyfajta optimalás lehetőségét jelentheti számára a műveleti költségek szempontjából, a vágott felület minőségét is figyelembe véve.

A paraméterek tényleges együttes vizsgálata a 2.4 fejezetben ismertetett matematikai modellek segítségével történhet. Ez esetben az előbb felrajzolt nomogramok komplex megközelítést kapjuk, ugyanis tetszőleges paraméter hármassal megállapítható az adott technológiai adatokkal elérhető bevágási mélység. A 33.-44., 36.-38. és 40.-42. ábrákon bemutatott vágási kísérletek eredményeit felhasználva megalkotható a bevágási mélység matematikai modellje. Elfogadva Monno egyenletét,

$$h = A \cdot \frac{p^B \cdot \dot{m}^C}{f^D} \quad (7)$$

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 meghatározhatók az összefüggés konstansai (11. táblázat). A regresszió analízist a (4) egyenlet linearizálása után a MINITAB nevű szoftverrel végeztem el.

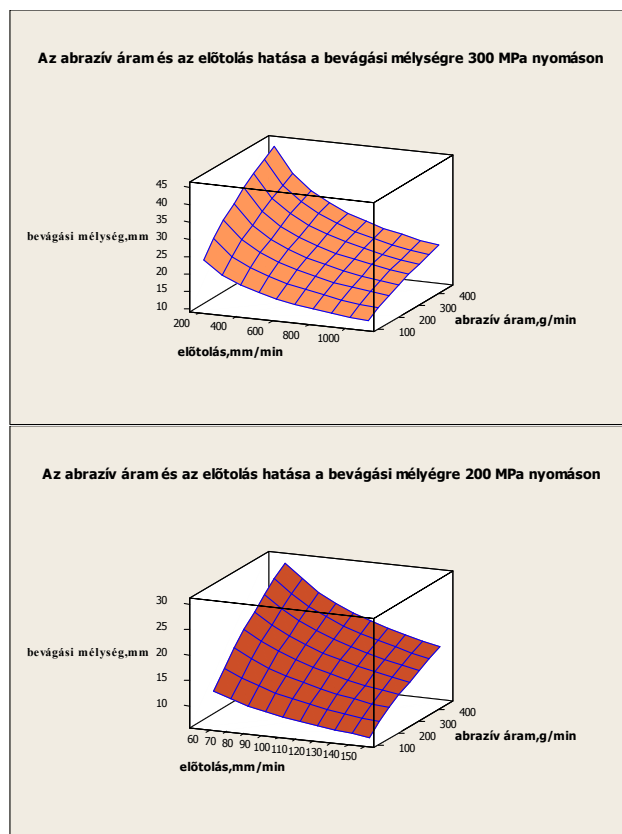
11. táblázat: A Monno modell regresszióval meghatározott konstansai

Anyag	A	B	C	D	S	R^2
S235JR	0,862	0,520	0,556	0,637	1,08	96,30%
X12Cr13	1,290	0,568	0,411	0,684	1,06	96,50%
Márvány	0,441	0,772	0,414	0,438	1,12	94,60%
AlMgSi0,5	0,046	1,270	0,706	0,947	1,22	95,30%

Összehasonlításként rozsdamentes, nemesített állapotú X12Cr13 (MSZ EN 10088), korrózió acélon is végeztem bevágási kísérleteket (IV. függelék). A próbadarab keménysége 310 HV volt. A 11. táblázatban ezen kísérletekből kapott korrelációk értékeit is feltüntettem.

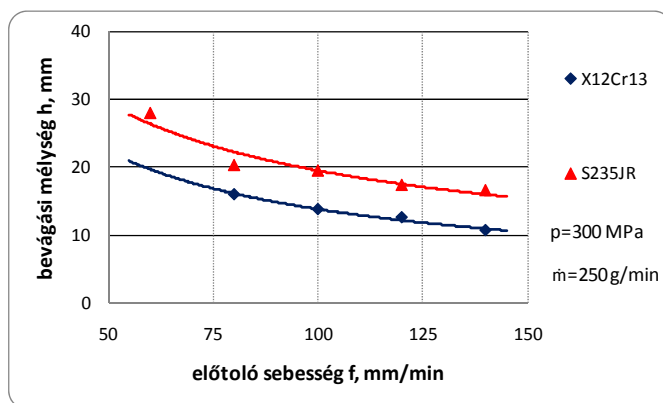
A táblázatban szereplő R^2 az ún. többszörös determinációs együttható, mely a többszörös korrelációs együttható négyzete. Többváltozós modellben általánosan ez használatos a korreláció jóságának becslésére. S az adatok szórása, vagyis az ún. eltérések négyzetösszegeinek átlagából vont négyzetgyök. Ennek értékei jóval kisebbek magának a mélység mérésének pontatlanságánál.

A meghatározott modellek, a változók egyikének konstans értéken tartása mellett ábrázolhatók. Erre mutat példát a 45. ábra.



45. ábra: Monno- féle modell alapján számított felületek megjelenítése MINITAB szoftverrel fehér márvány és S235JR acél anyagon

A 46. ábra a kétféle acél vágási eredményeinek összehasonlítását mutatja.



46. ábra: S235JR és X12Cr13 acél bevágási mélységének változása az előtoló sebesség függvényében

A 46. ábrából megfigyelhető, hogy a keményebb (310HV) X12Cr13 acél kisebb hatékonysággal vágható a kevésbé kemény (160 HV) S235JR acélnál. Ez azt a feltételezést támasztja alá, hogy a szivós anyagoknál a megmunkálhatóság egyik alapvető paramétere a munkadarab keménysége. Érdekes megfigyelni, hogy a két acél anyagra kapott modellek konstansai és kitevői (11. táblázat) milyen közeli értékeket mutatnak. Leginkább az A konstans értékében mutatkozik jelentősebb eltérés, vagyis feltételezhető, hogy ez áll összefüggésben az anyag keménységével.

A Monno modell kiszámított kitevő konstansai alapján következtetéseket vonhatunk le a technológiai adatoknak a bevágási mélység változására gyakorolt hatásáról. Ezt elősegítendő a 12. táblázat a bevágási mélység százalékos változásait mutatja abban az esetben, ha az adott paramétert 10%-al megváltoztatjuk a kiértékelési tartományban.

12. táblázat: A bevágási mélység százalékos változása a vizsgált paraméter 10%-os megváltoztatása esetén

	S235JR	X12Cr13	AlMgSi0,5	Márvány
nyomás, p	5,1%	5,6%	12,8%	7,6%
abrazív anyagáram, $\dot{m}_a$	5,4%	4,0%	7,0%	4,0%
előtoló sebesség, f	6,3%	6,7%	9,4%	4,3%

A 12. táblázatból megállapítható, hogy míg acél anyagoknál az előtoló sebesség változtatása a legdominánsabb, addig az alumíniumötvözet és a márvány esetén a nyomásváltozás hatása a nagyobb. Ez megítélésem szerint azzal magyarázható, hogy az acél anyagok szívósak, de relatíve kemények is (az alumíniumhoz viszonyítva), ezért sem a szívós, sem a rideg erózió nem indul be könnyen. A megfelelő anyagválasztáshoz hosszabb behatási idő szükséges, vagyis domináns paraméter az előtoló sebesség. Az alumíniumötvözet esetén annak kis keménysége miatt a szívós erózió, márvány anyag esetén annak ridegsége miatt a rideg erózió indul be könnyen, ezért a megmunkáláshoz nincs szükség hosszú időre, viszont a nyomásváltozásból eredően nő a részecskék sebessége – ezáltal energiatartalma - ami intenzívebb anyagválasztást eredményez, vagyis a nyomás válik a domináns paraméterré.

Az így kapott matematikai modellek alkalmasak arra, hogy az adott technológiai adatok tartományában a vizsgált anyagokon előre meghatározzuk az elérhető bevágási mélységet, vagy ha úgy tetszik az átvágható anyagvastagságot. Ez utóbbit az adott paraméterekkel elért bevágási mélység 80%-ában szokták meghatározni.

5.3 KÖVETKEZTETÉSEK

A vízsugaras vágás hatékonyságának jellemzésére az irodalomban széles körben elfogadott minősítő paraméter az ún. bevágási mélység.

Az acél, alumíniumötvözet és márvány anyagokon elvégzett vizsgálataim során a hatékonyságot befolyásoló számos paraméter közül az előtolás, a nyomás és az abrazív anyagáram hatását vizsgáltam. Elvégzett vizsgálataim alapján az alábbi összegző megállapítások tehetők:

Az előtoló sebesség hatása nagyon karakterisztikus. Növelésével a bevágási mélység főleg kis sebességeknél meredeken csökken. Megállapítottam, hogy a vizsgált anyagoknál a bevágási mélység változására az előtolás gyakorolja a legnagyobb befolyást

A nyomás növelése növeli a bevágási mélységet. Míg kisebb előtolás esetén a nyomás változtatásának jelentős a szerepe, addig nagyobb előtoló sebességek mellett a

nyomásválttatásának hatása egyre kisebb (a görbék nagyobb előtolásokon egyre laposabbak). Ez az ún. behatási idő nagyságával magyarázható. Mivel az előtolás növelésével csökken a behatási idő, így a nagyobb nyomásból eredő részecske sebesség növekedés nem képes hatását kellő mértékben kifejezteni.

Az abrazív anyagáram mennyisége növeli a bevágási mélység nagyságát. Kisebb abrazív áramoknál a bevágási mélység közel lineárisan nő. Ha az abrazív anyagáram nagysága túllép egy bizonyos értéket, akkor bevágási kísérleteknél a túlságosan sok „visszacsapódó” abrazív szemcse azonban akár csökkentheti is a bevágási mélységet. Ez a jelenség a teljes keresztmetszetben történő átvágásnál természetesen nem jelentkezik.

Az alumíniumötvözeteknél elmondottakhoz hasonlóan, a 37. ábra alapján megállapítható, hogy a nyomás hatása csak nagyobb abrazív anyagáramok és kisebb előtolások mellett karakterisztikus. Ilyenkor a nyomás növelése egyértelműen növeli a bevágás mélységét, különösen, amikor a vágási front haladási sebessége kisebb, azaz a részecskének van kellő ideje a megmunkáláshoz és nem az elhajló sugár hatása érvényesül.

A márvány anyagon végzett kísérleteknél a technológiai adatok hatása azonos volt a fémeknél tapasztaltakkal, de jóval nagyobb mélységek voltak elérhetők, mint az acél vagy alumínium esetén.

Bár alapvetően az abrazív anyagáram nagyságának növelése növeli a bevágási mélység nagyságát, a három vizsgált anyag közül a márványnál érzékelhető leginkább az a hatás, hogy bevágások készítésekor (ha nem vágjuk át az anyagot) az abrazív anyagáram növelése egy ponton túl már rontja a vágás hatékonyságát. Ezért van, hogy az abrazív anyag mennyiségének növelése egy bizonyos határon túl látszólag rontja a vágás hatékonyságát.

A különböző anyagokon végzett kísérletekből megállapítható, hogy az alumíniumötvözet sokkal könnyebben megmunkálható, mint a rozsdamentes acél, a márvány pedig még az alumíniumötvözetnél is hatékonyabban vágható. Az előbbi magyarázata az, hogy az alumínium keménysége és szilárdsága jóval kisebb az acélénál. A márvány azonban keményebb az alumíniumnál és a vizsgált acéloknál is mégis könnyebben megmunkálható. A márvány kb. háromszor hatékonyabban vágható, mint az alumíniumötvözet és hatszor hatékonyabban az acélnál.

A jelenség magyarázata a különböző eróziós mechanizmusokban rejlik. Az acél és alumínium anyagoknál az anyagleválasztás alapvetően a korábbiakban leírt ún. szívós erózióval megy végbe, ezért a két anyag közül a keményebb munkálható meg nehezebben. A márvány esetén viszont az anyagleválasztás rideg erózióval megy végbe, itt a keménység nem lényeges, az anyag repedési hajlama befolyásolja a folyamatot. Mivel a márvány nagyon rideg, az erózió nagyon be tud indulni, aminek eredménye az, hogy a három anyag közül a márvány munkálható meg a legkönnyebben.

Az elvégzett kísérletek alapján nomogramok szerkesztésével segíthetők a végfelhasználók a megfelelő technológiai adatok megválasztásában. Ezek rendkívül hasznos segítséget jelenthetnek a vízsugaras vágást az ipari gyakorlatban alkalmazók számára, ugyanis nagyobb előtoló sebességnél kedvezőbb költségek mellett lehet forgácsolni, míg nagyobb nyomásoknál a vágott felület minősége jobb. Így a felhasználó eldöntheti, hogy adott mélységű bevágást milyen technológiai paraméterekkel biztosít.

A technológiai paraméterek együttes vizsgálata empirikus matematikai modell (Monno) segítségével történt. Az alkalmazott modell előnye, hogy a végfelhasználók számára is kezelhető. Az így kapott matematikai összefüggések alkalmasak arra, hogy az adott technológiai adatok tartományában a vizsgált anyagokon előre meghatározzuk az elérhető bevágási mélységet, vagy ha úgy tetszik az átvágható anyagvastagságot. Ez utóbbit az adott paraméterekkel elért bevágási mélység 80%-ában szokták meghatározni.

A felállított matematikai összefüggés kiszámított kitevő konstansai alapján következtetéseket vonhatunk le a technológiai adatoknak a bevágási mélység változására gyakorolt hatásáról. Míg acél anyagoknál az előtoló sebesség változtatása a legdominánsabb, addig az alumíniumötvözet és a márvány esetén a nyomás hatása a legintenzívebb. Ez azzal magyarázható, hogy az acél anyagok szívósak, de relatíve kemények is (az alumíniumhoz viszonyítva), ezért sem a szívós, sem a rideg erózió nem indul be könnyen, ezért megfelelő anyagleválasztáshoz hosszabb behatási idő szükséges, vagyis domináns paraméter az előtoló sebesség, ami a behatási idővel fordítottan arányos. Az alumíniumötvözet esetén annak kis keménysége miatt a szívós erózió, márvány anyag esetén annak ridegsége miatt a rideg erózió indul be könnyen, ezért a megmunkáláshoz nincs szükség hosszú időre, viszont a nyomásváltozásból eredően növekszik a részecskék sebessége – ezáltal energiatartalma - ami intenzívebb anyagleválasztást eredményez, vagyis a nyomás válik a domináns paraméterré.

6 A MEGMUNKÁLT FELÜLET MINŐSÉGE ÉS PONTOSSÁGA

A megmunkálás paramétereit mindig hatással vannak a megmunkált felület minőségére és pontosságára. A költségek csökkentése érdekében minden felhasználó törekszik a vágófej előtolásának értékét a lehető legnagyobbra megválasztani, de az előtolás növelése együtt jár a makro- és mikrogeometriai hibák növekedésével. A kutatók a vízsugárral vágott felület minőségét elsősorban annak felületi érdességével, míg a pontosságát a vágórés ferdeségéből adódó méreteltérésekkel jellemzik [51, 52, 63, 64].

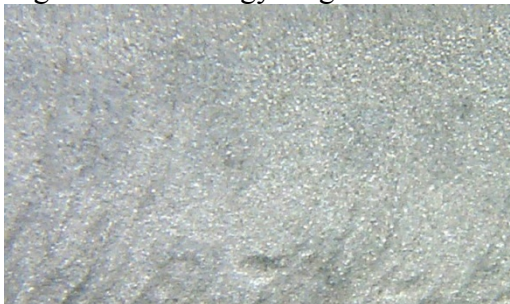
A megmunkált felület pontosságának és felületminőségének vizsgálatára átvágási kísérleteket folytattam 10 mm vastagságú AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben. A kísérletek paramétereit a 13. táblázat mutatja.

13. táblázat: Átvágási kísérleteknél alkalmazott paraméterek
AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben

Állandó paraméterek	
Munkadarab anyaga	AlMgSi0,5
Anyagvastagság	10 mm
Vizes fűvóka átmérője	0,25 mm
Abrazív fűvóka átmérője	0,8 mm
Abrazív fűvóka hossza	70 mm
Alkalmazott fűvóka magasság	2 mm
Abrazív anyag típusa	GARNET #80
Változtatott paraméterek	
Víznyomás, MPa	200-250-300
Abrazív anyagáram, g/min	100 – 200 – 400
Előtolás, mm/min	100- 300 – 500

6.1 ABRAZÍV VÍZSUGÁRRAL VÁGOTT FELÜLET ÉRDESSÉGE

Az abrazív vízsugaras vágással megmunkált felületek egyik jellegzetessége, hogy rajtuk megjelennek, a sugaras vágásokra általában is jellemző, ún. elhajlási vonalak, elsősorban a vágott felület alsó részében, ami a felület érdességének megítélése szempontjából döntő lehet. Erre mutat példát a vágási kísérletek egy megmunkált felülete a 47. ábrán.



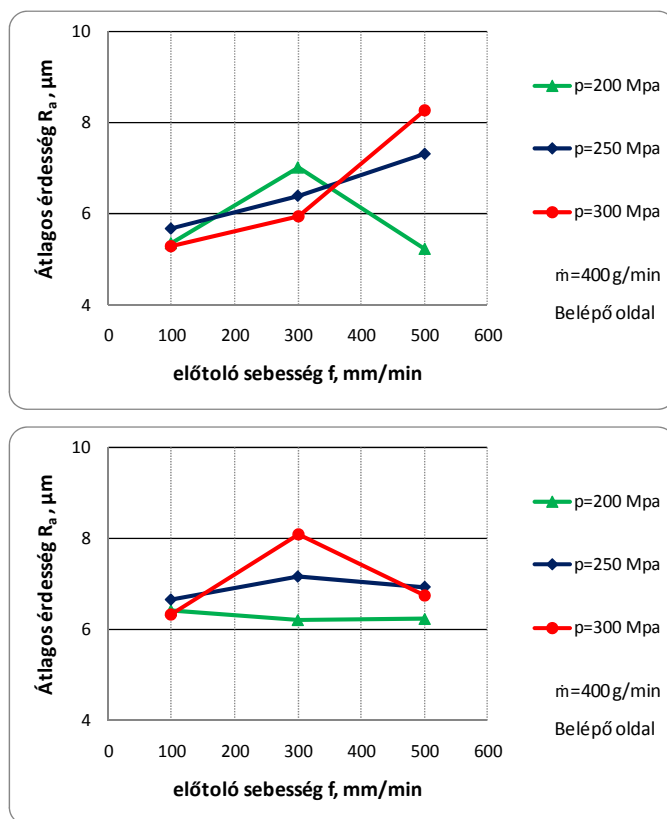
47. ábra: : Abrazív vízsugárral vágott AlMgSi0,5 ötvözet felülete

Bár a felületek „érdességének” különbözősége a belépő és kilépő oldalon szemmel is jól látható, az érdességi mérőszámok ezt – mint azt korábbi fejezetben már írtam – nem mindig igazolják.

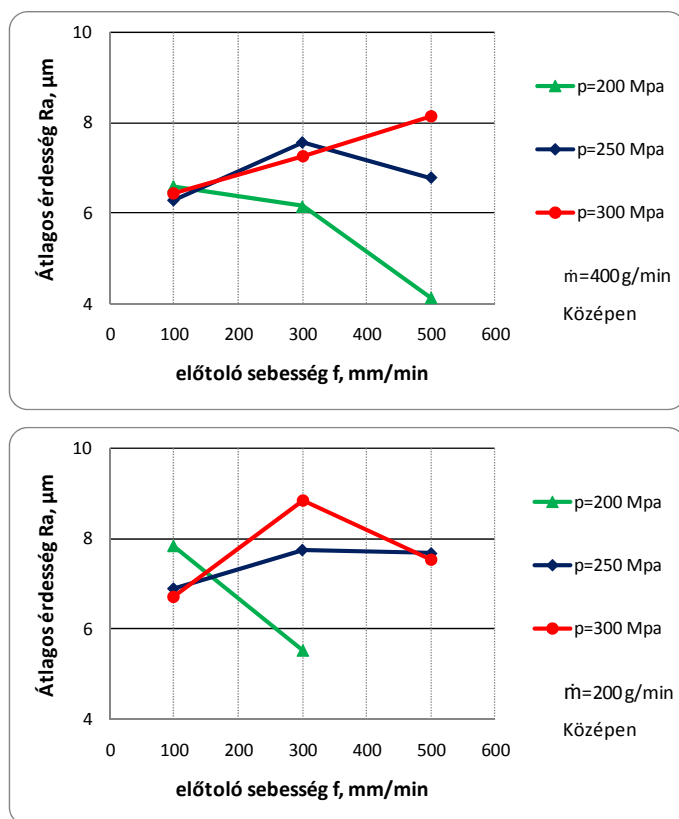
6.1.1 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A vágási kísérletek elvégzése után S8P típusú Perthometer-rel mértem a legjellegzetesebb felületérdességi mérőszámokat, azaz az átlagos érdességet (R_a), a maximális érdességet (R_t), az egyenetlenség magasságát (R_z), a hullámosságot (W_t), és a teljes profilhibát (P_t). Ezeket a mérőszámokat valamennyi technológiai beállítás esetén két vágást készítve, és minden vágott felületnél három helyen, a belépési oldalon (2 mm-re a felső felülettől), a felület közepén (5mm), és a kilépési oldalon (2 mm-re a kilépéstől). A kilépési oldalon azoknál a beállításoknál, ahol a sugár nem vágta keresztül a teljes anyagvastagságot, természetesen a felület mérése nem volt lehetséges. Az összes mérési adatot az V-VII. függelék tartalmazza.

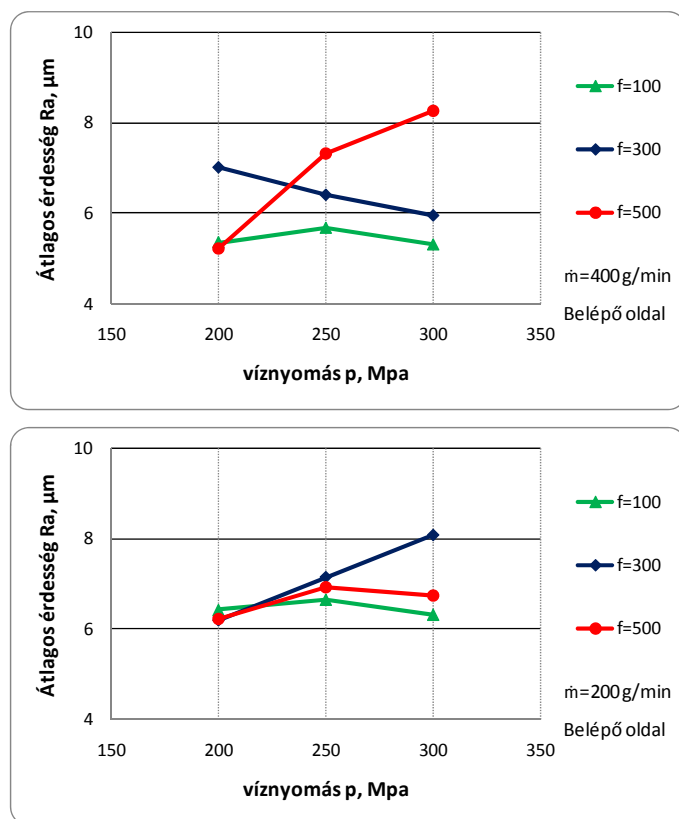
A vizsgálat eredményeit szemléltetik a 48.-55. ábrák.



48. ábra: Az átlagos érdesség változása az előtoló sebesség függvényében különböző nyomások és abrazív anyagáramok esetén AlMgSi0,5 alumíniumötvözetten a belépő oldalon

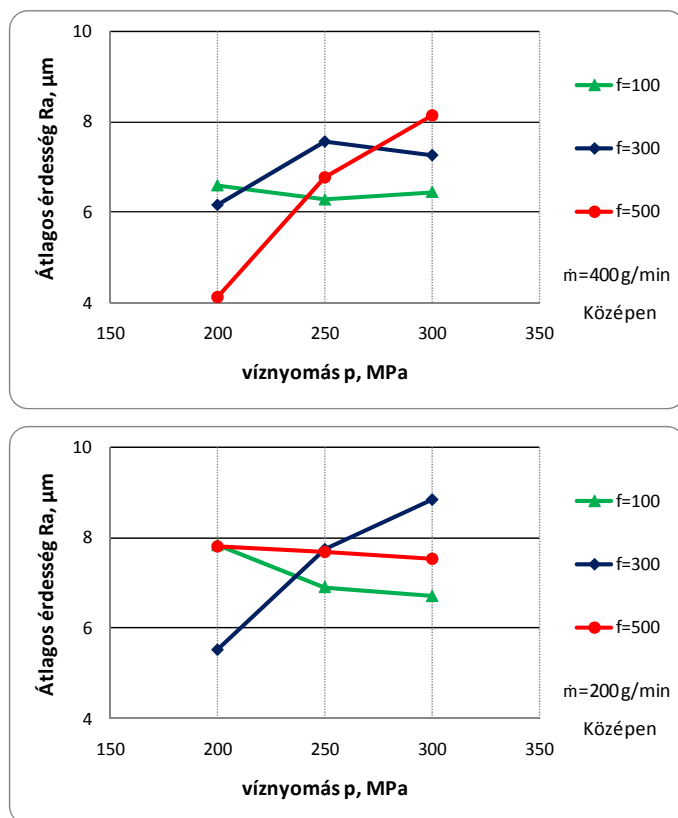


49. ábra: Az átlagos érdesség változása az előtoló sebesség függvényében különböző nyomások és abrazív anyagáramok esetén AlMgSi_{0,5} alumíniumötvözetten, középen



50. ábra: Az átlagos érdesség változása a víznyomás függvényében különböző előtoló sebességek és abrazív áramok esetén AlMgSi_{0,5} alumíniumötvözetten a belépő oldalon

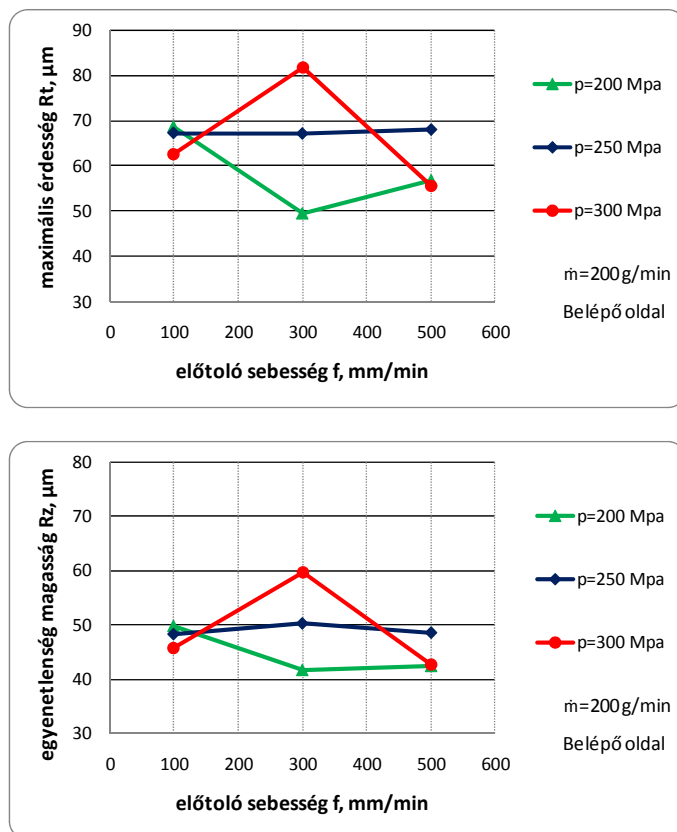
A mérési eredményekből (48. és 49. ábra) megállapítható, hogy az előtolásnak az átlagos érdességre gyakorolt hatása kis víznyomásoknál (200 MPa) nem egyértelmű sem a belépő oldalon, sem a megmunkált felület közepén. Nagyobb nyomásoknál az érdesség növekszik az előtolás függvényében. Ez összhangban van az irodalmi összefoglalóban ismertett kételyekkel. A különböző nyomásokon és abrazív anyagáramoknál felvett mérési eredmények alapján egyértelmű tendencia nem mutatható ki. A felület belépő oldalán, illetve a közepén kapott értékek nem mutatnak érdemi eltérést egymáshoz képest sem.



51. ábra: Az átlagos érdesség változása a víznyomás függvényében különböző előtoló sebességek és abrazív anyagáramok esetén AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben, középen

A víznyomás nagysága (50. és 51. ábra), hasonlóan az előtoló sebességhez nem mutat egyértelmű összefüggést a megmunkált felület átlagos érdességével. Bizonyos előtolások mellett növeli, máskor csökkenti annak nagyságát. Ugyancsak nem érzékelhetők érdemi különbségek a megmunkált felület belépő oldala és közepe között.

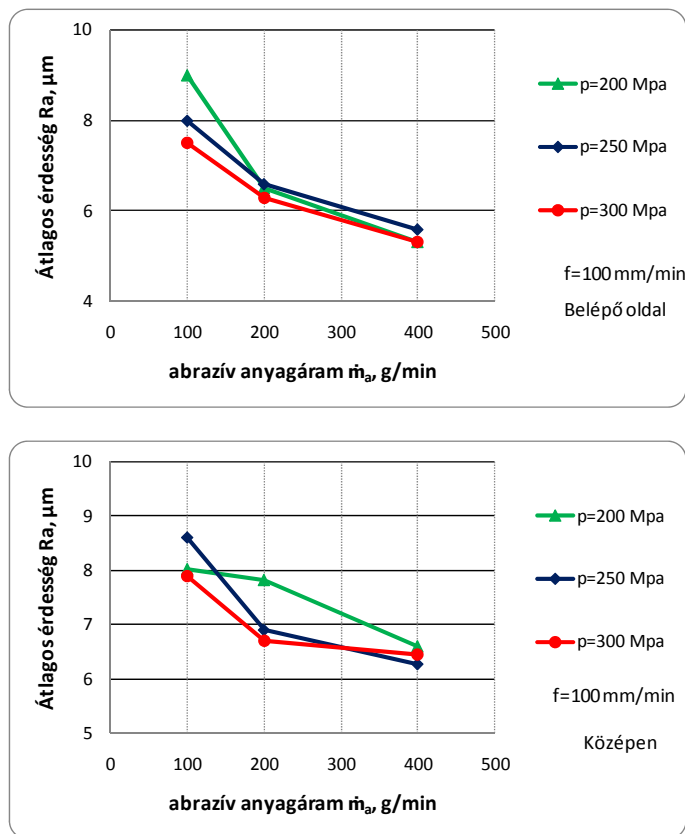
Hasonló jelenségeket tapasztaltam a maximális érdesség (R_t) és az egyenetlenség magasság (R_z) mért értékei és az előtoló sebesség illetve a víznyomás kapcsolatának vizsgálatakor. Különösebb részletezés nélkül, ennek szemléltetését mutatja az 52. ábra a vágott felület tetején.



52. ábra: A maximális érdesség (R_t) és az egyenetlenség magasság (R_z) változása az előtolás függvényében különböző nyomásokon AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben

Az ábra alapján megállapítható, hogy nem teremthető egyértelmű kapcsolat a megmunkált felület maximális érdessége, illetve egyenetlenség magassága és az előtoló sebesség között.

Az 53. ábra alapján az abrazív anyagáram nagyságának hatása az átlagos érdességre jóval egyértelműbb az előző két paraméternél. Itt kimutatható, hogy az abrazív anyag mennyisége javítja a megmunkált felület átlagos érdességét. Ennek magyarázata az, hogy az abrazív anyagáram nagyságának növelésekor megnövekszik az időegység alatt a felülettel ütköző részecskék száma, aminek eredményeképp a mikroegyenetlenségek eltávolításának valószínűsége megnő, a nagyobb számban legördülő szemcsék pedig mintegy koptatás által kedvezően befolyásolhatják a felület átlagos érdességét.

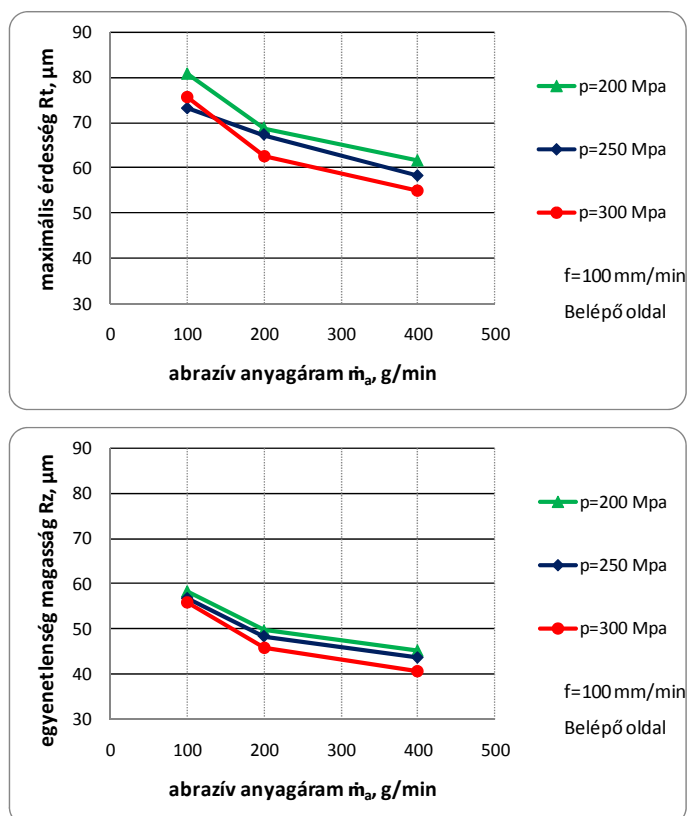


53. ábra: Az átlagos érdesség változása az abrazív anyagáram függvényében $f=100\text{mm/min}$ előtoló sebesség és különböző víznyomások esetén AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben, a belépő oldalon és középen

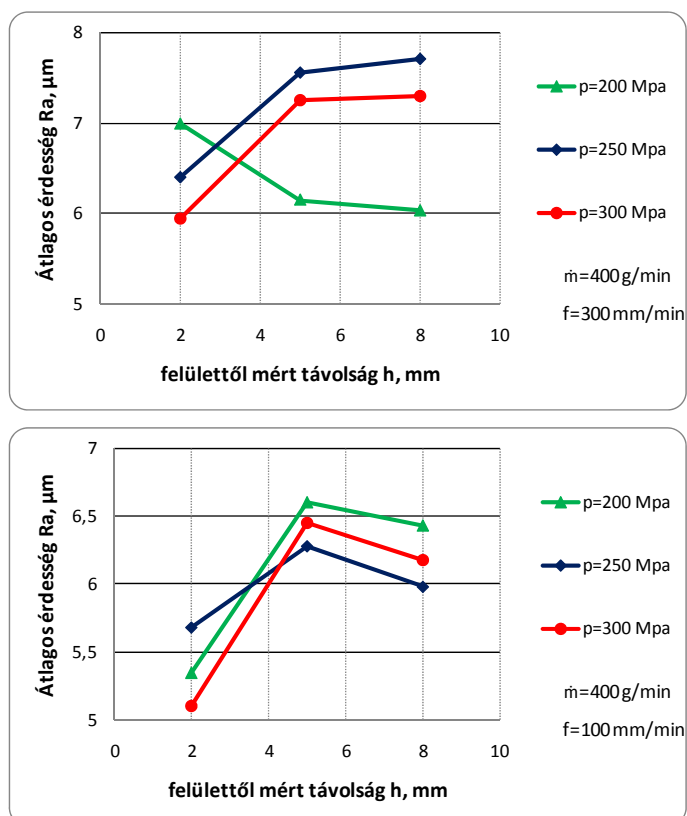
Ezen jelenségek miatt az átlagos érdességhez hasonló változást tapasztalunk a maximális érdesség, illetve egyenetlenség magasság és az abrazív anyagáram nagysága között (54. ábra).

Az 54. ábrából megállapítható, hogy a maximális érdesség és az egyenetlenség magasság egyértelműen csökkenő tendenciát mutat az abrazív anyagáram nagyságának növelésekor, ami átlagos érdességnél elmondottakkal abszolút összhangban van.

A felület belépő, közép és kilépő oldala közötti átlagos érdesség különbségeket szemlélteti az 55. ábra.



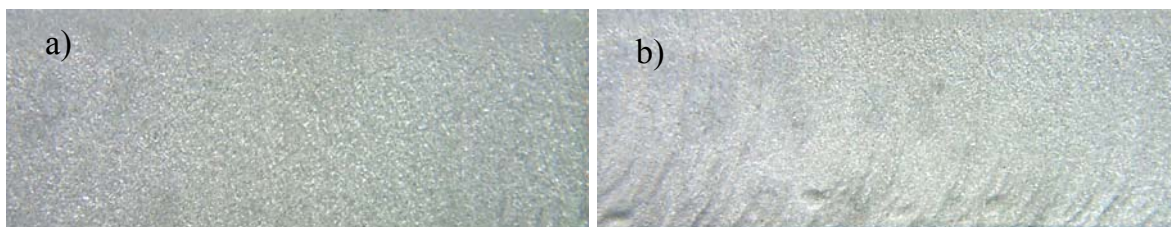
54. ábra: A maximális érdesség (R_t) és az egyenetlenség magasság (R_z) változása az abrazív anyagáram függvényében különböző nyomásokon AlMgSi_{0,5} alumíniumötvözetben



55. ábra: Az átlagos érdesség változása a belépő oldali felülettől mért távolság függvényében AlMgSi_{0,5} alumíniumötvözetben

Az 55. ábrából megállapítható, hogy jóllehet a felülettől mért távolság függvényében a szabad szemmel is érzékelhető, hogy növekszik a felület „barázdáltsága”, vagyis az érdesség növekedését váránk. Ez nem minden esetben kimutatható, sőt, olykor a felület érdessége kisebb a vágott felület alján, mint a közepén.

Az 56. ábrán szabad szemmel is érzékelhető a felületi egyenetlenségek különbsége az a) és b) ábra között, ill. hogy a b) ábrán a belépési oldalon finomabb a felület, mint a kilépésin.

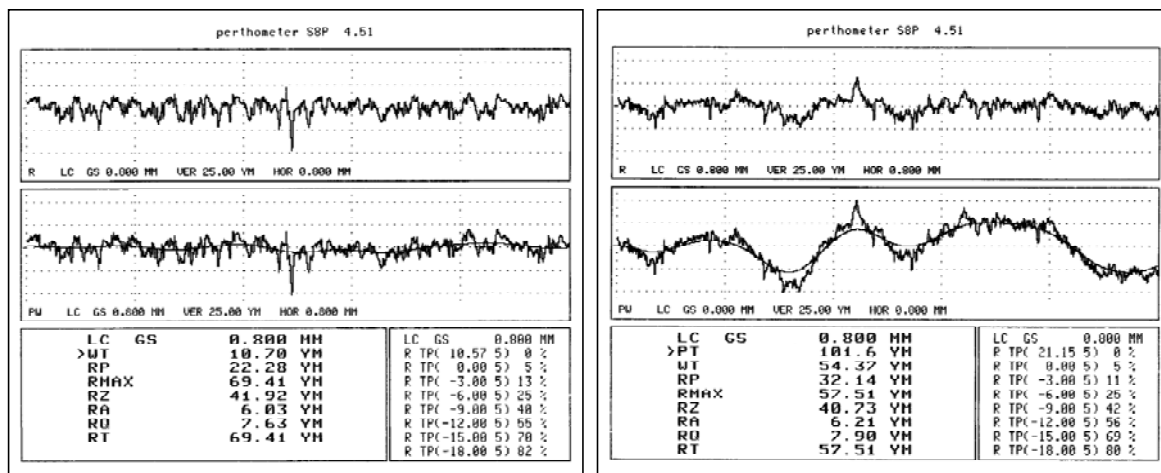


56. ábra: : Abrázív vízszaggárral vágott AlMgSi0,5 ötvözet felülete

a) $f=100$ mm/min, $p=250$ MPa, $m_a=400$ g/min

b) $f=300$ mm/min, $p=200$ MPa, $m_a=200$ g/min

Megvizsgálva azonban a két felület közepén mért átlagos érdességeket azt tapasztaljuk, hogy azok lényegében azonosak, értékük $R_a \approx 6$ μ m. A jelenség magyarázatához vizsgáljuk meg a két felület Perthométerrel felvett érdességi diagramjait (57. ábra).



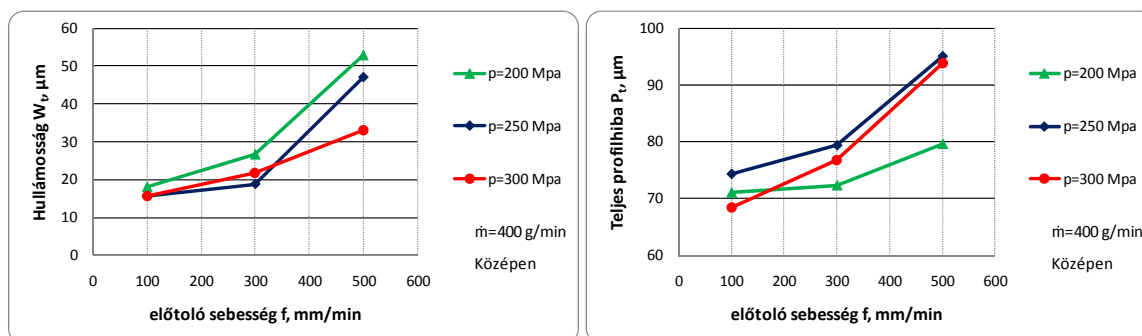
a)

b)

57. ábra: Vízszaggárral vágott felületek érdességi diagramjai. Anyag: AlMgSi0,5

Az 57. ábra regisztrátumain látható felső görbe az ún. érdességi profil, melynek felvételekor az érdességmérők kiszűrtek a felület hullámosságából adódó felületi egyenetlenségeket. Az alsó görbék a teljes profil egyenlőtlenségeket mutatják, és éppen ezek azok a „hullámok”, melyeket szabad szemmel is érzékelünk és észleljük a felületet „rosszabb érdességűnek”. Ha összevetjük a két felület hullámosságát vagy teljes profilhibáját akkor már az 56. ábrán láthatóaknak megfelelően a hullámosságra az a) ábrán $W_t=10,7$ μ m, a b) ábrán $W_t=54,6$ μ m, teljes profilhibára pedig $P_t=61,5$ μ m illetve $P_t=94,4$ μ m értékeket kapunk, ami már összhangban van a felületek látványával.

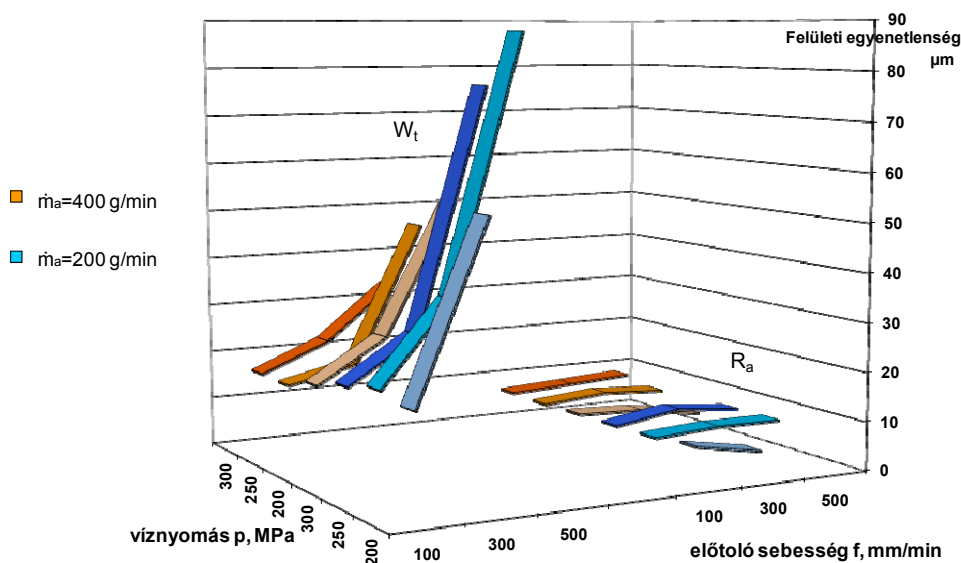
A hullámosság és a teljes profilhiba technológiai adatoktól való függésére mutat kiragadott példát az 58. ábra.



58. ábra: A hullámosság (W_t) és a teljes profilhiba (P_t) változása az előtolás függvényében a megmunkált felület közepén (AlMgSi0,5)

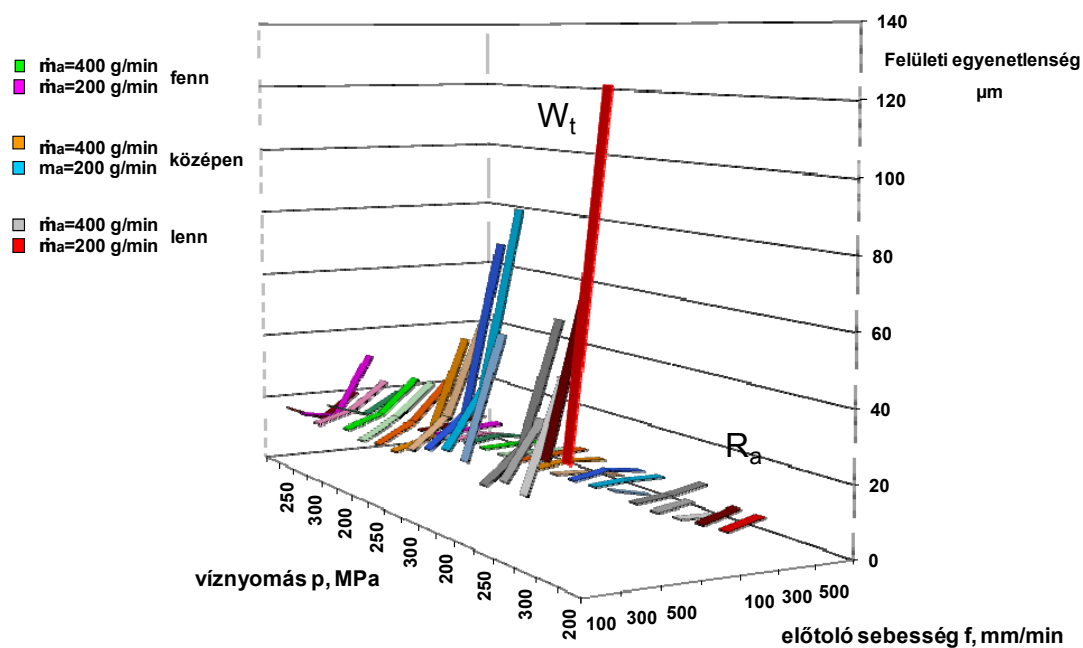
Az ábrából megállapítható, hogy az előtolás egyértelműen növeli a megmunkált felület hullámosságát és profilhibáját.

A víznyomás és az előtoló sebesség együttes hatása figyelhető meg az 59. és 60. ábrán.



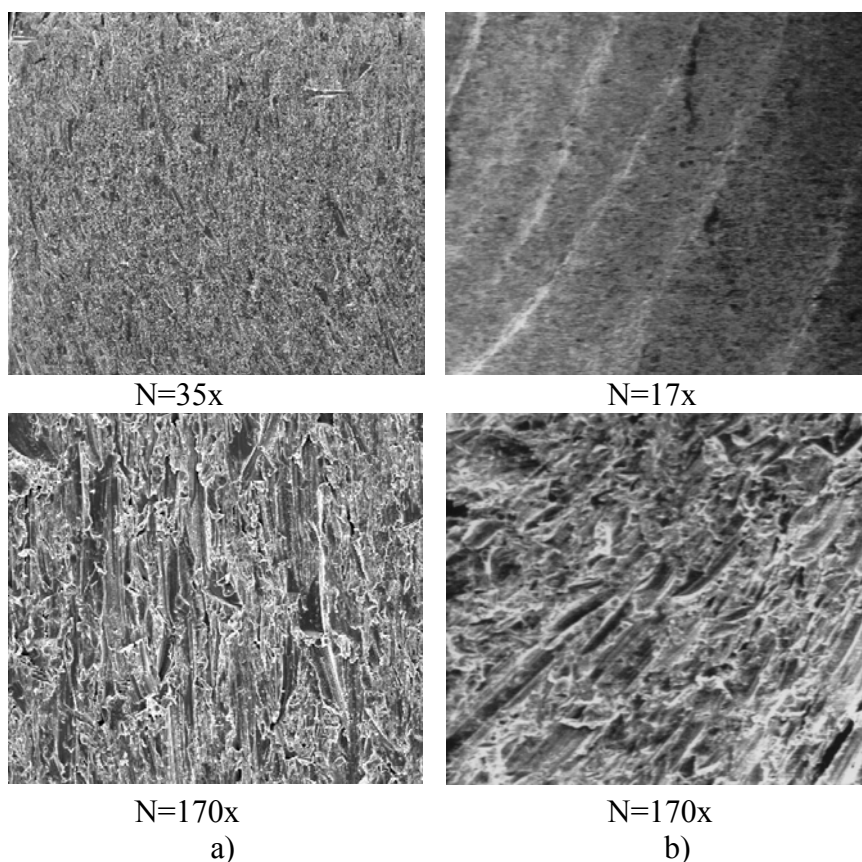
59. ábra: A hullámosság (W_t) és az átlagos érdesség (R_a) változása a víznyomás és az előtoló sebesség függvényében, a megmunkált felület közepén (AlMgSi0,5)

Az ábrából megállapítható, hogy az előtoló sebesség növeli, a víznyomás és az abrazív anyagáram növelése pedig csökkenti a megmunkált felület hullámosságát és teljes profilhibáját. Ugyanebben az ábrában feltüntettem az átlagos érdesség változását is. Ez utóbbi változása – a már korábban megállapítottak szerint – nem mutat semmilyen tendenciát a víznyomás és az előtoló sebesség függvényében, „véletlenszerűen” változik illetve közel állandó marad.



60. ábra: A hullámosság (W_t) és az átlagos érdesség (R_a) változása a víznyomás és az előtoló sebesség függvényében a teljes felületen (AlMgSi0,5)

A jelenség mélyebb megértéséhez scanning elektronmikroszkópon megvizsgáltam az említett két felület egyenetlenségeit (61. ábra)



61. ábra: Abrázív vízszugárral vágott AlMgSi0,5 ötvözet felülete ($p=300$ MPa, $\dot{m}_a=400$ g/min, $f=$ mm/min (a) illetve $f=300$ mm/min (b))

A 61. ábra 170x nagyításainak összevetésével megállapítható, hogy a felületen látható becsapódási és mikroforgácsolási nyomok, melyek az abrazív szemcsék ütközésekor jönnek létre, alapvetően nem különböznek egymástól a kétféle előtoló sebességnél, pusztán a becsapódások iránya más a sugár elhajlásának következtében.

Az említett jelenségek azzal magyarázhatók, hogy a megmunkálás fizikai lényege (szilárd ütközéses erózió a sugár részecskéinek a munkadarabbal történő ütközésekor), nem változik lényegesen a technológiai paraméterek változtatásával. Elsősorban ez az, ami az érdességet befolyásolja, viszont a „sugár elhajlása” jelentősen növekszik, ez ugyanis függ a sugár hatékonyságától, vagyis az elhajlási vonalak nagyságát, azaz a hullámosságot nagyban befolyásolja a sugár energiája, és ez okozza a szemmel látható barázdáltságot, ami már a hullámosság tartományába esik, ezért az ún. érdességmérő műszerek tulajdonképpen kiszűrik azt. Ugyanakkor a vágott felület alsóbb részein, ahol gyengül a sugár, az erózió során fellépő jelenségek közül előtérbe kerül az abrazív szemcsék „koptató” hatása. Ha az előtolást oly mértékben megnöveljük, hogy a sugár már-már alig képes átvágni az anyagot, megnő a visszapattanó abrazív részecskék aránya, melyek mintegy „polírozzák” a megmunkált felületet, aminek eredményeként az átlagos vagy maximális érdességet tekintve akár annak csökkenését is tapasztalhatjuk. A hullámosság illetve a teljes profilhiba tekintetében azonban ez a hatás természetesen nem érvényesül.

Mindebből az következik, hogy a vízsugaras vágás technológiai tervezésénél és a vágott felület minősítésénél a hullámosság kell legyen a meghatározó paraméter, nem pedig a ma is szélesebb körben használt átlagos érdesség.

6.1.2 A FELÜLETI ÉRDESSÉG MATEMATIKAI MODELLJE

Az elvégzett vizsgálatok alapján összefüggés kereshető és található a megmunkált felület érdességi mérőszámai és a technológiai paraméterek között. Keressük ezt az összefüggést az alábbi alakban:

$$R = A \cdot p^B \cdot \dot{m}_a^C \cdot f^D \quad (8)$$

ahol:

- R: valamely érdességi mérőszám (pl. R_a , W_t , P_t)
- f: előtoló sebesség
- p : a vízsugár nyomása
- $\dot{m}_a$: abrazív tömegáram
- A, B, C, D: mérési eredmények alapján meghatározandó konstansok

A MINITAB mérésadatgyűjtő és feldolgozó program segítségével elvégeztem a többváltozós regressziót. A hullámosságra és az átlagos érdességre AlMgSi0,5 alumíniumötvözetnél a 14. táblázatban látható eredmények adódtak.

14. táblázat: A hullámosság és az átlagos érdesség valamint a technológiai paraméterek közötti matematikai kapcsolatot leíró függvények konstansai

Érdességi jellemző	Mérési hely	A	B	C	D	R ²
Hullámosság W _t	közép	436,51	-0,482	-0,649	0,672	90,4%
	lenn	5888	-0,727	-0,992	0,873	93,5%
Átlagos érdesség R _a	közép	1,419	0,454	-0,159	-0,006	42,4%
	lenn	8,95	0,082	-0,329	0,234	79,9%

Az eredményeket elemezve látható, hogy a hullámosság és a technológiai paraméterek között létezik kimutatható kapcsolat. A nyomás és az abrazív anyagáram növelése csökkenti a hullámosságot, az előtolás növelése pedig növeli azt. Ez összhangban áll a korábban leírtakkal. Az abrazív anyagáram és az előtolás nagyobb intenzitással hatnak a hullámosság változására, mint a víznyomás.

Az érdesség vonatkozásában – mint azt korábban is megállapítottam – nincs egyértelmű korreláció a technológiai adatokkal, ezt jelzi a többszörös determinációs együtthatók kis értékei, valamint az hogy pl. az előtolás illetve a víznyomás hatását hol növelő, hol csökkentő hatásúnak mutatja a felállított modell. Mindez teljesen összhangban van a korábbi megállapításokkal.

6.1.3 KÖVETKEZTETÉSEK

Az abrazív vízsugárral vágott felületek egyik jellegzetessége, hogy rajtuk megjelennek, a sugaras vágásokra általában is jellemző, ún. elhajlási vonalak, elsősorban a vágott felület alsó részében, ami a felület érdességét erősen rontja. A felületek egyenetlenségeinek különbözősége a belépő és kilépő oldalon általában szemmel is jól látható, az érdességi mérőszámok ezt a különbözőséget nem mindig igazolják.

A technológiai paramétereknek az érdességi mérőszámokra gyakorolt hatása, az elvégzett vizsgálataim alapján, nem minden mérőszám tekintetében egyértelmű.

Az előtoló sebességnek az átlagos érdességre (R_a) gyakorolt hatása nem egyértelmű sem a belépő oldalon, sem a megmunkált felület közepén. A különböző nyomásokon és abrazív anyagáramokon felvett mérési eredmények alapján függvényszerű kapcsolat nem mutatható ki. A felület belépő oldalán illetve a közepén kapott értékek nem mutatnak érdemi eltérést egymáshoz képest sem.

A víznyomás nagysága, hasonlóan az előtoló sebességhez nem mutat egyértelmű összefüggést a megmunkált felület átlagos érdességével. Bizonyos előtolások mellett növeli, máskor csökkenti annak nagyságát. Ugyancsak nem érzékelhetők érdemi különbségek a megmunkált felület belépő oldala és közepe között.

Hasonló megállapítások tehetők a maximális érdesség (R_t) és az egyenetlenség magasság (R_z) mért értékei és az előtoló sebesség illetve a víznyomás kapcsolatának vizsgálatakor. Ezen paraméterek esetén sem teremthető egyértelmű kapcsolat a megmunkált felület maximális érdessége, illetve egyenetlenség magassága és az előtoló sebesség között.

Jóval egyértelműbb az abrazív anyagáram nagyságának hatása. Kimutatható, hogy az abrazív anyag mennyisége javítja a megmunkált felület átlagos érdességét. Ennek magyarázata az, hogy az abrazív anyagáram nagyságának növelésekor megnövekszik az időegység alatt a felülettel ütköző részecskék száma, aminek eredményeképp a mikroegyenetlenségek eltávolításának valószínűsége megnő, a nagyobb számban legördülő szemcsék pedig mintegy koptatás által kedvezően befolyásolhatják a felület átlagos érdességét.

Ezen jelenségek miatt az átlagos érdességhez hasonló változások mutathatók ki a maximális érdesség, illetve egyenetlenség magasság és az abrazív anyagáram nagysága között. Ezek a mérőszámok egyértelműen csökkenő tendenciát mutatnak az abrazív anyagáram nagyságának növelésekor.

Teljesen egyértelmű tendencia mutatható ki a technológiai paraméterek és a megmunkált felület másik két topográfiai mérőszáma a hullámosság (W_t) és a teljes profilhiba (P_t) között. Az előtoló sebesség növeli, a víznyomás és az abrazív anyagáram pedig csökkenti a megmunkált felület hullámosságát és teljes profilhibáját.

Pásztázó elektronmikroszkóppal is megvizsgálva a megmunkált felületeket, megállapítható, hogy a felületen látható becsapódási és mikroforgácsolási nyomok, melyek az abrazív szemcsék ütközésekor jönnek létre, alapvetően nem különböznek egymástól különböző előtoló sebesség esetén, pusztán a becsapódások iránya más a sugár elhajlásának következtében.

Mindez azzal magyarázható, hogy a megmunkálás fizikai lényege (szilárd erózió a sugár részecskéinek a munkadarabbal történő ütközésekor), nem változik lényegesen a technológiai paraméterek változtatásával. Elsősorban ez az, ami az érdességet befolyásolja, viszont a „sugár elhajlása” jelentősen növekszik, ez ugyanis függ a sugár hatékonyságától, vagyis az elhajlási vonalak nagyságát, azaz a hullámosságot nagyban befolyásolja a sugár energiája, és ez okozza a szemmel látható barázdáltságot, ami már a hullámosság tartományába esik, ezért az ún. érdességmérő műszerek tulajdonképpen kiszűrrik azt. Ugyanakkor a vágott felület alsóbb részein, ahol gyengül a sugár, az erózió során fellépő jelenségek közül előtérbe kerül az abrazív szemcsék „koptató” hatása, aminek eredményeként az átlagos vagy maximális érdességet tekintve akár annak csökkenését is tapasztalhatjuk.

Ha az előtolást oly mértékben megnöveljük, hogy a sugár már-már alig képes átvágni az anyagot, megnő a visszapattanó abrazív részecskék aránya, melyek mintegy „polírozzák” a megmunkált felületet, aminek eredményeként az átlagos vagy maximális érdességet tekintve akár annak csökkenését is tapasztalhatjuk. A hullámosság illetve a teljes profilhiba tekintetében azonban ez a hatás természetesen nem érvényesül.

Mindebből az következik, hogy a vízsugárral vágott felületek minőségének tervezésekor a hullámosság kell legyen a meghatározó paraméter, nem pedig a ma is legszélesebb körben használt átlagos érdesség.

Az elvégzett kísérleti vizsgálatok alapján tehát elmondható, hogy a vízsugaras vágás technológiai adatainak megválasztásakor figyelemmel kell lenni a megmunkált felület

minőségére. Bár az átlagos érdesség (R_a) ma az iparban leghasználatosabb érdességi mérőszám, de itt nem célszerű a gépiparban széles körben használatos átlagos érdesség (R_a) használata, hanem más felülettopográfiai jellemző (pl. hullámosság W_t ; teljes profilhiba P_t) alkalmazására kell törekedni. A leírtakból következik, hogy az abrazív vízsugárral megmunkált felületek minősítésére a tisztán mikrogeometriai mérőszámok nem alkalmasak. Sokkal inkább ajánlható a hullámosság, vagy teljes profilhiba alkalmazása.

6.2 A VÁGÓRÉS PONTOSSÁGA

Mint a 2.6 fejezetben láttuk, az abrazív vízsugaras vágás pontosságát technológiai szempontból alapvetően a vágórés alakja és annak ferdesége határozza meg.

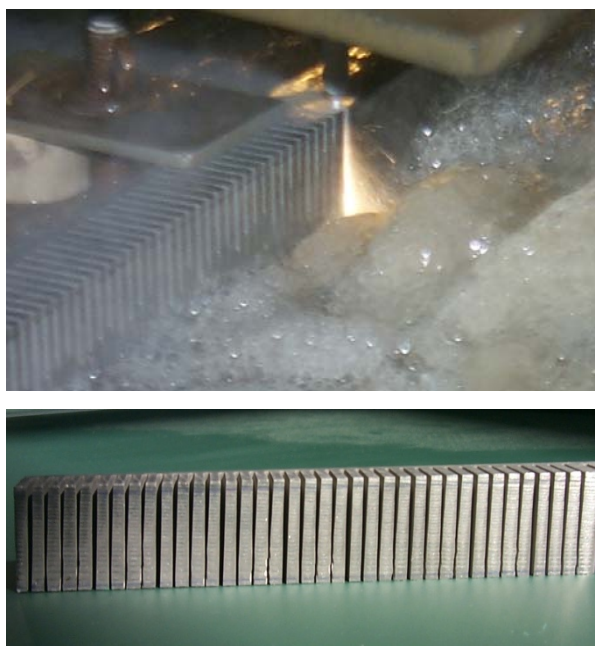
Ezért kutatásom során olyan módszer meghatározását tűztem ki célul, mellyel adott anyag megmunkálásakor meghatározható, hogy milyen paraméter együttesével kaphatunk közel párhuzamos vágórést, ami a vágás pontosságának alapvető feltétele.

A vágórés ferdeségének meghatározására átvágási kísérleteket folytattam 10 mm vastagságú AlMgSi0,5 alumíniumötvözetten és 25mm vastagságú Ti6Al4V (ISO5232-3) titán ötvözetten. A kísérletek paramétereit a 15. táblázat mutatja.

15. táblázat: Átvágási kísérleteknél alkalmazott paraméterek
Ti6Al4V és AlMgSi0,5 ötvözetek esetén

Állandó paraméterek	
Anyagvastagság	25 mm
Vizes fűvóka átmérője	0,25 mm
Anyagvastagság	10 mm
Abrazív fűvóka átmérője	0,8 mm
Abrazív fűvóka hossza	70 mm
Alkalmazott fűvóka magasság	2 mm
Abrazív anyag típusa	GARNET #80
Változtatott paraméterek Ti6Al4V	
Víznyomás, MPa	300-330-360
Abrazív anyagáram, g/s	4 – 5 - 6
Előtolás, mm/min	10- 20 – 30 – 40
Változtatott paraméterek AlMgSi0,6	
Víznyomás, MPa	350-300-350
Abrazív anyagáram, g/min	200-400
Előtolás, mm/min	50-100-150-200-250-300

A vágási kísérletek és az átvágott titánötvözet látható a 62. ábrán.

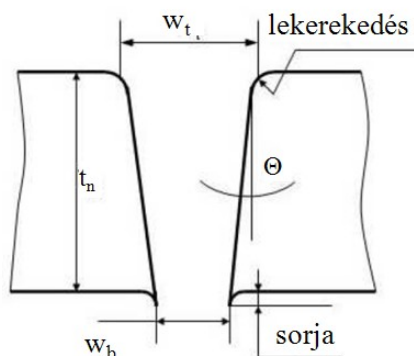


62. ábra: Vágási kísérletek végzése és eredménye Ti6Al4V titánötvözetben

A 62. ábrán érdemes megfigyelni a szikrák jelenlétét. A jelenség azzal magyarázható, hogy a viszonylag nehezen megmunkálható titánötvözetnél a nagy energiájú szemcsék becsapódásakor a helyi hatások egy jelentős része az alapanyag mikroméretű megolvasztását eredményezi, és ezt látjuk szikrák formájában.

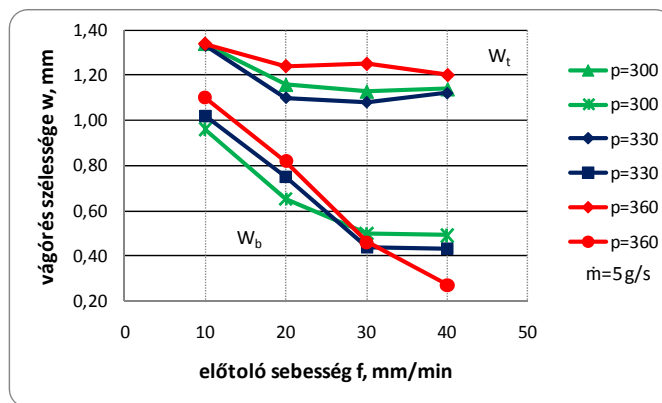
6.2.1 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

Vizsgálataim során a technológiai adatoknak a vágórés alakjára gyakorolt hatását vizsgáltam, oly módon, hogy megmértem a vágórés szélességét a be (w_t) és a kilépő (w_b) oldalon (63. ábra). A mérési adatok a VIII-IX. függelékben láthatók.



63. ábra: A vágórés szélességének mérése a belépő (w_t) és kilépő oldalon (w_b)

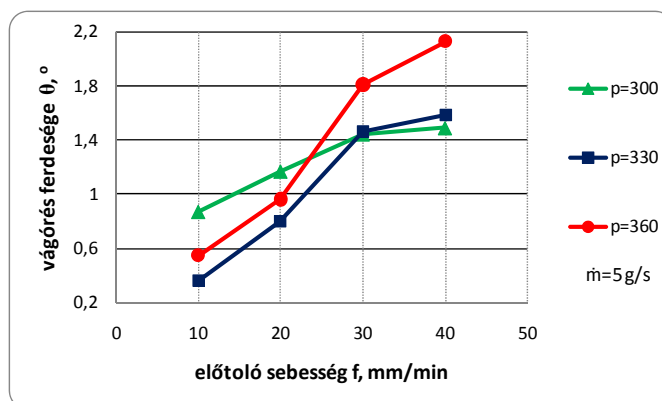
Az egyes technológiai paraméterek hatása kísérhető figyelemmel a 64. -68. ábránkon.



64. ábra: A vágórés szélességének változása az előtolás függvényében a belépő (W_t) és kilépő oldalon (W_b), anyagminőség: Ti6Al4V

Az előtolás hatása (64. ábra) a vágórés alakjára rendkívül domináns. Az ábrából látható, hogy vágórés mérete a belépő oldalon alig változik, ugyanakkor a kilépő oldalon az előtolás növelésével szignifikánsan, mintegy a negyed részére csökken, ami a ferdeség növekedését jelenti.

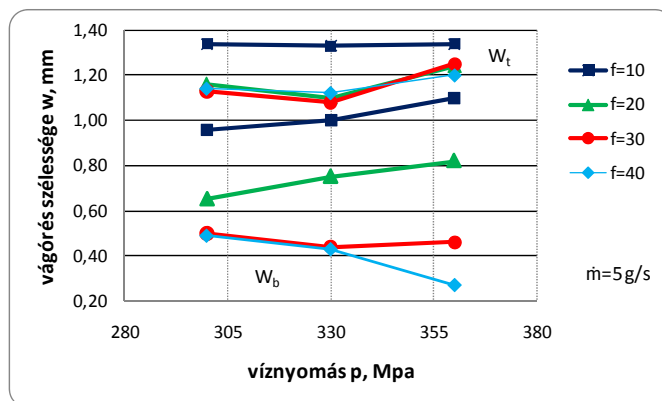
A vágórés alsó és felső szélességéből, valamint az anyagvastagságból kiszámítható a vágórés ferdeségi szöge. A ferdeségi szögnek az előtoló sebesség függvényében történő változását kísérhetjük nyomon a 65. ábrán.



65. ábra: A vágórés ferdeségének változása az előtolás függvényében Ti6Al4V titánötvözetben

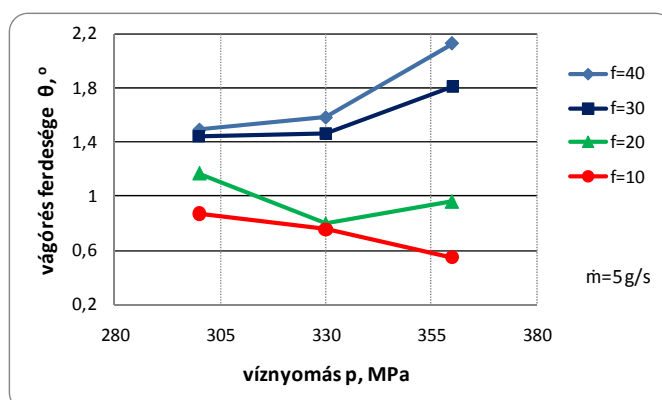
A 65. ábra alapján egyértelműen megállapítható, hogy a vágórés ferdesége nő az előtoló sebesség növelésével. A növekedés mértéke kis nyomásértékeknél kisebb (1,6 szerez) nagy víznyomásnál erőteljesebb (4,2 szerez). Mindez a vágórés kilépő oldali csökkenésének következménye, ugyanis nagy előtoláskor kicsi a behatási idő, így a sugárnak nem áll kellő idő a rendelkezésére az anyag megmunkálásához.

A 66. ábra a víznyomás hatását mutatja a vágórés változására. A nyomás változtatásával a vágórés a belépő oldalon enyhén növekszik, a kilépő oldalon a hatás nem egyértelmű. Az irodalom szerint nyomás növekedésével a kilépő oldalon növekednie kell a vágórés szélességének a nyomás növelésével, azaz csökkennie kell a ferdeség mértékének. Ez egyértelműen csak a 10 mm/min előtolás esetén igazolódott, amikor is csökken a belépő és kilépő oldali vágórés közötti különbség.

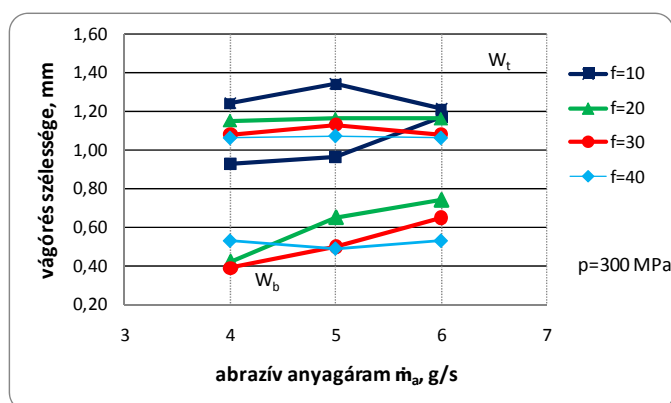


66. ábra: A vágórés szélességének változása a nyomás függvényében a belépő (W_t) és kilépő oldalon (W_b), Ti6Al4V titánötvözetben

A vágórés ferdeségének változása jól követhető a 67. ábrán is. Jól látható hogy kis előtolásnál ($f=10$ mm/min és valamelyest az $f=20$ mm/min esetén is) a ferdeség csökken a nyomás növelésével. Ez azzal magyarázható, hogy kis előtoló sebesség esetén a behatási idő viszonylag hosszú, ilyenkor kellő idő áll az abrazív szemcsék részére, hogy a nagyobb nyomásból adódó energianövekedést érvényesítsék. Ha túl kicsi a behatási idő (nagy az előtolás) ez a hatás nem tud érvényesülni.

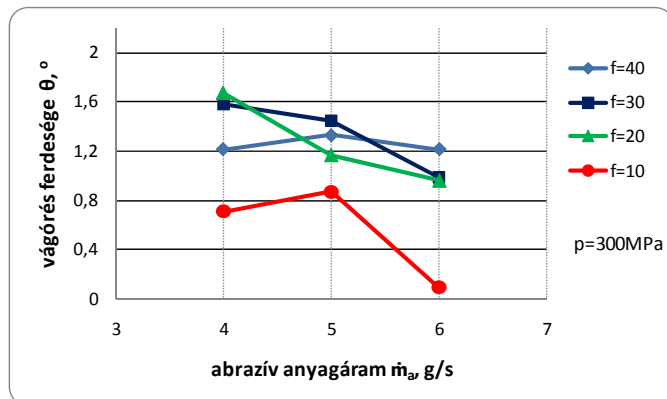


67. ábra: A vágórés ferdeségének változása a víznyomás függvényében Ti6Al4V titánötvözetben



68. ábra: A vágórés szélességének változása az abrazív anyagáram függvényében a belépő (W_t) és kilépő oldalon (W_b) Ti6Al4V titánötvözetben

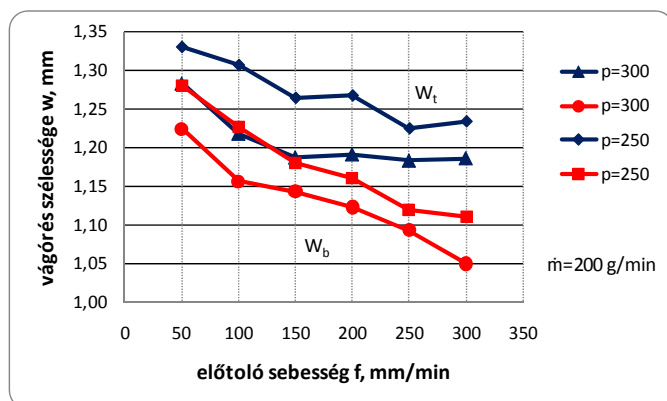
Az abrazív anyagáram hatását szemlélteti a 68. ábra. Az abrazív anyagáram növelésének hatása a belépő oldalon nem egyértelmű, gyakorlatilag konstansnak tekinthető. A kilépő oldalon a résméret egyértelműen növekszik az abrazív anyag mennyiségének növelésével, vagyis a ferdeség csökken. Ugyanez a jelenség követhető nyomon a 69. ábrán.



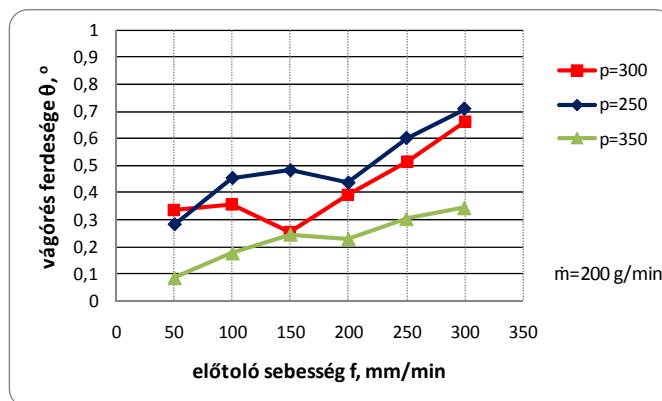
69. ábra: A vágórés ferdeségének változása az abrazív anyagáram függvényében Ti6Al4V titánötvözetben

Az abrazív anyagáram növelésével - kivéve a nagy előtolásokat - csökken a vágórés ferdesége, leginkább az igen kis előtolások esetén. A magyarázat - akárcsak a nyomás esetén - itt is az, hogy kis előtolások mellett aknázható ki a szemcsék nagyobb számából adódó energiatöbblet.

Az AlMgSi alumíniumötvözetben végzett átvágási kísérletek is az eddig elmondottakkal azonos eredményeket hoztak.

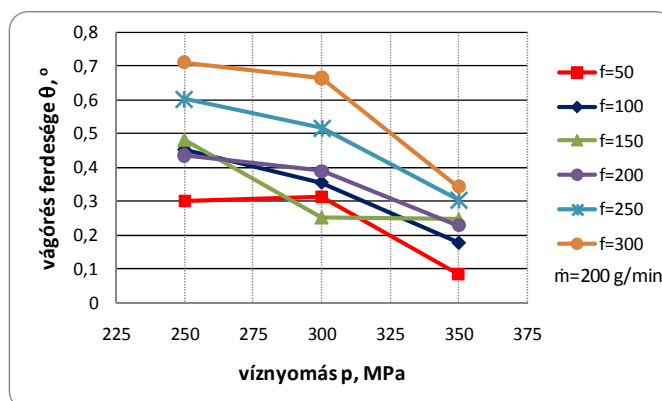


70. ábra: A vágórés szélességének változása az előtoló sebesség függvényében a belépő (W_l) és kilépő oldalon (W_b) AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben



71. ábra: A vágórés ferdeségének változása az előtoló sebesség függvényében $AlMgSi_{0,5}$ alumíniumötvözetben

A 70. és 71. ábrákból látható, hogy az előtolás egyértelműen növeli a vágórés ferdeségét, vagyis rontja a megmunkálás pontosságát. Ez teljesen analóg a titánötvözetnél elmondottakkal. Ugyancsak azonos jellegű eredményeket kaptam a nyomás és az abrazív anyagáram hatásának vizsgálatokor.



72. ábra: A vágórés szélességének és ferdeségének változása a víznyomás függvényében $AlMgSi_{0,5}$ alumíniumötvözetben

A 72. ábra alapján megállapítható, hogy a vágórés ferdesége, akár csak a titánötvözet esetén csökken a víznyomás növelésével. Ennek oka ismét csak az, hogy a víznyomás emelésével nő a részecskék mozgási energiája, ami lehetővé teszi, így a sugár anyagleválasztó képessége nő a kilépő oldalon, ezáltal növekszik a kilépő oldali vágórés szélessége is, azaz csökken a vágott felület ferdesége.

6.2.2 A VÁGÓRÉS FERDESÉGÉNEK VIZSGÁLATA AZ ENERGIABEVITEL ALAPJÁN

Az előző fejezetben vázolt eredmények azt mutatják, hogy a vízsugár által kialakított vágórés felületei akkor közelítenek a párhuzamoshoz – vagyis akkor csökken a vágórés ferdesége –, ha a sugár relatív hosszú ideig tartózkodik egy adott pont fölött, vagyis a behatási idő hosszú. Ekkor az anyagba belépő – és nagy energiával bíró – sugár sokáig támadja a felületet a kilépő oldalon is, vagyis kellő idő áll rendelkezésre, a már a kisebb

energiával bíró sugárnak, az anyagleválasztáshoz. A mélység növekedésével ugyanis a sugár energiája egyértelműen csökken, még akkor is, ha nem végez megmunkálást. Ez indokolta azt, hogy a vágórés alakját a bevitt energia függvényében vizsgáljam meg. Ilyen jellegű vizsgálatokat a szakirodalomban eddig nem közöltek.

Ennek érdekében fel kell írjuk a sugár által képviselt és a munkadarab belépő oldalán egy adott pontba bevitt, elméleti mozgási energiát, melyet a legegyszerűbb módon az alábbiak szerint határoztam meg

$$E_m = \frac{m_a \cdot v^2}{2} \quad (9)$$

ahol m_a : az időegység alatt a sugárhoz adalékolt abrazív anyag mennyisége, kg
 v : az áramló részecskék sebessége m/s

A sugár tényleges energiája természetesen nem pontosan ennyi, mert számtalan tényező befolyásolja – a sugár nem csak abrazív részecskékből áll, a részecskék sebessége és nagysága nem azonos, stb. - de ez az érték mindenképp arányos a sugár valódi energiájával.

Az egyszerűsített Bernoulli összefüggés szerint a fúvókából kiáramló víz sebessége

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (10)$$

ahol p : az alkalmazott nyomás, Pa
 ρ a víz sűrűsége (1000 kg/m³)

Az abrazív anyag tömege pedig az

$$m_a = \dot{m} \cdot t_a \quad (11)$$

összefüggéssel számítható,

ahol $\dot{m}$: az abrazív anyagáram nagysága, technológiai paraméter, kg/s
 t_a : a behatás ideje, s (az az idő amíg a sugár egy adott pont fölött tartózkodik)

Figyelembe véve hogy a behatás ideje a

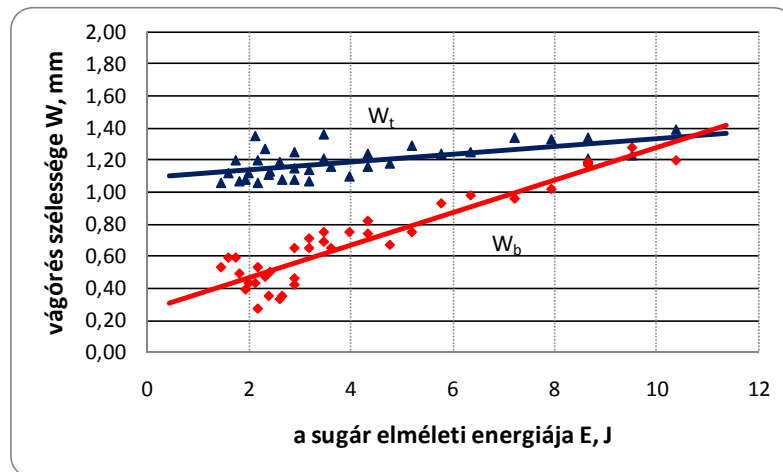
$$t_a = \frac{d_m}{f} \quad (12)$$

ahol d_m : az abrazív fúvóka átmérője, m
 f : a vágófej előtoló sebessége m/s

(5)-(8) egyenletek összevonásából adódik, hogy

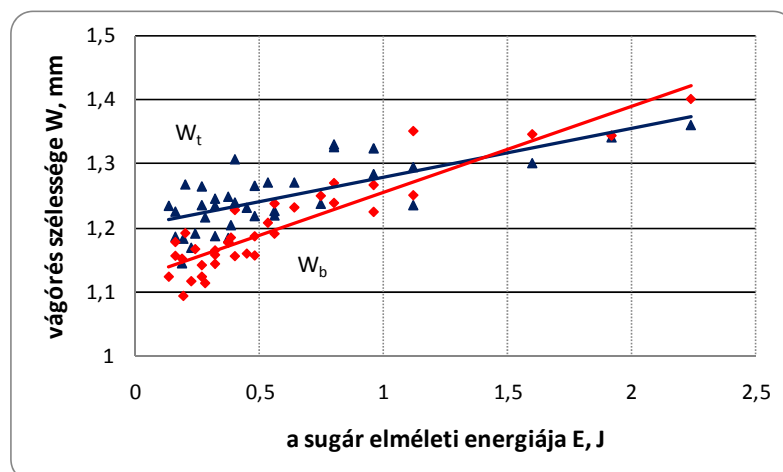
$$E_m = \frac{\dot{m} \cdot d_m \cdot p}{\rho \cdot f} \quad (13)$$

A (13) összefüggéssel meghatároztam az egyes technológiai paraméter beállítások során a sugár számítható elméleti energiáját. Ha ezen energia függvényében ábrázoljuk vágórés szélességét a be- illetve kilépő oldalon, a 73. ábrát kapjuk.



73. ábra: A vágórés szélességének változása a bevitt elméleti energia függvényében a belépő (W_t) és kilépő oldalon (W_b), anyagminőség: Ti6Al4V

A 73. ábra alapján az a megállapítás tehető, 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 az ábrából leolvasható, hogy milyen energia bevétel esetén kaphatunk párhuzamos vágott felületet (a két egyenes metszésénél). Azonos energia bevétel természetesen különböző technológiai paraméter beállításokkal biztosítható, tehát a felhasználónak lehetősége van, hogy a számára legkedvezőbb – általában legolcsóbb – megoldást választhassa, ami legtöbb esetben a lehető legnagyobb megválasztott előtoláshoz rendelt nyomás illetve abrazív anyagáram meghatározását jelentheti.



74. ábra: A vágórés szélességének változása a bevitt elméleti energia függvényében a belépő (W_t) és kilépő oldalon (W_b), anyagminőség: AlMgSi0,5

Hasonló következtetések vonhatók le az AlMgSi0,5 alumíniumötvözet vágási kísérleteiből is (74. ábra). A belépő és kilépő oldal vágóréseinek szélessége itt is egyértelműen közelít egymáshoz a bevitt energia növelésekor. A két ábra összevetéséből magyarázatot kaphatunk arra a jelenségre is, hogy „lág” anyagok (pl. műanyagok, gumik, habszivacsok stb) forgácsolásakor miért fordul elő, hogy a szokásos beállítási paraméterek esetén a vágórés lefelé bővülő. Ekkor ugyanis a két egyenes metszése után adódnak a beállított

vágási pontok, vagyis ilyenkor a párhuzamos vágórés a bevitt energia csökkentésével (pl. nagyobb előtoló sebességek alkalmazásával) érhető el.

A két anyag összevetéséből az is látszik, hogy az alumíniumötvözet vágásakor kisebb energiabefektetés alkalmazásakor volt elérhető a párhuzamos vágórés, mint az acél anyag esetén. Acélok megmunkálásakor az anyag átvágásakor szinte mindig a két egyenes metszéspontja előtt dolgozunk, mert a nyomás és az abrazív anyagáram tovább már nem növelhető, az előtoló sebesség csökkentése pedig túlzott költségnövekedést okozna, így acélok vágásakor gyakorlatilag mindig lefelé szűkülő vágórést kapunk.

6.2.3 KÖVETKEZTETÉSEK

A vágórés pontosságára tekintetében, a vizsgált anyagok vágására vonatkozó kutatások alapján a következő megállapítások vonhatók le:

Az előtoló sebesség hatása a vágórés alakjára rendkívül domináns. A vágórés mérete a belépő oldalon csak alig változik, ugyanakkor a kilépő oldalon az előtolás növelésével csökken, ami a ferdeség növekedését jelenti. Ez elsősorban a vágórés kilépő oldali csökkenésének következménye, ugyanis nagy előtoláskor kicsi a behatási idő, így a sugárnak nem áll kellő idő a rendelkezésére az anyag megmunkálásához.

A nyomás növelésével a vágórés a belépő oldalon enyhén növekszik, a kilépő oldalon a hatás nem egyértelmű. Az irodalom szerint a nyomás növekedésével a kilépő oldalon növekednie kell a vágórés szélességének, azaz csökkennie kell a ferdeség mértékének. Ez nem minden esetben volt igazolható egyértelműen, inkább csak kis előtoló sebességek alkalmazásakor volt megfigyelhető, amikor is csökken a belépő és kilépő oldali vágórések közötti különbség. Ebből következően a vágórés ferdeségének csökkenése is elsősorban kis előtolásnál volt megfigyelhető a nyomás növelésekor. Ez azzal magyarázható, hogy kis előtoló sebesség esetén a behatási idő relatíve hosszú, ilyenkor kellő idő áll az abrazív szemcsék részére, hogy a nagyobb nyomásból adódó energianövekedést érvényesítsék. Ha túl kicsi a behatási idő (nagy az előtolás) ez a hatás nem tud érvényesülni.

Az abrazív anyagáram növelésének hatása a belépő oldalon nem egyértelmű, gyakorlatilag konstansnak tekinthető. Ugyanakkor a kilépő oldalon a résméret egyértelműen nő, azaz a ferdeség csökken.

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. Azonos energia-bevitel természetesen különböző technológiai paraméter beállításokkal is biztosítható, tehát a felhasználónak lehetősége van, hogy a számára legkedvezőbb megoldást választhassa, ami legtöbb esetben a lehető legnagyobbra megválasztott előtoláshoz rendelt nyomás illetve abrazív anyagáram meghatározását jelentheti.

Az energia-bevitelen alapuló vizsgálat magyarázatot ad a lágy anyagok vágásakor jelentkező lefelé bővülő vágórés kialakulására is. A „lágy” anyagok (pl. műanyagok, gumik, habszivacsok stb.) forgácsolásakor a belépő és kilépő oldali vágórés szélesség

egyenesei metsződése után adódnak a szokásos beállítási paraméterek, vagyis ilyenkor a párhuzamos vágórés a bevitt energia csökkentésével (pl. nagyobb előtoló sebességek alkalmazása) érhető el.

A két anyag összevetéséből az is látszik, hogy az alumíniumötvözetnél kisebb energia-befektetéssel volt elérhető a párhuzamos vágórés, mint az acélnál. Acélok megmunkálásakor az anyag átvágásakor szinte mindig a két egyenes metszéspontja előtt dolgozunk, mert a nyomás és az abrazív anyagáram tovább már nem növelhető, az előtoló sebesség csökkentése pedig túlzott költségnövekedést okozna, így acélok esetén gyakorlatilag mindig lefelé szűkülő vágórést kapunk.

7 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 érdekességének jellemzésére, az iparban ma széles körben használt átlagos érdekesség 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.

8 A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

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

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

A vágóréssel 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 irányba továbbfejleszthető.

A hatékonyság vizsgálata témakörben a továbbfejlesztés egyik lehetséges útja lehet, hogy többféle anyagminőségre meghatározva a Monno féle matematikai 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 szívósság 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 vágórésnek 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.

9 ÖSSZEFOGLALÁS

Értekezésemben az abrazív vízsugaras vágás minőségének és hatékonyságának vizsgálatával foglalkoztam. 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 meg ezirányú első kutatásaimat. Mivel a vízsugaras vágás területén magyar nyelvű szakirodalom gyakorlatilag nem állt és ma sem áll rendelkezésre, az eljárás sajátosságainak elméleti és kísérleti elemzésén túlmenően, egyik fontos célom az volt, hogy elősegítsem ezen technológia magyarországi megismerését és elterjedését.

Irodalmi eredményekre alapozva az értekezésem első részében ismertettem az abrazív vízsugaras vágás elméleti alapjait, jellegzetes eljárásait, a megmunkáló sugár tulajdonságait és részletesen elemeztem az anyagleválasztás eróziós mechanizmusait, vagyis a rideg és a szívós eróziót.

Az abrazív vízsugaras vágás, mint a XX. század végén megjelenő nem hagyományos megmunkálási technológia – jóllehet, kutatása meglehetősen intenzív napjainkban – területén még számos feltáratlan problémával találkozunk. Ezek közül a nemzetközi szakirodalom áttekintése alapján meghatároztam azokat a területeket, amelyek a vágás hatékonyságának és minőségének kérdésében még tisztázásra vagy pontosításra szorulnak:

- A vágás hatékonyságának meghatározására kialakított különféle modellek elméleti megfontolások vagy empirikus közelítések, illetve ezek vegyes alkalmazása révén születtek. Megállapítható, hogy az irodalmakban közölt matematikai modellek egy átlagos vízsugaras vágást alkalmazó felhasználó számára kevésbé követhetők.
- A vágott felület érdességének tekintetében, elsősorban az átlagos érdesség (R_a) vonatkozásában az irodalmak nem egyértelmű eredményeket közölnek.
- A vágás pontosságát alapvetően meghatározza a vágórés ferdesége. Bár ennek vizsgálatával több szerző is foglalkozott, a technológiai paramétereknek a vágás ferdeségére gyakorolt hatását sok esetben nem egyértelműsítik a szerzők.

A problémák felvetését követően, a megfogalmazott célok elérése érdekében az alábbi feladatokat hajtottam végre:

- Vágási kísérleteket végeztem alumínium ötvözet, szerkezeti acél, rozsdamentes acél, márvány és titánötvözet anyagokon. Részletesen ismertettem a kísérletek körülményeit és a megmunkált anyagok jellegzetességeit.
- A technológiai kísérletek kiértékelése során a hatékonyság témakörében matematikai kapcsolatot állítottam fel a bevágási mélység és azon technológiai paraméterek között, amelyek a végfelhasználók számára általában változtathatók. Ezek a víznyomás, az abrazív anyagáram nagysága és a vágófej előtoló sebessége. Nomogramokat készítettem továbbá a végfelhasználók paraméter választásának megkönnyítésére. A matematikai modellek segítségével lehetőség nyílik egy adott vágási feladat esetén a technológiai adatok korrekt megválasztására illetve az átvágható anyagvastagság meghatározására.

- A felületminőség tekintetében a technológiai paraméterek és a felületi érdesség kapcsolatát vizsgáltam. Kimutattam, hogy az átlagos érdességi paraméter nem alkalmas a vízsugárral vágott felületek jellemzésére, helyette a hullámosság vagy a teljes profilhiba használatát javasoltam.
- A pontosság vizsgálata kapcsán a vágórés alakjának (ferdeségének) elemzésével foglalkoztam. Megállapítottam, hogyan hatnak az egyes technológiai adatok a vágórés be- és kilépő oldali szélességére, azaz a vágórés ferdeségére. A technológiai paraméterek együttes hatásának vizsgálatára egy újszerű, az energiabevitelen alapuló megközelítést vezettem be. Ennek eredményeként bebizonyítottam, hogy a vágórés alakja az energiabevitel függvénye és megfelelő technológiai adatok megválasztása esetén biztosítható a vágott felületek párhuzamossága.

Értekezésem végén külön fejezetben összefoglaltam az elvégzett kutatómunkám alapján megfogalmazható új tudományos eredményeket.

10 SUMMARY

In my dissertation I investigated the quality and efficiency of abrasive waterjet cutting. This technology was adopted in Hungary in 1996, first at the Bay Zoltán Institute for Logistics and Production Systems, where I have been worked at that time. This way I get acquainted with this technology and started my research activity in this field. Hungarian professional literature related to waterjet cutting practically was not available and even today it isn't, therefore beside the theoretical and experimental analysis of the procedure my dissertation aims at promoting the cognition and spreading of this technology in Hungary.

Based on a review of the international professional literature in the first part of the dissertation I introduced the theoretical bases of the waterjet cutting, the typical methods, the different characteristics of the cutting jet, furthermore I analysed in details the erosion mechanisms, i.e. the brittle and ductile erosion of the material removal. Publications reflect that in the field of abrasive waterjet cutting, as being a new technology, appearing at the end of the XXth century – although it is investigated intensively – there are numerous questions to be answered in the future. In the literature review I appointed that ones, relating to the cutting efficiency and quality, needed clarification and refining:

- Models used for determination of cutting efficiency have been developed based on theoretical considerations, empirical approximations or by mixing them. I have established, that models, published in the literature are very difficult to understand and apply by an everyday user of the waterjet cutting.
- Considering the surface roughness – first of all relating to the average surface roughness (R_a) – professional publications give no clear results.
- The accuracy of the cut is influenced basically by the tapering of the cutting gap. Although the tapering has been investigated by several authors, in many cases they give no unambiguous answer relating to the effect of the technological parameters on the tapering of the cut.

After these problems have been raised, in the second part of the dissertation I have executed the following tasks:

- I performed waterjet cutting experiments on aluminium alloy, constructional steel, stainless steel, marble and titanium alloy. I described in detail the experimental conditions and the characteristics of the investigated materials.
- During evaluation of the technological experiments, investigating the cutting efficiency I have established a mathematical correlation between the kerf depth and those technological parameters, that usually can be varied by the end users. These are the water pressure, the abrasive flow rate and the federate of the cutting head. I prepared furthermore nomograms, supporting the specialists during the choice of technological parameters. Mathematical models provide a possibility for the proper selection of technological data, as well as for determining the achievable cutting thickness in case of a given cutting task.

- Referring to the surface quality I investigated the connection between the surface roughness and the technological parameters. I have pointed out that the average surface roughness is not a suitable parameter for qualifying a surface machined by waterjet. Therefore I suggested using the waviness or the total profile error for this purpose, instead.
- Considering the subject of accuracy, I have analysed the shape of the cutting gap (tapering). I have identified the effects of certain technological data on the width of the cutting gap at the upper and bottom side – i.e. on the tapering – of the gap. For the investigation of the collective effect of the different technological parameters I introduced a new energy-input approach. Applying this novel aspect I have established that the shape of the cutting gap depends on the energy-input, in addition a parallel cut can be achieved through an appropriate choice of the technological parameters.

At the end of my dissertation I summarised the new scientific results that may be drawn up from the executed research work.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazon kollégaimnak, akik az értekezés elkészítésében tanácsaikkal, munkájukkal segítségemre voltak. Külön is köszönetet mondok tudományos vezetőmnek Dr. Tóth Lászlónak, aki hosszú évek során támogatott kutatómunkámban, a Sályi István Doktori Iskola vezetőinek, Dr. Páczelt Istvánnak és Dr. Tisza Miklósnak a segítőkészségükért, és tanszékvezetőimnek Dr. Dudás Illésnek és Dr. Kundrák Jánosnak, akik biztosították a lehetőséget, hogy a tanszéki munka mellett a disszertáció elkészítésével foglalkozhassak. Ugyancsak köszönöm a segítséget Bodnár Krisztinának és Dr. Deszpoth Istvánnak, akikkel a kísérletek lefolytatását kiviteleztuk, és persze köszönöm lányaimnak, Lillának és Szandinak, akikért mindezt érdemes.

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. szám, 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, pp333-338.

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 7th International Conference Modern Technologies in Manufacturing*, Cluj-Napoca, 6-8 October 2005, pp281-284
15. Maros, Zs. - -Tóth, L: *Experimental Investigation of Model for Material Removal at Abrasive Waterjet Cutting*, 11th 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*, 6th 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*, 3rd 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 Technical and Economical Evaluation*, 15th 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*, 10th International Conference on Tools ICT-200, 6-8 September 2000, Miskolc, Hungary, pp353-358
21. Deszpoth, I - Maros, Zs.: *Nontraditional Machining by Abrasive Waterjet Cutting*, Intelligent Machines and Technologies DAAM-Ceepus 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.

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. Lichtarowicz), 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 CO₂ 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 Hashish, M.: *Observations on Wear of Abrasive Waterjet Nozzle Materials*, ASME Journal of Tribology 116, 1994, pp439-444
- 21 M. Hashish, *Mixing Tube Material Effects and Wear Patterns*, Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, August 23-26, 1997, pp211-222.
- 22 Mort, G.A.: *Long Life Abrasive Waterjet Nozzles and their Effect on AWJ Cutting*, Proceedings of the 6th American Waterjet Conference, 1991, pp315-344
- 23 Nanduri, M. - Taggart, D.G. - Kim, T.J.: *A Study of Nozzle Wear in Abrasive Entrained Water Jetting Environment*, Journal of Tribology, April 2000, Vol. 122, pp465-471.
- 24 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
- 25 Momber, A.W. - Kovacevic, R.: *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer-Verlag London Limited, 1998, p394
- 26 Summers, D.A.: *Waterjetting Technology*, Alden Press Oxford, 1995, p875
- 27 Mazurkiewicz, M.: *A Study of Leading Edge for a Slot Formed During Hydro-Abrasive Cutting*, Proceedings of the 6th American Waterjet Conference, 1991, pp43-59

-
- 28 Meng, H.C. – Ludema, K.C.: *Wear Models and Prediction Equations: Their Form and Content*, Wear 1995, 181-183, pp443-457
 - 29 Hashish, M: *A Model Study of Metal Cutting with Abrasive Water Jets*, ASME J. Engineering Materials and Technology 106, 1984, pp88-100
 - 30 Hashish, M: *Visualization of the Abrasive Waterjet Cutting Process*. Experimental Mechanics 28, 1988, pp159-169
 - 31 Zeng, J. – Kim, T.J.: *Development of an Abrasive Waterjet Kerf Cutting Model for Brittle Materials*, Jet Cutting Technology (ed. Lichtarowitz), Kluwer Acad. Press, Dordrecht 1992, pp483-501
 - 32 Arola, D. – Ramulu, M.: *Mechanism of Material Removal in Abrasive Waterjet Machining of common Aerospace Materials*, Proceedings of 7th American Waterjet Conference, St. Louis 1993, Vol1, pp43-64
 - 33 Guo, N.S.: *Schneidprozess und Schnittqualität beim Wasserabrasivstrahlschneiden*, VDI-Fortschritt-Berichte 1994, Reihe2, Nr328
 - 34 Kovacevic, R. – Liaw, H.H. – Barrows, J.F.: *Surface Finish and its Relationship to Cutting Parameters*, SME TP MR-88-589, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn 1988, pp1-5
 - 35 Hashish, M.: *An Improved Model for Erosion by Solid Particle Impact*. In: Proc. of the 7th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, ELSI VII, Cambridge, England, Sept. 1987, 66/1-66/9
 - 36 Finnie, I.: *The Mechanism of Erosion of Ductile Metals*, Proceedings of 3th US Nat. Congress Applied Mechanics, ASME New York 1958, pp527-532
 - 37 Buijs, M.: *Erosion of Glass as Modeled by Indentation Theory*, Journal of American Ceramic Society 77, 1994, pp1676-1678
 - 38 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
 - 39 Tikhomirov, R. A. - Babanin, V. F. - Petukhov, E. N. - Starikov, I. D. - Kovalev, V. A.: *Gidrorezanie Sudostroitel'nykh Materialov*. Sudostroenie, Leningrad, 1987 engl. High Pressure Jet Cutting. ASME, 1992, p195
 - 40 Oweinah, H.: *Leistungssteigerung des Hochdruckwasserstrahlschneidens durch Zugabe von Zusatzstoffen*. Dissertation, Universität Darmstadt, 1989
 - 41 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

-
- 42 Blickwedel, H. et al.: *Prediction of Abrasive Jet Cutting Performance and Quality*, Proceedings of the 10th International Symposium on JCT, 1990, Amsterdam
 - 43 Kovacevic, R.: *Monitoring the Depth of Abrasive Waterjet Penetration*. International Journal of Machining and Tools Manufacturing, Vol. 32, 1992, pp725-736,
 - 44 Zeng, J. - Kim, T. J. - *Parameter Prediction and Cost Analysis in Abrasive Waterjet Cutting Operations*. In: Proc. of the 7th American Water Jet Conference, Water Jet Association, St. Louis, 1993, pp175-189
 - 45 Matsui, S. - Matsumara, H. - Ikemoto, Y. - Kumon, Y. - Shimizu, H.: *Prediction Equations for Depth of Cut Made by Abrasive Water Jet*. In: Proc. of the 6th American Water Jet Conference, Water Jet Technology Association, St. Louis, 1991, pp31 41
 - 46 Babu, A. R. - Babu, N. R. - Chakravarthy, P. S.: *A Fuzzy Based Approach for Selection of Process Parameters in Abrasive Waterjet Cutting of Black Granite*, 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, February 3-5, 1998, New Delhi, India
 - 47 Momber, A. W.: *A Generalized Abrasive Water Jet Cutting Model*. In: Proc. of the 8th American Water Jet Conference, Houston, Texas, 1995
 - 48 Monno, M.: *Selection of process parameters for abrasive water jet (AWJ) cutting*, International Conference on Cutting Technology, ICCT, March 5-6, 1997, Hannover
 - 49 Kovacevic, R.: *Surface Texture in Abrasive Waterjet Cutting*, Journal of Manufacturing Systems, 1991, 10(1), pp16-32
 - 50 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
 - 51 Hashish, M.: *Characteristics of Surfaces Machined with Abrasive-Waterjets*, Journal of Engineering and Technology, Vol113, 1991, pp354-362
 - 52 Ramulu, M. – Arola, D.: *Influence of Abrasive Waterjet Cutting Conditions on the Surface Quality of Graphite/Epoxi Laminates*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1994, 34(3), pp295-313
 - 53 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
 - 54 Wang, J: *A Machinability Study of Polymer Matrix Composites Using Abrasive Waterjet Cutting Technology*, Journal of Material Processing Technology, 94 (1999) pp30–35
 - 55 Krajny, Z.: *Vodný lúč v praxi.*, Bratislava, EPOS, 1998, , p384

-
- 56 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
- 57 Arola, D. - Ramulu, M. : *Material Removal in Abrasive Waterjet Machining of Metals Surface Integrity and Texture*, Wear 210 (1997), pp50-58
- 58 Hashish, M.: *On the Modeling of Surface Waviness Produced by Abrasive Waterjets*, Proceedings of 11th International Conference on Jet Cutting Technology, St. Andrews, Scotland, 1992, pp249-265
- 59 Siores, E. – Chen, L. – Wong, W.C.K.: *Improving Surface Finish Generated by the Abrasive Waterjet Process*, Proceedings of the International Symposium on Advances in Abrasive Technology, Sydney, 1997, pp187-191
- 60 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
- 61 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
- 62 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
- 63 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
- 64 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
- 65 Mort, G.A.: *Results of abrasive water jet market Survey*, Proceedings of 8th American Water Jet Conference, Water Jet Techn, Assoc. 1995, Vol1, pp259-282

FÜGGELÉK

**A bevágási mélység mért értékei különböző technológiai adatok esetén
AlMgSi alumíniumötvözetben**

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrazív áram m_a, g/min	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
1	200	400	100	27,8
2	200	400	300	11,39
3	200	400	500	7,25
4	200	400	700	5,40
5	200	400	800	4,16
6	250	400	100	35,09
7	250	400	300	15,03
8	250	400	500	9,71
9	250	400	700	7,12
10	250	400	800	5,36
11	300	400	100	44,14
12	300	400	300	19,40
13	300	400	500	13,03
14	300	400	700	9,50
15	300	400	800	7,50
16	200	200	100	22,61
17	200	200	300	8,6
18	200	200	500	5,58
19	200	200	700	3,6
20	200	200	800	2,56

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/min	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
21	250	200	100	29,43
22	250	200	300	11,91
23	250	200	500	7,30
24	250	200	700	5,86
25	250	200	800	4,30
26	300	200	100	34,01
27	300	200	300	15,51
28	300	200	500	10,18
29	300	200	700	7,41
30	300	200	800	5,61
31	200	100	100	14,26
32	200	100	300	5,02
33	200	100	500	2,78
34	200	100	700	1,68
35	200	100	800	1,48
36	250	100	100	17,93
37	250	100	300	7,20
38	250	100	500	4,15
39	250	100	700	2,46
40	250	100	800	1,65
41	300	100	100	22,80
42	300	100	300	9,48
43	300	100	500	5,97
44	300	100	700	5,05
45	300	100	800	2,53

**A bevágási mélység mért értékei különböző technológiai adatok esetén
S235JR szerkezeti acélon**

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrazív áram m_a, g/min	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
1	200	100	60	13,46
2	200	100	80	11,60
3	200	100	100	9,50
4	200	100	120	8,82
5	200	100	140	7,64
6	250	100	60	14,50
7	250	100	80	11,76
8	250	100	100	10,58
9	250	100	120	9,40
10	250	100	140	7,20
11	300	100	60	13,94
12	300	100	80	12,40
13	300	100	100	11,62
14	300	100	120	9,34
15	300	100	140	8,68
16	200	250	60	21,46
17	200	250	80	19,40
18	200	250	100	16,30
19	200	250	120	14,54
20	200	250	140	12,86

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/min	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
21	250	250	60	28,04
22	250	250	80	20,32
23	250	250	100	19,50
24	250	250	120	17,38
25	250	250	140	16,60
26	300	250	60	27,66
27	300	250	80	18,94
28	300	250	100	19,30
29	300	250	120	17,48
30	300	250	140	16,02
31	200	400	60	25,84
32	200	400	80	21,32
33	200	400	100	17,86
34	200	400	120	15,56
35	200	400	140	13,62
36	250	400	60	31,76
37	250	400	80	25,74
38	250	400	100	21,36
39	250	400	120	21,22
40	250	400	140	18,72
41	300	400	60	36,86
42	300	400	80	27,90
43	300	400	100	26,30
44	300	400	120	23,10
45	300	400	140	19,62

**A bevágási mélység mért értékei különböző technológiai adatok esetén
fehér márvány anyagon**

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrazív áram m_a, g/min	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
1	200	100	200	35,32
2	200	100	400	21,90
3	200	100	600	17,20
4	200	100	800	14,26
5	200	100	1000	12,56
6	250	100	200	26,44
7	250	100	400	17,22
8	250	100	600	11,42
9	250	100	800	10,36
10	250	100	1000	9,02
11	300	100	200	31,86
12	300	100	400	18,64
13	300	100	600	14,92
14	300	100	800	11,98
15	300	100	1000	9,78
16	200	250	200	35,32
17	200	250	400	21,90
18	200	250	600	17,20
19	200	250	800	14,26
20	200	250	1000	12,56

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/min	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
21	250	250	200	41,02
22	250	250	400	27,78
23	250	250	600	20,54
24	250	250	800	16,72
25	250	250	1000	14,02
26	300	250	200	48,36
27	300	250	400	30,44
28	300	250	600	23,26
29	300	250	800	19,24
30	300	250	1000	16,2
31	200	400	200	36,40
32	200	400	400	24,30
33	200	400	600	18,28
34	200	400	800	14,8
35	200	400	1000	12,56
36	250	400	200	42,5
37	250	400	400	28,54
38	250	400	600	22,72
39	250	400	800	20,04
40	250	400	1000	16,00
41	300	400	200	46,78
42	300	400	400	33,08
43	300	400	600	27,42
44	300	400	800	25,82
45	300	400	1000	22,06

**A bevágási mélység mért értékei különböző technológiai adatok esetén
X12Cr13 rozsdamentes acélon**

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrazív áram m _a , g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
1	360	6	100	16,93
2	360	6	120	15,60
3	360	6	140	14,26
4	300	6	100	16,38
5	300	6	120	14,64
6	300	6	140	13,55
7	240	6	80	16,72
8	240	6	100	14,35
9	240	6	120	12,85
10	240	6	140	11,29
11	360	5	100	15,28
12	360	5	120	13,52
13	360	5	140	12,28
14	300	5	80	16,35
15	300	5	100	14,86
16	300	5	120	13,11
17	300	5	140	11,88
18	240	5	60	17,85
19	240	5	80	15,26
20	240	5	100	13,35

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrazív áram m_a, g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Bevágási mélység h, mm
21	240	5	120	11,35
22	240	5	140	9,86
23	360	4	80	16,52
24	360	4	100	15,04
25	360	4	120	13,26
26	360	4	140	12,22
27	300	4	80	16,01
28	300	4	100	13,77
29	300	4	120	12,61
30	300	4	140	10,71
31	240	4	60	16,87
32	240	4	80	13,90
33	240	4	100	12,80
34	240	4	120	10,58
35	240	4	140	8,76

A felületi érdesség mérési adatai különböző technológiai adatok esetén AlMgSi alumíniumötvözetben a belépő oldalon

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Átlagos érdesség R _a , μm	Egyenetlenség magasság R _z , μm	Maximális érdesség R _t , μm	Hullámosság W _t , μm	Teljes profilhiba P _t , μm
1	200	400	100	5,35	41,65	53,95	14,85	60,70
2	200	400	300	7,00	49,13	65,78	18,03	71,41
3	200	400	500	5,23	35,05	47,93	26,42	62,50
4	250	400	100	5,68	43,60	58,23	16,28	64,42
5	250	400	300	6,40	49,20	68,20	14,75	68,75
6	250	400	500	7,33	50,60	72,40	33,37	87,62
7	300	400	100	5,10	40,30	56,90	16,45	63,70
8	300	400	300	5,95	47,55	62,85	12,07	66,82
9	300	400	500	8,25	57,55	78,81	19,93	70,20
10	200	200	100	6,43	49,78	68,78	15,20	78,92
11	200	200	300	6,20	41,68	49,52	21,32	63,73

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Átlagos érdesség R _a , μm	Egyenetlenség magasság R _z , μm	Maximális érdesség R _t , μm	Hullámosság W _t , μm	Teljes profilhiba P _t , μm
12	200	200	500	6,23	42,43	56,87	30,95	73,83
13	250	200	100	6,65	48,33	67,28	16,85	71,12
14	250	200	300	7,15	50,25	67,15	20,53	69,62
15	250	200	500	6,93	48,60	68,00	30,48	89,07
16	300	200	100	6,33	45,83	62,50	22,10	71,18
17	300	200	300	8,08	59,58	81,68	18,72	88,90
18	300	200	500	6,75	42,73	55,73	24,90	64,32
19	200	100	100	9,00	58,42	80,80	17,12	87,17
20	250	100	100	8,08	56,75	73,07	21,20	80,63
21	300	100	100	7,55	55,85	75,75	18,70	81,05

A felületi érdesség mérési adatai különböző technológiai adatok esetén AlMgSi alumíniumötvözetben közép

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Átlagos érdesség R _a , μm	Egyenetlenség magasság R _z , μm	Maximális érdesség R _t , μm	Hullámosság W _t , μm	Teljes profilhiba P _t , μm
1	200	400	100	6,60	52,37	77,10	17,97	80,15
2	200	400	300	6,15	46,25	55,17	26,55	72,27
3	200	400	500	4,12	31,15	45,22	52,80	79,63
4	250	400	100	6,27	47,25	63,95	15,68	74,25
5	250	400	300	7,55	52,03	70,38	18,87	79,30
6	250	400	500	6,78	44,97	62,95	47,11	95,01
7	300	400	100	6,45	45,03	60,62	15,82	68,40
8	300	400	300	7,25	50,80	66,71	21,67	76,78
9	300	400	500	8,15	57,81	72,63	32,92	93,72
10	200	200	100	7,83	57,81	78,15	20,43	90,30
11	200	200	300	5,52	38,20	55,12	54,75	86,80

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Átlagos érdesség R _a , μm	Egyenetlenség magasság R _z , μm	Maximális érdesség R _t , μm	Hullámosság W _t , μm	Teljes profilhiba P _t , μm
12	200	200	500	---	---	---	---	---
13	250	200	100	6,90	51,22	67,81	21,77	79,67
14	250	200	300	7,75	53,68	69,45	37,88	93,31
15	250	200	500	7,68	44,57	62,55	87,80	126,95
16	300	200	100	6,70	47,78	65,90	20,05	76,40
17	300	200	300	8,85	55,72	74,02	29,05	86,97
18	300	200	500	7,53	43,90	64,30	77,15	132,10
19	200	100	100	8,02	58,37	82,58	34,57	99,93
20	250	100	100	8,61	58,88	75,62	31,17	96,73
21	300	100	100	7,92	56,12	74,43	34,42	92,72

A felületi érdesség mérési adatai különböző technológiai adatok esetén AIMGSi alumíniumötvözetben a kilépő oldalon

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Átlagos érdesség R _a , μm	Egyenetlenség magasság R _z , μm	Maximális érdesség R _t , μm	Hullámosság W _t , μm	Teljes profilhiba P _t , μm
1	200	400	100	6,42	50,95	76,97	17,30	86,87
2	200	400	300	6,02	41,43	56,65	47,30	90,73
3	200	400	500	---	---	---	---	---
4	250	400	100	5,97	46,05	68,25	18,97	72,87
5	250	400	300	7,71	55,00	78,50	34,63	91,90
6	250	400	500	---	----	---	---	---
7	300	400	100	6,17	47,67	60,21	15,98	69,65
8	300	400	300	7,30	50,45	69,37	25,02	82,47
9	300	400	500	9,55	65,18	95,03	59,50	138,50
10	200	200	100	6,87	49,67	66,12	32,45	85,80
11	200	200	300	---	---	---	---	---

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/s	Előtoló sebesség f, mm/min	Átlagos érdesség R _a , μm	Egyenetlenség magasság R _z , μm	Maximális érdesség R _t , μm	Hullámosság W _t , μm	Teljes profilhiba P _t , μm
12	200	200	500	---	---	---	---	---
13	250	200	100	7,42	50,68	66,87	29,60	78,65
14	250	200	300	10,20	63,32	108,15	124,1	193,67
15	250	200	500	---	---	---	---	---
16	300	200	100	7,11	52,35	68,68	28,22	86,83
17	300	200	300	10,17	65,82	86,38	69,85	126,22
18	300	200	500	---	---	---	---	---
19	200	100	100	10,37	66,95	97,90	78,75	155,92
20	250	100	100	8,90	62,75	84,12	49,92	118,60
21	300	100	100	8,60	53,37	70,30	52,68	111,15

A vágórés ferdesége, és szélessége a belépő és kilépő oldalon különböző technológiai adatok esetén Ti6Al4V titán ötvözet vágásakor

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m_a , g/s	Előtoló seb. f, mm/min	Vágórés ferdeség, fok	Vágórés szélesség belépésnél mm	Vágórés szélesség kilépésnél mm
1	360	4	10	0,96	1,54	1,12
2	360	4	20	1,40	1,36	0,75
3	360	4	30	1,83	1,27	0,47
4	360	4	40	1,40	1,20	0,59
5	360	5	10	0,34	1,34	1,19
6	360	5	20	0,96	1,24	0,82
7	360	5	30	1,81	1,25	0,46
8	360	5	40	2,13	1,20	0,27
9	360	6	10	0,44	1,39	1,20
10	360	6	20	1,24	1,29	0,75
11	360	6	30	1,19	1,21	0,69
12	360	6	40	1,97	1,19	0,33
13	330	4	10	0,62	1,25	0,98
14	330	4	20	0,99	1,14	0,71
15	330	4	30	2,11	1,35	0,43
16	330	4	40	1,21	1,12	0,59
17	330	5	10	0,71	1,33	1,02
18	330	5	20	0,80	1,10	0,75
19	330	5	30	1,67	1,08	0,35
20	330	5	40	1,58	1,12	0,43

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrazív áram m _a , g/s	Előtoló seb. f, mm/min	Vágórés ferdeség, fok	Vágórés szélesség belépésnél mm	Vágórés szélesség kilépésnél mm
21	330	6	10	-0,11	1,23	1,28
22	330	6	20	1,17	1,18	0,67
23	330	6	30	0,96	1,07	0,65
24	330	6	40	1,74	1,11	0,35
25	300	4	10	0,71	1,24	0,93
26	300	4	20	1,67	1,15	0,42
27	300	4	30	1,58	1,08	0,39
28	300	4	40	1,21	1,06	0,53
29	300	5	10	0,87	1,34	0,96
30	300	5	20	1,17	1,16	0,65
31	300	5	30	1,44	1,13	0,50
32	300	5	40	1,33	1,07	0,49
33	300	6	10	0,09	1,21	1,17
34	300	6	20	0,96	1,16	0,74
35	300	6	30	0,99	1,08	0,65
36	300	6	40	1,21	1,06	0,53

A vágórés ferdesége, és szélessége a belépő és kilépő oldalon különböző technológiai adatok esetén AlMgSi0,5 alumíniumötvözet vágásakor

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m_a , g/min	Előtoló seb. f, mm/min	Vágórés ferdeség, fok	Vágórés szélesség belépésnél mm	Vágórés szélesség kilépésnél mm
1	250	200	50	0,28	1,33	1,28
2	250	200	100	0,45	1,31	1,23
3	250	200	150	0,48	1,26	1,18
4	250	200	200	0,61	1,27	1,16
5	250	200	250	0,60	1,23	1,12
6	250	200	300	0,71	1,23	1,11
7	300	200	50	0,34	1,28	1,22
8	300	200	100	0,36	1,22	1,16
9	300	200	150	0,25	1,19	1,14
10	300	200	200	0,39	1,19	1,12
11	300	200	250	0,52	1,18	1,09
12	300	200	300	0,78	1,19	1,05
13	350	200	50	0,09	1,24	1,22
14	350	200	100	0,18	1,22	1,19
15	350	200	150	0,41	1,25	1,18
16	350	200	200	0,44	1,22	1,14
17	350	200	250	0,30	1,17	1,12
18	350	200	300	0,32	1,15	1,09
19	250	400	50	0,45	1,42	1,35
20	250	400	100	0,32	1,33	1,27

Sorsz	Víznyomás p, MPa	Abrázív áram m _a , g/min	Előtoló seb. f, mm/min	Vágórés ferdeség, fok	Vágórés szélesség belépésnél mm	Vágórés szélesség kilépésnél mm
21	250	400	150	0,36	1,27	1,21
22	250	400	200	0,48	1,24	1,16
23	250	400	250	0,46	1,25	1,16
24	250	400	300	0,64	1,24	1,12
25	300	400	50	-0,02	1,34	1,34
26	300	400	100	0,33	1,32	1,27
27	300	400	150	0,22	1,27	1,23
28	300	400	200	0,45	1,27	1,19
29	300	400	250	0,11	1,20	1,18
30	300	400	300	0,44	1,23	1,16
31	350	400	50	0,14	1,36	1,34
32	350	400	100	0,25	1,29	1,25
33	350	400	150	0,09	1,24	1,22
34	350	400	200	0,21	1,23	1,19
35	350	400	250	0,41	1,23	1,16
36	350	400	300	0,11	1,18	1,17