NEUMANN JÁNOS EGYETEM
GAMF MŰSZAKI ÉS INFORMATIKAI KAR

Csigafúró élgeometriájának hatása a forgácsolóerőre, a sorjaképződésre és a furat felületi érdességére Al6063-as alumínium ötvözet fúrása során

Készítette: Görög Róbert
Gépészmérnök szakos hallgató
Levelező tagozat

Konzulens: Kónya Gábor
Tanársegéd

Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Debrecen

2025.

TARTALOMJEGYZÉK

Ábrajegyzék I

Táblázatjegyzék II

Előszó III

Köszönetnyilvánítás III

Jelölések jegyzéke IV

1. Latin betűk IV

2. Görög Betűk IV

Bevezetés 1

1. Szakirodalom kutatás 2

1.1. Alumínium ötvözetek osztályozása 2

1.2. Fúrás 3

1.2.1. Forgács képződés 7

1.2.2. Forgácsoló erő 7

1.2.3. Forgácsolási sebesség 9

1.2.4. Forgács eltávolítás 9

1.2.5. Forgács tapadás 10

1.3. Belső hűtés alkalmazásának hatása 11

1.4. Hűtőfolyadék koncentrációja 16

1.5. Sorja meghatározása 16

1.5.1. Az ISO 13715:2017 szabvány, a sorja definiálása. 16

1.5.2. Sorja típusok 19

1.5.3. Sorja mérete 20

2. Kísérlettervezés 22

2.1. Fúrógeometriák meghatározása 23

2.2. Munkadarab meghatározása 26

2.3. Kísérlet körülményei 27

2.4. Érdességmérés 30
3. Eredmények 31
3.1. Forgácsoló erő 31
3.2. Sorjamagasság és szerszám állapotának elemzése 33
3.3. *Ra* és *R*z felületi érdesség 41
4. Összegzés 45
4.1. Az eredmények összehasonlítása a hipotézissel 45
4.2. Az eredmények jelentősége 45
4.3. A kutatás korlátjai 47
4.4. Jövőbeli kutatási irányok 47
5. Summary 48
5.1. Comparison of Results with the Hypothesis 48
5.2. Significance of the Results 48
5.3. Limitations of the Research 49
5.4. Future Research Directions 50
Irodalomjegyzék 51

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Forgácsolási hő keletkezése [4] 4
2. ábra Forgácsleválasztás [15] 5
3. ábra Csigafúró nomenklatúra; DIN ISO 5419 alapján [18] 6
4. ábra Gyári fúrón (a) és a módosított fúrón (b) fellépő forgácsoló erők [20] 7
5. ábra „Elméletileg leválasztott forgácskeresztmetszet” [10] 8
6. ábra Forgácsoló erő változása a szerszámsugár mentén. [4] 9
7. ábra Fúrás folyamata [25] 10
8. ábra A szerszámanyagok keménysége a hőmérséklet függvényében [28] 11
9. ábra A szerszámanyagok keménysége a szívósság függvényében [28] 11
10. ábra Forgácsoló erő változása száraz és nedves forgácsoláskor [29] 12
11. ábra Hőtermelés szimulációja [30] 13
12. ábra Hűtőcsatorna kilépési pozíciói a főélhez képest különböző osztókörökön [30] 14
13. ábra Standard (A) modell és Standard megnyitással (B) [31] 15
14. ábra Sorja meghatározása ISO 13715 szabvány szerint [35] 17
15. ábra Minták sorja meghatározásához [29] 17
16. ábra Negatív sorja ISO 13715 szerint [35] 17
17. ábra Sorja ISO 13715 szerint [35] 18
18. ábra Sorja jelölése műszaki dokumentációkban ISO 13715 szerint [35] 18
19. ábra Sorjaszám meghatározása Schäfer szerint [37] 19
20. ábra Sorja fúrásnál, kilépéskor Min szerint [39] 20
21. ábra Saacke UWIE 22
22. ábra 140°-os csúcsszögű, kiinduló szerszám 3D szimulációja 23
23. ábra Vizsgált geometriák 24
24. ábra Teszt szerszámok 26
25. ábra Furatképek metszeti ábrája 27
26. ábra Kísérlet körülményei 28
27. ábra Mikroszkópos mérés 29
28. ábra Munkadarab félbevágása sorja méréshez 30
29. ábra Sorja méréshez félbevágott munkadarab 30
30. ábra Érdességmérés 31
31. ábra a) csúcsszög hatása, **b)** sarokvédő letörés szögének hatása, **c)** forgácsosztó kialakítás, **d)** horony homlokszög, **e)** „W” csúcs és előtolás függvénye, **f)** hűtő-kenő csatorna pozíciójának hatása a forgácsoló erőre 32

32. ábra a) csúcsszög hatása, **b)** sarokvédő letörés szögének hatása, **c)** forgácsosztó kialakítás, **d)** horony homlokszög, **e)** „W” csúcs és előtolás függvénye, **f)** hűtő-kenő csatorna pozíciójának hatása a sorja méretére 34
33. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – CS150 szerszám 35
34. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – SV20 szerszám 36
35. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – FO2asz szerszám 37
36. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – HH05 szerszám 38
37. ábra Szerszámon lévő feltapadás **a)** f = 0,12 mm/ford.; **b)** f = 0,03 mm/ford.; **c)** f = 0,18 mm/ford. esetén 39
38. ábra Elsődleges hátlap **a)** f = 0,12 mm/ford.; **b)** f = 0,03 mm/ford.; **c)** f = 0,18 mm/ford. esetén . 39
39. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – W szerszám 40
40. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – HH15x1 szerszám 41
41. ábra Ra és Rz értékek a különböző élgeometriák és az előtolás függvényében 44

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat 140°-os csúcsszögű kiinduló szerszám főbb geometriája 23
2. táblázat Vizsgált geometriák 25
3. táblázat Munkadarab kémiai összetétele 27
4. táblázat Munkadarab fizikai tulajdonságai 27
5. táblázat NCT EmL-850D 5AX jellemzői 28

ELŐSZÓ

Az egyik, ha nem a legelső forgácsolással kapcsolatos vizsgálatot a XIX. század 40-es éveiben Cocquillat [1] végezte a fúrással kapcsolatban. Innen számítjuk a forgácsoláselmélet létrejöttét. Bár azóta sok tanulmány, vizsgálat született, mégis folyamatosan változó világunkban mindig szükség lesz az új technológiák, anyagok kutatására, vizsgálatára [2].

Dolgozatomban alumínium ötvözet fúrása során képződő élsisak és sorja kialakulásának csökkentésével foglalkozom. A sorja a későbbi műveletek (pl.: szerelés, működés) közben problémát okoz. Mérési pontatlanságot eredményez. Az eltávolítása jelentős idő és költsétöbbletet jelent, ezért a gyártásban mindenhol törekednek a kialakulásának elkerülésére, minimalizálására.

A kutatásom célja, hogy adott gyártási folyamatban a darabidő csökkentése nélkül, azaz az alkalmazott technológiai paraméterek jelentős változtatását kerülve, az alkatrész utómunkáinak költségét és idejét csökkentse.

A forgácsolás során egyszerűen változtatható paramétereken túl, (pl.: a hűtő – kenő folyadék (emulzió) koncentrációja, forgácsolósebesség és előtolás) a fúró szerszám élgeometriájának módosítása is hatással van a kialakuló sorjára. A gyártók általában egy adott geometriával készítik ezeket a szerszámokat. A rendelkezésre álló szerszámköszörű gép segítségével leprogramozható és gyártható olyan forgácsoló szerszám, amelynek egyedi élkialakítása a kívánt megmunkálás igényeihez legoptimálisabban igazítható.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném kifejezni köszönetemet témavezetőmnek, Kónya Gábornak a munkájáért és támogatásáért. Ugyancsak köszönöm Németh Imre és Molnár Bálint támogatását.

A materiális támogatásért, mely lehetővé tette a csigafúrók legyártását és a különleges kilépőfelület vizsgálatát, a Festo AM Kft.-nek szeretnék köszönetet mondani. A szerszámok legyártását a Rolatast Kft. által szállított alapanyag biztosította.

A tesztek és mérések elvégzéséhez a Neumann János Egyetem munkatársainak segítségét szeretném megköszönni, név szerint Szabó Norbertnek és Molnár Istvánnak.

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

1. LATIN BETŰK

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
v_c	Forgácsoló sebesség	m/perc
D_m	Megmunkált átmérő	mm
n	Főorsó fordulatszáma	1/perc
Q	Fémleválasztás sebessége	cm^3/perc
D, D_c	Fúró átmérő	mm
f_n	Fordulatonkénti előtolás	mm/ford.
g	Sorjaszám	-
b_r	Sorjató vastagság	mm
r_f	Sorjató rádiusz	mm
b_g	Sorja vastagság	mm
h_o	Sorja magasság	mm
F_{v1}	Egy fogra jutó főmozgás irányú erő	N
$k_{s\,köz}$	Fajlagos forgácsoló erő közepes értéke	N/mm^2 (MPa)
A_1	Forgács keresztmetszet	mm^2
fz	Fogankénti előtolás	mm/ford.
a	Fúró rádiusz	mm
f	Előtolás	mm/ford.
D	Fúró átmérő	mm

2. GÖRÖG BETŰK

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
π	3.14159	-
ω	Spirálszög	°
$2\kappa_r$	Csúcsszög	°
ψ	Keresztél szöge	°
δ	Sarokvédő letörés kúpszög	°
θ	Horony homlokszög	°

BEVEZETÉS

Az alumínium ötvözetek forgácsolhatósági vizsgálatainak jelentősége az ipari gyakorlatban kiemelkedő, mivel az alumínium széles körben használt anyag a repülőgépgyártásban és az autóiparban, valamint számos egyéb területen. Az alumínium ötvözetek általában jó forgácsolhatósággal rendelkeznek, melyek megmunkálhatóságát több tényező befolyásolja, ideértve az ötvöző elemek típusát és mennyiségét, az anyag keménységét, a hővezetési tulajdonságokat és az alkalmazott forgácsolási paramétereket. Alacsony sűrűsége, jó hővezetése és viszonylag alacsony olvadáspontja mind hozzájárul a hatékony forgácsoláshoz. Azonban a sorjásodás ezen anyagok forgácsolása során jelentős. A megmunkált alkatrészeknek sorjamentesnek kell lenniük, mivel mérési, szerelési, funkcionalitásbeli és egyéb problémákat okozhat az élek mentén kialakult sorja [3].

Kutatásom célja, hogy megvizsgáljam az EN AW-Al Mg0,7Si-T66 EN AW-6063-T66 extrudált alumínium fúrását egyedi élgeometriájú keményfém szerszámmal, melynek legfőbb célja a kilépő sorja mértékének minimalizálása. A kísérlettervezés során definiáltam a vizsgált geometriákat és azok értékeit. A legyártandó szerszámok geometriai paramétereit úgy határoztam meg, hogy mindig csak egy paraméter változzon a kiinduló szerszámhoz képest, ezzel biztosítva azt, hogy az adott geometriai módosításból származó eredményeket kapjam. Továbbá terveztem egy olyan csigafúrót, ami dupla csúcsszöggel rendelkezik, melyet irodalomkutatásom alapján alumínium ötvözetek fúrása során még nem használtak. Ezt követően a tesztszerszámokat megterveztem és legyártottam. Ezt követően elvégeztem a forgácsolási kísérleteket, mely során 3 komponensű, piezoelektromos elven működő erőmérővel mértem a megmunkálás során fellépő forgácsoló erő komponenseket, melyeket a kilépő oldali sorja nagyságával igyekszem összehasonlítani. A sorjamagasság méréshez szükséges mikroszkópi mérésekhez és a furat falán mért felületi érdesség méréséhez a munkadarabokat előkészítettem és a méréseket elvégeztem. Ezt követően az eredményeket szisztematikusan kiértékeltem, melyek a további kutatásaim alapját fogják képezni.

1. SZAKIRODALOM KUTATÁS

Szakirodalom kutatásom fő célja volt, hogy olyan vizsgálatokról keressek dokumentációt, ahol alumínium megmunkálását vizsgálták, elsősorban fúrás és sorjaképződés szempontjából. Figyelembe vettem olyan eredményeket is, amik a szerszámmal kapcsolatos kutatások, illetve egyéb megmunkálási módokat teszteltek, melyek eredményei azonban kivetíthetők dolgozatom témájára is [4].

1.1. Alumínium ötvözetek osztályozása

Az alumínium ötvözői közül a szilícium (Si) és a magnézium (Mg) hozzáadása növelheti az ötvözet keménységét és szilárdságát, de ezek az elemek ugyanakkor rontják a forgácsolhatóságot. Az ötvözetek osztályozása alapján, az 1xxx és 6xxx sorozatú ötvözetek általában jobban forgácsolhatók, míg a 2xxx és 7xxx sorozatú ötvözetek nehezebben megmunkálhatók.

Az alumínium ötvözetek osztályozása az ötvöző elemek alapján történik, és általában négyjegyű számokkal jelölik őket [5], [6] .

- Az 1xxx sorozatú ötvözetek közel tiszta alumíniumot tartalmaznak (99% vagy annál több), és kiváló korrózióállóságuk és jó elektromos vezetőképességük miatt alkalmazzák őket.
- A 2xxx sorozat réz ötvöző anyagot tartalmaz, ami növeli az ötvözet szilárdságát, de rontja a korrózióállóságot.
- A 3xxx sorozat mangánt tartalmaz, és közepes szilárdságú, jó korrózióállóságú ötvözeteket eredményez.
- A 4xxx sorozat szilíciumot tartalmaz, ami növeli az ötvözet önthetőségét.
- Az 5xxx sorozat fő ötvöző eleme a magnézium, ami kiváló korrózióállóságot és hegeszthetőséget biztosít.
- A 6xxx sorozat szilícium és magnézium kombinációját tartalmazza, amely jó szilárdságot és korrózióállóságot eredményez, és gyakran használják szerkezeti alkalmazásokhoz.
- A 7xxx sorozat cinket tartalmaz, amely a legnagyobb szilárdságú alumínium ötvözeteket eredményezi, és gyakran alkalmazzák a repülőgépiparban.

- Végül a 8xxx sorozat az egyéb ötvözetek jelölésére szolgál.

Például: MSZ EN1780-1 szabvány szerint:
EN AW-5083 (AlMg4.5Mn0.7) 3.3547
EN AW-6061 (AlMg1SiCu)
EN AW-7075 (AlZn5,5MgCu) 3.4365

Az alumínium ötvözetek könnyen forgácsolhatóak, mivel relatív kicsi a szilárdságuk, ugyanakkor a hőtani jellemzőik kiválóak [7]. Az öntött ötvözetek – kisebb szívósság – jóval egyszerűbben forgácsolhatóak. Minél lágyabb az ötvözet, annál komolyabb problémát okoz a képlékenysége. A megmunkált felület ezeknél az anyagoknál elsősorban a felületi érdesség miatt nem kielégítő, mivel a lágy anyag hajlamos az ún. felkenődésre. A keményebb, ezáltal kisebb szívósságú eutektikus ötvözetek esetén fellépő koptató hatás nehezíti a megmunkálást. „*Az eutektikus ötvözetek különleges, ún. „csatolt kristálynövekedés”-sel keletkeznek a kémiailag homogén olvadékból. Ez azt jelenti, hogy az olvadékból egyszerre, egyidejűleg két szilárd fázis kristályosodik* [8].”

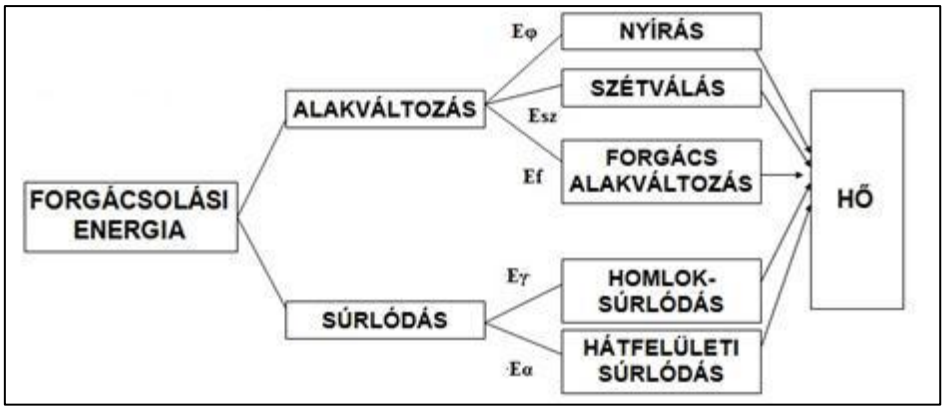
Ez a bennük megtalálható eutektikum, és a primer második fázis (leggyakrabban a Si) miatt nagy forgácsoló sebességgel csak kopásálló szerszámokkal megmunkálhatóak. Forgácsolás során az anyagba beágyazott alumínium-oxid részecskék, illetve az öntőformából a felületbe ragadt homokszemcsék jelentős abrazív hatást fejtenek ki a forgácsoló szerszámra. Leginkább porkohászati keményfém vagy PCD (polikristályos gyémánt) szerszámokkal ajánlott a megmunkálást végezni [9].

1.2. Fúrás

A fúrás belső forgásfelületek létrehozására szolgáló eljárás [10]. Fúrásnál a főmozgást a forgó mozgás jelenti. Végezheti a szerszám vagy a munkadarab, vagy mindkettő. A mellékmozgás meghatározza a forgács vastagsági, szélességi dimenzióit. A forgács vastagságát az előtoló mozgás, szélességét a fogásvételi mozgás határozza meg. Fúrásnál a mellékmozgás egyenes vonalú, általában a szerszám végzi. Különböző furatok alakíthatók ki, úgy, mint hengeres, kúpos, sík és alakos felületek. Ezek a furatok lehetnek átmenő vagy zsákfuratok.

A furat hosszának (l) és átmérőjének (d) viszonya a technológiát és a szerszámot jelentősen befolyásolja. Ha az l/d viszony $\leq 0,5$, akkor rövid; $0,5 < l/d < 3$ esetén normál; $3 < l/d < 10$ esetén hosszú és $10 \leq l/d$ esetén mély furatokról beszélünk.

A forgácsolhatóság nem más, mint az alapanyag mindazon tulajdonságainak összessége, mely kihatással van a forgácsolási folyamatra és az adott termék előállításának könnyedségére vagy épp nehézségére [11]. A forgácsolhatóság fogalma magába foglalja az összes jellemzőt, mint például a geometriai pontosságot, a forgács alakját, a forgácsolóerőt, a forgácsolószerszám kopását, hőképződést, a megmunkált felület érdességét és állapotát együttesen. Forgácsoláskor szinte az összes energiabefektetés az alakváltozásra, azaz a forgács leválasztására, illetve a fellépő súrlódások leküzdésére fordítódik. Vagyis ahogy az 1. ábra mutatja, teljes egészében hőképződést okoz [10].



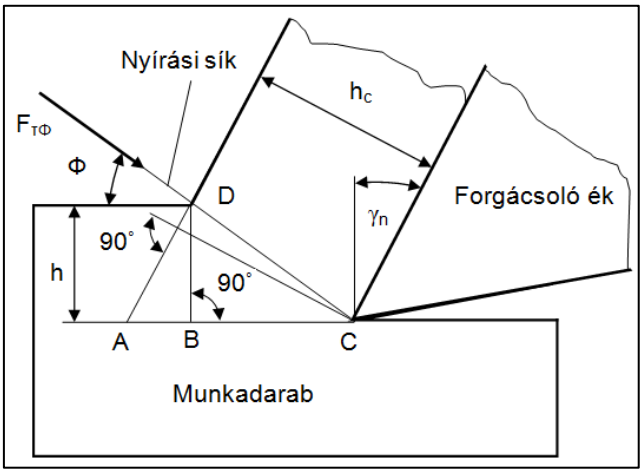
1. ábra Forgácsolási hő keletkezése [4]

A kísérlet során a keletkező hő elvonását a forgács keletkezés helyétől kiemelten kell kezelni, mivel az elégtelen hőelvonás a forgács feltapadását okozza, ami károsan hat a sorjaképződésre [12].

A megfelelő paraméterek megválasztása kritikus a kívánt felületi minőség és a szerszám élettartam szempontjából [13]. A forgácsolt felületek minősége nem csupán a felület érdességét, hanem alakhibáit, mikrorepedéseket és a felületi feszültséget is magában foglalja [14]. Az érdesség a megmunkált felületen lévő mikroszkópikus méretű egyenetlenség. Átlagos felületi érdesség jele $R_{a.}$ Egyenetlenség magassága – jele R_z – megközelítőleg az átlagos érdesség 4,5-szerese. Az elméleti és a valós felület közötti különbség az alakhiba. Az ismétlődő felületi egyenetlenség a hullámosság, melynek a hullám mélysége a hullámhosszhoz viszonyítva kicsi.

A munkadarab, a szerszám és a forgács kölcsönhatásának területe a forgácstő [2]. Amely „*a forgácsnak a munkadarabbal még összefüggő része.*” Kötött forgácsoláskor (fúrás) a szerszám csúcsa is részt vesz a forgácsolásban, vagyis nem csak a főél, hanem a mellékél is forgácsol. Az összetett forgácsolt felület miatt az alakváltozások gátlása miatt bonyolult kereszthatások érik az anyagot a forgácstőben. Az itt kialakuló nyírási síkot a szerszám

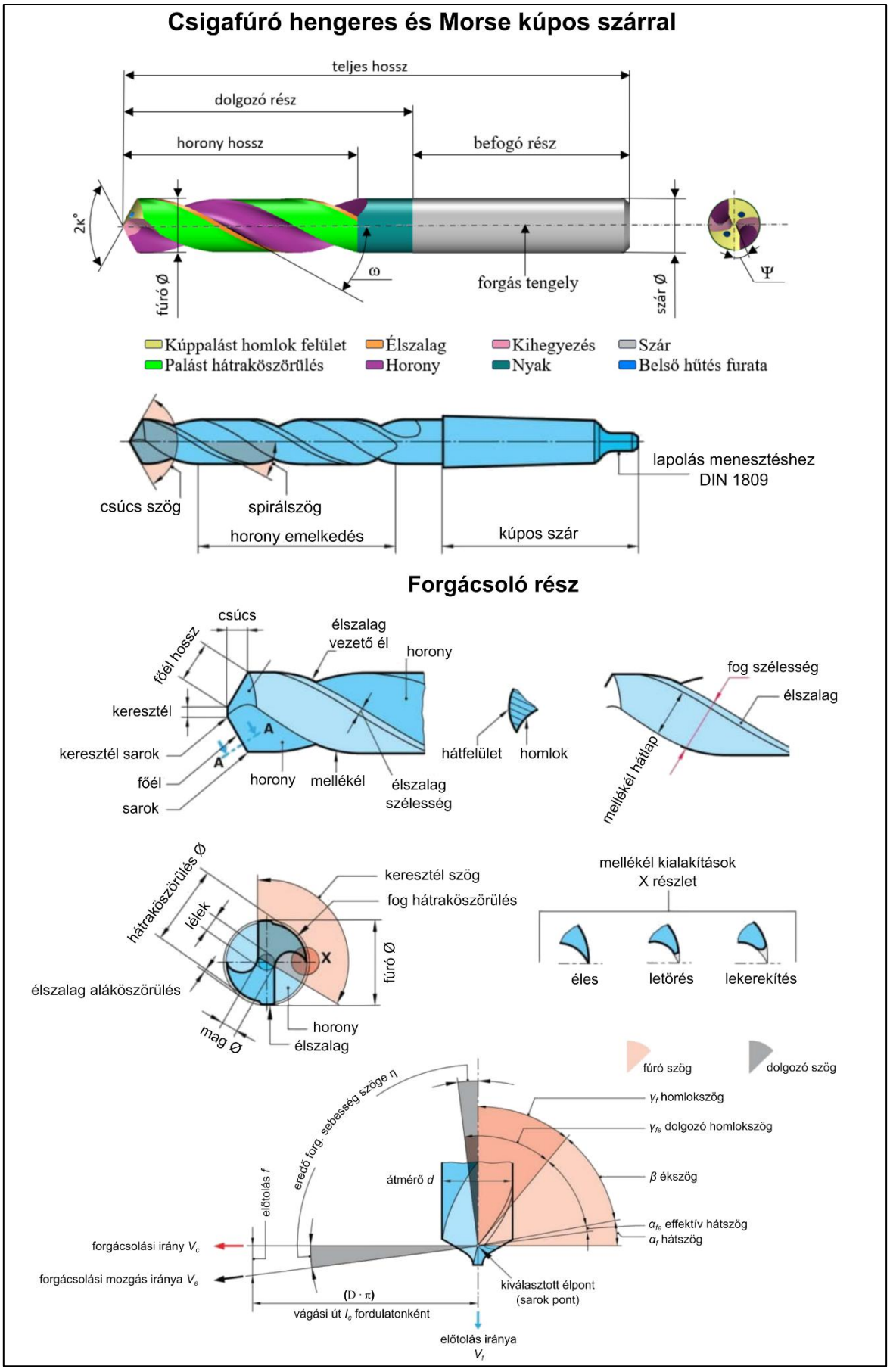
homlokszöge befolyásolja. A forgácsoló erő csökkenthető a nyírási sík területének csökkentésével, amit a homlokszög növelésével érhetünk el, ahogyan a 2. ábra szemlélteti [15].



2. ábra Forgácsleválasztás [15]

A forgácsolási sebesség, előtolási sebesség és fogásmélység optimalizálása szükséges a hatékony forgácsoláshoz. Magas forgácsolási sebességek alkalmazása általában jobb felületi minőséget eredményez, de növelheti a forgácsoló erőt és ezáltal a szerszám kopását. A fordulatszám és a fogankénti előtolás megfelelő kombinációja csökkentheti a forgácsolási erőket és javíthatja a megmunkálás stabilitását.

A csigafúró hengeres, kétélű, szabályos élgeometriájú szerszám [16] (3. ábra). A kúpos hegyén a főéleket a dolgozó részen spirálisan kialakított hornyok alakítják ki. A dolgozó rész hosszát a megmunkálandó furat mélysége, plusz az újraélezéshez képzett tartalék határozza meg. Mivel a fúró hossza jelentős hatással van a merevségére, ezért nem javasolt a szükségesnél hosszabb szerszám használata. A furatban a súrlódás csökkentése érdekében a hengeres felületet lemunkálják úgy, hogy csak egy vékony szalagot hagynak meg a horony mentén [17]. Itt mérhető a fúró névleges átmérője. Ez a kialakított élszalag segít a furatban megvezetni a szerszámot. A különösen mély furatokhoz a dolgozó részt a szár, azaz a befogó rész irányába kúposan (1:1000) készítik, ezzel elkerülve a beszorulást.



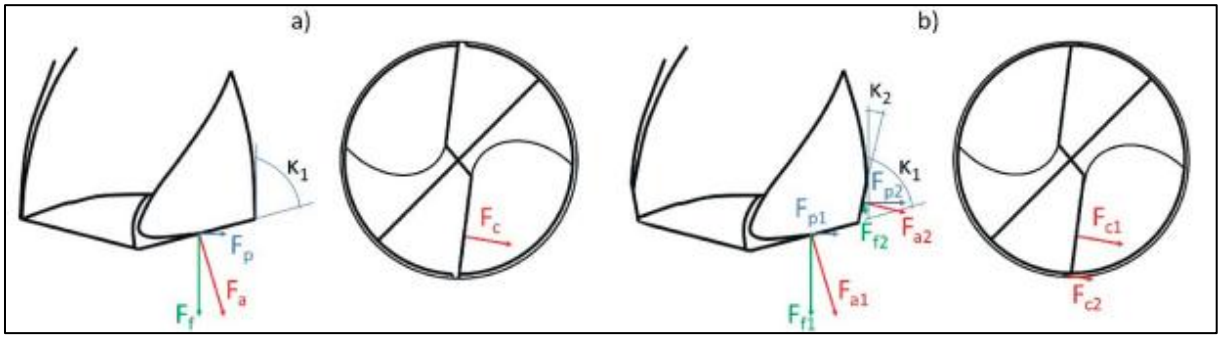
3. ábra Csigafúró nomenklatúra; DIN ISO 5419 alapján [18]

1.2.1. Forgács képződés

A forgácsképződés során olyan másodlagos jelenségek is kialakulnak, melyek a forgács szakaszos letapadásából, majd elnyíródásából származnak. Az élcsúcson elnyíródó forgács adhéziósan kötődik a szerszám homlokfelületéhez. A forgács továbbhaladásakor immár a szerszám felületéről, nem pedig az alapanyagról nyíródik el. A szerszámok kopását tehát elsősorban ez a folyamatos adhéziós kötés kialakulása, majd elnyíródása okozza elsősorban, nem pedig a forgács súrlódása. „*A különböző anyagok határfelületén fellépő vonzóerőt adhéziónak (tapadásnak) nevezzük. A különböző anyagok között másodlagos kémiai kötések alakulnak ki, amelyek jelentős erőt képviselnek, ám ez általában gyengébb kapcsolatot jelent, mint a kohéziós erő* [19].”

1.2.2. Forgácsoló erő

Franczyk és mtsai. [20] megfigyelték, hogy a forgácsoló erő csökkentése kedvező hatással van a sorjaképződés elkerülésére. Ennek érdekében kísérletet végeztek egy módosított geometriájú fúróval. A módosítás abból állt, hogy egy meghatározott hosszúságú és szögű letörést alakítottak ki a fúrón. Ezáltal lerövidült a főél és egy újabb vágóél alakult ki, mely segített a forgácsoló erők elosztásában a fúrás során, ahogyan a 4. ábra is szemlélteti.



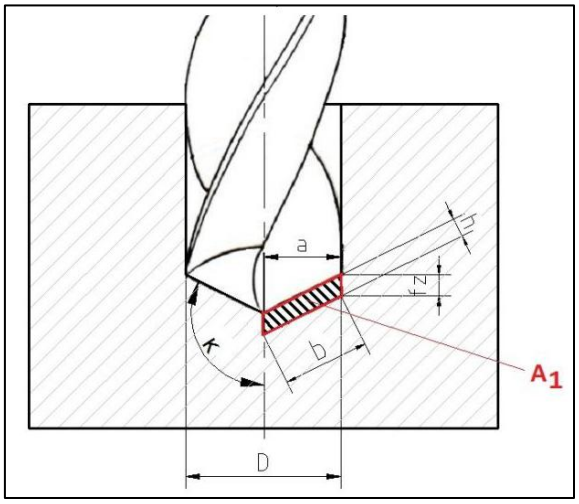
4. ábra Gyári fúrón (a) és a módosított fúrón (b) fellépő forgácsoló erők [20]

Feltételezték, hogy szimmetrikusan terhelt fúróval a kapott F vágóerő által képviselt forgácsolási ellenállás két összetevőre oszlik, amelyek a vágóéleken helyezkednek el: F_c vízszintes erő és merőleges a forgácsolóélre az F_a függőleges síkerőben. Ezután az F_a erő két összetevőre osztható: F_f és F_p. Ha az egyik él erőértéke F_f, akkor mindkét él esetében $2F_f$ lesz. Mivel $F_f = F_a sin(\kappa_r 1)$, az axiális erő növekszik a fúró csúcsszögének ($2\kappa_r$) növekedésével.

Egy további forgácsolóél létrehozása megváltoztatta az erők eloszlását. Ebben az esetben az F teljes forgácsolóerő értéke az elsődleges és a kiegészítő forgácsolóélen fellépő ellenállások összege. A kiegészítő forgácsolóél csúcsszögének kis értéke miatt az F_f2 axiális erő lényegesen kisebb, mint az eredeti forgácsolóélen fellépő F_f1 axiális erő. A fúrt lyuk széle

közelében a radiális irányban ható erő mennyisége sokkal nagyobb, mint az axiális irányban. Az axiális erő értékének helyi csökkenése azt eredményezte, hogy a munkadarab anyagának a szerszámmozgás által kiváltott kilökődése kisebb intenzitással történik a furat szélén, mint a közepén. Így a fúrt lyuk kerülete körüli anyagfeszültség-értékek jelentős csökkenését sikerült elérniük.

Jelen dolgozat egyik fő vizsgálati témája a forgácsoló erő csökkentése [10]. A forgácsoló erő számításhoz a Kienzle-Victor egyenlet használatával az elméletileg leválasztott rétegkeresztmetszetet (5. ábra) kell először meghatározni egy élre vonatkoztatva (A1).



5. ábra „Elméletileg leválasztott forgácskeresztmetszet” [10]

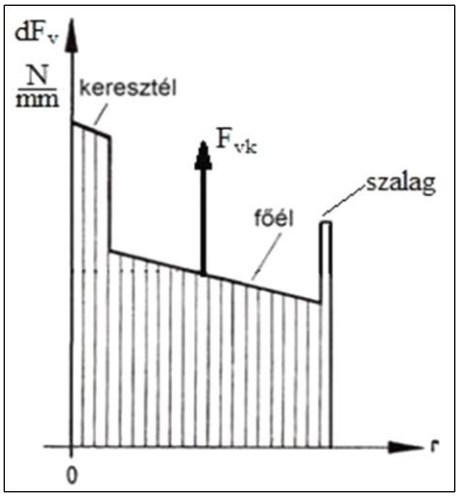
Az egy él által leválasztott elméleti forgács keresztmetszet számítása az alábbi egyenlet alapján történik:

$$A_1 = f_z \cdot a = \frac{f}{z} \cdot \frac{D}{2} = \frac{D \cdot f}{4} \tag{1}$$

Egy élen ébredő forgácsolóerő a Kienzle-Victor egyenlet szerint:

$$F_{v_1} = k_{sköz} \cdot A_1 = k_{sköz} \cdot \frac{D \cdot f}{4} \tag{2}$$

„*A fúró éle mentén a változó homlok- és hátszög következtében pontról pontra más az erő értéke. A keresztélen a nagy negatív homlokszög miatt nagy erő keletkezik, a főélen a növekvő homlokszög miatt az erő csökken, majd az élszalag súrlódása miatt ismét megnő*” [10]. Ez látható a 6. ábrán.



6. ábra Forgácsoló erő változása a szerszámsugár mentén. [4]

1.2.3. Forgácsolási sebesség

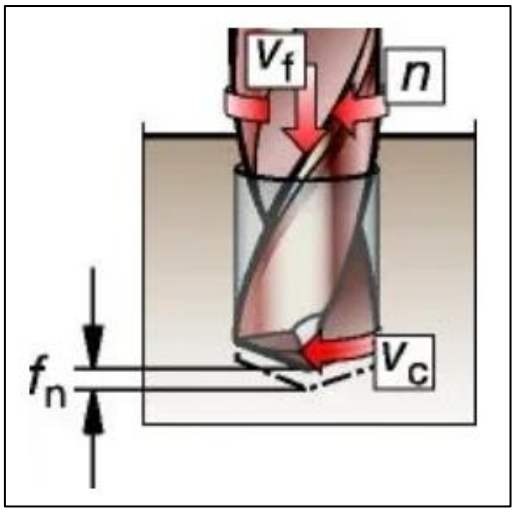
Az optimális forgácsolási sebességet többek között a hőtani jellemzők határozzák meg. Az alumínium ötvözetek forgácsoláskor sokkal alacsonyabb hőmérsékletre hevülnek, azonban az olvadáspontjuk is alacsonyabb, ami gondot okozhat. A forgácsoló sebességet a 3. egyenlet alapján számoljuk.

$$v_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \ (m/perc) \tag{3}$$

Bánkuti [21] ismeretei alapján a 6063-as alumínium öntvényhez 200 - 300 m/perc tartományban javasolt a forgácsolási sebesség megválasztása. Chatcha és mtsai. [22] tanulmányuk készítésekor 30 és 53,7 m/perc forgácsoló sebességet alkalmaztak 60 mm/perc, azaz 0,04 mm/ford. előtolás mellett. Ceratizit [23] katalógus szerint a 1079106000 cikkszámú tömör keményfém fúróval 400 m/perc forgácsolási sebesség mellett, 0,25 mm/fordulat előtolással munkálható meg a 6063-as alumínium öntvény. Subramanian és mtsai. [24] által végzett tesztekben 40 – 70 m/perc forgácsoló sebesség és 0,1 – 0,2 mm/perc előtolással kísérleteztek.

1.2.4. Forgács eltávolítás

A forgács eltávolítása speciális kialakítású szerszámokat igényel, mely a fúrás folyamatát befolyásolja (7. ábra) [25]. A nagyobb forgácsolósebesség miatt időegységenként több forgács keletkezik (4. egyenlet). A horonyba ragadás elkerülése végett, szélesebb hornyú és nagyobb spirálszögű, kevesebb fogszámú szerszámok alkalmazása szükséges. Szintén segítheti a forgács eltávolítását a belső hűtéses szerszámon keresztül áramló hűtő folyadék.



7. ábra Fúrás folyamata [25]

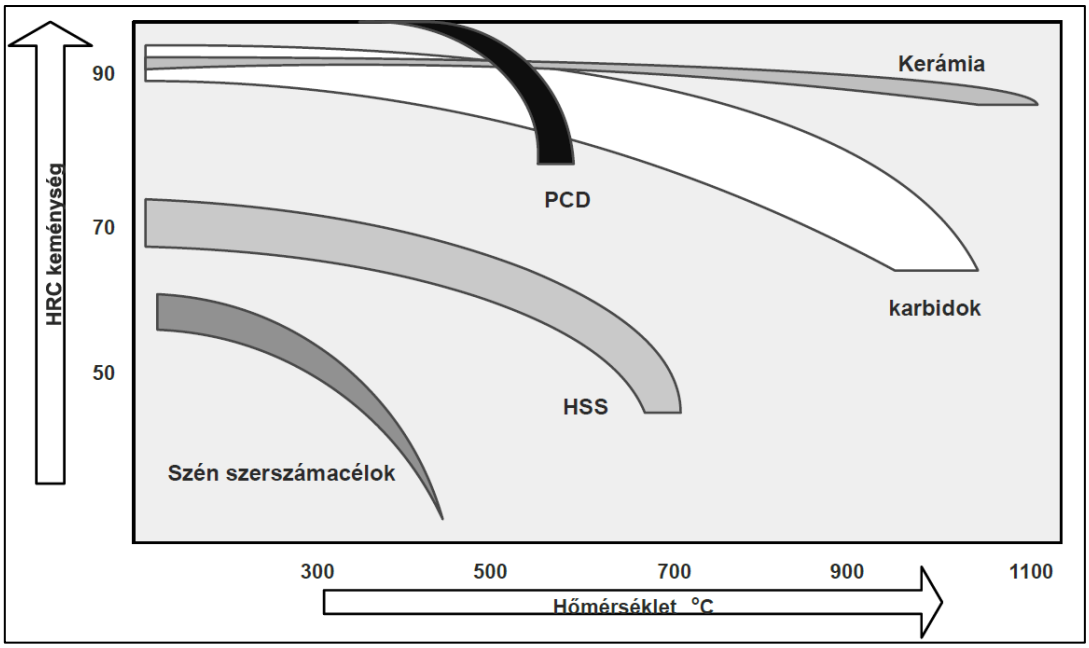
$$Q = \frac{D_c * f_n * v_c}{4} \tag{4}$$

1.2.5. Forgács tapadás

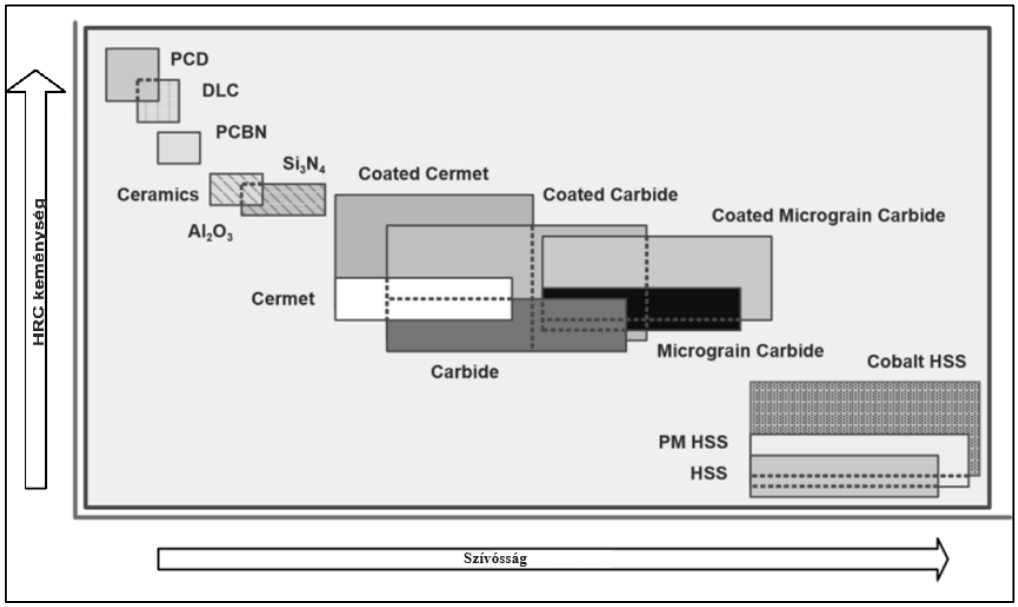
További problémát okoz a forgács tapadása. Nagy forgácsolási sebesség esetén a szerszámmal érintkező anyag a magas hőmérséklet miatt lágyul. Ezt a kilágyult anyagot a forgácsképződés során keletkező nyomás kiszorítja a szerszámmal való érintkezési zónából, ami ezután ismét megszilárdul. Ez az újra dermedt képződmény a szerszámra tapad. Legtöbbször a hátlapon figyelhető meg ez a feltapadás, ezért éles, pozitív homlokszögű, nagy hátszögű, keskeny élszalaggal rendelkező szerszám alkalmazása javasolt. Alumínium ötvözetek megmunkálása során a forgácstő rezgéskeltő hatása alacsony, ezért nagyobb fogásmélység alkalmazható.

Matsumura és mtsai. [26] kutatásukban kimutatták, a forgács tapadása 400 – 500 K közötti hőmérsékleten és 500 MPa nyomáson ment végbe. Matsumura és mtsai. egy másik kutatásuk során [27] bemutatták, hogy 40 és 60 m/perc közötti forgácsolási sebesség tartomány körül nagymértékű tapadás tapasztalható, ami a szerszám felületén jelentkező feszültséggel és hőmérséklettel függ össze.

Astakhov és mtsai. [28] kutatásai alapján a forgácsolást végző szerszámokat a fenti követelményeknek megfelelően kiválaszthatjuk a keménységük és a forgácsolási hőmérséklet (8. ábra), illetve a keménységük és a szívósságuk (9. ábra) függvényében.



8. ábra A szerszámanyagok keménysége a hőmérséklet függvényében [28]



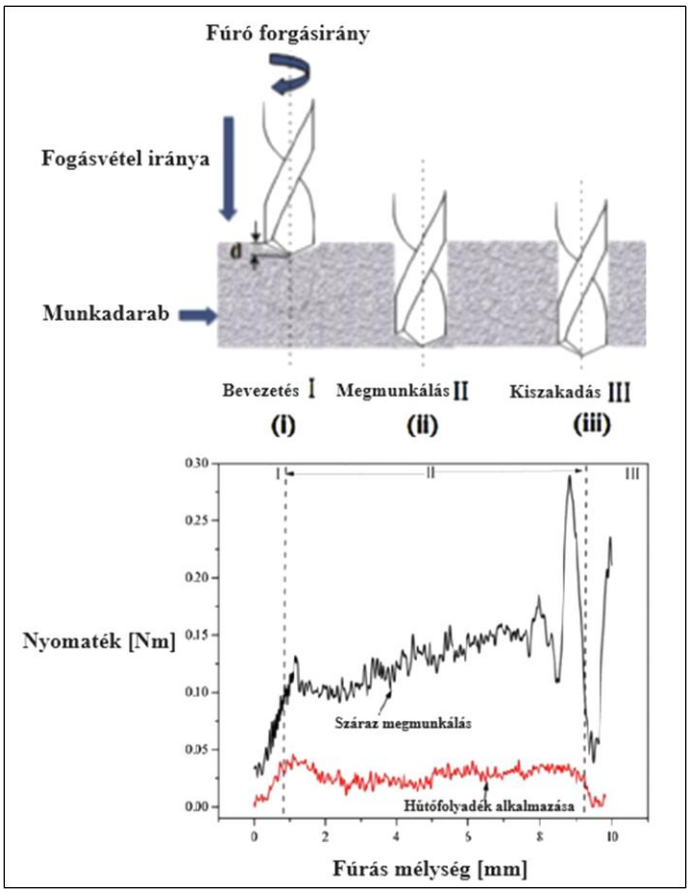
9. ábra A szerszámanyagok keménysége a szívósság függvényében [28]

1.3. Belső hűtés alkalmazásának hatása

Horváth és mtsai. [13] tanulmányában megbizonyosodhatunk arról, hogy a hűtő – kenő folyadék alkalmazása nem elhanyagolható előnyökkel jár. Száraz forgácsoláskor jelentős mennyiségű élrátét és sorja keletkezett. Az élrátét növelte a forgácsoló erőt, elősegítette a sorjaképződést. Ezen felül a felületi minőséget is rontotta. Ezek az anyagok (például: emulzió) csökkentik a súrlódást, hűtik a szerszámot és a munkadarabot, valamint segítenek eltávolítani a

forgácsokat a forgácsolási zónából, ezáltal javítva a felületi minőséget és növelve a szerszám élettartamát.

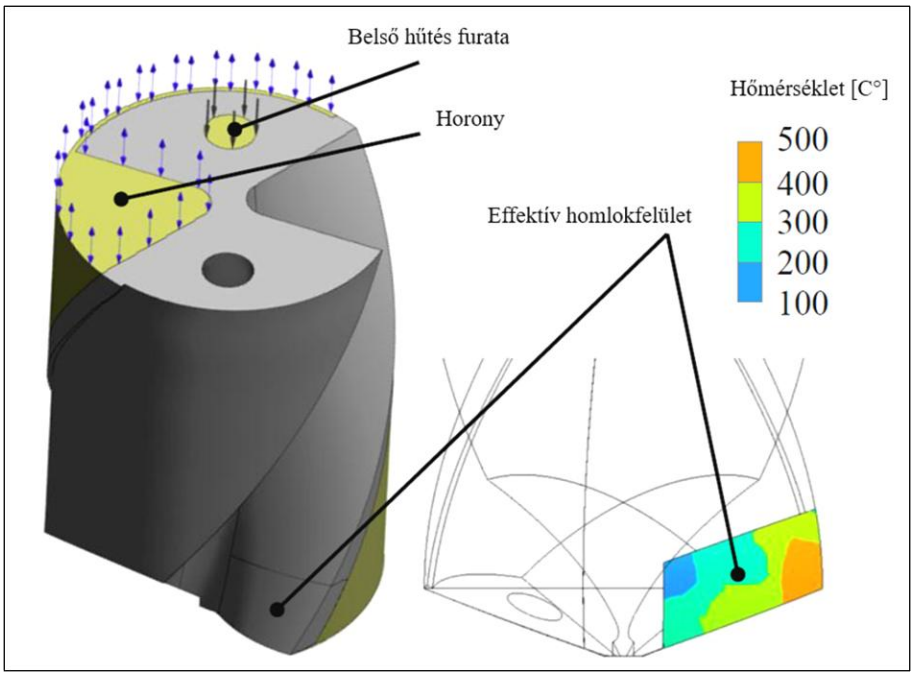
A hűtés hatását – Ti-Al ötvözetben – Nithin és mtsai. [29] vizsgálták. Fontos megállapításra jutottak, miszerint a fúrás előrehaladtával az anyagban a hűtőfolyadék egyre nehezebben jut el a forgácsoló élhez. Ha 3D vagy ennél nagyobb mélységben kell a megmunkálást végezni, akkor a folyamat gyakorlatilag száraz forgácsolásnak tekinthető, mivel a forgács áramlása akadályozza a hűtőfolyadék bejutását a furatba. Ez kerülendő, mivel a száraz forgácsolás nagyobb hőterhelést okoz, ezáltal a szerszámkopás gyorsabb és jelentősebb lesz. Romlik a felületi minőség és fokozottan növekszik a sorja képződés és annak mérete. Ahogy a 10. ábra mutatja a száraz és emulziós hűtés során mérhető nyomatékkülönbség, miszerint az emulziós hűtés a szerszámterhelés csökkentésében jelentős szerepet kap.



10. ábra Forgácsoló erő változása száraz és nedves forgácsoláskor [29]

Figyelembe véve ezt a kutatási eredményt, a kísérletekhez olyan porkohászati keményfém alapanyagból készítem a fúró szerszámot, melyben kiképeztek belső furatokat a hűtőfolyadék szállítására. Ezáltal a szerszám főéleihez közvetlenül lehetséges eljuttatni szükséges mennyiségben a folyadékot a stabil fúrási teljesítmény fenntartása érdekében.

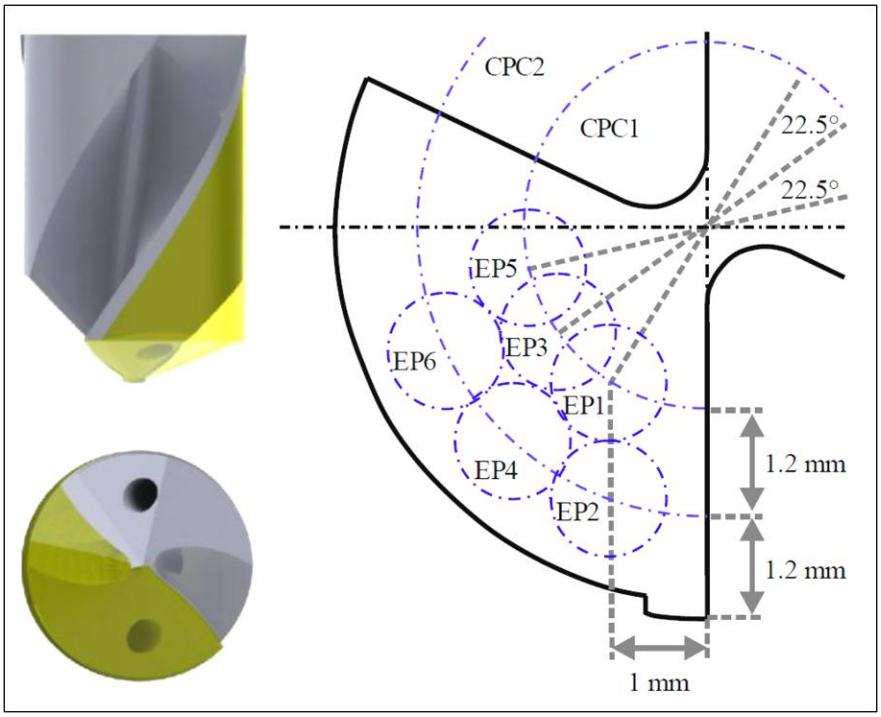
Fallenstein és Aurich [30] vizsgálta – CFD (computational fluid dynamics) modell segítségével – a hűtőfolyadék áramlási sebességének és a hűtőcsatorna kilépési pozícióját a hűtésre gyakorolt hatás szempontjából. Az effektív homlokfelületet lefedő hőmérsékletmezőt hoztak létre, hogy szimulálják a forgács és a szerszám közötti hőtermelő érintkezési felületet (11. ábra).



11. ábra Hőtermelés szimulációja [30]

A hűtőfolyadék nagy nyomás alatt történő alkalmazása nagyobb áramlási sebességet eredményez, és ezáltal több hűtőfolyadékot juttat a forgácsolóélek közelében. Ez a korreláció könnyen bizonyítható hidraulikus számítások alkalmazásával (Bernoulli egyenlete).

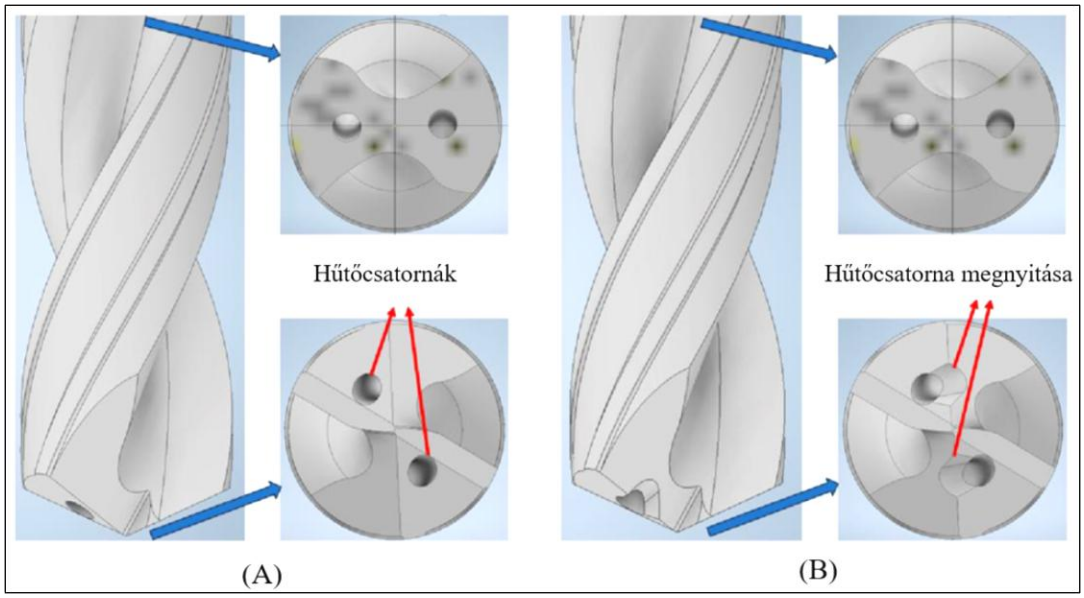
Mind az áramlási sebesség, mind a kilépési pozíció jelentős hatással van a szerszámtól a folyadékig terjedő hőáramra a fő hátfelületen keresztül. A hűtőcsatorna kilépési helyzetének kerületi komponensének hatása sokkal erősebb, mint a radiális komponensé. Ennek ellenére a fúró belső területeinek hűtése jobb, ha a hűtőcsatorna kilépési helyzete a szerszám középvonala felé helyezkedik el (12. ábra).



12. ábra Hűtőcsatorna kilépési pozíciói a főélhez képest különböző osztókörökön [30]

Végső következtetésük szerint minél kisebb a távolság a hűtőcsatorna kilépési pozíciója és a homlokfelület között, és minél nagyobb a hűtőfolyadék áramlási sebessége, annál több hő távozik a forgácsoló éktől. Ugyanakkor az éken belüli maradék átlaghőmérséklet aszimptotikus viselkedést mutat a hűtőfolyadék áramlási sebességének növelésére.

Diba és mtsai [31] szintén CFD modellezés segítségével végeztek vizsgálatokat fúrási művelet során a hűtőfolyadék áramlási dinamikájának és hőelvezetésének tanulmányozására. Négy fő alapmodellt vizsgáltak. Az elérhető szerszám alapanyag miatt számunkra a standard hűtőcsatornás és a standard hűtőcsatorna horony irányába történő megnyitásával végzett kísérletek lesznek relevánsak (13. ábra).



13. ábra Standard (A) modell és Standard megnyitással (B) [31]

Kutatásuk alapján a standard modellű kivitelnél volt a legmagasabb hűtőközeg kilépési sebesség. Állandó 5,5 l/perc bementi sebesség mellett a standard modellnél ~ 90 m/s sebesség tapasztalható, míg a megnyitással rendelkező standard modell esetében 75 – 80 m/s között mérhető a kilépő hűtőfolyadék sebessége. Ennek ellenére minden fúrómodellnél jelentős csökkenés figyelhető meg a hűtőfolyadék áramlási sebességében a vágóél területén, ahol a sebesség nagyon alacsonyra, a fúró középvonala felé szinte 0 m/s-ra esik vissza, amit holtzónának neveznek. Ez azt jelzi, hogy a hűtőfolyadék áramlási sebessége 80 – 100%-kal csökken a kimeneti furat területétől a vágóélig. Ez arra utal, hogy ezekre a területekre nem jut elegendő hűtőközeg. Érdekes módon a holtzóna területe a standard modellnél a legkisebb, annak ellenére, hogy a CFD eredmények alapján a hátfelületen és a furat alján viszonylag egyenletes áramlási sebesség figyelhető meg.

Ez a megfigyelés egybecseng az előzőleg említett Fallenstein és Aurich [30] kutatásával. Megállapították, hogy a fő forgácsolóéltől távol elhelyezkedő kilépési pozíciók esetében a hátfelület első oldala alatti jelentősen alacsonyabb átlagsebesség a folyadékok fizikai tulajdonságával magyarázható, miszerint a legkisebb ellenállású utat részesítik előnyben, amely ebben az esetben az axiális horony. Azaz a hűtőcsatorna megnyitással rendelkező modell [31] hasonlóan viselkedett, mint az EP5 kilépő pozíciójú modell (12. ábra).

1.4. Hűtőfolyadék koncentrációja

Mendes és mtsai. [32] által végzett tesztek alapján javasolt legalább 10%-os emulzió használata a forgácsolóerő minimalizálása érdekében. Eredményeikkel hasonló megállapításra jutottam korábbi tapasztalataim során.

Jelentős különbségeket mértek 5% és 10% -os koncentráció esetén azonos forgácsolási paraméterek mellett. 5%-os koncentrációnál a kutatásban [32] különböző hűtési módok használatával 290N és 340N körül volt mérhető a forgácsoló erő. A koncentráció növelésével a forgácsolóerő csökkent, azonban 10%-nál és felette már nem csökkent tovább ~220N-nál. Tehát nincs szignifikáns előnye a 10%-nál nagyobb koncentrátumnak. A korábbi vizsgálataimban 12%-os értéknél – azonos forgácsolási paraméterek mellett – értem el optimális eredményeket, viszont ott más tényezők vizsgálata volt az elsődleges cél a forgácsoló erő helyett.

Kónya és Kovács [33] kísérlete során szintén azt tapasztalták, hogy a legkisebb forgácsoló erőt 12%-os olaj koncentráció mellett érték el. Érdemes megvizsgálni szerszámozás szempontjából azt a nem elhanyagolható tényt, hogy a 6%-os koncentráció esetén 14,9%-al nagyobb volt a forgácsolóerő. Ez a jelentős különbség fokozza a szerszám élettartamának csökkenését, ezáltal plusz költséget és időt vesz el a gyártástól, miközben az előnyei (kevesebb olaj költség, kisebb környezeti terhelés) ezt nem tudják ellensúlyozni.

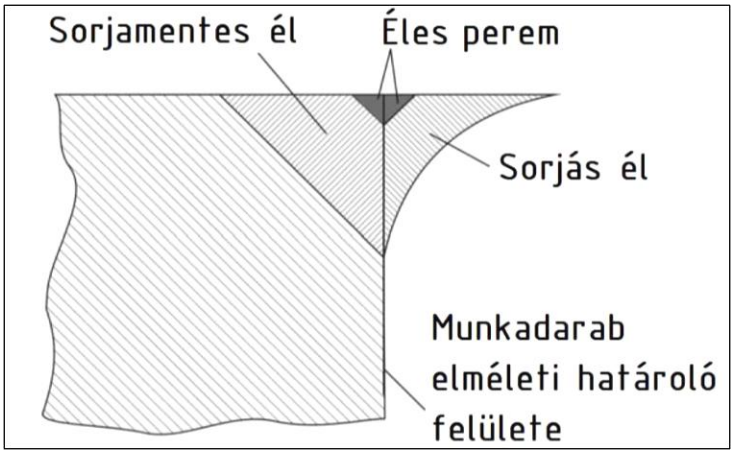
Megállapításuk szerint a 15% (vagy nagyobb) koncentrációnál a szerszám élén egy olajfilm bevonat alakul ki, melynek felhalmozódása növeli a szerszám forgácsoló élének sugarát, mintha egy bevonatolás történt volna. A fő probléma ezzel, hogy egyrészt hozzáadódik az élpreparáció és a bevonat által létrehozott rádiuszhoz; másrészt ez kontrollálatlanul történik, ami ugyancsak káros. Ezért itt már tapasztalható a forgácsolóerő növekedése [33].

1.5. Sorja meghatározása

Ma már több nemzeti és nemzetközi szabvány (lásd alább) definiálja, leírja a sorját, a felületek minőségét. Viszont évezredeken át nem volt szavunk a sorjára. Az első írásban megemlített sorja (burr) kifejezést Charles Darwin nagyapja, Erasmus Darwin – természettudós és költő – nevéhez köthetjük 1784-ből [34].

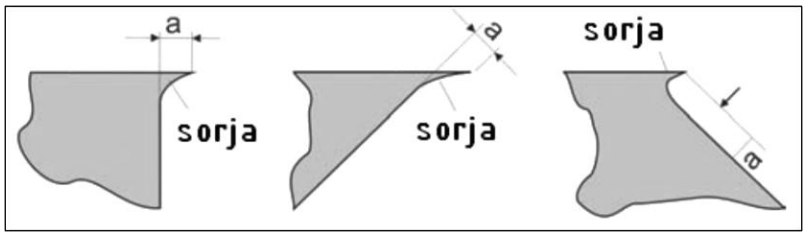
1.5.1. Az ISO 13715:2017 szabvány, a sorja definiálása.

Sorjásnak tekinthető a megmunkálás során kialakuló azon él, amelyen a maradék anyag nagysága mérhető, mérete nullától különböző, azaz lehet negatív is. A sorja meghatározása ISO 13715 szabvány szerint (14. ábra).



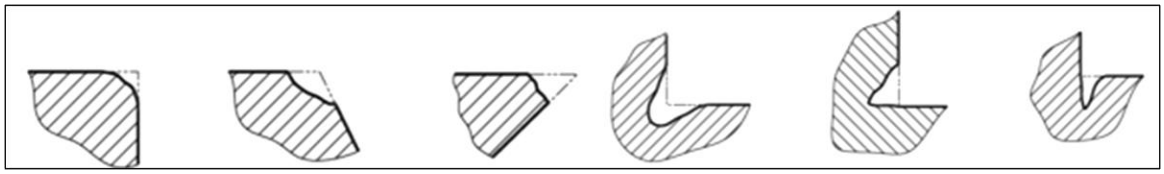
14. ábra Sorja meghatározása ISO 13715 szabvány szerint [35]

Ez a szabvány egy „*a”* paraméterrel jellemzi a sorját (15. ábra), mely a határoló síkok közül a nem megmunkált sík és a sorja csúcspontja közötti legkisebb távolság.



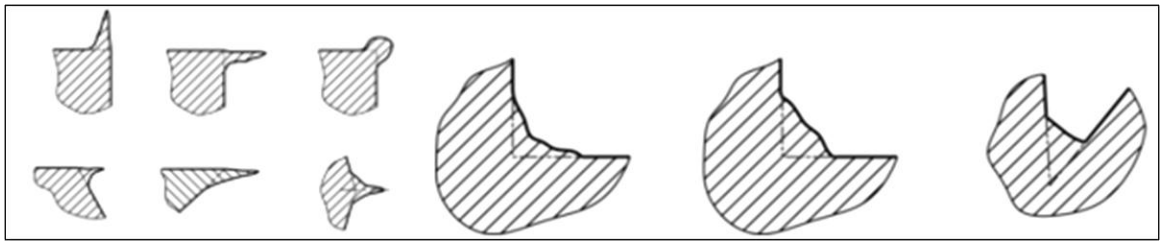
15. ábra Minták sorja meghatározásához [29]

Műszaki rajzokon ritkán találkozhatunk sorjára utaló jelöléssel, mivel általában azt a geometriai alakot adják meg, amit ideálisnak mondhatunk eltérések nélkül. Ez fontos, mivel az alkatrész működése, vagy biztonsági előírások miatt fel kell tüntetni. Ilyen élek lehetnek a külső élek, valamint az átmenő belső élek. Az ISO 13715:2017 szabvány rögzíti az alkatrészeken megjelenő sorja jelölésére szolgáló szimbolikát is. Alámetszés esetén megkülönböztethetünk külső és belső élen keletkező sorját (negatív sorja, kitörés) (16. ábra).



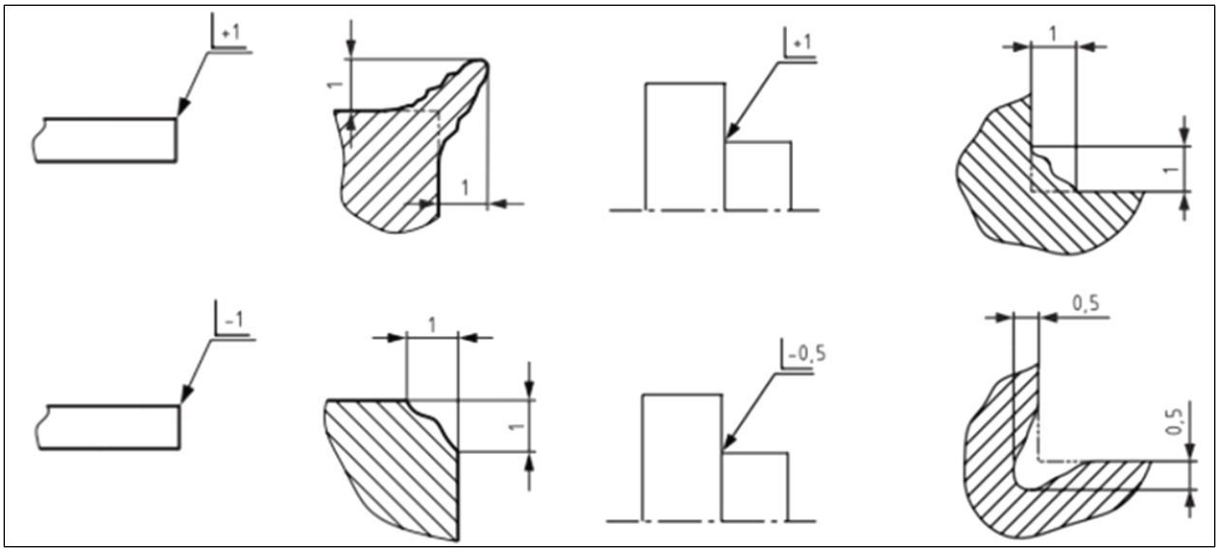
16. ábra Negatív sorja ISO 13715 szerint [35]

Szabvány szerint a megjelenő anyagfelesleg, mint sorja külső és belső éleken (17. ábra).



17. ábra Sorja ISO 13715 szerint [35]

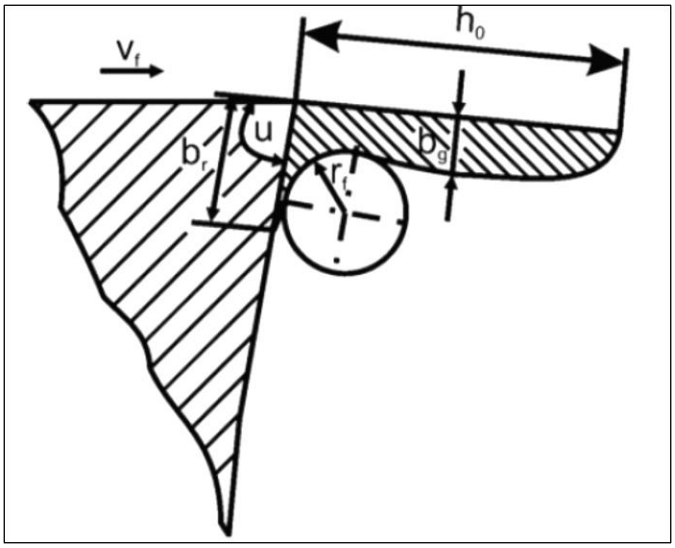
Műszaki dokumentumokban, rajzokon az alábbi jelöléseket (18. ábra) alkalmazhatjuk a még elfogadható méretű és helyzetű sorja jelölésére:



18. ábra Sorja jelölése műszaki dokumentációkban ISO 13715 szerint [35]

Gillespie és mtsai. [36] nem a valóban megmunkált éleket vették referenciának, hanem az elméleti felületeket. Ez alapján a keletkező élt akkor is sorjásnak kell tekinteni, ha az elméleti kontúrhoz képest kitöredezés, azaz anyaghiány tapasztalható.

Schäfer és mtsai. [37] véletlenszerűen kiválasztott sorja keresztmetszetét használták a méretének leírásához. Megállapításuk szerint minden típusú sorja leírható egy hosszirányú és egy hozzá tartozó keresztmetszeti profillal (19. ábra).



19. ábra Sorjaszám meghatározása Schäfer szerint [37]

A sorja egyöntetűen meghatározható az ún. sorjaszámmal (5. egyenlet). Ebben értelmezhetjük a meghatározott paramétereket, melyek eltávolítási nehézségükkel súlyozva kerülnek figyelembevételre.

$$g = \frac{4b_r + 2r_f + b_g + h_0}{8} \tag{5}$$

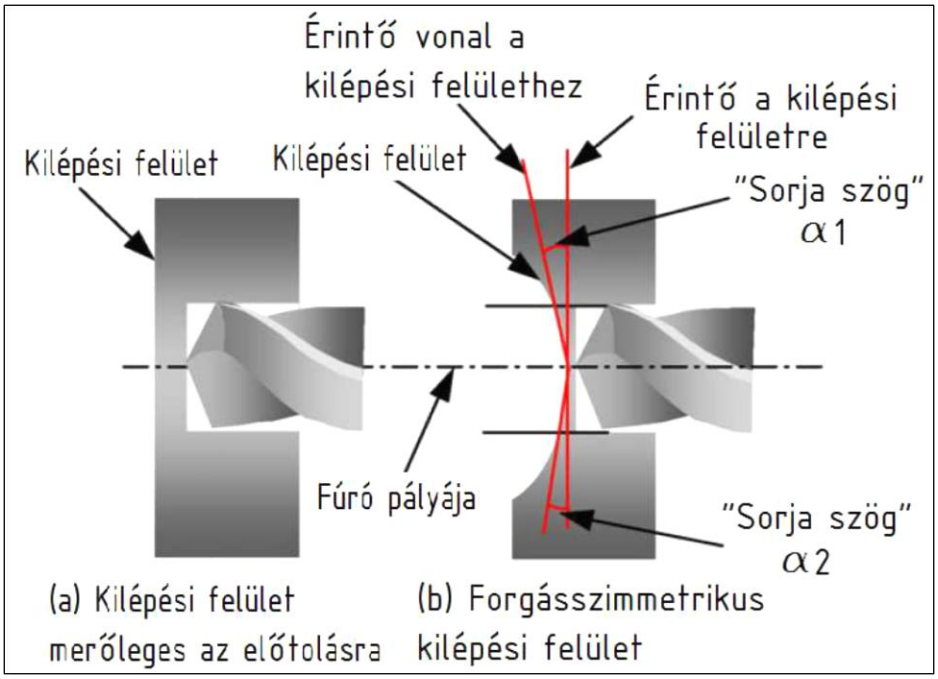
1.5.2. Sorja típusok

Gillespie és mtsai. [38] megfigyeléseik szerint különböző típusokba sorolták a sorjákat.

Ez alapján megkülönböztetünk: Poisson, szakadási, kihajló és darabolási sorját.

A belépő oldalon kialakuló sorja a szakítás, hajlítás utáni tiszta nyírás eredménye. Ha a munkadarab maradó alakváltozást szenved a nagy nyomás hatására, majd oldalirányba kitüremkedik, akkor beszélhetünk Poisson sorjáról. Fúrás során leginkább ezzel találkozhatunk a kilépő oldalon, mivel a szerszám élszalagja és a furat felülete között súrlódás lép fel. A továbbiakban a jelen esetben kritikusabb, kilépő oldali Poisson sorjával foglalkozom.

Min és mtsai. [39] kifejlesztettek egy modellt, mellyel a furatoknál a kilépő oldalon vizsgálták a forgácsoló él és a kilépési felület egymásra gyakorolt hatását (20. ábra). Figyelembe vették a szerszám fordulatszámából eredő dinamikus hatást is. Ezzel a modellel előre jelezhető az a terület, ahol a sorja megjelenik. Ezt a területet legfőképp a hátszög határozza meg. Leitz és mtsai. [40] kinematikai modellje a kilépés geometriai eseteit veszi figyelembe. E kettő modell kombinációja lehetővé teszi a sorja helyének és alakjának a meghatározását a kilépő geometria függvényében. Ezt kísérletekkel igazolták.



20. ábra Sorja fúrásnál, kilépéskor Min szerint [39]

1.5.3. Sorja mérete

Bahce és mtsai. [41] kutatásaik alapján kifejlesztettek egy matematikai modellt NLR elemzéssel, amely 90,26%-os pontossággal teszi lehetővé a fúrás során keletkező sorjamagasság meghatározását. Korábbi tanulmányokban kimutatták, hogy a fúrási paraméterek hatással vannak a kilépési sorja alakjára, ha a kilépési felület szöge 0°.

Ettől eltérő kilépési szögnél nincs szignifikáns összefüggés a keletkező sorja és a fúrási paraméterek között. Megfigyelték, hogy a sorja instabil szerkezetű és a kilépés szögével arányosan növekedett. Viszont nem találtak összefüggést sem az előtolás, sem a fordulatszám és az esetleges sorjamentes szakasz között. Az elvégzett Taguchi elemzés, a kísérleteik eredménye azt mutatta, hogy az előtolási sebesség van a legnagyobb hatással a sorja magasságára. Jelentős hatásúnak bizonyult a kilépés szöge, majd pedig a szerszám fordulatszáma.

Ezeken felül, mint ahogy több kutatás is foglalkozik vele a szerszám geometriája fontos tényező. Dornfeld és mtsai. [42] tanulmányukban megvizsgálták a fúrócsúcs típusát, csúcsszögét, a spirálszögét, és a hátszögét a sorja nagyság vonatkozásában. Összesen 7 különböző geometriájú fúrót használtak.

A csúcsszög növelésével az általános 118°-ról 130°-ra a sorja mérete és vastagsága 200 mikrométerről 150 mikrométer alá csökkent. Ezt felhasználva a kísérletben alkalmazott

szerszámok csúcsszögei 130° vagy nagyobb értékkel készülnek. A spirálszög kis mértékű növelésével a sorja mérete jelentősen növekedett. Kísérletem során a belső hűtés egyértelműen kedvezőbb hatása miatt az alapanyag szerkezete meghatározza a spirálszög értékét. Ettől eltérő geometria készítésével a szerszám forgácsolásra alkalmatlan lenne, ezért a teszt szerszámok mindegyike 30°-os spirálszöggel rendelkezik.

A főél hátszöge a keletkező sorja dimenzióit kevésbé érzékenyen érintette, bár megfigyelhető, hogy ~13° felett csökkentek az értékek.

Az irodalmi áttekintésben szereplő tanulmányok alapján a kutatásom teszt szerszámainak geometriáit és egyéb tulajdonságait fel tudtam vázolni. Belső hűtés alkalmazása szükséges. A hűtőcsatorna furatok pozíciói vizsgálhatók. A csúcsszögek értékeit lehet növelni, megvizsgálva ezzel a korábbi tendenciák változását. Sarokletörés alkalmazásának hatását kutatni kell. A forgácsolóerő – és ezáltal a sorjaképződés – csökkentésére egy új élgeometria kidolgozása is célom volt.

2. KÍSÉRLETTERVEZÉS

Az irodalomkutatásom során megállapítottam, hogy a forgácsolási paraméterek (előtolás, fordulatszám, forgácsoló sebesség, kilépési szög) együttesen befolyásolják a sorja kialakulását. Fontos tényező a hűtő-kenő folyadék koncentrációja is. Eddigi tapasztalataim teszteredményei alapján az átlagos 9%-os koncentrációval csak nagyon visszafogott technológia mellett csökkenthető a sorja. A koncentráció emelésével javul, azaz mérséklődik a sorja kialakulása a kilépő oldalon. Ugyanakkor 12% felett már nem tapasztalható érdemi változtatás.

Egy olyan sokváltozós rendszerben, mint a forgácsolás, azon belül is a fúrás, elsőként a szerszámgeometria hatásait vizsgálom. A körülményeket figyelembe véve a csigafúró alap geometriái közül kiválasztottam egyet, melyet a későbbi módosítások kiinduló bázisaként rögzítettem. A különböző geometriák módosítását ennek az alapszerszámnak a felhasználásával egyenként gyártottam le.

A gyártást egy Saacke UWIE 5 tengelyes CNC szerszámköszörű [43] gépen Numroto szoftver [44] segítségével végeztem (21. ábra). Minden szerszám azonos technológiai paraméterekkel készült, hogy a forgácsoláskori eltéréseket minél inkább a geometriai különbségekre lehessen visszavezetni.

21. ábra Saacke UWIE

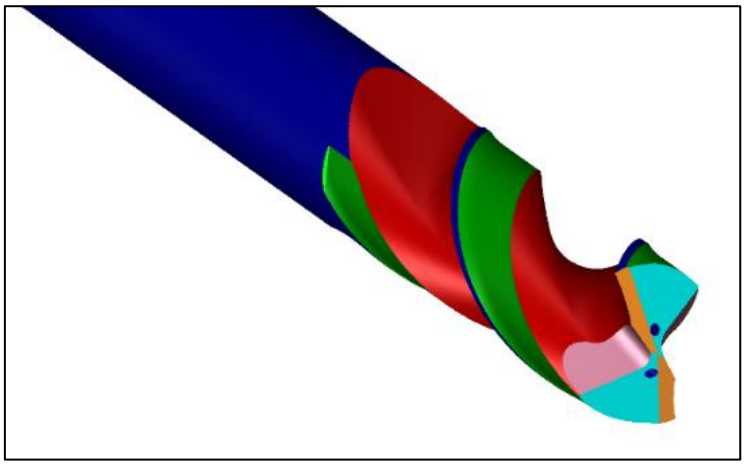
2.1. Fúrógeometriák meghatározása

Célom volt: A fúró geometria módosításának vizsgálata a forgácsoló erőre és a kilépési oldalon keletkező sorja tulajdonságaira, valamint a megmunkált furat felületi érdességére (R_a, R_z). Szakirodalmi kutatásom [45], [29], [30], [31], [32], [33] és szakmai tapasztalatok alapján a hűtőfolyadék eljuttatása a vágóélhez kiemelt prioritású. Emiatt a szerszámgyártáshoz felhasznált alapanyag belső hűtést lehetővé tevő csatornákkal rendelkezik. Ez meghatározta a szerszám horonyszögét (ω=30°).

Jelen kutatás során standardnak választott 140°-os csúcsszögű szerszám főbb paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

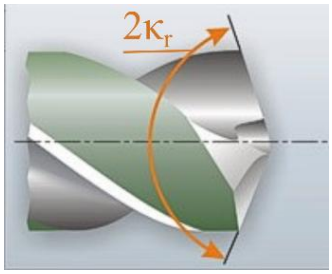
1. táblázat 140°-os csúcsszögű kiinduló szerszám főbb geometriája

Csúcsszög	*2Kr*	140°
Sarokvédő	δ	0°
Horony homlokszög	θ	10°
Spirálszög	ω	30°
Hűtőcsatorna	Ψ	30°
Elsődleges hátlap	α	14°
Másodlagos hátlap	β	26°
Dolgozó átmérő	ø	6 mm
Forgácsosztó		-
Támasztó élszalag		-
Horony hossz		28 mm
Befogó szár		DIN6535HA
Teljes hossz		65 mm

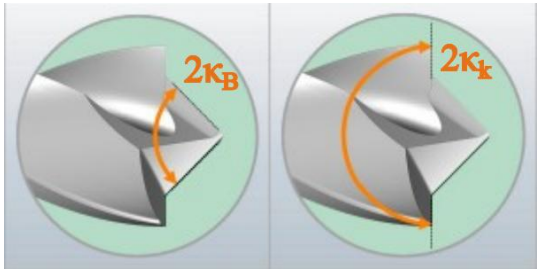


22. ábra 140°-os csúcsszögű, kiinduló szerszám 3D szimulációja

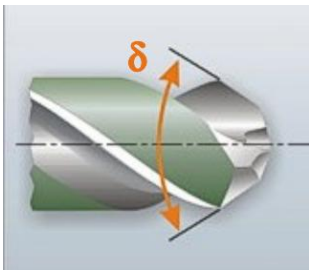
A vizsgált geometriai módosításokat mutatja a 23. ábra és a 2. táblázat.



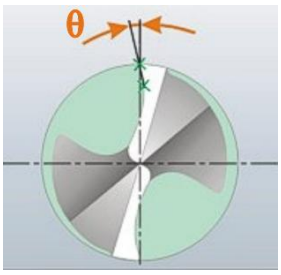
Csúcsszög



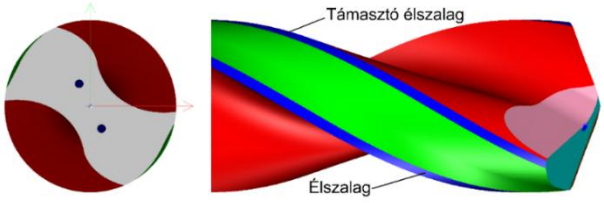
„Behajlási csúcs” belső és külső csúcsszög



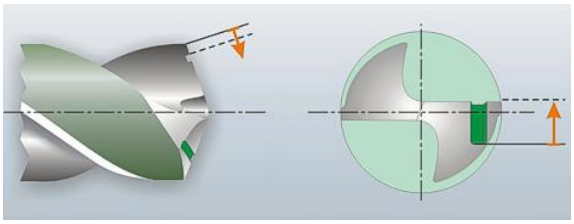
Sarokvédő letörés

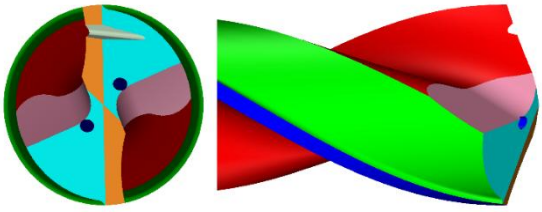


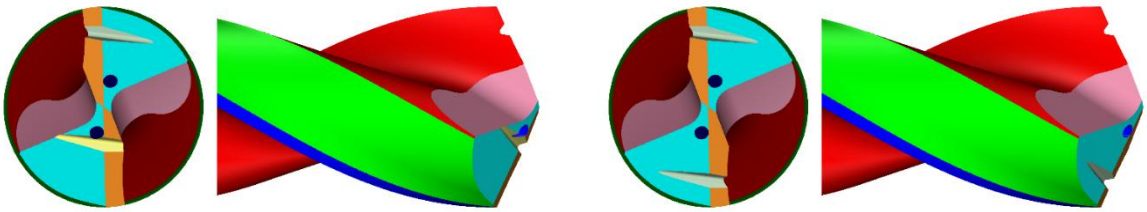
Horony homlokszög



Támasztó élszalag







Forgácsosztó

23. ábra Vizsgált geometriák

Behajlási csúcs kialakítása sarokvédő letöréssel („W” csúcs). Ennek az élformának a szabványos 118°-os belső csúcsszöge 10° – 180° között változtatható. A külső csúcsszöge pedig 30° – 320° között változtatható.

Forgácsosztó kialakításnál a palásttól mérve 0,6 mm távolságra és 0,2 mm mélységben alakítottam ki a forgácsosztókat. Az aszimmetrikus változatnál a második élen 1,8 mm a palásttól mért távolság. A kialakítás alakjával és méretével igyekeztem elkerülni a forgács tapadást.

2. táblázat Vizsgált geometriák

Vizsgált geometria	Szerszám jelölése	Érték
Csúcsszög $2\kappa_r$	CS130	130°
	CS140	140°
	CS150	150°
Sarokvédő δ	SV10	10°
	SV20	20°
	SV30	30°
Horony homlokszög θ	HH05	5°
	CS140	10°
	HH15	15°
Hűtőcsatorna ψ	HH15x1	10°
	HH15	30°
	HH15x2	50°
Forgácsosztó	FO1	1
	FO2sz	2sz
	FO2asz	2asz
Támasztó élszalag	TE	-
„W” csúcs	W	220° / 140°

Hassan és mtsai. [46] kutatásában szintén az élgeometriák változtatásának hatását vizsgálták. Ehhez egyedi, adott paramétereknek megfelelő szerszámokra van szükség. Ezek a fúrók porkohászati keményfémből (VHM) készültek. A keményfémek anyagának meghatározásához a gyártók saját jelölési rendszert használnak, de ezek mindegyike megfeleltethető ISO csoportokra nézve is.

A felhasznált anyagot a PCG [47] szállította. PC F10 jelölésű, azaz K20-K30 ISO csoportba tartozik. Főbb jellemzői: 0,7 µm szemcseméret, 10% Co tartalom, 92 HRa keménység (1580 Hv_{30}), 14,45 g/cm^3 sűrűség, 3800 N/mm^2 hajlító szilárdság (TRS), 10,7 MPa√m törésállóság.

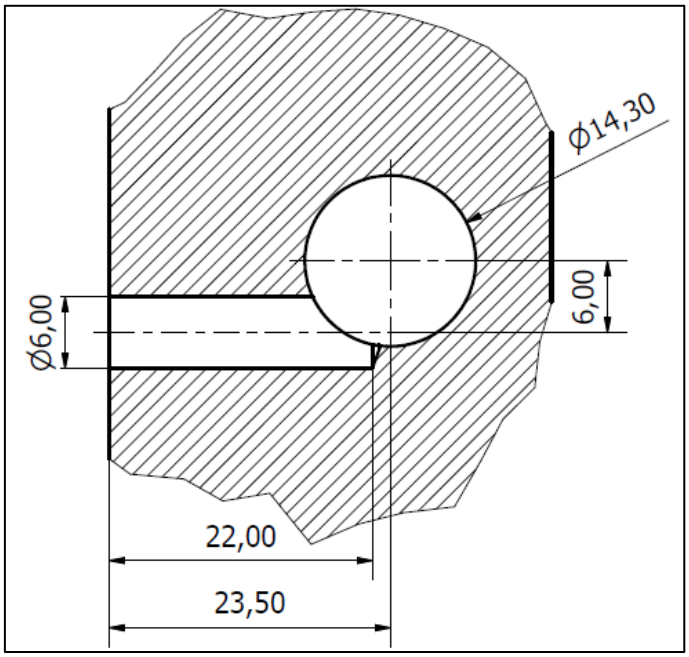
24. ábra Teszt szerszámok

2.2. Munkadarab meghatározása

Az alapanyag a vevői igényeknek megfelelően hengerelt, extrudált, 6 m hosszú alumínium rúd. Gyártáskor ebből egy körfűrész segítségével darabolják megfelelő hosszúságúra, attól függően, hogy milyen típusú munkadarabra van szükség. A hengerműből érkezett alapanyagban a hossz mentén megtalálhatók azok a geometriák, melyek minden ebből készült munkadarabra jellemzőek. Ezek a külső kontúrok és a hossztengellyel párhuzamos furatok.

Mivel ezek a furatok már adottak, így a gyártás olcsóbb és gyorsabb lehet. Viszont ez gondot is okoz, mert a munkadarabok készre munkálásakor a sorjaképződést műveleti sorrenddel szabályozni már nem lehet. Az egyik legnehezebb feladat a két henger térbeli áthatásának térgörbéjét alkotó két furat találkozásánál kialakuló él mentén létrejövő sorja méretét kontrollálni. A nagyobb átmérőjű furat az alapanyagban már elhelyezkedik, a hengermű az extrudálás során így készíti el. Ehhez a készre munkáláskor már nem szükséges, illetve a méretek miatt már nem is megengedett az utólagos megmunkálási művelet. Erre a furatra

merőlegesen készítendő el a kisebb furat. A két furat tengelyvonalai nem metszik egymást (25. ábra). A kísérletek során ezt a furatelrendezést vettem alapul.



25. ábra Furatképek metszeti ábrája

A megmunkált alapanyag anyagminősége: EN AW-Al Mg0,7Si-T66 EN AW-6063-T66 [48] [49], melynek kémiai összetétele a 3. táblázatban, míg fizikai tulajdonságai a 4. táblázatban láthatóak.

3. táblázat Munkadarab kémiai összetétele

Si (%)	Mg (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)	Egyéb (%)
0,20 - 0,60	0,45 - 0,90	≤0,35	≤0,10	≤0,10	≤0,10	≤0,10	≤0,10	≤0,05

4. táblázat Munkadarab fizikai tulajdonságai

Sűrűség	E rugalmassági modulus	G nyírási modulus	Poisson szám
2,7 [g/cm^3]	69500 [MPa]	26100 [MPa]	0,33
Dermedéspont	Megszilárdulási hőmérséklet	Hőtágulási együttható 20°C-on	Hővezetési tényező
655 [°C]	615 [°C]	23.5 [µm/mK]	218 [W/mK]

2.3. Kísérlet körülményei

A kísérletre a Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszékén került sor. Az itt található megmunkáló gépek,

mérőberendezések lehetővé tették a tesztek lefuttatását és dokumentálását. Az így kinyert adatokat fel lehet használni a jövőbeni kísérletek kiinduló pontjaként. A megmunkáláshoz NCT EmL-850D 5AX típusú szerszámgépet használtam, melynek tulajdonságai megfelelőek voltak a fúrás követelményeinek. A gép paramétereit az 5. táblázatban foglaltam össze.

5. táblázat NCT EmL-850D 5AX jellemzői

Főorsó	SK40
Max fordulatszám [min^{-1}]	12000
Teljesítmény [kW]	15,9
Nyomaték [Nm]	79,91
Felbontás [mm]	± 0,0005
Ismétlési pontosság [mm]	± 0,003

A forgácsoló erők méréséhez KISTLER 9257B típusú, 3 komponensű piezoelektromos elven működő erőmérőt használtam és KISTLER 5007 típusú analóg jelerősítővel alkalmaztam. A jelfeldolgozás KISTLER 5697 típusú jelfeldolgozó egységgel történt. Az erőjeleket a megmunkálási idő függvényében DynoWare 2825A1-2 szoftverrel rögzítettem, melyek OriginPro 2021 szoftverrel kerültek kiértékelésre.

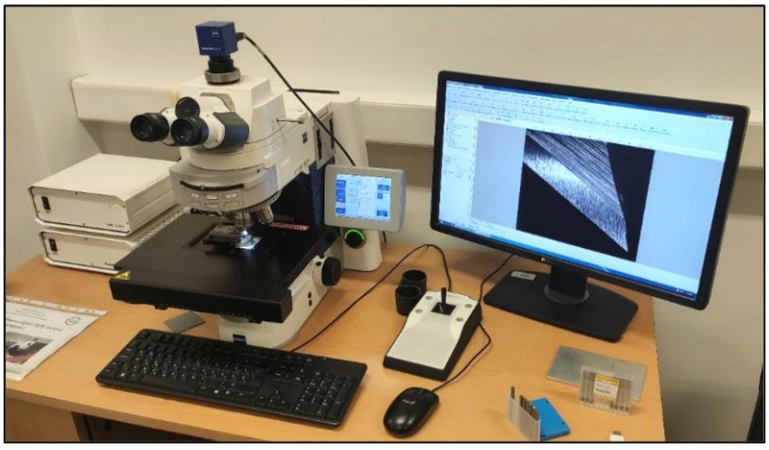
26. ábra Kísérlet körülményei

Hűtéshez MOL Emolin 120 [50] típusú, univerzális, biostabil, bórtartalmú, vízzel elegyíthető, félszintetikus hűtő-kenő folyadékot 5%-os koncentrációban alkalmaztam a szerszám belső hűtésű csatornáin keresztül megmunkálás során.

Technológiai paraméterek: Arra törekedtem a furat készítésekor, hogy minél egyszerűbben és gyorsabban, zavaró hatásoktól mentesen lehessen lefolytatni a teszt fúrásokat. Ezért nem bontottam több szakaszra az előtolás értékét. Egy átlagos értéket állítottam be, mellyel kiértékelhető eredmények adódtak. 150 m/perc forgácsoló sebességet és 0,12 mm/ford. előtolást használtam. Elárasztást nem, csak belső hűtést alkalmaztam. Az emulzió nyomása 20 bar volt. A szerszámokat SK40-es hydro tartó + patron segítségével fogtam meg. Minden szerszámmal 5 furat készült, azonos beállítások és körülmények mellett, majd szerszámcsere után – melynél azonos hossz beállítására ügyeltem – következett az újabb 5-ös sorozat. Előközpontozásra nem volt szükség. Az alapanyagot ütköző segítségével mindig azonos módon lehetett pozícionálni csere esetén.

A „W” szerszámot már az első fúrás során tapasztalható hangok, rezgések és az erőmérő élőben mutatott erődiagramja alapján kiválasztottam a későbbi előtolás módosított értékekkel történő vizsgálatához. Vizsgáltam 25%-ra csökkentett, azaz 0,03 mm/ford. és 50%-kal emelt, vagyis 0,18 mm/ford. előtolást.

A kísérletek előtt és után is méréseket végeztem mikroszkóppal a fúrók élein (27. ábra). Szintén ezzel a mikroszkóppal tudtam a keletkezett sorja vizsgálatát is elvégezni és a sorjamagasságot megmérni. A sorjamagasság mérést a mikroszkóp 5x nagyítást adó lencséjét használva oldottam meg úgy, hogy csak a keletkezett él mentén egy adott jól behatárolható szakaszt vettem, ahol a legnagyobb sorja keletkezett. Ez a szakasz látható pirossal jelölve a 29. ábra része. A mikroszkóp lencséinek mélységélessége µm nagyságrendű. Ezt felhasználva a kezelő szoftver „Z-stack” funkciójával meghatározhatóvá vált a sorja magassága az anyag további szétvágása nélkül.



27. ábra Mikroszkópos mérés

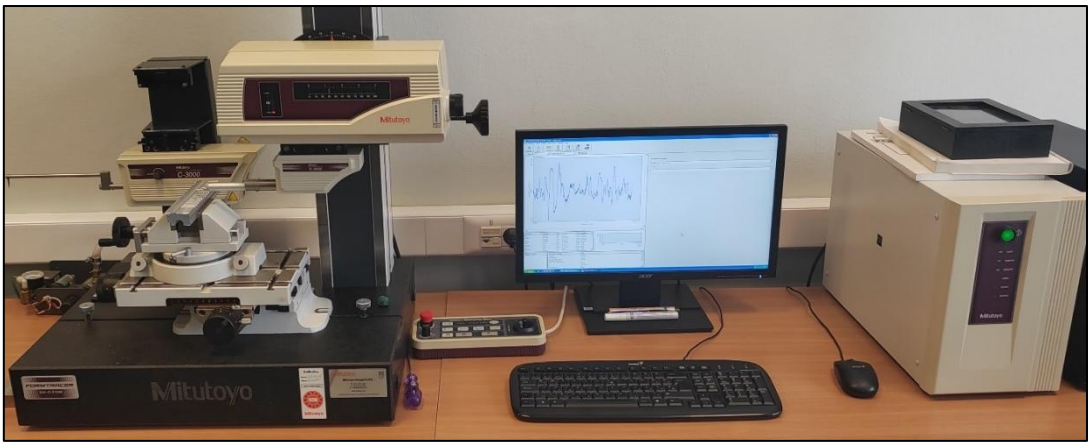
A kilépési Poisson sorja méréséhez a darabokat fel kellett vágni (28. ábra), ügyelve arra, hogy a sorja ne sérüljön, azaz mérhető maradjon. Ehhez egy Pilous ARG260H típusú szalagfűrészt választottam, ami lehetővé tette a darab teljes hossz menti félbe vágását.

28. ábra Munkadarab félbevágása sorja méréshez

29. ábra Sorja méréshez félbevágott munkadarab

2.4. Érdességmérés

A megmunkált furatok *Ra* és *Rz* érdességének méréséhez Mitotoyo Formtracer SV-C3100 típusú tapintós érdességmérőt használtam (30. ábra). A mérést úgy végeztem el, hogy az 5-ből 3 furatot mértem meg furatonként egyszer, majd a mért eredményeket átlagoltam és szórásukat számoltam.

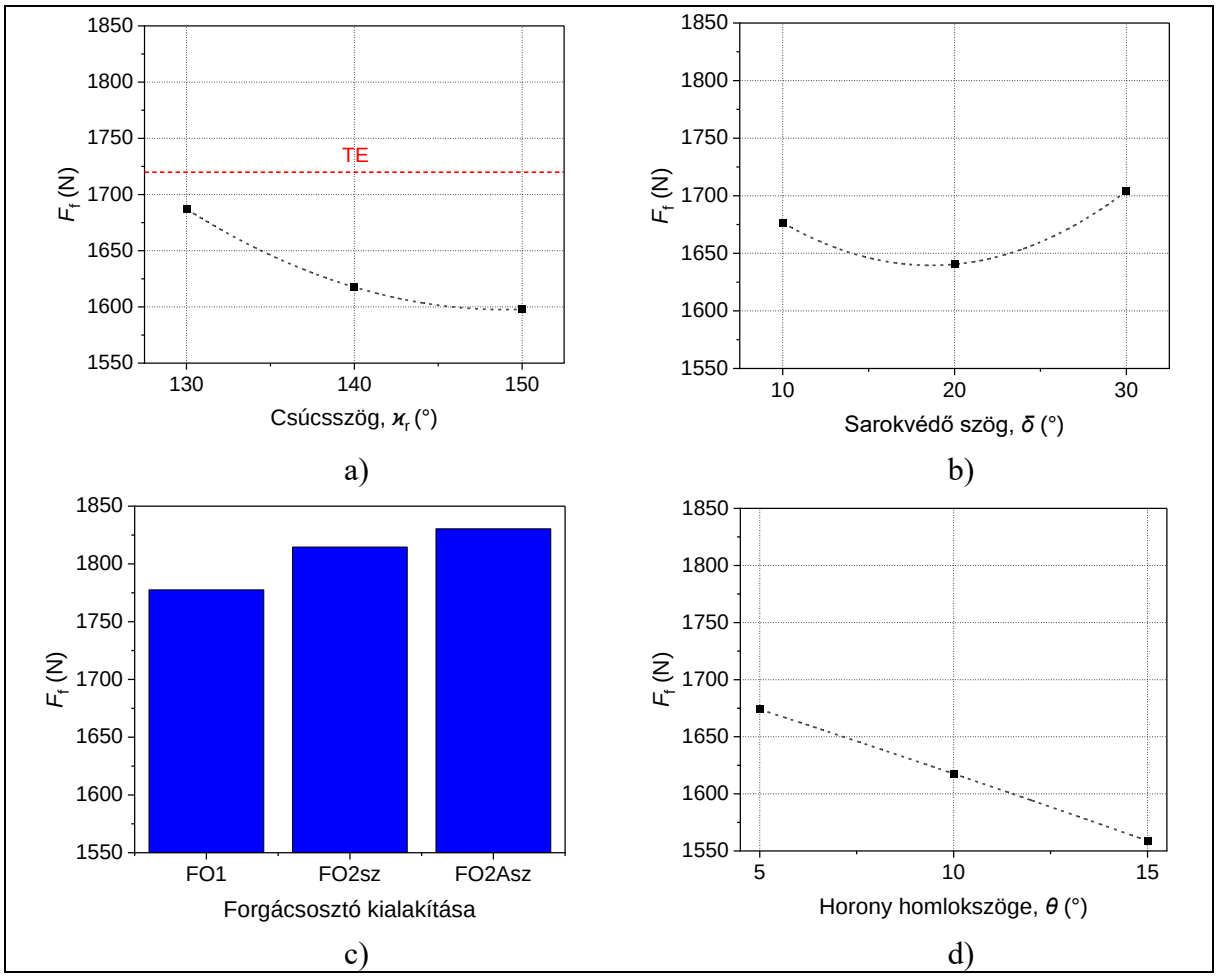


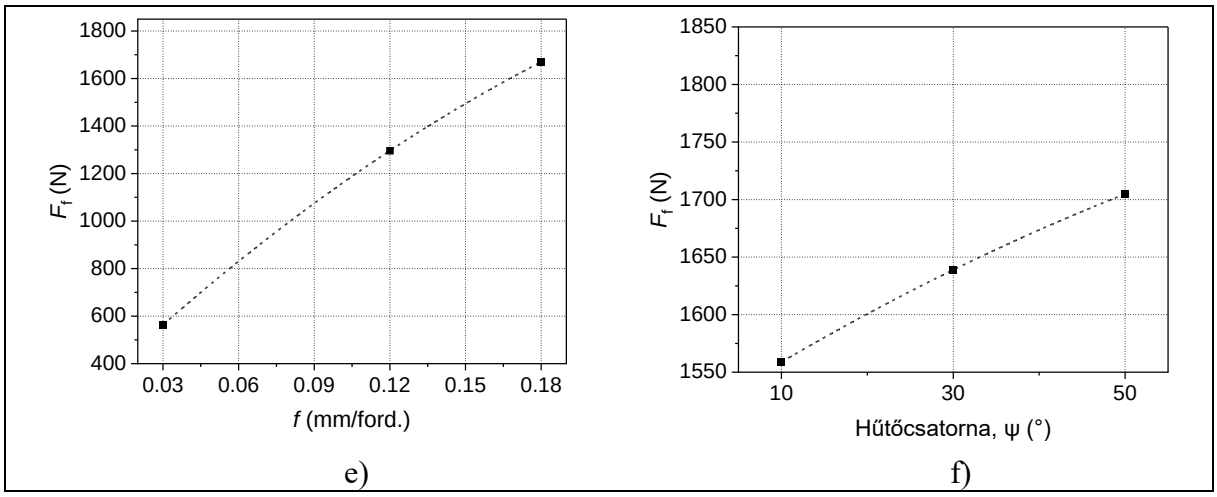
30. ábra Érdességmérés

3. EREDMÉNYEK

3.1. Forgácsoló erő

Az F_f forgácsoló erő alakulása a fúrógeometriák és az előtolás függvényében (31. ábra).





31. ábra a) csúcsszög hatása, **b)** sarokvédő letörés szögének hatása, **c)** forgácsosztó kialakítás, **d)** horony homlokszög, **e)** „W" csúcs és előtolás függvénye, **f)** hűtő-kenő csatorna pozíciójának hatása a forgácsoló erőre

Erőjel ingadozás Pirtini és Lazoglu kutatásában [51] is felbukkant. Jelen teszt során ennek a zavaró hatásai és az egyszerűsítés érdekében csak a Z (F_f) irányú, azaz a furat hossztengelyével párhuzamos jeleket dolgoztam fel.

Dornfeld és mtsai. [42] vizsgálták többek között a csúcsszög változtatásának hatását. Kutatásuk folytatásaként tovább vizsgáltam a forgácsoló erő nagyságát további két csúcsszög (140°; 150°) tesztelésével (31. ábra). Az eredmények a várt módon egybecsengenek az általuk kapott értékekkel. A csúcsszög növelésével a vágóél rövidült, emiatt csökkent a forgácsoló erő. A támasztó élszalag ugyanakkor a nagyobb érintkező felület miatt növelte a forgácsoló erőt. Ezt a hatást tovább fokozta a támasztó élszalagon keletkező élrátét.

Franczyk és mtsai. [20] tesztszerszámuk δ szögét 30°-ban határozták meg. Ezt az értéket véve kiindulási paraméternek, további két lépcsővel próbáltam meg összehasonlítani a kialakuló forgácsoló erőket (31. ábra). A 0°-os letörés szöge a CS140-es fúrót jelenti, mellyel történt megmunkálás során ~1620N erőt mértem. A kis δ szög (SV10 jelölésű szerszám) miatti letörésen keletkezett forgácsnak kicsi a keresztmetszete, melyet a főéltől érkező forgács könnyen el tud nyomni. Emiatt a feltorlódó forgács egyrészt forgácsoló erő növekedést okoz, másrészt a horonyban megjelenik az adhéziós forgács tapadás. A nagyobb δ szög (SV30 jelölésű szerszám) viszont már hosszabb forgácsoló élt jelent, ami növeli a forgácsoló erőt. A lágy alumínium ötvözet forgácsolhatósága miatt a 20°-os letöréssel értem el a legkisebb F_f forgácsoló erőt, mely azonban még így sem éri el a standard, illetve a CS150-es szerszámok eredményeit a hosszabb főél miatt.

A forgácsosztó kialakítása kedvezőtlen hatással volt a forgácsolóerőre (31. ábra), mivel plusz alakváltoztató munkát igényelt a forgácsosztó geometriája miatt az anyagon maradt többlet eltávolítása. A vizsgált Al6063-as ötvözethez további forgácsosztó módozatok tesztelésének nem látom jelentőségét.

A fúró hossztengelyére merőleges síkban, a horonyban mérhető homlokszög hatással van a keletkező forgácsot alakformáló erőkre. Minél kisebb ez a szög, a forgács annál nagyobb alakváltoztatási munka árán tud tovább haladni a horonyban. Ez a jelenség egyértelműen kirajzolódik a 31. ábra értékeiből.

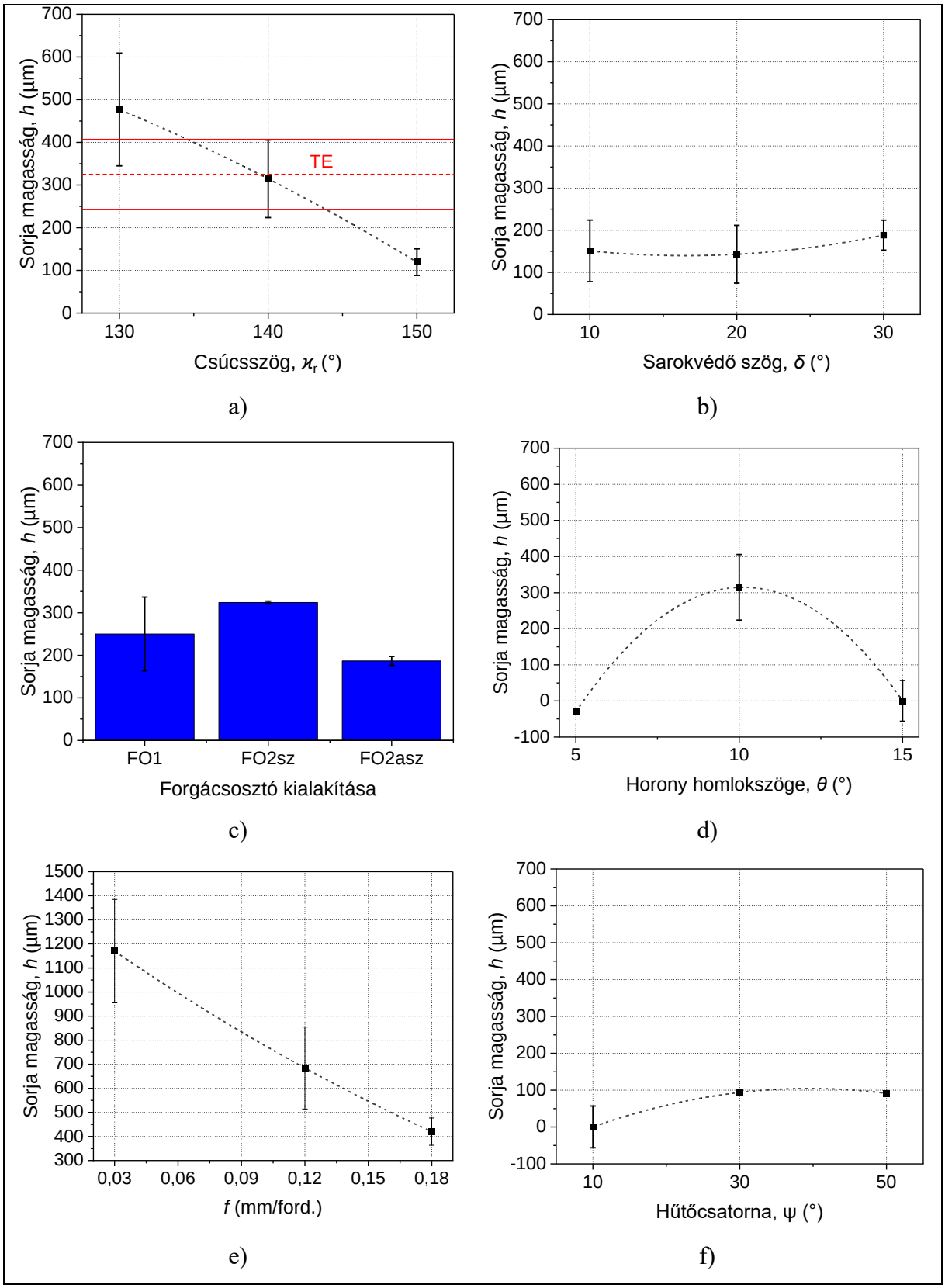
Franczyk és mtsai. [20] kutatása nyomán tovább gondolt élgeometria kialakítása jelentős forgácsoló erő csökkenéssel járt. A forgácsoló él mentén a csigafúró hossztengelyével párhuzamos és merőleges komponensekre felosztott, az előtolásból származtatható erő a külső és a belső csúcsszög kialakítása miatt ellentétes irányúak, ezért az eredő erő kisebb lett.

A standard szerszámhoz képest +50%-os előtolás esetén produkált hasonló forgácsoló erőt (31. ábra). Ugyanakkor a csúcs kialakítása miatt a használata igen szűk korlátok között lehetséges, mert ebben a furatösszeállításban sorját és nyomot hagy. További vizsgálatok és szerszám módosítások kutatása javasolt, mivel már az első teszt eredmények is igen kedvezőek voltak a forgácsoló erő szempontjából. Más kilépő felületű, átmenő furatnál emiatt lehetséges, hogy jelentős előnyökkel járhat ennek az élgeometriának az alkalmazása.

Fallenstein és Aurich [30] CFD modellezését ültettem át a gyakorlatba. Itt kivételesen a CS140 szerszám helyett a HH15-ös szerszámot vettem standardnak, mivel a forgácsra ható alakváltoztató munka itt ígérkezett a legkisebbnek. A várakozásokkal ellentétesen a főél közelébe több folyadékot juttató kialakítás nem hozott forgácsoló erő csökkenést (31. ábra). A horony irányába eső változat viszont a CFD modellezés szerinti forgácsoló erő növekedését hozta. A HH15x1 szerszám rossz eredményei valószínűsíthetően a folyadék alacsony nyomásából származhatnak.

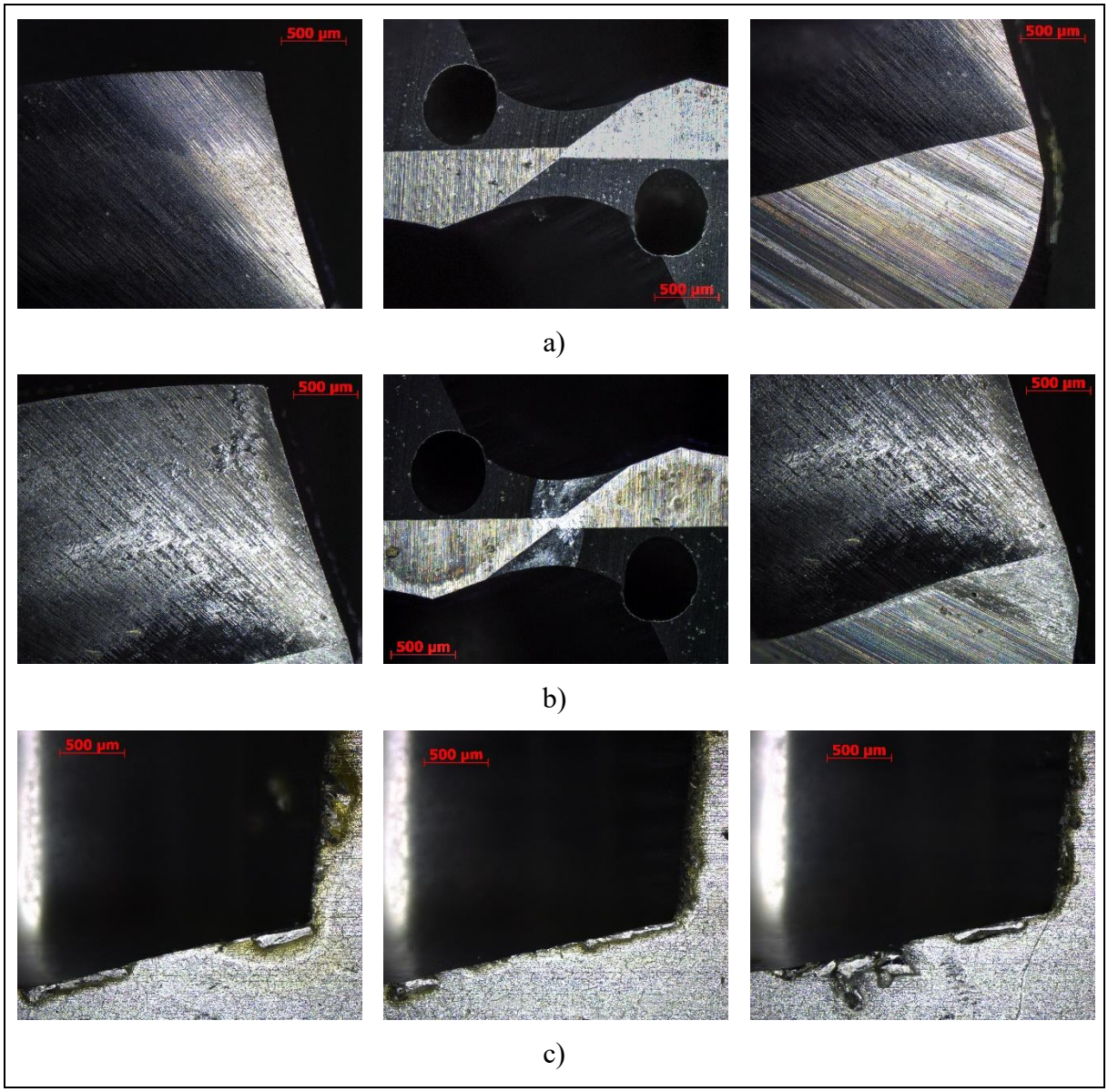
3.2. Sorjamagasság és szerszám állapotának elemzése

A 32. ábra a) pontjában látható, hogy a csúcsszög növelésével a sorja magasság is csökken. Ez a főél hosszának rövidülése miatt, a szintén csökkenő forgácsoló erő hatását mutatja. A nagyobb csúcsszög másik pozitív hatása, hogy a sorja méretének szórása is kisebb határok közötti.



32. ábra a) csúcsszög hatása, **b)** sarokvédő letörés szögének hatása, **c)** forgácsosztó kialakítás, **d)** horony homlokszög, **e)** „W" csúcs és előtolás függvénye, **f)** hűtő-kenő csatorna pozíciójának hatása a sorja méretére

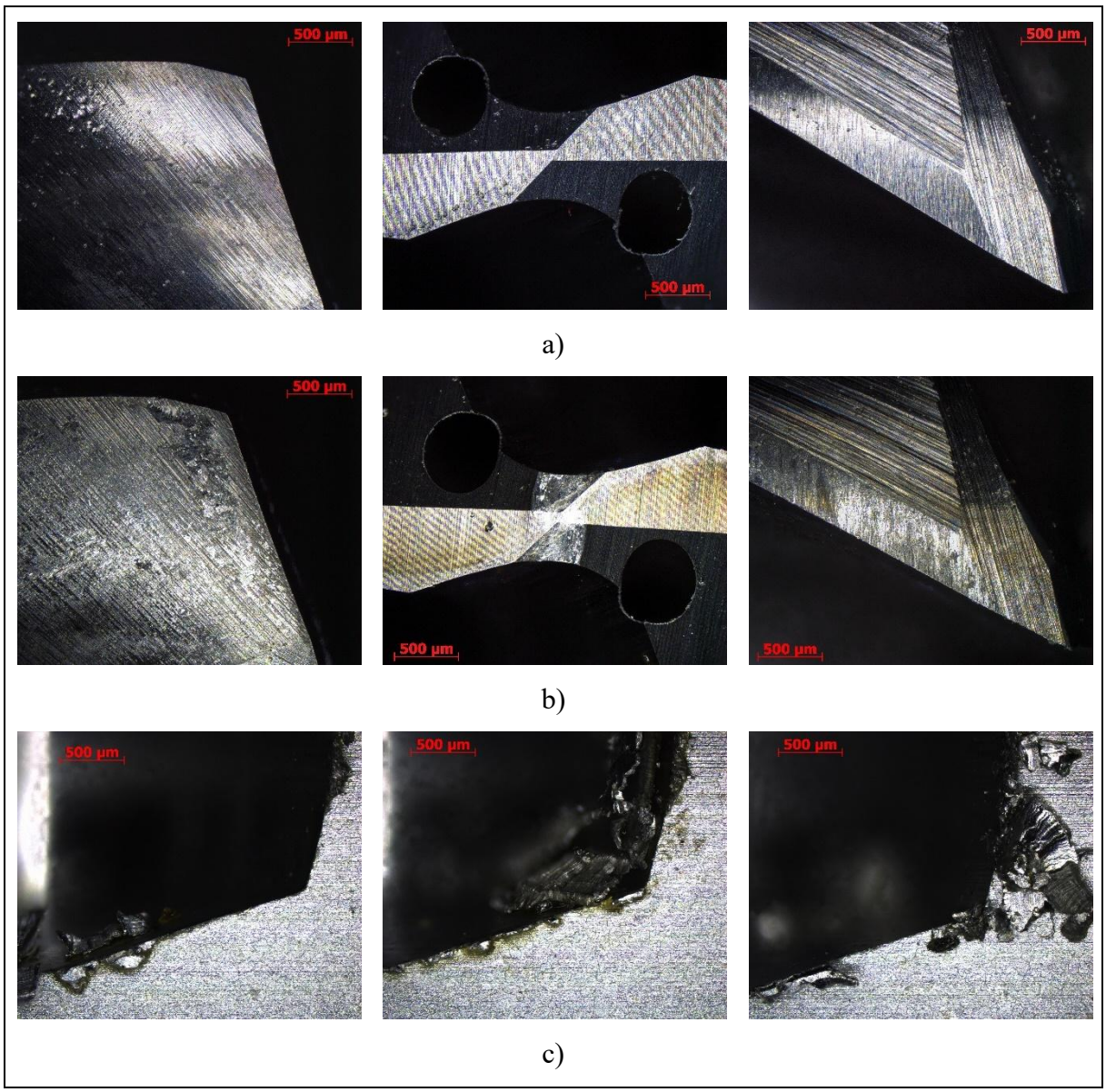
A csúcsszög variációk közül a legjobban teljesítő szerszámról lehet látni felvételeket. A 33. ábra b) sorában megfigyelhető, hogy minimális forgács tapadás történt. Az elsődleges hátlapon látható elszíneződés utalhat a szerszám hőterhelésére és az elégtelen hűtésre. A 33. ábra c) sorában a keletkezett sorja képek láthatók. Jellemzően ugyanazokon a helyeken képződtek. A furat palástja mentén negatív sorjaképződés is megfigyelhető. 1. melléklet 3. ábráján látható a b) sorban az anyagfeltapadás, mely a forgácsképződés során fellépő túlzott képlékeny alakváltozásnak köszönhető. Legfőképp emiatt keletkezhetett negatív sorja is, mely ugyanitt, az 1. melléklet 3. ábra c) sorában látható.



33. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – CS150 szerszám

A sarokvédő δ szög hatását a forgácsoló erőre a 31. ábra b) pontban találjuk. Ennél a szerszámnál is megfigyelhető, hogy a forgácsoló erővel egyenesen arányos a kialakuló sorja magassága. A legkedvezőbb értékeket 20°-os beállításnál értem el. A 34. ábra b) sorában a 3.

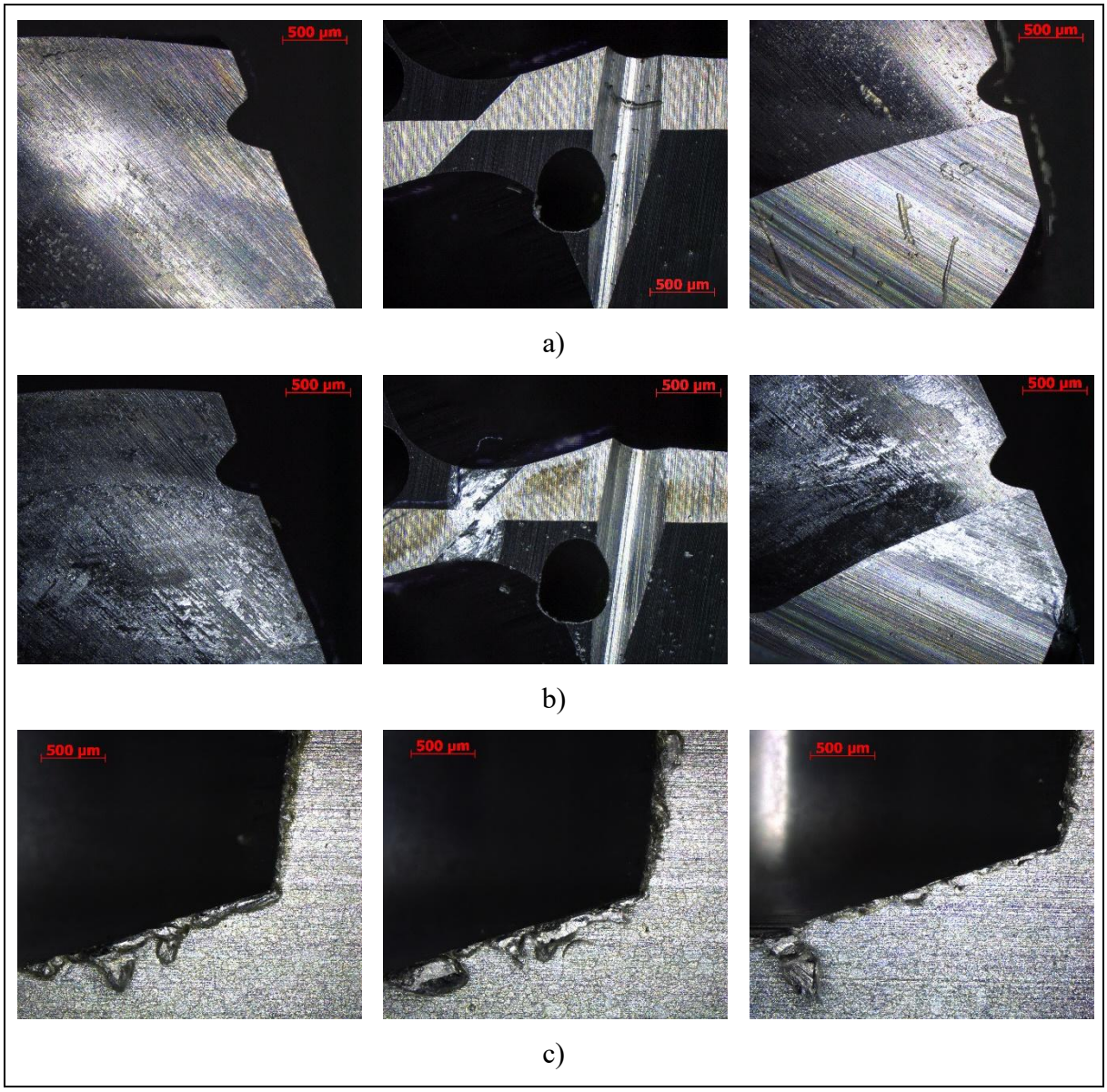
képen látható ahogy a sarokvédő és az élszalag találkozásánál, illetve az élszalagon is anyagfelrakódás keletkezett. Ez okozhatott forgácsoló erő növekedést. Ahogy az elkészült furatok sorozatképén látszik a 34. ábra c) sorában, a megmunkálás haladtával lett egyre rosszabb a sorjaképződés. (1. melléklet 4., 5., 6., ábrák c) sorai.) Ez inkább technológiai okokra vezethető vissza. (Szakaszos előtolás alkalmazása; emulzió koncentrációja, nyomása; előtolás; forgácsoló sebesség.) A szerszám hornyában a főél mentén és a palásthoz közelebb elhelyezkedő élrátét is technológiai problémára utal. Forgácsoló sebesség növelés szükséges.



34. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – SV20 szerszám

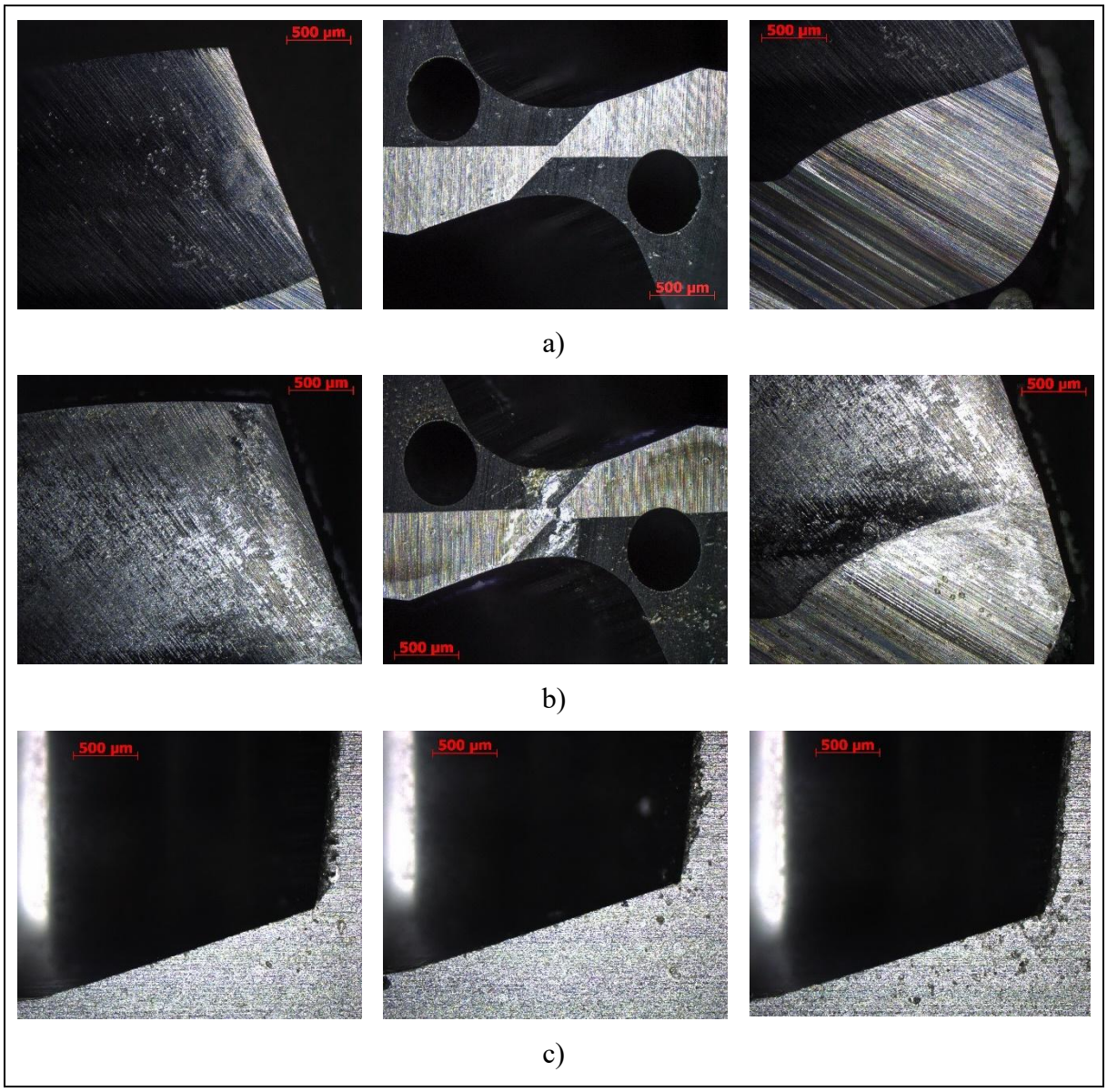
A forgácsosztó kialakítással készített furatokon megjelenő sorja mérete is összefüggést mutat a forgácsoló erővel (31. ábra; 35. ábra). Az aszimmetrikus kialakítás nagy forgácsoló erő igénye miatt a sorjaképződésnél az anyag folyáshatár közelébe kerül a kilépésnél, emiatt a sorja mérete tág határok között változhat. Ezt befolyásolni nem, vagy csak nehezen lehetne más

paraméterek változtatásával. Kijelenthető, hogy az Al6063-as ötvözethez nem alkalmas a forgácsosztóval rendelkező szerszám a fűráshoz.



35. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – FO2asz szerszám

A θ homlokszög hatása további vizsgálatokat igényel. A forgácsoló erővel egyenesen arányos a standard érték feletti tartományban. Ugyanakkor a kisebb homlokszög által nagyobb alakváltoztatásra kényszerített forgács a növekvő forgácsoló erő ellenére kisebb méretű, jelen esetben negatív sorját eredményezett (36. ábra). Ez a gyártásban lévő termék esetében nem, illetve kisebb problémát jelent. Emiatt felmerül a lehetősége a 0°-os ω szögű – azaz egyenes hornyú – szerszám tesztelésének.

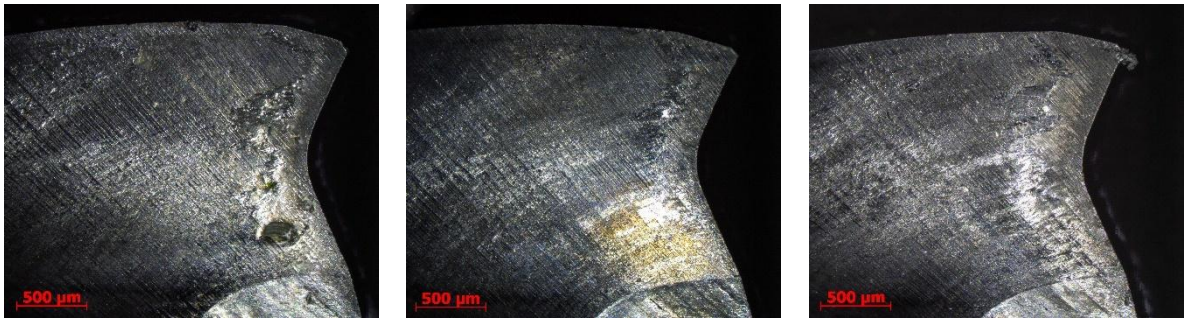


36. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – HH05 szerszám

A *„W”* behajlási csúcs kialakítású szerszám forgácsoló erő szempontjából igen meggyőző értékeket mutatott, azonban a kilépő oldalon keletkező sorja mérete miatt alkalmazása ebben a formában nem javasolt (31. ábra; 39. ábra). Ellentétben a forgácsosztó kivitelű szerszámokkal az elvetése mégsem mondható ki. Az adhéziós anyag feltapadás miatt a forgácsoló sebesség növelése és az élgeometria módosítása lenne szükséges, hogy a sorja képződést kontrollálni és csökkenteni lehessen megtartva a forgácsoló erőnél jelentkező előnyét.

A fúrók különböző geometriai változatai közül kiemelném a „*W*” szerszám eredményeit. Itt lehetőség volt különböző előtolás értékkel végezni teszt fúrást. A 31. ábra e) pontjában látható a forgácsoló erő mértéke. A teszt azonban a többi szerszámmal való összevethetőség

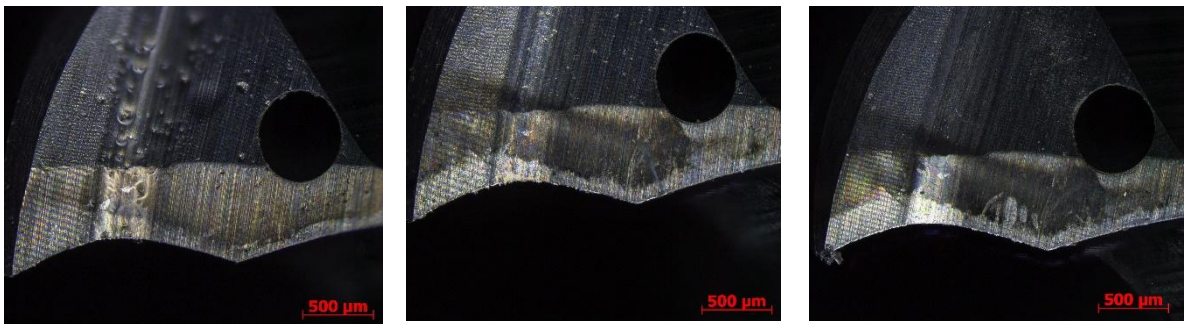
miatt más sorrendben zajlott. Elsőként f = 0,12 mm/ford., majd f = 0,03 mm/ford., végül f = 0,18 mm/ford. előtolással történt a fúrás. A szerszámon lévő feltapadás a 37. ábrán látható.



a) b) c)

37. ábra Szerszámon lévő feltapadás **a)** f = 0,12 mm/ford.; **b)** f = 0,03 mm/ford.; **c)** f = 0,18 mm/ford. esetén

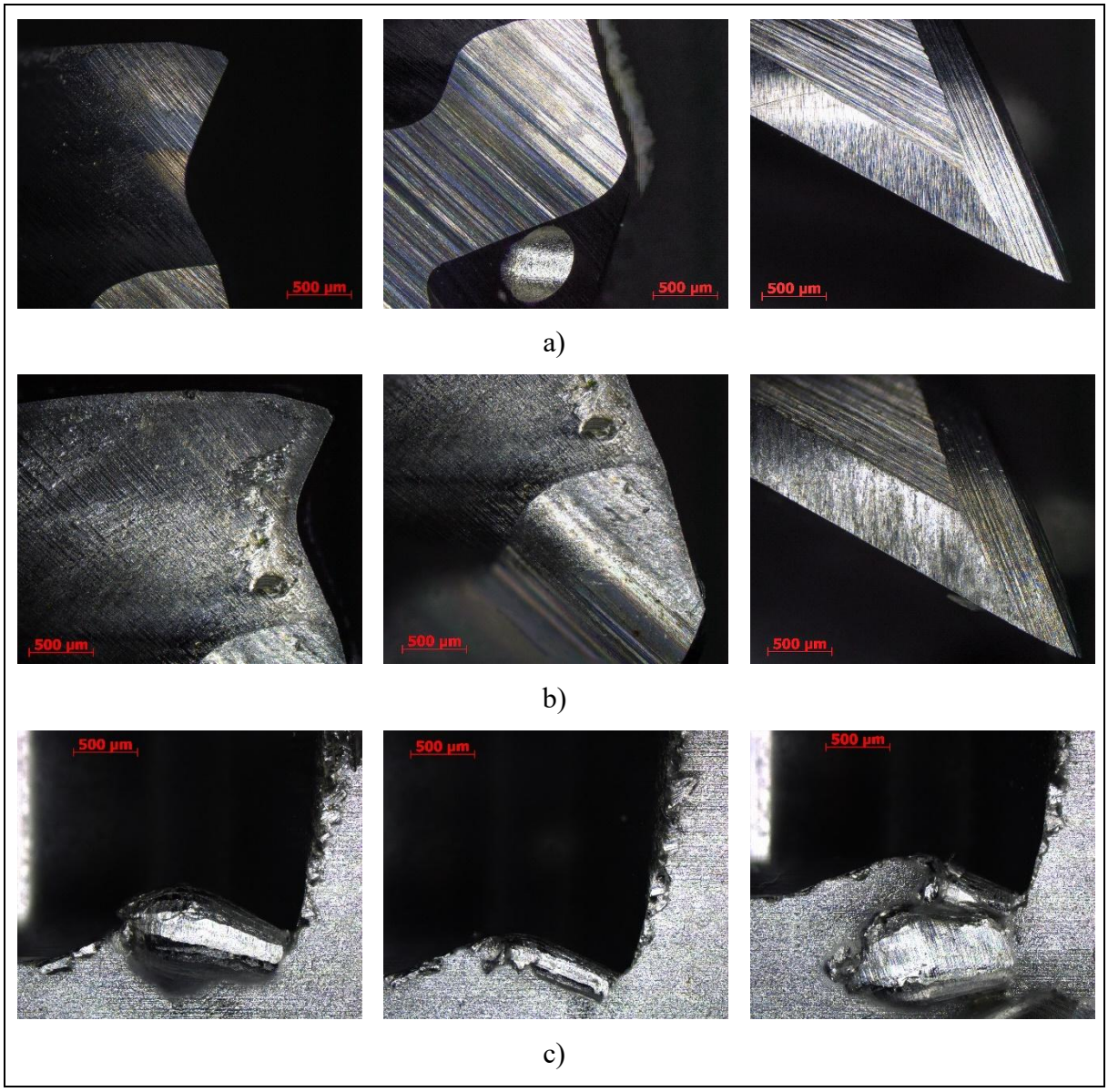
Az első fúrási teszt sornál keletkezett némi anyag feltapadás, mely követte a főél alakját az előtolással megegyező távolságban. A horonyban továbbhaladó forgács a köszörűkorong által hagyott mikrobarázdákon szintén feltapad kis mértékben. A következő lépésben a negyedére csökkentett előtolás célja a kilépési sorja mérséklése lett volna, azonban az egyik legnagyobb sorja keletkezett ekkor. Vélhetően a kis forgácskeresztmetszet nem tette lehetővé, hogy a forgács hatásosan szállítsa el a hőt a főél közeléből, emiatt az alumínium nagyobb mértékben tudott képlékenyen változni. Hőelvezetési problémára utal a 38. ábra b) pontján az elsődleges hátlapon jelentkező fokozott égési nyomra utaló elszíneződés. A hőképződésért elsősorban a nagy forgácsolási sebesség felel, ami jelen esetben minden teszt során állandó volt.



a) b) c)

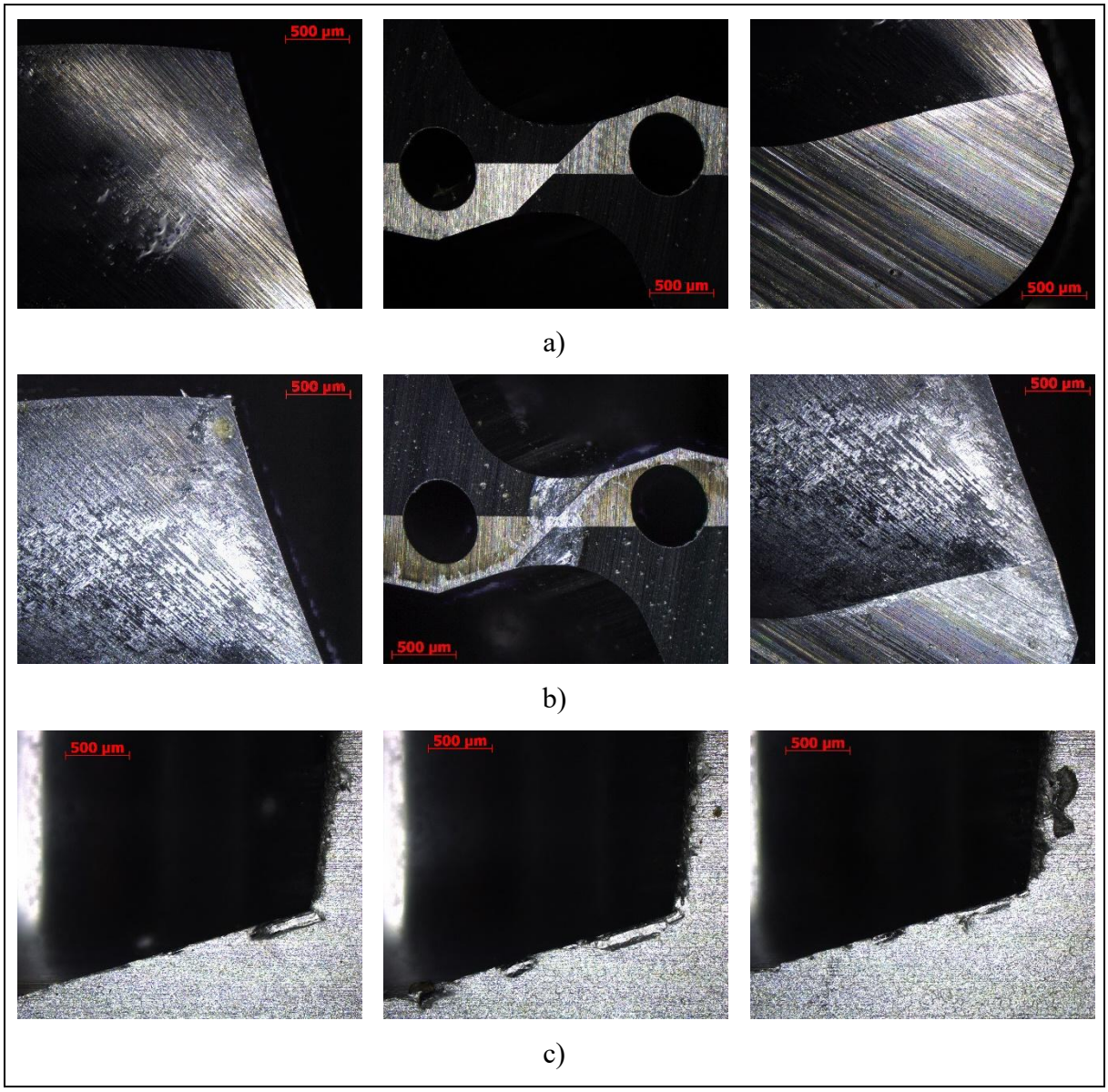
38. ábra Elsődleges hátlap **a)** f = 0,12 mm/ford.; **b)** f = 0,03 mm/ford.; **c)** f = 0,18 mm/ford. esetén

További részletes mikroszkópi képek az 1. melléklet 15.; 16.; 17. és 18. ábráján láthatók.



39. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – W szerszám

A hűtőcsatorna pozíciójának jelentősége inkább a forgácsoló erő nagyságára volt hatással. A sorjaképződésnél a standardtól való eltérés mindkét irányba kedvezőtlen hatású. (40. ábra; 1. melléklet 9. és 10. ábra) Anyag feltapadás látható a horonyban. Ez az adhéziós jelenség összefüggésben van az anyag képlékeny alakváltozásával. Mivel széles tartományban látható ez a jelenség, ezért valószínűsíthető a magas hőmérséklet. A főélhez közel elhelyezkedő hűtőcsatorna pozíció miatt nagyobb nyomást igényelne az emulzió, hogy a megfelelő áramlás kialakulhasson. Ennek hiánya száraz forgácsolásra emlékeztet. A keresztél környékén található munkadarab anyag felrakódás utal az előtolás növelésére. Ez abból a szempontból is hasznos lenne, hogy a megnövekvő forgács keresztmetszet több hőt tudna elszállítani a főél környékéről, ami csökkentené a további adhézió kialakulását.



40. ábra a) fúrás előtt; **b)** fúrás után; **c)** sorja kép; – HH15x1 szerszám

3.3. *Ra* és *Rz* felületi érdesség

Ahogyan a 41. ábra mutatja a felületi érdesség szempontjából a különböző geometriai variációknak gyakorlati szempontból nincs szignifikáns hatásuk. Az egyik nem várt eredményt a támasztó élszalaggal rendelkező szerszámmal kaptam. Itt annak ellenére, hogy a támasztó élszalag segíti a szerszám rezgésmentes futását, ezáltal javítva a forgácsolás körülményeit, mégis magas *Rz* értékeket mutatnak a vele készített furatok. Ennek oka az 1. melléklet 41. ábra c) pontban megtalálható fúrás utáni mikroszkópi felvételek tanúsága szerint a lágy alumínium ötvözet feltapadása a támasztó élszalagra. Bár jelen kísérletben emiatt rosszul teljesített ez a szerszám, más esetekben (keményebb alapanyag, jobb hűtés-kenés, más furathossz/átmérő arány) mégis hasznos lehet az ilyen szerszám kialakítás.

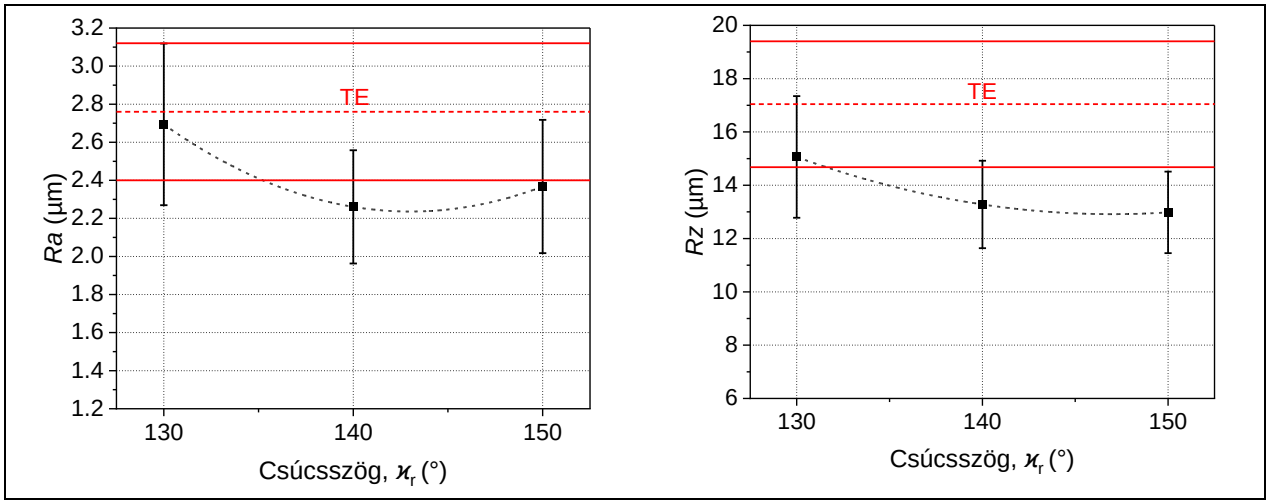
Pozitívumként a horony homlokszög módosított szerszámoknál tapasztalt *Rz* értékek kis mértékű szórását emelem ki. Ezeknél a szerszámváltozatoknál a forgácsolóerő csökkenése is megfigyelhető volt, ami hatással volt a készített furat érdességére is azáltal, hogy a keletkező forgácson végzett alakváltoztató munka eredményeként a horonyban távozó forgács a furat oldalfalát kevésbé vette igénybe.

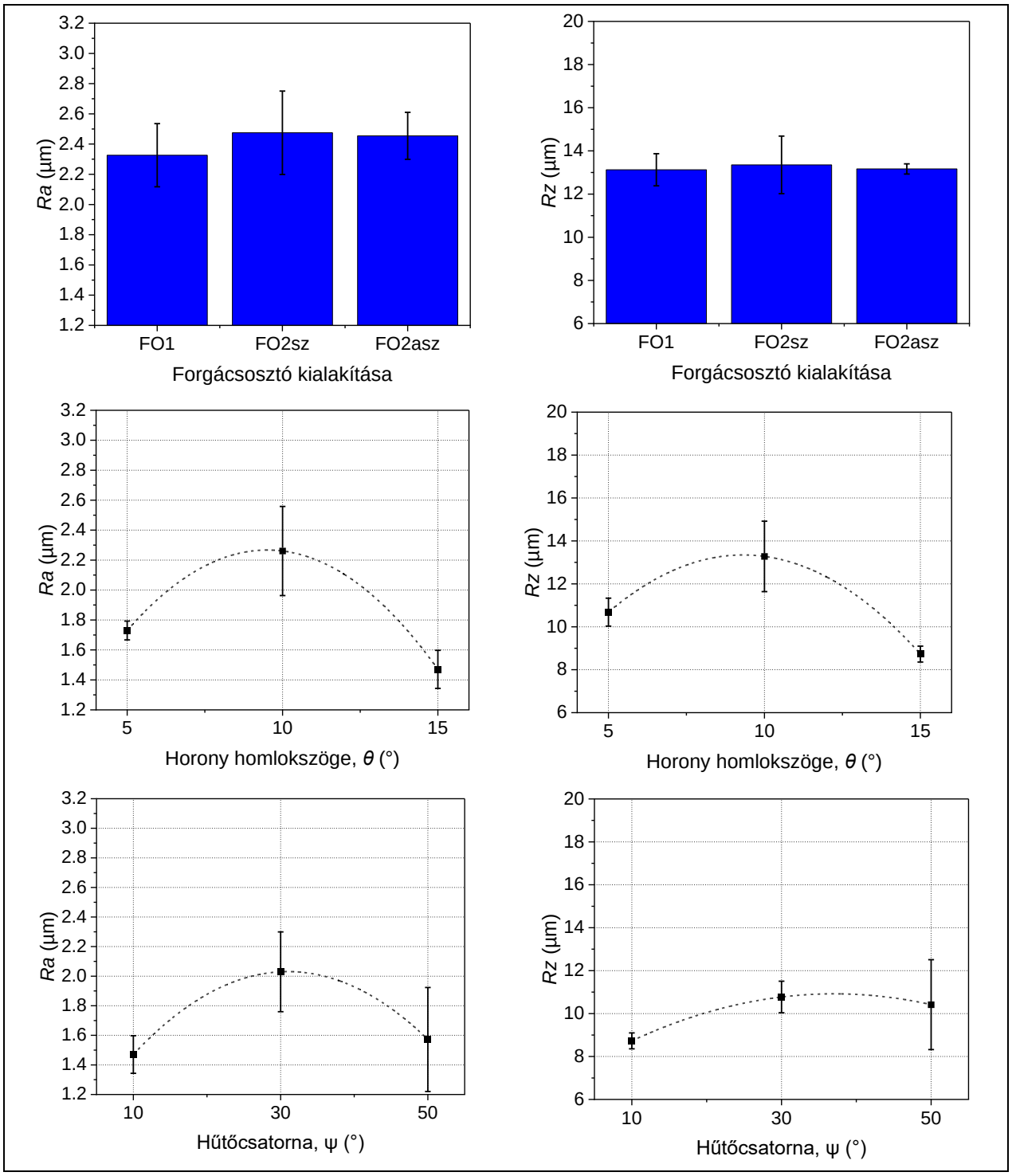
Általánosságként elmondható, hogy a felületi érdességre az élszalag tulajdonságai vannak hatással, melyek mindegyik szerszám esetén azonosak voltak. Ezt támasztják alá a kapott eredmények is.

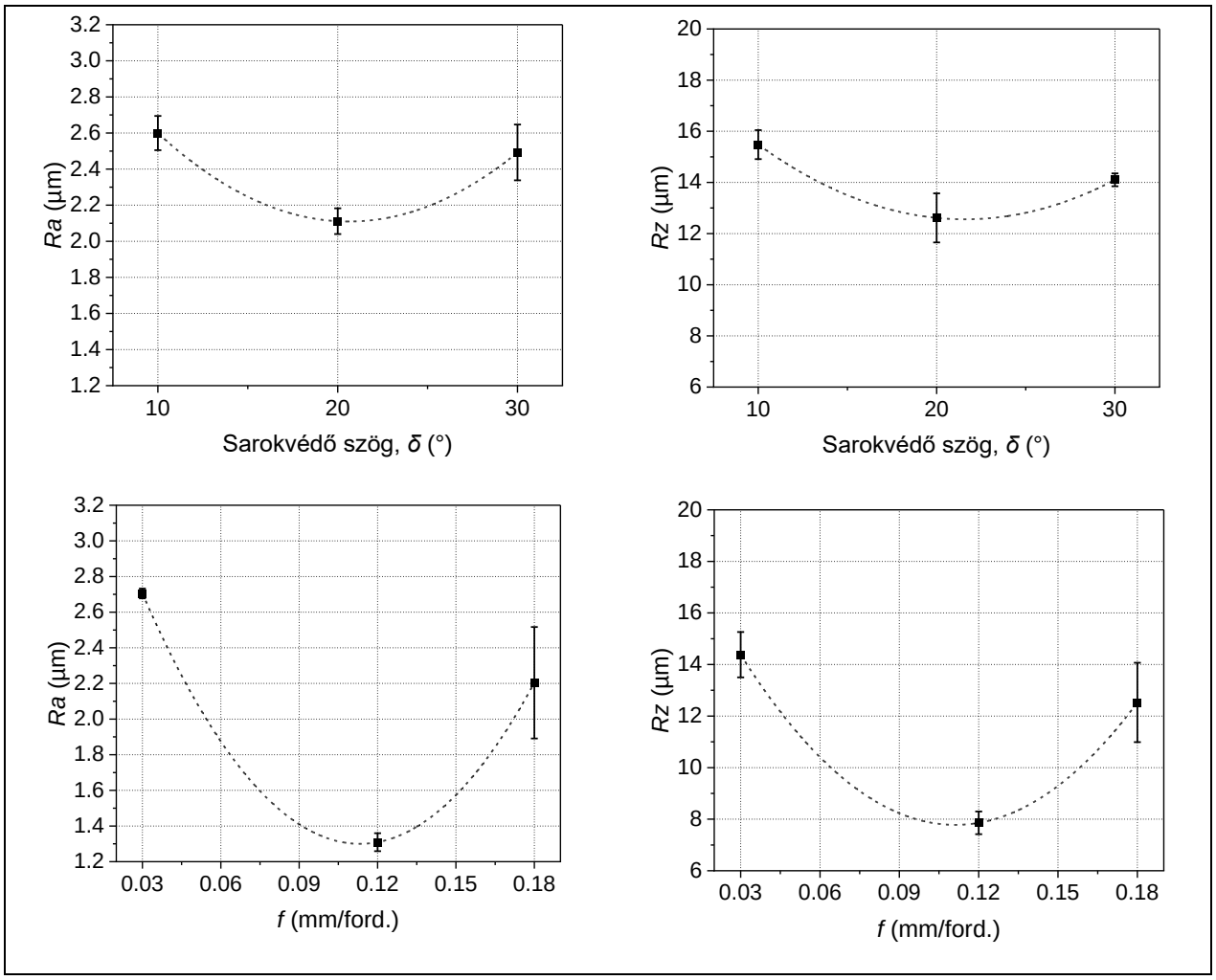
Fontos a megfelelő előtolás megválasztása. A kísérlet során az $f = 0{,}03$ mm/ford. előtolásnál tapasztalt rosszabb értékek az előtoláshoz képest magas forgácsolási sebesség miatt alakult ki elsősorban. Ez okozta a szerszámon is látható hőelvezetési problémákra utaló nyomokat (38. ábra).

A magasabb (f = 0,18 mm/ford.) előtolási érték esetén a forgácskeresztmetszet is megnőtt, ami rontotta a felületi érdességet. Az alumínium vizsgált ötvözete e tekintetben nem segítette a forgácsolást. A nagy képlékenysége miatt a nagyobb előtolás egyértelműen rosszabb felületi érdességet eredményezett.

A standard előtolás értékének meghatározása a szerszám geometriájából, (pl.: főél hátszög) és korábbi tapasztalati adatokból került meghatározásra. Ez az érték ($f = 0{,}12$ mm/ford.) a mért eredmények tanúsága szerint is éppen optimális volt a legjobb felületi érdesség eléréséhez.




Ra (µm)
FO1
FO2sz
FO2asz
Forgácsosztó kialakítása
Rz (µm)
FO1
FO2sz
FO2asz
Forgácsosztó kialakítása
Ra (µm)
Horony homlokszöge, θ (°)
Rz (µm)
Horony homlokszöge, θ (°)
Ra (µm)
Hűtőcsatorna, ψ (°)
Rz (µm)
Hűtőcsatorna, ψ (°)



41. ábra *Ra* és *Rz* értékek a különböző élgeometriák és az előtolás függvényében

4. ÖSSZEGZÉS

4.1. Az eredmények összehasonlítása a hipotézissel

A forgácsoló erő és a sorjaképződés közötti kapcsolat kimutatható a kapott eredményekből. Az emulzió főélhez juttatásának fontossága szintén kimutatható a *HH15x1* és *HH15x2* szerszámok diagramjaiból (31. ábra és 32. ábra).

A legkedvezőbb értékeket a csúcsszög változtatásával 150°-nál értem el. Ennek a szerszámnak volt a legrövidebb a főéle, ezért igényelt kisebb forgácsoló erőt, ami hatással volt a kilépésnél a forgács alakváltoztatására. A kisebb erő nem okozott nagy képlékeny alakváltozást, így a sorja mérete is kisebb lett.

A forgácsoló erő és a sorja mérete közötti arányosságnak látszólag ellent mond az 5°-os horony homlok szögű szerszám. Itt a kedvezőbb sorja képet a nagyobb alakváltoztató munka okozza. Ez a plusz igénybevétel azonban a forgácsoló erőben kimutatható többletet jelent, ami ez esetben a sorja képződést mégis pozitívan befolyásolta. A nyírási sík területének csökkentését eredményező nagyobb horony homlok szög ($\theta = 15°$) teljesítette a hozzá fűzött várakozásokat és csökkent a forgácsoló erő, ami a sorja magasság csökkenését is jelentette.

A sarokvédő letörés esetén a sorjaképződés nem mutat olyan szoros összefüggést a forgácsoló erővel, mint más esetben, de ahogy Franczyk és mtsai. [20] kutatásában, úgy itt is megfigyelhető, hogy kedvező hatást lehet elérni vele. A sorja magassága jól behatárolható, szűk sávban maradt, ami az utómunka tervezését segítheti.

4.2. Az eredmények jelentősége

A kilépőfelület sajátossága miatt a kutatásom eredményei új megközelítést adnak a forgácsolás technológiájának és szerszámozásának. A geometriai alaksajátosságok vizsgálata sok pontban mutat egyezőséget korábbi kutatások részeredményeivel [20] [42].

A megfigyelt 38. ábra hőelvezetési probléma egyértelműsíti, hogy az előtolás csökkentésekor a forgácsolási sebesség mérséklése is szükséges. További érdekes jelenség volt megfigyelhető, hogy az előtolás csökkentésével az előzőleg feltapadt anyagtól a szerszám hornya megtisztult. Ugyanakkor az nem lehet megoldás, hogy a fúrás kilépési szakasza végezze el a horony tisztítását, mert az adhézió tartós kialakulása a fúrás előző szakaszában hosszabb távon káros.

A hűtőcsatornák helyzetének pozíciója is kiemelt figyelmet érdemel. Ezen felül nem csak a pozíció, hanem a mérete is számít. Ahogy látható volt a hűtési elégtelenség a sorjaképződésen felül a szerszámra is jelentős hatással bírt.

A kísérletsorozat rávilágít arra, hogy a csúcsszög ($2\kappa_r$) változtatásával elérhető a sorja méret csökkentése akár 400%-kal. Ugyancsak jelentős eredményeket lehet kimutatni a horony homlokszög (θ) változtatásával. A forgácsoló erőre jelentős hatást gyakorolt a „*W*" csúcs kialakítású szerszám, mely azonos paraméterek mellett 20%-kal kisebb forgácsoló erőt eredményezett. A megfelelő helyre és mennyiségben eljuttatott hűtő-kenő emulzió használatának jelentősége kimutatható a szerszámokon látható nyomokból. A forgácsosztónak nincs hasznossága a sorjaképződés szempontjából, viszont a forgácsoló erőt növelte. A sarokvédő letörésnek (δ) szintén elhanyagolható szerepe van a sorjaképződésre a többi geometriai változatokhoz képest, akárcsak a támasztó élszalagnak.

Az elvégzett kísérlet rávilágít a forgácsolási paraméterek közötti összefüggésekre. Nem lehet csak egy változót vizsgálni, az egész rendszert kell egységként kezelni. Így sikerült megmutatni, hogy akár az általánosan alkalmazott megoldásoktól – pl.: 9-12 %-os hűtő-kenő folyadék koncentráció helyett 5% volt ez a koncentráció – bizonyos részében jelentősen eltérő körülmények is adhatnak elfogadható eredményt – l. *HH05* szerszám. A csigafúrókról és a sorjaképekről készült mikroszkópos felvételek az 1. mellékletben találhatók.

Összetett technológiák alkalmazása esetén fontos figyelemmel lenni azokra a jellemzőkre, amiket egy későbbi művelet elfedhet, eltorzíthat. Mint például az anyag feltapadás, melyet a kisebb előtolás megváltoztatott. Ha ez a két művelet egy furaton belül történt volna, akkor hibásan következtethetnénk arra, hogy az egy jó technológia, miközben jelentős szakaszon keletkezne szerszámot károsító adhézió.

A geometriai változtatások lehetnek hasznosak, ugyanakkor okozhatnak káros változásokat is. Viszont az adott körülményeknek megfelelően egy másik, eltérő környezetben nem feltétlenül haszontalan egy – egy módosítás.

Kutatásom során sikerült olyan szerszám geometriákat – csúcsszög és horony homlokszög – találni, melyek alkalmazásával csökkenthető a sorjaképződés miatti utómunka. A fejlődés azonban itt nem állhat meg, a további kísérletekhez jelen dolgozatban foglalt adatok felhasználása kijelölte a továbblépés irányát.

4.3. A kutatás korlátjai

Élettartam vizsgálatra nem volt lehetőség, ahogy a hűtő-kenő folyadék koncentrációjának változásával kialakuló változásokat sem tudtam megfigyelni. Ez esetben Kónya és Kovács kutatására [33] támaszkodva kijelenthető, hogy az ideálistól eltérő 5%-os koncentráció megnehezítette a vizsgálatot.

Forgó nyomatékmérő meghibásodása miatt a munkadarabra ható erők mérésének visszafejtésével kaptam adatokat a forgácsoló erőről.

4.4. Jövőbeli kutatási irányok

Jelen kutatás alapján a leghasznosabbnak bizonyult geometriák egyesítésével gyártott szerszám tesztelése. Ez 150°-os csúcsszöget, 5°-os horony homlokszöget jelent. A sarokvédő letörés ebben a konkrét vizsgálatban nem mutatott olyan kimagasló eredményt, ami miatt javasolt lenne a használata.

A megfelelő technológia kutatása is fontos. Azonban a téma összetettsége miatt ezt a lehető legpontosabban szabályozott környezetben kell megtenni, a későbbi reprodukció érdekében.

A hűtés-kenés hatásának további vizsgálata mindenképpen szükséges. Ez egy olyan területe a forgácsolásnak, ahol minimális változtatással viszonylag nagy változások jelentkezhetnek. A könnyen változtatható paraméterek a koncentráció és a nyomás. Ugyanakkor a hűtőcsatorna mérete is okozhat különbségeket. Ez utóbbi viszont alapanyag függő, tehát már a szerszám tervezése során kell döntést hozni erről.

A *HH05* szerszám eredményei alapján megfontolás tárgya lehet tesztet végezni egyenes hornyú szerszámmal is.

Bevonat alkalmazása, vagy a horony felpolírozása is vizsgálandó a feltapadás mérséklésére. Ugyanakkor a bevonatra tekinthetünk úgy is, mint egyfajta élpreparációra. Lágy anyagokhoz, mint amilyen a vizsgált Al6063-as ötvözet, a minél élesebb szerszám használata javasolt a gyakorlatban. Ugyanakkor egy élettartam vizsgálattal egybekötött kutatás optimalizálhatná a bevonat előnyeit az él lekerekítésének hátrányával.

5. SUMMARY

5.1. Comparison of Results with the Hypothesis

The relationship between machining force and burr formation is evident from the results obtained. The importance of delivering the emulsion to the main edge is also demonstrable through the diagrams of tools HH15x1 and HH15x2 (Figures 31 and 32).

The most favorable values were achieved by adjusting the tip angle to 150°. This tool had the shortest main edge, thus requiring less machining force, which influenced the chip deformation upon exit. The reduced force did not cause significant plastic deformation, hence the smaller burr size.

The proportionality between the machining force and burr size seemingly contradicts the tool with a 5° groove face angle. Here, the improved burr formation is caused by increased deformation work. This additional strain, however, translates to an excess in machining force that, in this case, positively influenced the burr formation. A larger groove face angle ($\theta = 15°$) reduced the shear plane area, meeting expectations and decreasing both the machining force and the burr height.

In the case of the corner guard breaking, the correlation between the burr formation and machining force is not as tight as in other cases, but as Franczyk et al. [20] observed in their research, a favorable effect can be achieved. The burr height remained within a narrowly defined range, which could aid in planning the finishing work.

5.2. Significance of the Results

The characteristics of the exit surface provide a new approach to the technology and tooling of machining. The examination of geometric characteristics aligns in many aspects with the partial results of previous research [20] [42].

The observed cooling problem clarifies that a reduction in feed rate necessitates a decrease in machining speed. Another interesting phenomenon was the cleaning of the tool groove from previously adhered material when reducing the feed rate. However, relying on the drilling exit phase to clean the groove is not a solution, as the adhesion formed during the previous drilling phase could cause long-term damage.

The positioning of the cooling channels deserves special attention. Not only their position but also their size matters. As observed, the insufficiency in cooling affected the tool significantly beyond just burr formation.

The experiment highlights that changing the tip angle (2κr) can reduce the burr size by 400%. Significant results were also shown by varying the groove face angle (θ). The "W"-shaped tool, with consistent parameters, required 20% less machining force. The importance of properly positioning and quantifying the coolant-lubricant emulsion is evident from the traces seen on the tools. The chip splitter does not serve a purpose from the perspective of burr formation but did increase the machining force. The corner guard breakage (δ) also played a negligible role in burr formation compared to other geometric variations, as did the support edge strip.

The conducted experiment illuminates the correlations between machining parameters. One cannot only examine a single variable; the entire system must be treated as a unit. Thus, it was demonstrated that even conditions significantly different from commonly used solutions – e.g., a coolant-lubricant concentration of 5% instead of the typical 9-12% – can yield acceptable results, as seen with the HH05 tool. Microscopic images of the chip burrs and drills are available in Appendix 1.

In cases involving complex technologies, attention must be paid to features that a later operation might obscure or distort. For instance, the material adhesion altered by reduced feed rate. If these two operations had occurred within the same bore, one might incorrectly conclude that it was a sound technology, while significant adhesion damaging the tool would occur over a longer period.

Geometric changes can be useful but also cause detrimental alterations. However, under different conditions, a change might not necessarily be futile.

The research achieved its objective. It was possible to identify tool geometries – tip angle and groove face angle – that, when applied, reduce the need for finishing. However, progress should not halt here; the data contained in this document guide the direction for further experiments.

5.3. Limitations of the Research

There was no opportunity to conduct lifespan tests, nor to observe the effects of changing coolant-lubricant concentration. In this case, relying on the research by Kónya and Kovács [33], it can be stated that the atypical 5% concentration complicated the study.

Due to the malfunction of the torque sensor, data on the forces acting on the workpiece were deduced from the machining force.

5.4. Future Research Directions

Based on this research, testing a tool manufactured by combining the most useful geometries is advisable. This involves a 150° tip angle and a 5° groove face angle. The corner guard breakage in this specific study did not show such outstanding results to recommend its use.

Researching the appropriate technology is crucial. However, due to the complexity of the topic, this must be done in a well-controlled environment for future reproducibility.

Further investigation into the effects of cooling and lubrication is essential. This is an area of machining where minimal adjustments can lead to significant changes. Easily changeable parameters include the concentration and pressure. However, the size of the cooling channels can also make a difference, which must be decided during tool design.

Considering the results from the HH05 tool, testing with a straight-grooved tool might be worth considering.

The use of coatings or polishing the groove to reduce adhesion should also be examined. Coatings can also be viewed as a kind of edge preparation. For soft materials like the examined Al6063 alloy, using a sharper tool is recommended in practice. However, a lifespan study coupled with research could optimize the benefits of the coating against the disadvantages of edge rounding.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Cocquilhat, M, *Expériences sur la Resistance utile produites dans le Forage*, köt. 10. in Annales des Travaux Publics en Belgique, vol. 10. 1851.

[2] Dr. Igaz Jenő, „Forgácsoló megmunkálás II/1 (A forgácsolás elmélete)", Győr, Széchenyi István Egyetem Közlekedésgépészeti Intézet, 1979. 0. [Online]. Elérhető: http://www.sze.hu/~pinter/NGB_AJ012_1%20FORG%c3%81CSOLO%20MEGMUNKALAS%20FORG%20SZERSZAMOK/JEGYZETEK/IGAZ%20FORG%20MEGM%20II_1/

[3] A. M. Abdelhafeez, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, A. Dowson, és D. Arnold, „Burr Formation and Hole Quality when Drilling Titanium and Aluminium Alloys", *Procedia CIRP*, köt. 37, o. 230–235, jan. 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.019.

[4] S. Y. Jin, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, S. Shankar, és S. Debnath, „Burr formation and its treatments—A review", *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 107, sz. 5, o. 2189–2210, márc. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05203-2.

[5] M. Aamir, K. Giasin, M. Tolouei-Rad, és A. Vafadar, „A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications", *Journal of Materials Research and Technology*, köt. 9, sz. 6, o. 12484–12500, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.09.003.

[6] F. C. Campbell, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International, 2008.

[7] A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, S. Shankar, és S. Chattopadhyaya, „Sustainability in drilling of aluminum alloy", *Cleaner Materials*, köt. 3, o. 100048, márc. 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100048.

[8] Lovas Antal, *Anyagismeret*. Typotex Kiadó, 2011.

[9] D. Venkateswaran és A. Muniappan, „Comparing carbide and PCD with HSS tool for surface roughness in drilling of Al6061/SiC/Al2O3 novel composite", *AIP Conference Proceedings*, köt. 2853, sz. 1, o. 020078, máj. 2024, doi: 10.1063/5.0197530.

[10] Szmejkál Attila és Ozsváth Péter, *Járműszerkezeti anyagok és technológiák II.* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki Kar, 2011. [Online]. Elérhető: http://www.sze.hu/~pinter/NGB_AJ012_1%20FORG%C3%81CSOLO%20MEGMUNKALAS%20FORG%20SZERSZAMOK/JEGYZETEK/Dr.%20Szmejk%C3%A1l%20Attila%20%E2%80%93%20Ozsv%C3%A1th%20P%C3%A9ter%20J%C3%A1rm%C5%B1szerkezeti%20Anyanagok%20%C3%A9s%20Megmunk%C3%A1l%C3%A1sok%20II/0018_Jarmuszerkezeti_anyagok_es_technologiak_2.pdf

[11] Smith, G. T., *Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology.* Germany: IFS Pub / Springer Verlag.

[12] X. Huang, C. Wang, T. Yang, B. Liao, X. He, és L. Zheng, „Investigation of the chip adhesion mechanisms in micro-drilling of high ceramic-content particle-filled GFRPs", *Machining Science and Technology*, köt. 24, sz. 6, o. 861–881, nov. 2020, doi: 10.1080/10910344.2020.1765177.

[13] D. Patel és R. Verma, „Analysis of drilling tool life — A review", *ISSN*, köt. 2278 – 0149, sz. Vol. 4, No. 1, January 2015, 2015.

[14] Bánkuti József, „Felületminőség, érdesség". Elérés: 2024. augusztus 14. [Online]. Elérhető: https://perfor.hu/erdesseg_67

[15] L. János, B. Adrián, K. Gábor, S. Norbert, és M. István, „Forgácstő szimulációs vizsgálatok: Cutting zone simulations", *Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT*, o. 177–181, ápr. 2022.

[16] Dr. Szabó László, „Forgácsolás, Hegesztés". Elérés: 2024. augusztus 11. [Online]. Elérhető: https://vmek.oszk.hu/01200/01200/html/index.htm

[17] M. Volz, E. Abele, és M. Weigold, „Lateral Vibrations in Deep Hole Drilling Due to Land Width Variation", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, köt. 4, sz. 2, Art. sz. 2, jún. 2020, doi: 10.3390/jmmp4020028.

[18] „Drill Nomenclature - GUHRING”. Elérés: 2024. augusztus 21. [Online]. Elérhető: https://guhring.com/Support/Technical/Drilling-Definitions-Dimensions-And-Angles

[19] „Ragasztott kötés kialakítása és jellemzése | Gépészeti szakismeretek 1. | Sulinet Tudásbázis”. Elérés: 2024. augusztus 11. [Online]. Elérhető: http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/0d0cc85d-f7b5-41fb-aec0-d1b8362c7ebf_e90c4562-46d5-4b3a-a5ed-d640f67b512a_1632497a-4975-4feb-ba4d-1dd363000ff7_46c44eed-884a-4816-8f45-54dc2aed3270_dee6b59b-3f1a-442c-aa46-636073f4c71c_a0c9f4e7-090a-461e-a978-3f6cb2f7749f_8a64908d-343a-4a0a-8c25-db913f490ec1_06062d3d-4ae5-4366-83df-6527243af447

[20] E. Franczyk, Ł. Ślusarczyk, és W. Zębala, „Drilling Burr Minimization by Changing Drill Geometry”, *Materials*, köt. 13, sz. 14, Art. sz. 14, jan. 2020, doi: 10.3390/ma13143207.

[21] Bánkuti József, „Forgácsolási adatok”. Elérés: 2024. augusztus 17. [Online]. Elérhető: https://www.perfortek.hu/forgacsolasi_adatok_76

[22] S. S. Chatha, A. Pal, és T. Singh, „Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication”, *Journal of Cleaner Production*, köt. 137, o. 537–545, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.139.

[23] „WTX – Nagy teljesítményű fúró, DIN 6537 | CERATIZIT | WNT | KOMET”. Elérés: 2024. augusztus 21. [Online]. Elérhető: https://cuttingtools.ceratizit.com/hu/hu/products/1079106000.html

[24] S. Subramanian, „Optimization of material removal rate in CNC drilling of AA6063 using Taguchi method”, *International Journal of Research in Advanced Technology*, köt. 1, o. 1–3, nov. 2016.

[25] Sandvik, Coromant, „Sandvik, Tudástár”, Sandvik Coromant. Elérés: 2024. augusztus 11. [Online]. Elérhető: https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge

[26] T. Matsumura, S. Arakawa, és S. Tamura, „Study on Adhesion With Stress and Temperature in Drilling of Aluminum Alloy”, előadás 2020 International Symposium on Flexible Automation, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, szept. 2020. doi: 10.1115/ISFA2020-9633.

[27] T. Matsumura, R. Kiyono, S. Arakawa, és K. Nagamine, „Adhesion in Drilling Process of Aluminum Alloy”, *Proceedings of the International Symposium on Flexible Automation*, köt. 2018, o. 258–261, 2018, doi: 10.11509/isfa.2018.258.

[28] V. P. Astakhov és J. P. Davim, „Tools (Geometry and Material) and Tool Wear”, in *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, J. P. Davim, Szerk., London: Springer, 2008, o. 29–57. doi: 10.1007/978-1-84800-213-5_2.

[29] N. T. Mathew és V. L., „Drilling of titanium aluminide at different aspect ratio under dry and wet conditions”, *Journal of Manufacturing Processes*, köt. 24, o. 256–269, okt. 2016, doi: 10.1016/j.jmapro.2016.09.009.

[30] F. Fallenstein és J. C. Aurich, „CFD based Investigation on Internal Cooling of Twist Drills”, *Procedia CIRP*, köt. 14, o. 293–298, jan. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.112.

[31] F. Diba, J. Naser, G. Stephens, R. A. Rahman Rashid, és S. Palanisamy, „Numerical Study of Coolant Flow Phenomena and Heat Transfer at the Cutting-Edge of Twist Drill”, *Applied Sciences*, köt. 14, sz. 13, Art. sz. 13, jan. 2024, doi: 10.3390/app14135450.

[32] O. C. Mendes, R. F. Ávila, A. M. Abrão, P. Reis, és J. Paulo Davim, „The performance of cutting fluids when machining aluminium alloys”, *Industrial Lubrication and Tribology*, köt. 58, sz. 5, o. 260–268, jan. 2006, doi: 10.1108/00368790610682662.

[33] G. Kónya és Z. F. Kovács, „Effects of Oil Concentration in Flood Cooling on Cutting Force, Tool Wear and Surface Roughness in GTD-111 Nickel-Based Superalloy Slot Milling”, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, köt. 8, sz. 3, Art. sz. 3, jún. 2024, doi: 10.3390/jmmp8030119.

[34] J. C. Aurich, D. Dornfeld, P. J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz, és S. Min, „Burrs—Analysis, control and removal”, *CIRP Annals*, köt. 58, sz. 2, o. 519–542, jan. 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.004.

[35] iso.org, „ISO 13715:2017(en), Technical product documentation — Edges of undefined shape — Indication and dimensioning”. Elérés: 2024. augusztus 11. [Online]. Elérhető: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13715:ed-3:v1:en

[36] Gillespie, LK, „The battle of the burr: new strategies and new tricks”, *Manufacturing Engineering(USA)*, sz. 2, 1996.

[37] Schäfer F., „Entgraten”. Krausskopf Verlag, Mainz, 1975.

[38] L. K. Gillespie és P. T. Blotter, „The Formation and Properties of Machining Burrs”, *Journal of Engineering for Industry*, köt. 98, sz. 1, o. 66–74, febr. 1976, doi: 10.1115/1.3438875.

[39] S. Min, D. A. Dornfeld, és Y. Nakao, „Influence of Exit Surface Angle on Drilling Burr Formation”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, köt. 125, sz. 4, o. 637–644, nov. 2003, doi: 10.1115/1.1596573.

[40] L. Leitz, V. Franke, és J. C. Aurich, „Burr Formation in Drilling Intersecting Holes”, in *Burrs - Analysis, Control and Removal*, J. C. Aurich és D. Dornfeld, Szerk., Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, o. 99–105. doi: 10.1007/978-3-642-00568-8_11.

[41] E. Bahçe és B. Özdemir, „Investigation of the burr formation during the drilling of free-form surfaces in al 7075 alloy”, *Journal of Materials Research and Technology*, köt. 8, sz. 5, o. 4198–4208, szept. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.07.028.

[42] D. A. Dornfeld, J. S. Kim, H. Dechow, J. Hewson, és L. J. Chen, „Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6AI-4V”, *CIRP Annals*, köt. 48, sz. 1, o. 73–76, jan. 1999, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63134-5.

[43] „SAACKE GmbH & Co. KG”. Elérés: 2024. október 4. [Online]. Elérhető: https://saacke-pforzheim.com/?l11123114227l=1

[44] „NUMROTOplus - NUM”. Elérés: 2024. szeptember 11. [Online]. Elérhető: https://www.num.com/complete-solutions/numroto/numrotoplus

[45] R. Horváth, E. N. Halász, és F. Oláh, „The investigation of drilling an aluminium matrix composite reinforced with iron hollow spheres”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, köt. 426, sz. 1, o. 012019, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/426/1/012019.

[46] M. H. Hassan, J. Abdullah, és G. Franz, „Multi-Objective Optimization in Single-Shot Drilling of CFRP/Al Stacks Using Customized Twist Drill”, *Materials*, köt. 15, sz. 5, Art. sz. 5, jan. 2022, doi: 10.3390/ma15051981.

[47] „PCG”, PCG Shop. Elérés: 2024. szeptember 15. [Online]. Elérhető: https://shop.pcg-gmbh.com/en/

[48] „ALUMERO_Legierungen_EN-AW-6063_EN.pdf”. Elérés: 2024. augusztus 21. [Online]. Elérhető: https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO_Legierungen_EN-AW-6063_EN.pdf

[49] „Hydro EN AW 6063.pdf”. Elérés: 2024. augusztus 21. [Online]. Elérhető: https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20EN%20AW%206063.PDF?docId=7823

[50] „MOL Magyarország”. Elérés: 2024. szeptember 22. [Online]. Elérhető: https://mol.hu/hu/

[51] M. Pirtini és I. Lazoglu, „Forces and hole quality in drilling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 45, sz. 11, o. 1271–1281, szept. 2005, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.004.