

OTDK dolgozat

Szalai Miklós László

Gépészmérnöki alapszak
Gyártásinformatikai specializáció
Nappali tagozat

**Gyorsacél keménymarása különböző szerszámanyagokkal
öttengelyes szerszámgépen**

Neumann János Egyetem
GAMF Műszaki és Informatikai Kar
Kecskemét
2021

NYILATKOZAT

Alulírott, Szalai Miklós László (Z28HGR), a Neumann János Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt az OTDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Kecskemét, 2021.11.10.

Szalai Miklós László

hallgató

Tartalomjegyzék

Előszó.....	I
Köszönetnyilvánítás	II
Jelölések jegyzéke.....	III
1 BEVEZETÉS.....	1
1.1 Célkitűzések	1
1.2 Hilti Szerszám Kft. - Kecskemét, Magyarország.....	2
1.3 Áttekintés	2
1.4 Főbb elvek és módszerek	3
2 ALKALMAZOTT SZERSZÁMANYAGOK.....	4
2.1 Gyorsacél.....	6
2.2 Keményfém	9
2.3 Kőbős bór-nitrid.....	11
2.4 Keményfém vs. kőbős bór-nitrid.....	13
3 ALKALMAZOTT FORGÁCSOLÁSI ELJÁRÁS: KEMÉNYMEGMUNKÁLÁS.....	14
3.1 Keménymegmunkálási műveletek	14
3.1.1 Keménymarás	16
3.1.2 Keményesztorgálás	16
3.1.3 Keményfűrés és dörzsárazás	17
3.1.4 Keményüregelés	17
3.1.5 Kemény fogaskerékgyártás.....	18
3.1.6 Kőszőrülés	18
3.2 Keménymegmunkáláshoz használt eszközök	19
3.2.1 Keménymegmunkálásra használható szerszámgépek.....	19
3.2.2 Keménymegmunkálásra alkalmas szerszámbefogók marásnál	19
3.2.3 Keménymegmunkálás szerszámai.....	20
3.2.4 Keménymegmunkálás szerszámbevonatai	22
3.3 Keménymegmunkálás attribútumai	23
3.3.1 Keménymegmunkálás során fellépő kopási mechanizmusok	23
3.3.2 Keménymegmunkálás során fellépő hőmérséklet.....	25
3.3.3 Keménymegmunkálás során fellépő erőhatások.....	26
3.4 Keménymegmunkálás forgácsolási paraméterei.....	27
3.4.1 Vezető és dőlés szög	27
3.4.2 Axiális fogásvétel.....	28
3.4.3 Radiális fogásvétel	29
4 KÍSÉRLETTERVEZÉS.....	31
4.1 Vizsgálathoz használt gépek	32
4.2 Vizsgálathoz használt munkadarabok.....	33
4.3 Vizsgálathoz használt szerszámok	34
4.4 Vizsgálathoz használt speciális befogó készülék.....	34
5 ELŐKÍSÉRLETEK.....	36
6 KÍSÉRLETEK	40
7 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELESE.....	42
7.1 Eredmények	42
7.2 Javaslatok/Következtetések/Tanulságok.....	49
ÖSSZEFOGLALÁS.....	50
IRODALMI FORRÁSOK.....	53

Előszó

Amióta megismerhettem az egyik talán legösszetettebb és legsokrétűbb ágazattal, a műszaki területtel, azóta teljesen magával ragadott a kíváncsiság. Még ezen belül is a CAD-CAM és a CNC világa az igazán megunhatatlan témakör számomra. Hiába egy kis szelete a műszaki ismereteknek, mégis egy személy számára hatalmas, időnként átláthatatlan. A különböző programok használata megkövetelik a naprakész tudást abban a rohanó és egyre ütemesebb tempóban fejlődő világunkban, melyben élünk. Az információmennyiség, ami szembe jön velünk nap mint nap, vagy aminek lehetőségünk van birtokába jutni az már emberi ésszel követhetetlen és felfoghatatlan. Ennek ellenére igyekszem lépést tartani és naprakész tudás birtokában lenni az általam kedvelt műszaki témákban. Egyaránt fontosnak tartom a megfelelő elméleti és gyakorlati háttérrel, így amikor lehetőségem van megkísérlem a kettőt közelebb vinni egymáshoz. Erre kifejezetten jó lehetőséget láttam TDK dolgozatom elkészítése által. Külön megtiszteltetés számomra, hogy Tanárain és Munkatársaim mindenben támogattak és igyekeztek segíteni a munkámban. Számos új szerszámgépet, mérőberendezést, eszközt volt lehetőségem megismerni, mindemelett új ismeretségekre tettem szert, más egyetemeket látogathattam és ismerhettem meg. A véső és fúró gyártás során használatos hengerlőszerszámok jelentették dolgozatomban a megmunkálendő geometriát. Manapság a munkahelyemen ezeket három tengely mentén újítják fel CNC megmunkálógépen. A vizsgálataim során igyekeztem új technológiát kitalálni a jelenleg használttal ellentétben, így jutottam el az öttengelyes megmunkáláshoz. A helyzetemet nehezítette a gyorsacél anyagú munkadarabok keménysége, amely miatt már keménymegmunkálásról beszélhetünk. Igyekeztem a legnagyobb mértékben fejleszteni tudásom a gyorsacél anyagok keménymegmunkálásával kapcsolatban, mindemelett a keménymegmunkálási és köbös bór-nitrid szerszámanyagok terén is, amelyeket használtam a marások során. Mindez idáig leginkább maximum három tengely mentén lágyabb anyagokat munkáltam meg a forgácsolások során, így az öttengelyes keménymegmunkálás újabb kihívásokat jelentett számomra. Eddig nem volt szerencsém köbös bór-nitrid anyagú szerszámokhoz sem. Az irodalomkutatással szerzett új ismeretek birtokában és a már eddigi tapasztalataim alapján hatalmas lelkesedéssel kezdtem bele a kísérletek elvégzéséhez, amely során számtalan akadályba ütköztem, de igyekeztem ezeket a nehézségeket leküzdeni és megoldást találni a felmerülő problémákra. Sokszor nem volt egyszerű a kísérletek kivitelezése, ugyanis a feladat komplexitása miatt számos olyan eszközre, berendezésre volt szükségem, amelyeket helyben a közvetlen környezetemben nem tudtam használni, viszont további egyetemek is segítségemre voltak.

* * *

Köszönetnyilvánítás

Hatalmas köszönetet szeretnék mondani első körben a *Hilti Szerszám Kft.* ügyvezető igazgatójának *Takács Gyula Igazgató Úrnak*, hogy lehetőséget biztosított dolgozatom megvalósításához. Különösképpen szeretnék köszönetet mondani *Kósa Zsolt* számára, a gyár mérnöki részlegének vezetőjének, *Rácz Gyula mentoromnak* és konzulensemnek, amiért elsajátíthattam a megfelelő gyakorlati tudást. Biztosították számomra a szükséges eszközöket, alapanyagot, gépeket és berendezéseket. Hasonlóképpen köszönöm azoknak a gyári dolgozóknak segítségét, akik hozzájárultak vizsgálataimhoz.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani a *Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatika Karán* dolgozó tanárainak *Dr. Kovács Zsolt Ferenc* és *Dr. Liska János* konzulenseimnek, amiért elsajátíthattam a szükséges elméleti alapokat, segítették dolgozatom elkészülését és biztosították, hogy elmélyülhessek a különböző szerszámanyagok felhasználásával történő több tengelyes marások témájában. Szintén köszönöm azoknak az egyetemen dolgozók segítségét, akik segítettek a kutatásom teljesítését az erőmérések és felületi érdességmérés kapcsán.

Valamint köszönettel tartozom még *Böde Sándornak* a *TaeguTec Hungary Kft.* területi képviselőjének, amiért biztosították a vizsgálat során szükséges speciális szerszámokat.

Mindemellett köszönetet szeretnék mondani a nagyszombati székhelyű *Szlovákiai Műszaki Egyetem Anyagtechnológia Kar* dolgozóinak, közöttük *Morovic Lászlónak* a megmunkálógépük használatáért.

Nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani a *Soproni Egyetem Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar* dolgozóinak, közöttük *Tatai Sándornak* a konfokális mikroszkópi felvételek elkészítéséért.

Kecskemét, 2021.11.10.

Szalai Miklós László

Jelölések jegyzéke

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a_e	radiális irányú fogásvétel	mm
a_p	axiális irányú fogásvétel	mm
$a_{p \text{ krit.}}$	kritikus axiális irányú fogásvétel	mm
f	előtolás	mm/min
f_z	fogankénti előtolás	mm/fog
F_x	radiális irányú forgácsoló erő	N
F_y	érintő irányú forgácsoló erő	N
F_z	tengely irányú forgácsoló erő	N
h_s	borda magasság	mm
z	fogszám	1
n	fordulatszám	min ⁻¹
$n_{max.}$	maximális fordulatszám	min ⁻¹
N_i	gömb-gömb metszéspontba mutató vektor	mm
N_s	gömb-henger metszéspontba mutató vektor	mm
R	gördülési sugár	mm
R_0	szerszám sugár	mm
R_{0-Z}	csökkentett szerszám sugár	mm
Ra	átlagos felületi érdesség	μm
Ra_e	elméleti átlagos felületi érdesség	μm
Ra_{ee}	elméleti átlagos felületi érdesség elősimításnál	μm
Ra_{ev}	valóságos átlagos felületi érdesség elősimításnál	μm
Ra_{ne}	elméleti átlagos felületi érdesség nagyolásnál	μm
Ra_{nv}	valóságos átlagos felületi érdesség nagyolásnál	μm
Ra_{se}	elméleti átlagos felületi érdesség simításnál	μm
Ra_{sv}	valóságos átlagos felületi érdesség simításnál	μm
Ra_{szg}	szerszámgépgyártó által meghatározott elérhető ált. felületi érdesség	μm
Ra_v	valóságos átlagos felületi érdesség	μm
Rt	érdességmélység	μm
Rz	egyenetlenségmagasság	μm
v_c	forgácsolási sebesség	m/min
$v_{c \text{ eff.}}$	effektív forgácsolási sebesség	m/min

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	vezetőszög	°
β	dőlésszög	°
γ	elfordítási szög mérésekhez	°

Mellékletek jegyzéke

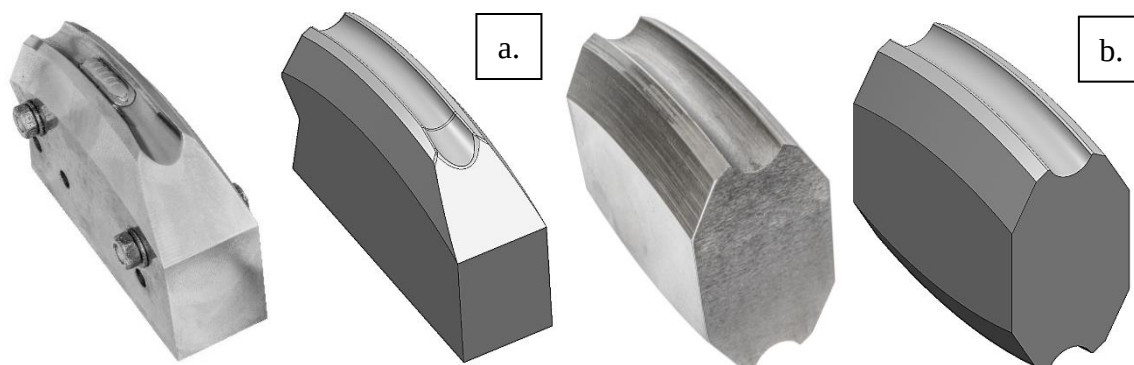
1. Melléklet: Szalai_Miklos_Laszlo-Mellekletek.pdf

1 BEVEZETÉS

A dolgozatom elkészítése során keményfém és köbös bór-nitrid szerszámok használatával végeztem keménymarásokat marógépen öttengelyes megmunkálás segítségével. A mai modern technológiák széleskörű ismerete, alkalmazása és a fejlesztések elengedhetetlen szerepet töltenek be a piacon történő versenyképesség megőrzésében. Napjainkban nagy szerepet játszik a környezettudatosság, költséghatékonyság és a megfelelő minőség biztosítása is nemcsak a termékek által, hanem a gyártási folyamatok közben is egyaránt, ezért ezeket az elveket is figyelembe vettem dolgozatom elkészítése során.

1.1 Célkitűzések

A célkitűzéseim közé tartozik a jelenlegi gyártási technológiát megismerve felülvizsgálni esetleges új technológia bevezetésének lehetőségét a véső és fúró hengerlőszerszámok előállításában, feltérképezni az egész gyártási folyamatot, az alapanyag beérkezésétől a szerszám használatbavételéig. A jelenleg használt tervező program, szerszámgép és szerszám felhasználásának optimalizálása, azáltal, hogy a jelenleg alkalmazott három tengelyes megmunkálás helyett öttengelyes megmunkálást alkalmazok és megvizsgálom a jelenleg használt keményfém szerszámanyag ellenében alternatívát kínáló köbös bór-nitrid szerszámanyagot. Vizsgálatom kiterjed az elérhető legjobb felületi minőség megkeresésére, tengelyirányú erők mérésére, költségek optimalizálására. Nem a meglévő szerszámok felületét munkáltam meg a dolgozatom során, hanem ezeknek a szerszámok előállítása során megmaradt alapanyagból készítettem el a munkadarabokat, így megőrizhetőek maradtak számomra és kevésbé hátráltattam a termelést vizsgálataim során. Lehetőségem volt az alapanyagból kialakítani a próbadarabokat, ezért kisebb méretű és egyszerűsített felületeket alkalmaztam, így több megmunkálandó felületet hoztam létre. A véső és fúró termékek horonyhengerléséhez használt hengerlőszerszám alaptest és az általam egyszerűsített és legyártott próbadarab az 1. ábrán látható:



1. ábra: Hengerlőszerszám (a.) és az egyszerűsített próbadarab (b.)

1.2 Hilti Szerszám Kft. - Kecskemét, Magyarország

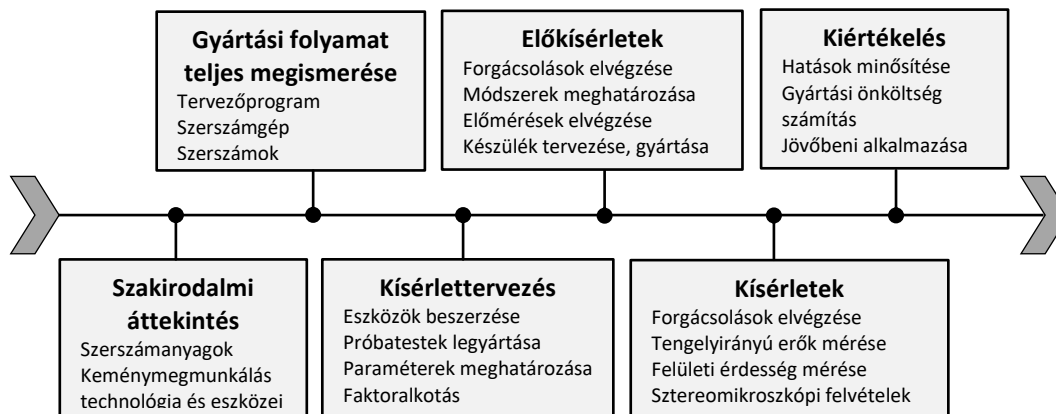
A kecskeméti gyártóüzemben, amely a 2. ábrán megtekinthető, vésőket, félkész fúrókat és speciális fúrókat, gyémánt koronafúrókat és a vágótárcsákat, HDA dübelt állítanak elő. 1989 óta folyamatosan bővül a gyár [1]. Szoros kapcsolatot ápol számos magyar műszaki főiskolával és egyetemmel, közöttük a *Neumann János Egyetemmel* is. Együttműködésük duális képzés formájában is megvalósul, melynek egyetemi éveim kezdetétől részese lehetek. Hatalmas örömet okoz számomra az elmélet és a gyakorlat elsajátítása ez idő alatt tanáraimtól és mentoraimtól. Nagy megtiszteltetésnek érzem, hogy fontos szerepet kaphattam az öttengelyes megmunkálások vizsgálatában és esetleges bevezetésében.



2. ábra: Hilti kecskeméti szerszámgyár [1]

1.3 Áttekintés

A dolgozatom elkészítését szakirodalmi kutatómunkával kezdtem, majd párhuzamosan kezdtem kidolgozni a kísérlettervezést, ezáltal a felvetődő újabb és újabb kérdésekre válaszra találhattam a hazai és nemzetközi irodalmakban. Folyamatosan bővítettem már meglévő tudásom a kutatás során, így biztosítva a megfelelő szakmai felkészültséget. Ennek ellenére a főbb folyamatokat a könnyebb átláthatóság és tárgyalhatóság okán egymás után részletezem. A dolgozatom felépítését a 3. ábra ábrázolja:



3. ábra: A dolgozat felépítése

1.4 Főbb elvek és módszerek

A vizsgálatok meghatározásához a *Taguchi kísérlet tervezési módszert* választottam, amelyet Genichi Taguchi japán mérnök fejlesztett ki a második világháború okozta korlátozott erőforrások miatt. Ez a módszer nem elméleti, hanem gyakorlati, tapasztalati tervezési módszereken alapszik, ezért vált egyedülállóan sikeressé a hagyományos módszerekkel szemben.

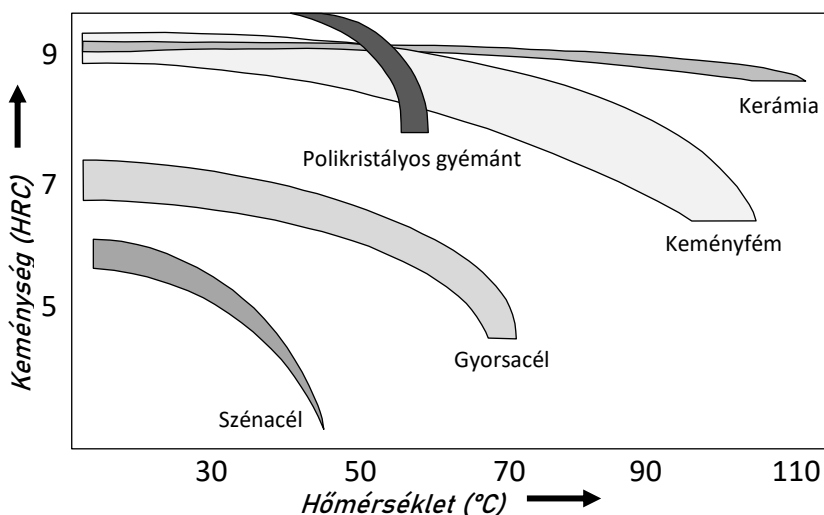
Azért ezt az eljárást választottam, mert a módszer megbízhatatlan és ellenőrizhetetlen körülmények között is jól működik azáltal, hogy a tervezési paramétereket az optimális szintekhez igazítja, így érzéketlen lesz a zavaró tényezőkre, amelyeket nehéz, vagy lehetetlen nyomon követni. A módszer magába foglalja a rendszer, a paraméterek és a tolerancia tervezését az eredmény elérése miatt a legjobb termék minőség érdekében. A faktoriális kísérlettervezési módszer továbbfejlesztett változata, amely a kísérletek számának csökkentésével a lehető legkevesebb kísérlet lebonyolítását teszi lehetővé, így gyorsabbá válik az optimum elérése [2]. A vizsgálat során meg kellett határoznom a legfontosabb befolyásoló paramétereket, amelyeket a dolgozatom további részeiben ismertetek. A kísérleteket érdemes megismételni azonos körülmények között a pontosabb eredmények elérése érdekében. Jelen körülmények között ezt nehezen tudtam volna kivitelezni, ezért előkísérleteket végeztem annak érdekében, hogy jók-e az alapvető felvetéseim és több tapasztalattal kezdhessem el kísérleteimet.

2 ALKALMAZOTT SZERSZÁMANYAGOK

Napjainkban a fém megmunkáló iparban sokféle szerszámanyagot használnak, a magas széntartalmú acéloktól, a kerámiákon át, egészen a gyémántokig. Ennek oka a jelentős különbségek a szerszámanyagok tulajdonságai között. E különbségek ismeretében az egyes anyagtípusok helyes megválasztása és szakszerű alkalmazása a legfontosabb műveletek közé sorolható a különböző forgácsolási műveletek során [3].

A különbségek az alábbi anyagtulajdonságokban tapasztalhatók:

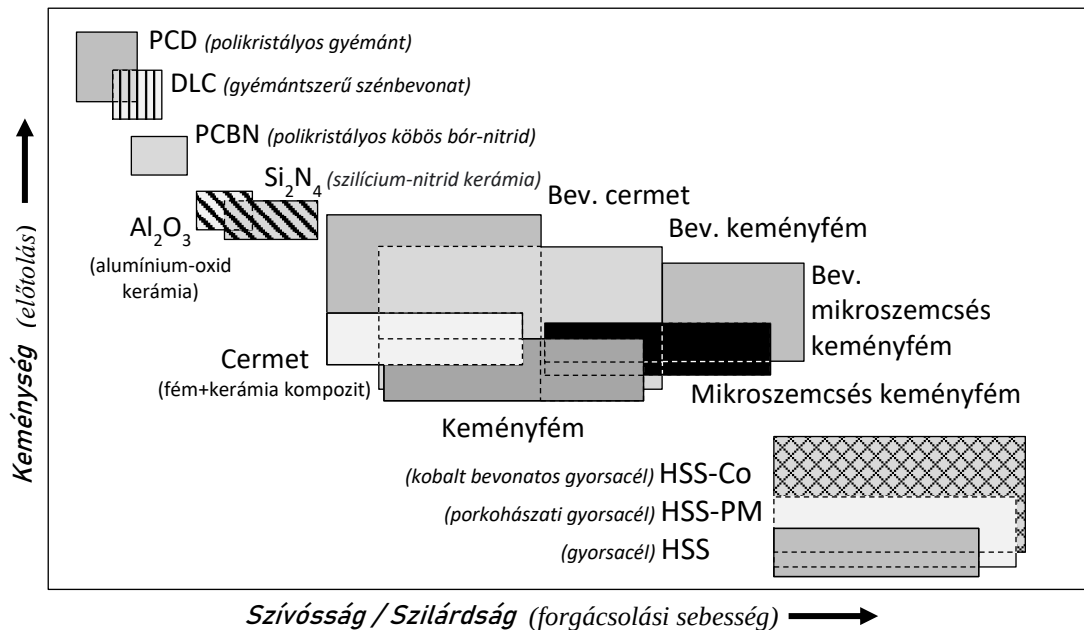
- **Keménység:** az anyag azon tulajdonsága, amely külső mechanikai behatolásoktól való ellenállósággal jellemezhető. A keménység megtartását magas hőmérsékleten melegkeménységnek nevezzük. A szerszámanyagok keménységét és a hőmérséklet kapcsolatát a 4. ábra szemlélteti [3].
- **Szilárdság:** az anyagok azon képessége, hogy milyen mértékben nyelik el az energiát a törés előtt. Minél nagyobb a szerszámanyag törésállósága, annál jobban ellenáll a forgácsolásnak, ütésnek, törésnek, rezgésnek és a megmunkálási rendszer egyéb hiányosságainak [3].
- **Kopásállóság:** a különböző mechanikai igénybevételekkel szembeni felületi ellenállóképességet jelenti, amely a szerszám élettartamát nagymértékben befolyásolja. A forgácsolószerszám kopása bonyolult fizikai, kémiai és termomechanikai jelenségek eredménye. Különböző egyszerű kopási mechanizmusok hatnak egyidejűleg, mint a tapadás, kopás, diffúzió, oxidáció stb.) [3].



4. ábra: A szerszámanyagok keménysége és a hőmérséklet kapcsolata [3]

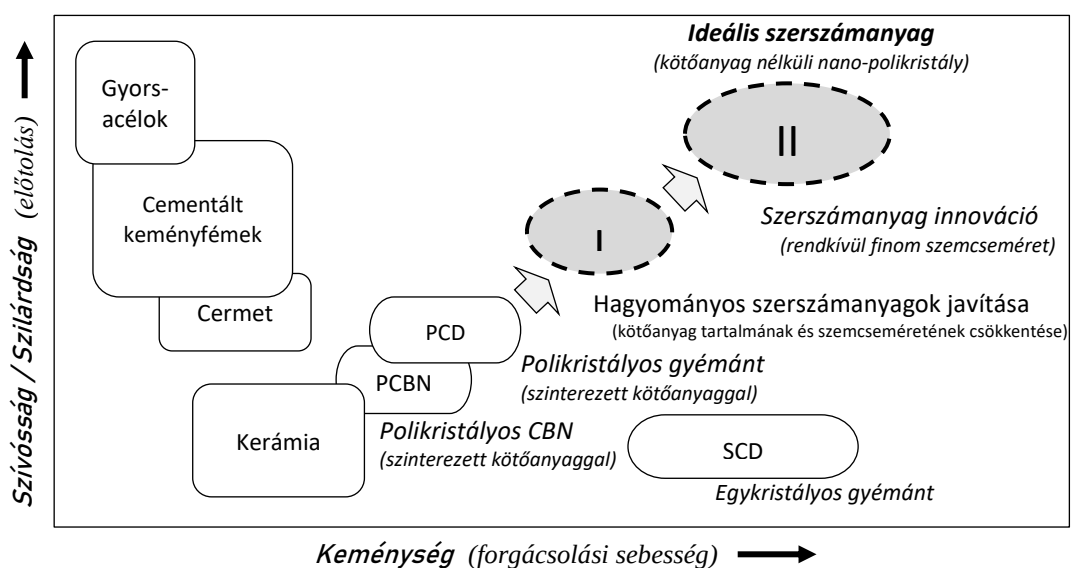
A gyártási költségek csökkentése és a termelés hatékonyságának növelése érdekében tett erőfeszítések részeként az autóiparban, a repülőgépiparban, az orvostechikában, az elektronikában és a hadi iparágakban bővül a rendkívül tartós, nehezen forgácsolható

anyagok felhasználása. Ilyen körülmények között ezeknek a szektoroknak egyre nagyobb az igényük a keményebb és keményebb forgácsolószerszámokra a forgácsolás hatékonyságának növelése érdekében a forgácsoló sebesség növelésével, valamint a nehezen forgácsolható anyagok forgácsolásához. Teljességgel kijelenthető, hogy minden igénynek jelenleg egy szerszámanyag sem tud megfelelni, ami belátható a 5. ábra szerint [3]:



5. ábra: Szerszámanyagok keménysége és szívóssága/szilárdsága [3]

A tökéletes megoldást egy nano-polikristályos kötőanyag nélkül szorosan egymáshoz illesztett szemcsékből felépülő anyag jelenthetné, amelyet a 6. ábra illusztrál, de a jelenleg használt hagyományos módszerekkel nem előállítható, ezért az innovatív előállítási folyamatok elengedhetetlen szerepet játszanak a jövőbeli elkészítéséhez [4].



6. ábra: Jelenleg rendelkezésre álló szerszámanyagok mechanikai tulajdonságai és az innovatív ultrakemény anyagok fejlesztésének iránya [4]

2.1 Gyorsacél

A gyorsacélok (HSS) az ötvözött szerszámacélok speciális osztályát alkotják, kombinálva az olyan tulajdonságokat, mint a hőállóság, nagy keménység és a nagy kopásállóság. A HSS maximális üzemi hőmérséklete kb. 500 °C. Az ötvözött acélok ezen csoportját a XX. század elején fejlesztették ki, így a szerszámacéloknál sokkal gyorsabb megmunkálásra nyílt lehetőség, ezért kapta a gyorsacél elnevezést. Alapvetően nagy tartalmú szénacélok, amelyekben nagy arányban vannak ötvözött elemek, például volfrám, molibdén, króm, vanádium és kobalt. Az átlagos keménységük: ~ 65 HRC [5] [6, p. 35].

A gyorsacélokat három különböző módszerrel lehet előállítani:

- öntéssel,
- porkohászattal,
- porlasztással.

Az öntéssel készült öntvények lassú lehűlése durva öntött mikrostruktúrát eredményez, ami a nem homogén, durva keménységhez és alakíthatósághoz vezet. Annak ellenére, hogy a gyorsacélgyártás a hagyományos kohászati eljárásokkal folyamatosan javul, a megszilárdulás során bekövetkező szegregáció és a fémek megszilárdulási sebességének különbsége az öntvények térfogatában jelentős (ezek a jelenségek a folyamat fizikai jellegéből adódnak, és nem lehet teljesen lecsökkenteni), ezekben az acélokban a karbidok szabálytalan alakúak és különböző méretűek [5].

A porkohászati úton előállított termékek számos ipari felhasználásra alkalmasak, mivel az anyagok számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek. A nagy mechanikai szilárdság, a kopásállóság és a szinte tökéletes rácsszerkezet számos lehetőséget rejt a szerszámgyártás területén. A porkohászati gyorsacélötvözetek megmunkálása kifinomult megmunkálási folyamatokat igényel. A forgácsolási műveletekhez nagy teljesítményű forgácsoló szerszámokat, például cementált keménységűeket, nagy ötvözetű szerszámacélokat és köbös bór-nitridet kell alkalmazni [7].

A porlasztás előnyei közé tartozik a porkohászathoz képest a gyors megszilárdulás (gáz porlasztás), költséghatékonyság, illetve közvetlen módszer az ömlesztett alkatrészek gyártására, tömeggyártásra [5].

A 100 évig alkalmazott gyorsacélok napjainkban egyre korlátozottabban alkalmazhatók forgácsoló szerszámként (különösen nagy megmunkálási sebességnél), de építkezési elemekként, műanyagból készült termékek gyártására szolgáló formákra és egyéb formázó szerszámként használják őket [8].

Gyorsacélok ötvözői és hatásuk:

Az EN ISO 4957:1999 európai szabvány szerint a gyorsacélok meghatározása: elsősorban megmunkáláshoz és alakítási folyamatokhoz használt acélok, amelyek kémiai összetételük miatt a legmagasabb melegkeménységgel és hőállósággal rendelkeznek. Ha a szerszámacél ötvözesi koncepciója alapján több mint 7% volfrám, molibdén és vanádium keverékét foglalja magában, 0,6% -nál nagyobb szénttartalommal kombinálva, akkor ez az acél gyorsacélként határozható meg [9].

A gyakorlatban HSS általában magas volfrám (W), molibdén (Mo), króm (Cr), vanádium (V) és egyéb erős karbidképző elemeket tartalmaz [10].

Az ötvözőelemek hatása a gyorsacélokban:

- **Szén** ($C = 0,8 - 1,5\%$)
Karbidokat képez, növeli a kopásállóságot, a vörös keménységet és a nyomószilárdságot. Csökkenti az acél szívósságát [11] [12].
- **Volfrám** ($W = 1,2 - 18\%$)
A stabil karbidképzés miatt javítja a kopásállóságot, keménységet, különösen magas hőmérsékleten, finomítja a szemcseméretet. Másodlagos keményedéshez vezet [12].
- **Vanádium** ($V = 1,0 - 5,0\%$)
Szűkíti a γ -tartományt, javítja a keménység megtartását és finomítja az elsődleges szemcséket, ferrit és karbidképző elem. Annak a ténynek köszönhetően, hogy a vanádium erős keményfémképző, növeli a kopásállóságot. Kisebb mértékben javítja a melegkeménységet, a melegsilárdságot és a hegeszthetőséget is [13] [12].
- **Króm** ($Cr = 3,0 - 5,0\%$)
Az egyik karbidképző ötvözőelem. Növeli a keménységet, szilárdságot és a kopásállóságot. Nagy koncentrációban ($> 12\%$) élesen növeli a korrózióállóságot. Pozitív hatásai mellett viszont kedvezőtlenül hat a szívósságra [14] [12].
- **Kobalt** ($Co = 0 - 12\%$)
Nem képez karbidokat, de mégis gyorsacél ötvözőelemként használják, mert növeli a melegkeménységet és a nyomószilárdságot. Kis mértékben növeli az acél ridegségét [12] [15].
- **Molibdén** ($Mo = 0 - 10\%$)
Kettős karbidot képez vassal és a szénnel. Szemcsefinomító hatása és pozitív hatása van az edzhetőségre azáltal, hogy csökkenti a kritikus hűtési sebességet, szűkíti a γ -tartományt és alacsonyabb edzési hőmérsékletre lenne szükség, de a volfrám magas olvadáspontú, ezért szükséges a magasabb hőmérséklet. Csökkenti a

megeresztési ridegséget, növeli a melegszilárdságot, keménységet különösen magas hőmérsékleten és dinamikus körülmények között [12] [16].

A vizsgálat során megmunkált gyorsacél: S390

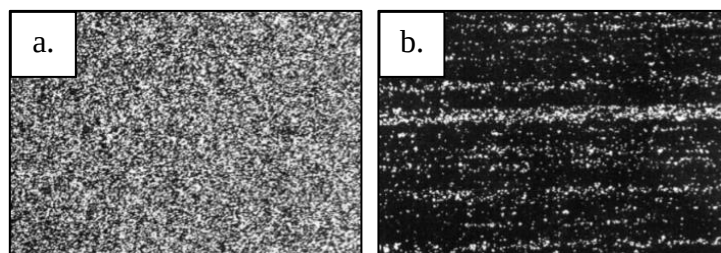
A *BÖHLER Edelstahl GmbH* által a hagyományos öntési eljárásokkal ellentétben egy porkohászati úton előállított „S390 MICROCLEAN” elnevezésű, kobalt ötvöztetésű gyorsacél anyagot keménymarási technológiával munkáltam meg, amelynek keménysége 62 ± 2 HRC. Nagy nyomás és magas hőmérséklet alatt homogén, dúsulásmentes, legnagyobb tisztaságú és megfelelő szemcsézettségű fémporból diffúziós folyamat során hozzák létre, homogén, dúsulásmentes anyagot kapva, ami gyakorlatilag izotróp tulajdonságokkal rendelkezik. Szintén igaz rá a már említett jó melegkeménység, nyomószilárdság és kopásállóság, nagyon jó szívósság és mindemelett kitűnő megmunkálhatóság [17, pp. 3-4].

Az S390 MICROCLEAN gyorsacél szerszámanyag vegyi összetételét az 1. táblázat tartalmazza [17]:

1. táblázat: S390 (1.3202) vegyi összetétele [17]

Vegyjel	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co
%	1.64	0.60	0.30	4.80	2.00	4.80	10.40	8.00

A porkohászati úton előállított gyorsacélok szemcsemérete kisebb, homogénebb, a szennyezők mennyisége kevesebb, így tisztább összetétellel rendelkeznek és a kisebb porozitás miatt nagyobb a nyersanyag kihasználás, mint a hagyományos öntéssel előállított gyorsacélok esetén, amelyet a 7. ábra szemléltet:



7. ábra: Hagományos öntési (a.) és porkohászati (b.) eljárás eredménye [17, p. 3]

Alkalmazási terület [17, p. 4]:

- autóversenyzés, kopó alkatrészek,
- csigafúrók, menetfúrók, kaliberfúrók,
- finomkivágás/kivágás/alakozás, lemezvágó- és gép kések,
- fogazó-, hántoló- és alakító szerszámok,
- hengerlés, hidegalakítás/dombornyomás, porsajtolás
- speciális forgácsoló szerszámok, üregelők, végmarók.

2.2 Keményfém

A keményfémek a mai korszerű szerszámok leggyakrabban használt anyaga. Izzószálak anyagának kísérletezése hatására 1923-ban a berlini Osram Studiengesellschaft-nál dolgozó Karl Schröter fejlesztette ki, amelyet keményfázisú volfram-karbid és folyékony kobalt keverésével és szinterelésével állított elő. Fémmeel cementált karbid anyagot kapott eredményül az eljárása végén. Az Essen székhelyű Krupp AG hozhatta forgalomba, 1927-ben WIDIA márkanév alatt, ami a „Kemény, mint a gyémánt.” (*Hart, wie Diamant*) kifejezésből ered, magyarosítva nálunk vídia néven terjedt el. Akkoriban megközelítőleg a gyorsacél szerszámanyagok forgácsolási sebességének (20-40 m/min) közel négyszeresét (100-150 m/min) tudták a keményfém szerszámokkal biztosítani. A gyorsacélnál nagyobb nyomószilárdsággal bír, kopásállóbb, keményebb, viszont ridegebb, törékenyebb, mert hajlítósilárdsága alacsonyabb. A HSS szerszámanyaga vas ötvözet, míg kezdetben a keményfém alapanyaga volfram-karbid (WC), amit kiegészíthetnek más szintén magas olvadáspontú karbidokkal (TiC, TaC) és kötőelemként kobaltot (Co) használnak. Manapság karbidok mellett már boridok, nitridek, szilícidek is felhasználásra kerülnek, míg kötőanyagként nikkelt és vasat is használnak [18].

A keményfém szerszámokat két tényező határozza meg [6, pp. 36-37]:

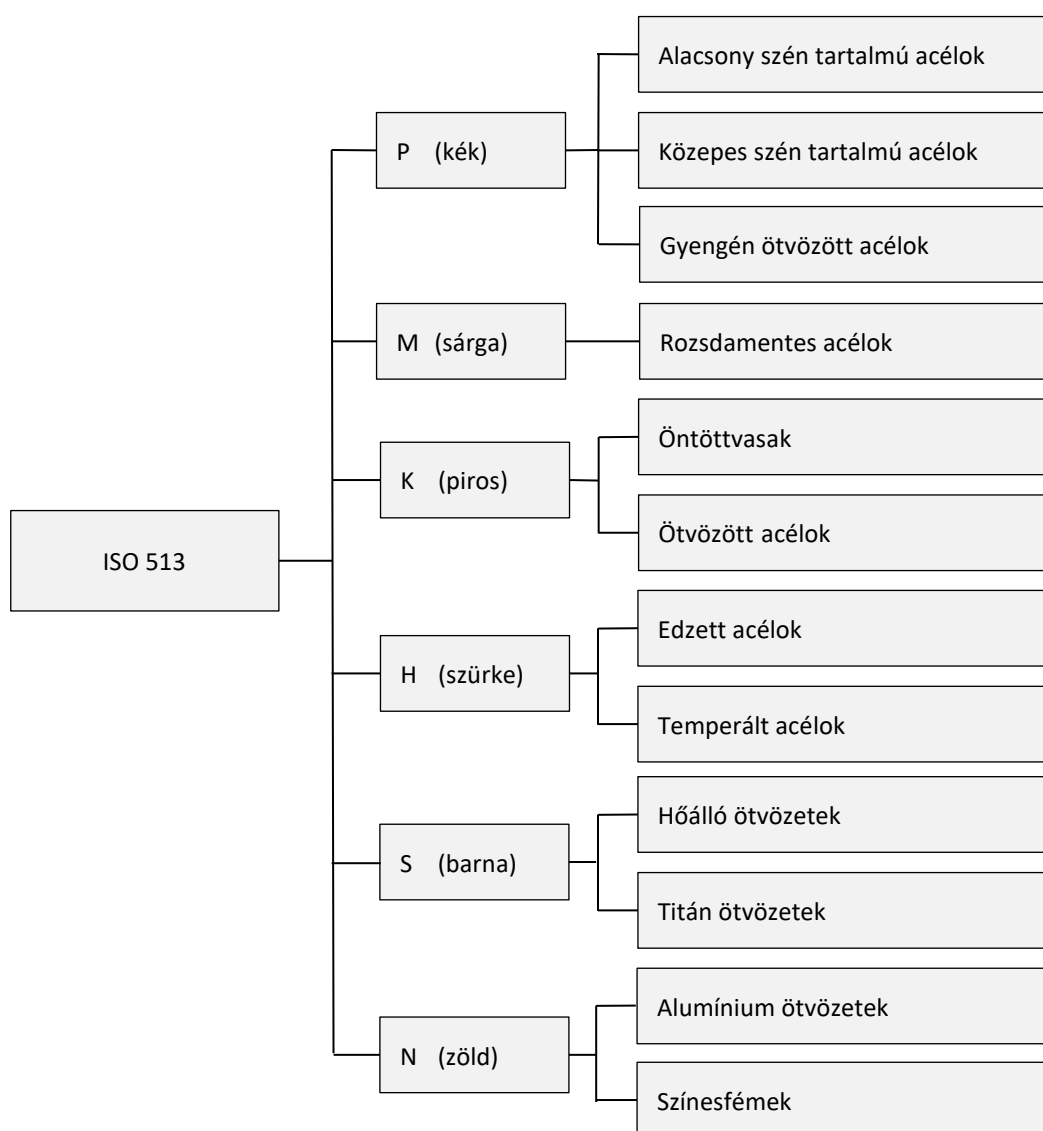
- A volfram-karbid és a kobalt aránya. Az utóbbi általában 6% és 12% között van jelen. A kobalt olvadáspontja magas (1493 °C) így képez oldható fázist a volfram-karbid szemcsékkel 1275 °C-on, ami segíti a porozitást.
- A szemcseméret, mely szerint a mikrorészecske osztályok 1 µm-nél kisebb részecskéket tartalmaznak, a szubmikronrészecskék pedig kisebb, mint az egy mikron fele. Minél kisebb a szemcséje, annál keményebb a keményfém. A keménység növekszik a kötőanyag-tartalom és a volfrám-karbid szemcseméretének csökkenésével, 600 és 2100 HV közötti értékekkel.

A keményfém szerszámokat kétféle formában gyártják [6, p. 36]:

- Integrált szerszámok: nyers keményfém rúd köszörülésével végmarókat, vagy fúrókat készítenek. A fő előnye ezeknek a forgácsoló szerszámoknak a tökéletes egyensúly, de a fő hátránya a magas ár, figyelembe véve, hogy a forgácsolási folyamat csak egy kis és nagyon specifikus zónát használ a szerszámból. Egyes szerszámok újra élezése és profilozása is lehetséges.
- Váltólapkás szerszámok: kicsi, speciális geometriájú betétek keményfémből, de acélból készült szerszámtartókra vannak rögzítve. Nagy méretű szerszámoknál a kopott lapkák gyors cseréje költséghatékonyaságot jelent.

A keményfém osztályokat az ISO 513 szabvány szerint hat csoportba sorolják, amelyet a 8. ábra prezentál. Eredetileg a volfram-karbidokat szerették volna osztályozni a különböző forgácsolási eljárásoknak megfelelően egy számjellegű skálát követve, de nem határozták meg a kötőanyag-mennyiséget és a szemcseméretet, így különböző gyártók azonos elnevezésű szerszámai között teljesítményben jelentős eltérések lehetnek. Általános tévhit, hogy a magasabb osztályokban kevesebb a kobalt kötőanyag, ezért keményebbek és törékenyebbek, de ez nem igaz. Emiatt és más hiányosságok miatt ez szabvány folyamatosan módosul [6, pp. 36-37].

A betű utáni kétjegyű szám, 01-től 40-ig (*P csoportban 50*) határozza meg az osztályzat keménységét és szívósságát. Az alacsonyabb számok a keményebb osztályoknak felelnek meg. A K10-től K30-ig használják napjainkban a legtöbbet [6, p. 37].



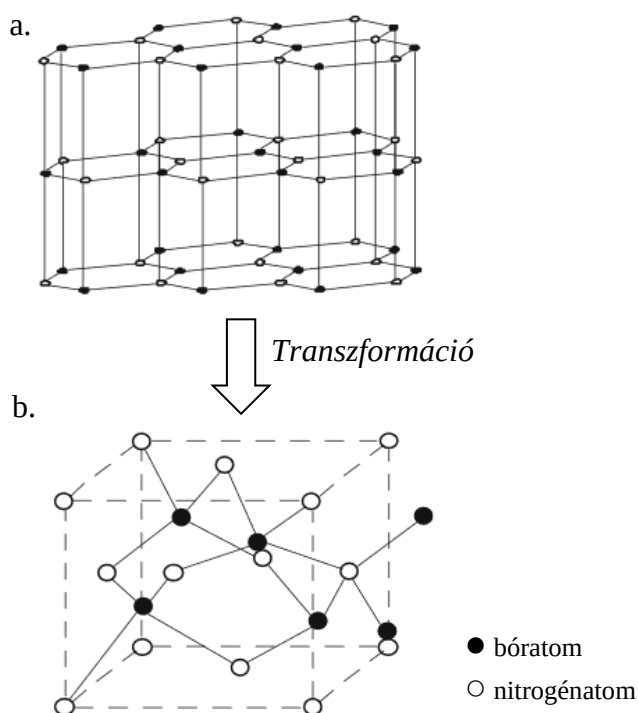
8. ábra: A keményfémek felhasználásának csoportosítása az ISO 513 szerint [6, p. 37]

2.3 Kőbös bór-nitrid

A kőbös bór-nitrid (CBN) olyan anyag, amely nem található meg természetben ásványi formában. Először 1957-ben szintetizálta az Egyesült Államok General Electric cég kutatója *R. H. Wentorf* egy anyagszintézis-tanulmányban, amely során ultramagas nyomást használtak. 1968-ban már ipari mennyiségben állították elő. 1970-től kezdtek el határozott élgeometriával rendelkező CBN forgácsoló szerszámokat gyártani. Később különféle bevonatokkal látták el (TiN , $TiAlN$, $TiCN$) a különböző bevonatoló eljárásokkal, mint a fizikai gőzfázisú leválasztás (*PVD*, *Physical Vapor Deposition*) és a kémiai gőzfázisú leválasztás (*CVD*, *Chemical Vapor Deposition*) [19].

A tiszta bór-nitridet gázkeverék kémiai kölcsönhatásával nyerik: bór-triklorid, hidrogén és ammónia 2-6 GPa nyomáson, 1200 °C feletti hőmérsékleten és katalizátorok, azaz alkáli- és alkáliföldfémek, vagy ezek nitridjei, vagy boridjai jelenlétében. Ebből a hexagonális alfa-bór-nitridből két módosítás kapható: gyémánszerű köbkristályos szerkezetű béta-bór-nitrid és a gamma-bór-nitrid. A béta-bór-nitridet, azaz a kőbös bór-nitridet szokták még boratzonnak, kubonitnak, vagy elbornak is nevezni [20] [21].

A 9. ábrán az atomok elrendezése látható a bór-nitridben az átalakulás hatására [19]:



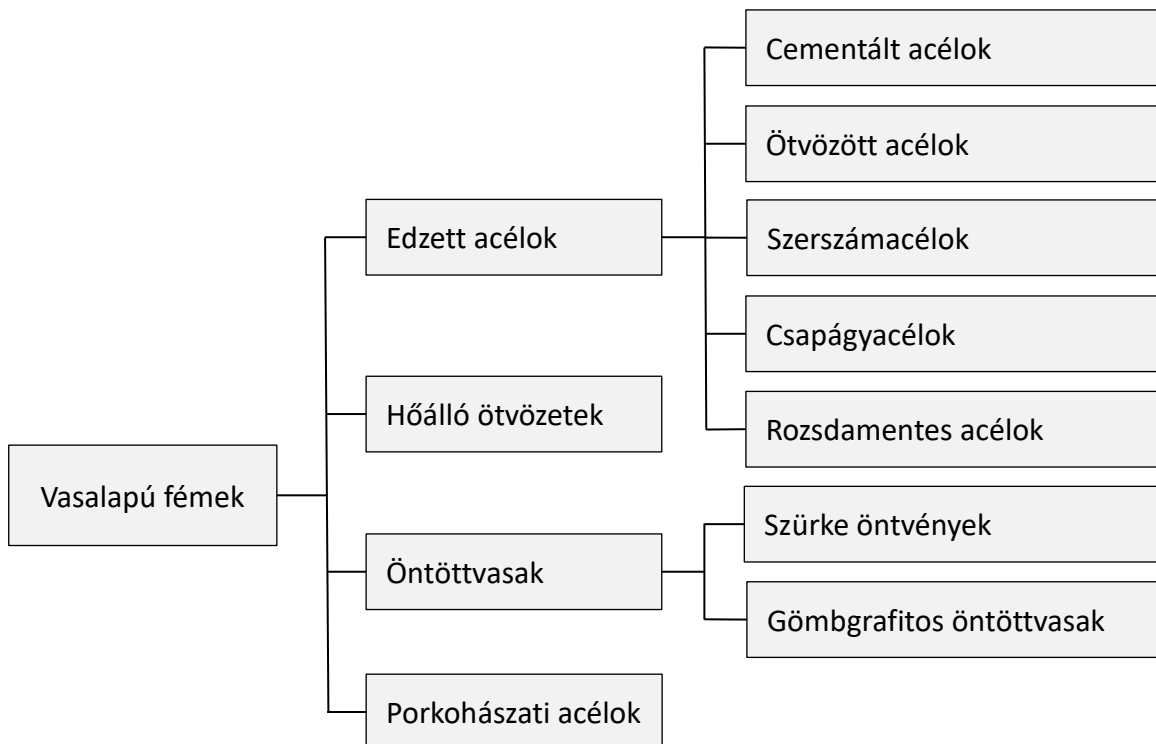
9. ábra: Hexagonális (a.) és kőbös rácsszerkezet (b.) a bór-nitridben [19]

A kőbös bór-nitrid a gyémánthoz hasonlóan szuperabrazív anyag és kristályrácsa is hasonló, de a gyémántrács csak egyetlen elem szén atomjaiból épül fel, míg a kőbös bór-nitrid két elem atomjaiból épül fel a bóratomból és a nitrogénatomból [19].

A CBN figyelemre méltó tulajdonságokkal rendelkezik [22, pp. 118-125] [6, pp. 40-41]:

- rendkívül nagy keménységű ($<4500\text{ HV}$), így a gyémánt ($>9000\text{ HV}$) után a második legkeményebb forgácsoló szerszámanyag,
- kémiaileg semleges, ezért nem reagál könnyen a vasalapú anyagokra,
- kis sűrűségű ($\rho = 3,45 \cdot 10^3\text{ kg/m}^3$),
- magas mechanikai tulajdonságok jellemzik ($R_v = 5330\text{ MPa}$, $R_m = 800-1200\text{ MPa}$),
- nagy hőmérsékleten is megtartja keménységét (2000°C -ig),
- kopásállósága felülmúlja a gyémánt szerszámokat,
- széles körben alkalmazható, ezáltal alkalmas nehezen vágható anyagok, például edzett acél és hőálló ötvözetek, nagy sebességű és nagy pontosságú öntöttvas feldolgozására, és vas alapú szinterelt ötvözetek feldolgozása.

A 10. ábrán megtekinthető a köbös bór-nitrid széleskörű felhasználása. Igen magas ára mellett mostanság a köbös bór-nitrid szerszámokat keménymegmunkálási műveleteknél előszeretettel használják. Magas keménységgel rendelkező munkadaraboknál, mint edzett acélok, öntöttvasak, acél kovácsdarabok, porkohászati termékek, hőálló acélok, felületi edzett alkatrészek megmunkálásánál alkalmazzák. Végül, de nem utolsósorban köszörű szerszámok anyagaként is használatos [3].



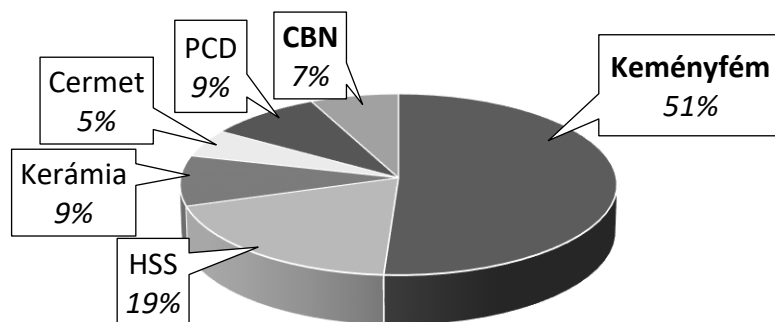
10. ábra: CBN szerszámok alkalmazása a fémiparban használatos anyagoknál
[22, pp. 118-125]

2.4 Keményfém vs. köbös bór-nitrid

A Harbini Tudományos és Műszaki Egyetemen *Haining Gao és csapata (2019)* kutatásukban összehasonlították a bevont cementált keményfém és köbös bór-nitrid szerszámokat, amelyből a következő megállapításokra jutottak [23]:

- A vágási erő, a felület minősége, a forgács morfológiája és a vágási hőmérséklet értékelési mutatói alapján a CBN szerszám forgácsolási teljesítménye jobb volt.
- A CBN szerszám fő meghibásodásai az edzett acél kis sebességű megmunkálásakor a élrátét keletkezés és a homloklapon és hátlapon történő kopás volt. Az edzett acél nagy sebességű megmunkálásakor a CBN szerszám fő meghibásodásai a hátkopás és a nagyfokú kifáradás okozta károk voltak. Az oxidáció, a tapadás és a diffúziós folyamatok vezetnek a CBN szerszámok hátkopásához.
- A CBN szerszám élettartamát a forgácsolási sebesség befolyásolja. Nagyobb forgácsolási sebesség mellett ($>150 \text{ m/perc}$) az élettartam jobb volt, mint a keményfém szerszámoknál, így az alacsony forgácsolási sebességet kerülni kell.
- A forgácsolási sebesség növelésével növekedett a leválasztott forgács magassága, mert megkönnyítette a csúszás során fellépő nyírást.
- Amikor a CBN szerszámot edzett acél megmunkálásához használták, a forgácsolási hőmérséklet magasabb volt. Kisebb és sötétebb volt forgács. Ennek oka a súrlódás és nyomás volt, illetve nem tudott a keletkező hő időben eltávozni.

A keményfémek vezetőbb szerepet töltenek be a szerszámanyagok piacán, mint az a 11. ábrán is látszik. Mindezt annak ellenére, hogy egyrészt a keményfém szerszámok két fontos összetevőjét - a volfrámot és a kobaltot - korábban (2011) az EU az ipar számára létfontosságú kritikus nyersanyag listájára tette. A gazdasági jelentőségük és az ellátás megszakításának kockázata miatt továbbra is ezen a listán maradtak. Másrészt a keményfém előállítása során az emberi szervezetre veszélyes anyagok keletkeznek, ezért sürgető igény mutatkozott arra, hogy az EU alternatív megoldásokat dolgozzon ki a meglévő forgácsoló szerszámokkal szemben [24].



11. ábra: A világon felhasznált szerszám anyagok eloszlása 2018-ban [24]

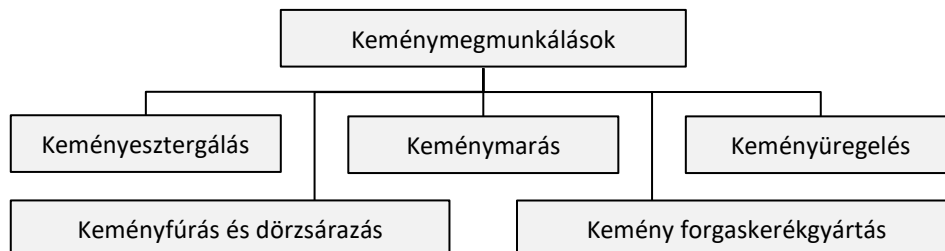
3 ALKALMAZOTT FORGÁCSOLÁSI ELJÁRÁS: KEMÉNYMEGMUNKÁLÁS

A tágabb értelemben vett meghatározása szerint a kemény megmunkálás 45 HRC feletti keménységű alkatrészek megmunkálását jelenti, bár a művelet leggyakrabban az 58-68 HRC keménységű munkadarabokat érinti. Főleg olyan befejező vagy félkész felületkezelési folyamat, ahol nagy méret-, forma- és felületi pontosságot lehet elérni. [6, p. 1]

3.1 Keménymegmunkálási műveletek

Az edzett acél alkatrészek felület kikészítésének hagyományos megoldása a polírozás, csiszolás és köszörülés volt. A modern gyártásban a kemény megmunkálást már nem tekintik az összes előbb említett művelet alternatívájának. Manapság számos olyan alkalmazás létezik, ahol ez a két folyamat kiegészíti egymást, így a kemény megmunkáláshoz szükséges modern gépeket gyakran köszörűorsókkal is ellátják.

A keménymegmunkálás a keményszergálás formájában az 1980-as évek közepén történő szélesebb körű bevezetése óta jelentősen fejlődött a különféle megmunkálási műveletekben. Bár a keménymegmunkálás gyakorlatilag bármilyen műveletnél alkalmazható az alábbi műveleteknél váltak a leggyakoribbá, mint az a 12. ábrán látható [6, pp. 1, 15-21]:



12. ábra: A legelterjedtebb keménymegmunkálási műveletek [6, pp. 1-2, 14]

A kemény megmunkálás következő előnyeit számos irodalmi forrás és cégek promóciós anyagai jól leírják, melyeket a felhasználók is tapasztalnak [6, pp. 2-3]:

- összetett, bonyolult alkatrészek esetén is könnyen alkalmazható,
- termelékeny, gyors átállás más termékekre, munkadarabokra,
- több művelet végrehajtása egy befogással/felfogással
- nagyobb pontosság, jobb felületminőség
- magas forgácseltávolítási sebesség,
- a szerszámgép programozása megegyező módon történik, mint lágymegmunkálásnál,
- alacsony szerszámgép beruházást és kis szerszámkészletet igényel,
- környezetbarát fémforgács mennyiség és minimális hűtőfolyadék használat miatt.

A kemény megmunkálás korlátait és hátrányait általában nem sorolják fel a promóciós anyagokban és a kutatási cikkekben, bár ezekkel is érdemes tisztában lenni [6, p. 3]:

- Az egységenkénti **szerszámköltség** keménymegmunkálásnál lényegesen **magasabb**, mint a már említett felület kikészítését befejező műveleteknél.
- Bizonyos esetekben az **alkatrész mérete vagy geometriája** egyszerűen nem alkalmas keménymegmunkálásra. Például, ha esztergálásnál, hossz/átmérő (L/D) nagyobb, mint 4:1 viszonyzáma.
- Gyakran speciálisan **merev gépek** szükségesek a sikeres kemény megmunkáláshoz. A gépi merevségének mértéke diktálja a pontosságot. A megmunkálási rendszereknek tartalmazniuk kell számos tulajdonságot a merevség és a csillapítási jellemzők növelése érdekében a keménymegmunkálási műveleteknél. Ide tartoznak a polimer kompozit megerősítéssel ellátott gépalapok, a különböző hidrosztatikus módszerek és igyekezni kell a hosszabb szerszámkinyúlásokat kerülni.
- A hűtőfolyadékkal kapcsolatban a legnagyobb kérdés az, hogy kemény megmunkálás során használják-e vagy sem. Azoknál az alkatrészeknél, mint a fogaskerekek, amelyek sűrűn megszakítják a felületet, a legjobb, ha **szárazon** munkálják a hősokk általi bekövetkező törés miatt. Folyamatos forgácsolás esetén a száraz esztergálás során fellépő magas szerszámhőmérséklet a forgácsolandó terület megolvasztását (lágyítását) szolgálja, ami csökkenti a keménység értékét és megkönnyíti az anyag forgácsolását. Ez a jelenség előnyös a sebesség növelése érdekében. A hűtőfolyadék nélküli megmunkálás nyilvánvaló költségelőnyöket és költséghatékonyságot is jelent. Ha a szárazmegmunkálás a munkadarab felületén jelentős már meg nem engedett szövetszerkezeti változásokat okoz, akkor a hűtőfolyadék használata szükségessé válik. Ilyenkor szerszámon keresztüli belsőhűtést alkalmaznak magas nyomáson. Hűtőfolyadék használata esetén vízalapúnak kell lennie. A **minimál kenés** több alkalommal hasznosnak bizonyult a kemény megmunkálás során.
- A szerszám élettartamán belül is **fokozatosan romlik a felületi érdesség**.
- Az úgynevezett "**fehér réteg**" **képződés** kemény megmunkálás során, szabad szemmel láthatatlan, nagyon vékony héj, amely keményebb, mint az alapanyag. A kemény megmunkálás során képződött fehér réteg vastagsága a szerszám kopásával növekszik. Leggyakrabban csapágyacélokon képződik. Idővel a fehér réteg elválhat, és csapágyhibához vezethet a használat során.

3.1.1 Keménymarás

Az öntőformák, fröccsöntő és kovács szerszámok gyártása hagyományosan magában foglalja a lágyacélok marását, hőkezelését, szikraforgácsolását (*EDM, Electro Discharge Machining*), vagy a köszörülést, esetleges kézi polírozását. A folyamatlánc azonban nagyon időigényes, drága és a környezetre is veszélyes. Ezenkívül a szikraforgácsolással, vagy abrazív eljárással megmunkált felület hajlamos a termikus károkra [25] [26].

A közelmúltban a szerszámanyagok fejlődése és a merevebb felépítésű szerszámgépek lehetővé tették keménymarást, vagyis edzett, ötvöztött acélok marását 40–60 HRC keménységgel is. A keménymarás, mint versenyképes befejező, vagy félkészre megmunkáló technológia van jelen a szerszámok gyártásában [25].

A hagyományos technológiákhoz képest a megmunkálási költségek, az átfutási idő és a folyamat elvégzéséhez szükséges szerszámgépek számának csökkenése, az anyageltávolítási sebesség növekedése, a hőkezelések miatt bekövetkező méretváltozások és vetemedések kizárása, valamint a hasonló felületi érdesség számos előnyt biztosít [25].

Tömör és váltólapkás keményfémeket, kerámiákat használnak szerszámanyagként. Hűtőfolyadék nem ajánlott keménymarásnál, de levegő használata előnyt jelenthet forgácseltávolításához, például zsebmarsnál. A hűtőfolyadék mellőzése mellett keménymarásnál nagy fordulatszámtartományra van szükség, emiatt rendszer lehet a legnagyobb merevségére és pontosságára, amiben még a szerszámbefogók is fontos szerepet töltenek be [6, pp. 17-19].

3.1.2 Keményesztergálás

A keményesztergálás edzett acél alkatrészeknél számos lehetőséget és előnyt biztosít a hagyományos esztergálással szemben. Általában 60 HRC és még keményebb alkatrészeken alkalmazzák. A kemény esztergálás tehát mind a fémipar, mind a kutatóközösség számára nagyon érdekes. A kőbőr-nitrid, cermet, vagy kerámia szerszámanyag kulcsfontosságú szerepet játszik a kemény esztergálás technológiájának lehetővé tételében. Az akár meggyipirosra is felhevülő forgács problémát okozhat. Forgácsolás közben narancssárga színű és folyamatosan folyó forgácsnak kell lennie, mint egy szalag. Ha a lehűlt forgács kézzel történő összenyomás hatására szétesik, akkor a forgácsban megfelelő hő keletkezik [6, pp. 5, 15-16].

Ezenkívül a kemény esztergálásnak számos egyedi folyamatjellemzője van, például szegmentált forgácsképződés és a megmunkált felületek mikrostrukturális változásai, amelyek alapvetően különböznek a konvencionális esztergálástól [6, pp. 5,].

3.1.3 Keményfúrás és dörzsárazás

A fúrás folyamata során tömör anyagba készítünk furatot, míg furatbővítés során a már meglévő furatot nagyobb átmérőjű furattá bővítjük. A furatbővítéshez hasonló módon a dörzsárazással is a meglévő furat átmérőjét növeljük. A dörzsárazással a furat hibáit tudjuk javítani, úgymint a méretpontosságot, egyenességet, hengerességet és nem utolsósorban a felületi érdességet. Vannak olyan alkatrészek, melyeknek az előző mondatban említett kritériumoknak kell megfelelni hőkezelés után, amely során méretbeli változások lépnek fel. Hagyományos fúrási és dörzsárazási módszerekkel a méretbeli változásokat már nem, vagy nagyon nehezen költséges úton lehet megvalósítani kemény anyagoknál. Itt merül fel a különböző abrazív, vagy keménymegmunkálások szükségessége. A keménymegmunkálás ebben az esetben is sokkal költséghatékonyabb, mind szerszám, mind gyártási költségek terén, s termelékenyebb eljárásnak tekinthető, mint egy belső abrazív megmunkálás. Rendkívül produktív és mindemelett kiváló felületi érdességet kínáló alternatíva. Szerszámanyagként cermetet, kerámiát betétekként alkalmaznak, vagy CBN anyagú hegyet közvetlenül forrasztva többnyire a volfrám keményfém szárhoz [6, pp. 16-17].

3.1.4 Keményüregelés

A bonyolult belső felületek megmunkálása a tömeggyártásban az üregelés a leggazdaságosabb. Többfogú szerszámot alkalmaznak, amelyen a forgácsoló élek egymás után meghatározott geometriával és sorrendben vannak beosztva. A keményüregelést általában 60 HRC felett alkalmazzák. A szerszámnak elő kell készíteni egy furatot, amin keresztül a szerszám áthalad lineáris, vagy spirális mozgással miközben kialakítja a megfelelő profilt. A korszerű szerszámanyagok és bevonatok, mint például a CBN és gyémánt anyagok lehetővé teszik a forgácsolási sebesség növelését és az edzett alkatrészek üregelését, hőkezelés utáni méretváltozások, felületi érdesség javítását, a súrlódás csökkentését, ezáltal a művelet költséghatékonyágának növelését és termelékenyebbé tételét [6, pp. 19-20].

3.1.5 Kemény fogaskerékgyártás

A fogaskerek manapság is fontos eleme a modern gépeknek. A fogaskerékgyártók számos kihívással néznek szembe termelési folyamat javítása érdekében a versenypiacon. Javítaniuk kell a hatékonyságot, mindemelett meg kell feleljenek az ügyfeleknek. Alacsonyabb rezgésű, alacsonyabb zajszintű hajtóművekre vonatkozó követelményeket kell nyújtaniuk széles frekvenciatartományban és a megnövekedett terhelhetőséget tudniuk kell biztosítani. Mindemellet megnövelt sebességfokozatot és jobb felületi érdességű és pontosabb fogakat követel meg az ipar a gyártóktól. A hűtő-kenő folyadékok használatának csökkentése, vagy teljes mellőzése, azaz a szárazon megmunkálás további környezetvédelmi elvárás. Normál esetben szükség van drága speciális berendezésekre a fogaskerék-befejező műveleteihez, például fogaskerék köszörűgépekre, amelyet hőkezelések után alkalmaznak a kívánt minőség elérése érdekében. Ezek a műveletek jelentősen megnövelik a fogaskerek költségeit. Alternatív megoldásként kemény fogaskerék megmunkáló műveletek, például a kemény lefejtő marás, kemény fogaskerék hántolás (szerszám és munkadarab összejáratásán alapul, kemény fogaskerék hámozás (használt technológia, mint a lefejtés, de itt a munkadarab és a szerszám is forog). A kemény fogaskerékgyártás alkalmas a hőkezelés előtti és hőkezelés utáni befejező műveletekre is. Ezeknél a műveleteknél már nem elég a gyorsacél és eddigi szerszámanyagok alkalmazása, mert a szerszámnak magasabb hő- és mechanikai igénybevételnek kell ellenállnia, ezért szükséges keményfémek, mint CBN, vagy kerámia szerszámanyagok használata. Továbbá a szerszámok geometriai kialakítása is kis mértékben eltér a régebbi technológiákban alkalmazott szerszámokétól [6, pp. 20-21].

3.1.6 Köszörülés

A CBN az egyéb csiszolóanyagokhoz viszonyított előnye a nagy keménység, a hőstabilitás, a kémiai semlegesség és a magas hővezető képesség, amelyek miatt ez a csiszolóanyag különösen alkalmassá teszi nagy keménységű fémötvözetek köszörülését [27].

A CBN köszörűkorongok meglehetősen drágák a többi köszörűkorong anyaghoz képest, de a szerszám élettartama kiemelkedő, amely jelentősen javítja a gyártás minőségét és költségeit. [27] A legtöbb köszörűgépet régen úgy tervezték, hogy optimális teljesítményt nyújtson az alumínium-oxid (korund) korongokkal. Az elmúlt években azonban a kifejezetten CBN-csiszolóanyag felhasználására tervezett köszörűgépek száma és típusai jelentősen megnöttek [28].

3.2 Keménymegmunkáláshoz használt eszközök

A keménymegmunkálások során a fellépő erők és nyomatékok a megmunkálási pontosságban meghatározó szerepet töltenek be a szerszámgépek, a szerszámok, a munkadarabok és az ezek között alkalmazott bizonyos készülékek által (MKGS). A munkadarabon méret, alak, helyzet hibát okozhat a rendszer deformációja, sőt rezgések is keletkezhetnek a forgácsolás során, amelyek negatívan befolyásolják a végeredményt [6, pp. 13-14].

3.2.1 Keménymegmunkálásra használható szerszámgépek

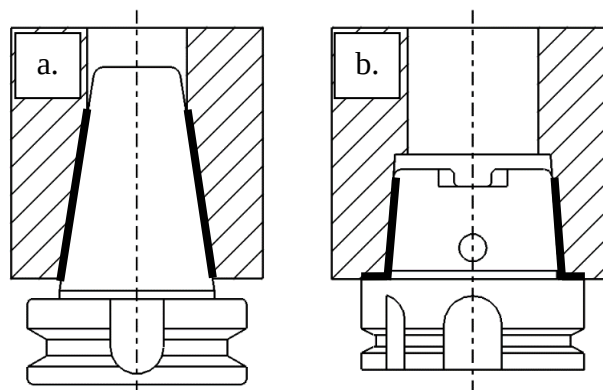
Az elmúlt 20 évben gyártott gépek többsége elegendő merevségű a keménymegmunkálásokhoz. Sok esetben a gép általános állapota inkább tényező, mint a kora. Még egy régi, jól karbantartott szerszámgép is alkalmas lehet a művelet elvégzéséhez. Mivel azonban az előírt tűréshatárok egyre szigorúbbak és a felületi minőséggel szemben támasztott elvárások is egyre finomabbak lesznek, a gép merevsége egyre nagyobb kérdéssé válik. A keménymegmunkálás sikerének kulcsa azonban nem a gép, hanem a rendszer merevsége, melyet nagy mértékben csökkent a szerszám, vagy munkadarab kinyúlása, távtartók, átalakítók és hosszabbítást biztosító eszközök. Nem minden megmunkálási módnál lehet elhagyni teljesen a hűtést, ezért minimálkenésre (MQL, minimal quantity lubrication) is alkalmasnak kell lennie a megmunkológépeknek [6, pp. 15-20].

3.2.2 Keménymegmunkálásra alkalmas szerszámbefogók marásnál

A szerszámok és megmunkológép kapcsolatát biztosító szerszámbefogók kulcsfontosságú szerepet játszanak az alkatrészek szigorú méretpontosságban és felületi minőség előállításában. Ezenkívül a szerszám teljesítményét jelentősen befolyásolhatja a géphez való rögzítő rendszer minősége. Általánosságban a lehető legmerevebb megoldások használata ajánlott a szerszámtartó-szerszám elhajlásának csökkentése és a szerszám biztonságos rögzítési rendszerének biztosítása érdekében a keménymegmunkálási körülmények között. Az alapvető elvárások a szerszámbefogókkal szemben [6, pp. 67-68]:

- az összeszerelésnek és a szétszerelésnek egyszerűnek kell lennie,
- a CNC-től parancsolt automatikus szerszámcsere könnyen megvalósítható legyen,
- maximális koaxiális pontosság a szerszám-szerszámtartó-orsó szerelvényen,
- a lehető legnagyobb merevség biztosítása,
- maximális nyomatékátvitel az orsóról a szerszámra.

A szerszámbefogók szerepe a keménymarási műveletekben hasonló a többi megmunkálási művelethez. Nagy merevségre, stabilitási megbízhatóságra és a szerszám helyzetének pontosságára van szükség. A mai marási eljárások azonban nagy orsósebességeket alkalmaznak (40 000 ford/min feletti), amelyek nagy centrifugális erőket produkálnak, így a rotációs rendszer kiegyensúlyozatlanná válása fokozott veszélyt jelenthet. Ez a tény arra készítette a tervezőket, hogy gondolják át a szerszámtartó és a szerszámgép orsó közötti csatlakozását vagy a szerszámbefogó egyensúlyának követelményét. A marási műveletek hagyományos szerszámbefogóit (*SK, BT, ISO stb.*), mint például a 13.a. ábrán, amelyek a kúpos szár segítségével egyetlen oldalirányú érintkezési felület alapján illeszkednek kevésnek bizonyultak, ezért kettős érintkezéssel illeszkedő szerszámtartókat fejlesztettek ki, amelyek már oldalirányban és a szerszám tengelyére merőlegesen is egyaránt csatlakoznak (*HSK, BIG-PLUS, stb.*), mint a 13.b. ábrán [6, pp. 67-70]:



13. ábra: Egy felülettel érintkező (SK) (a.) és két felülettel érintkező (b.) (HSK) szerszámtartó rendszerek

3.2.3 Keménymegmunkálás szerszámai

A keménymegmunkáló forgácsolószerszámoknak egyszerre kell ellenállniuk a nagy mechanikai terheléseknek és a magas hőmérsékletnek. Hiszen nagy súrlódás keletkezik a szerszám és az eltávolított forgács között, akárcsak a szerszám és a megmunkált felület között. Emellett a forgács-szerszám érintkezésénél lévő hőmérséklet egyes esetekben elérheti a 700 °C-t. Ezeket szem előtt tartva a szerszám jó tervezése és elkészítésének fő tényezői a következők [6, pp. 33-34]:

- Magas hőmérsékleten is fizikailag és kémiaiilag is tartósnak kell lennie.
- Meg kell őriznie keménységét a magas hőmérsékletek ellenére is.
- Anyagának alacsony kopási viszonyokkal kell rendelkeznie abrazív és adhéziós mechanizmusokkal szemben, mindeközben szilárdnak kell lennie törések elkerülése érdekében.

A 2000-es évek előtt bevált szokás volt az munkadarabokon elvégezni a nagyolást hagyományos gépeken még edzés előtt lágy állapotban. Ezt követően végezték el a szükséges hőkezelést, majd speciális gépeken munkálták készre a munkadarabokat. Két oka volt [6, pp. 64-65]:

- A nagy pontosságú követelmények nélküli nagyolást olyan gépeken végezték, amelyek óránkénti költsége a speciális gépek ötöde.
- A szerszámkopás kedvezőbb körülmények között ment végbe nagyobb szerszám élettartammal.

A modernebb szerszámok és szerszámgépek megjelenése után már a hőkezelt formából indultak ki és a lehető legtöbb műveletet ugyanazon a gépen hajtották végre. Hatalmas előnyt jelentett akkoriban, hiszen egyszerűbben és gyorsabban lehetett ezáltal átállni a műveletek között. Mindemellett nőtt a munkadarabok pontossága és megbízhatósága, mivel elkerülhető volt a többszöri munkadarab nullpont felvétel [6, pp. 64-65].

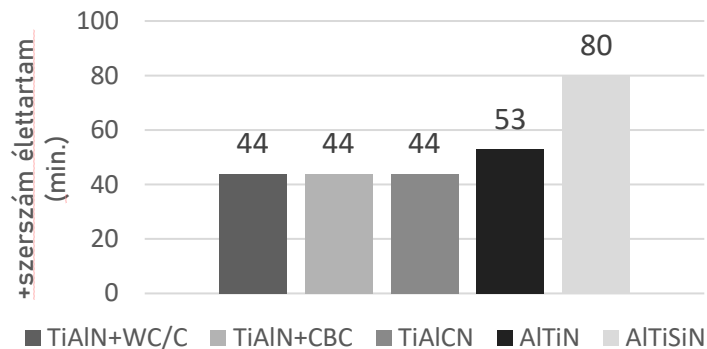
Manapság eldöntendő kérdés melyik módszert alkalmazzuk kemény anyagok megmunkálására, mert függ a gyártási költségektől és a szükséges átfutási időtől, de a készre munkálást minden esetben gömbvégű maróval hajtják végre olyan gépen, amely alkalmas nagy fordulatszámok mellett elegendő nyomaték átvitelére [6, pp. 64-65].

A fő szerszámanyagok a legkisebb keménységtől a legnagyobbig [6, pp. 33-43]:

- Nagysebességű acéloknak (HSS), beleértve az új szinterelt osztályokat is, nincs elég keménységük a keménymegmunkálásokhoz.
- **Szinterezett keményfémek** bevonattal vagy bevonat nélkül manapság a legtöbbet használt szerszámanyag keménymegmunkáláshoz és nagy sebességű megmunkáláshoz.
- Alumínium-oxidon (Al_2O_3) vagy szilícium-nitriden (Si_3N_4) alapuló kerámia szerszámok alkalmasak kemény anyagok forgácsolására hőállóságuk, keménységük és szívósságuk következtében, de törékeny, hűtés és ütés nem érheti, így megszakított felületek forgácsolására alkalmatlan.
- Polikristályos gyémánt (PCD) szerszámokat sem szoktak keménymegmunkálásra használni, inkább műanyagok, kompozitok és színesfémek forgácsolására használják.
- **Polikristályos köbös bór-nitrid (PCBN)** szintén alkalmas szerszámanyag keménymegmunkálásokra magas mechanikai tulajdonságai kristályszerkezetének és kovalens kapcsolatának köszönhetően.

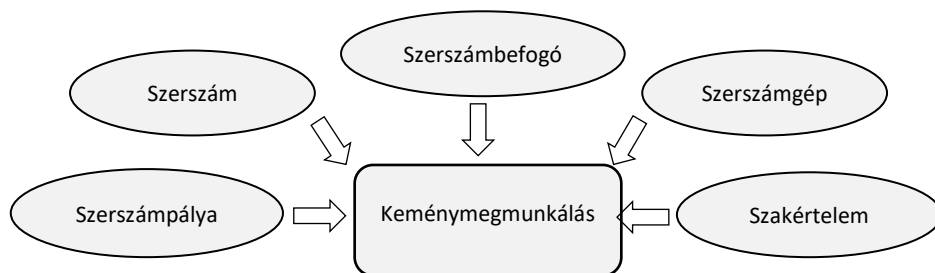
3.2.4 Keménymegmunkálás szerszámbevonatai

A szerszámok hordozótestét napjainkban különféle bevonatokkal látják el. A szerszámbevonat vastagsága ~2 és ~15 µm között van. A bevonatok kemény, vegyileg stabil felületet, hővédelmet és kopásállóságot nyújtanak a szerszámoknak, javítva azok teljesítményét a forgácsolás során, így biztosítva a szárazmegmunkálást és a hosszabb szerszámélettartamot, amely költségmegtakarítással jár. Az első kereskedelmi forgalomban megjelenő bevonat a TiN volt, s a bevonatok nagy része manapság is nitrideken alapszik. A keménymegmunkálásokhoz leggyakrabban $TiAlN$, $AlTiN$, $AlTiSiN$, $AlCrN$ bevonatokat használnak, sőt még Zr , V , B vagy O hozzáadásával is végeznek bevonatolást. Az 14. ábrán megtekinthető, mennyi idővel hosszabbodnak meg a szerszámélettartamok különböző bevonatok hatására: [6, pp. 43-48]



14. ábra: Szerszám élettartam növelése a különböző bevonatok alkalmazásával keménymarás során [6, p. 47]

Összességében tehát elmondható a keménymegmunkálási technológiákról, hogy számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos megmunkálásokhoz képest az edzett munkadarabok forgácsolásánál. Sok hagyományos megmunkálási mód költséghatékony alternatíváját kínálja. Környezetvédelmi szempontból igen jelentős előrelépés a hűtőfolyadék mellőzése érdekében is még, ha nem is elsődleges célja. Ez a speciális forgácsolási mód merevebb, stabilabb szerszámgépeket és modern szerszámanyagok használatát igényel. A már említett tulajdonságok alapján megállapítható, hogy a 15. ábrán látható jellemzők befolyásolják keménymegmunkálást [6]:



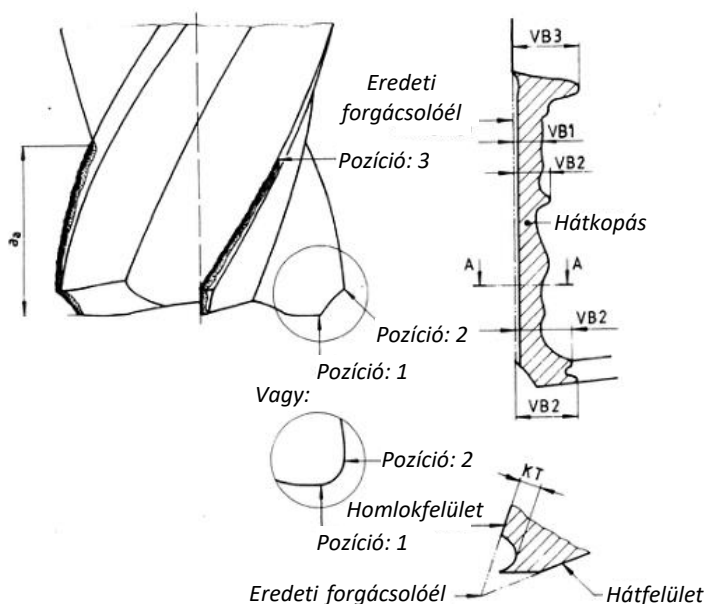
15. ábra: A keménymegmunkálást befolyásoló komponensek [6]

3.3 Keménymegmunkálás attribútumai

3.3.1 Keménymegmunkálás során fellépő kopási mechanizmusok

A megmunkáló rendszer termelékenysége, a megmunkálási költség, a minőség, a megmunkált felület integritása és a nyereség nagymértékben függ a szerszám kopásától és a szerszám élettartamától. A forgácsoló szerszámok hirtelen meghibásodása a termelékenység csökkenéséhez, az alkatrészek hibájához és ebből következő gazdasági veszteségekhez vezet. A kopások növekedése a forgácsolószerszám csúcssugarának csökkenéséhez vezethet, ami csökkenti a felület kikészítését. A kopás szélsőséges folyamat, ami megnöveli a forgácsolási erőket és rezgéseket okozhat a marási folyamatban. A forgácsoló szerszám maximális kihasználása az egyik módja annak, hogy az ipar csökkentse a gyártási költségeket. Ezért a szerszám kopását ellenőrizni kell, és minden megmunkálási folyamatnál a kívánt határokon belül kell tartani. A szerszám kopása elsősorban az adott munkadarab anyag marásához használt megmunkálási paraméterektől függ. A gyártási folyamatból származó nyereség maximalizálása érdekében érdemes pontos folyamatmodellt készíteni egy marási folyamathoz, ami magába foglalja a forgácsolási sebességet, előtolást és fogásmélységeket, mint bemeneti megmunkálási paraméterek és ebből lesz kimeneti paraméter a megmunkálás során a szerszám megmunkáló részének a kopása [29].

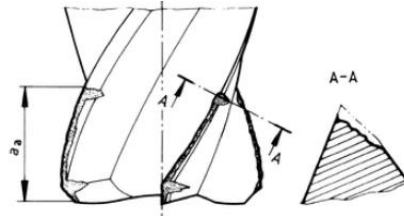
A forgácsolás során a szerszám felületén különböző kopások tapasztalhatók, amelyek a szerszámra ható folyamatos forgácsolás alatt a mechanikus és termikus igénybevételek hatására alakulnak ki. A marószerszámok kopását és helyzetét a 16. ábrán demonstrált ISO 8688-2:1989 szabvány írja le [6, pp. 52-53]:



16. ábra: Kopások helyzete végmarókon (ISO 8688-2:1989) [30]

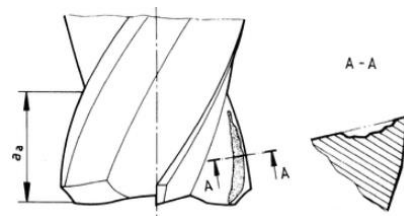
A kopások alábbi fajtáit különböztetjük meg:

A **hátkopás (VB)** mértékétől függ a megmunkálási folyamatban használt szerszám élettartama, amely a 17. ábrán megfigyelhető. Mivel a forgácsoló szerszám hátfelülete súrolja a munkadarab anyagát, a megmunkált munkadarab felületi érdessége elsősorban a hátkopás mértékétől függ [6, pp. 52-53].



17. ábra: Hátkopás végmaró szerszámon (ISO 8688-2:1989) [30]

A **kráterkopás (KT)** a szerszám homlokfelületén jön létre a lefutó forgács miatt, melynek helye a 18. ábrán megtekinthető. Nagyobb forgácsolási sebesség és előtolás nagyobb kráterkopáshoz vezet. Abban az esetben, ha a kráterkopás pozíciója közel esik a forgácsolóélhez, akkor az a szerszámra veszélyt jelent, ugyanis a kráter kiszélesedével, kimélyülésével szerszámtörést okozhat. Ebben az esetben a szerszám élettartamát a kráter kopásával értékelik. Általában a kráter pozíciója főforgácsolóéllal párhuzamosan helyezkedik el. A kráter szélessége többnyire megegyezik a forgácsolásban résztvevő élhosszal [3] [6, pp. 52-53].



18. ábra: Kráterkopás végmaró szerszámon (ISO 8688-2:1989) [30]

Továbbiakban még több kopás típust is megkülönböztethetünk:

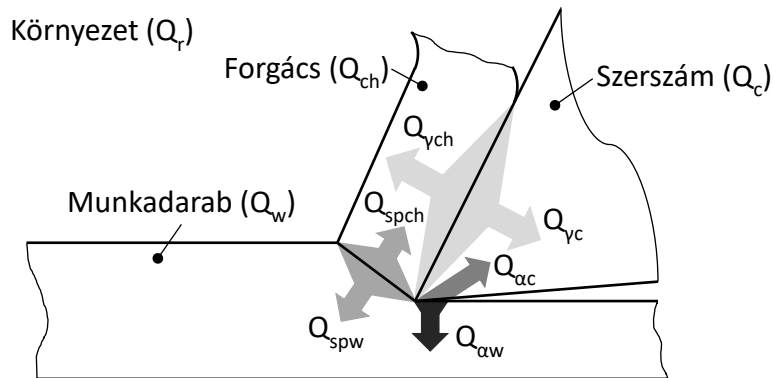
A **csúcskopás** a forgácsoló szerszám csúcsánál alakul ki. Többnyire a geometriai kialakítás és kedvezőtlen hőelvezetési lehetőségek a szerszámcsúcs termikus kifáradásához, esetleges kicsorbulásához vezetnek. Ha a szerszám csúcsa fontos szerepet játszik a forgácsolás közben, akkor a kopás növekedésének mértékével a munkadarab felületi minősége romlani fog. [6, pp. 52-53]

A **szélkopás** a szerszám és a munkadarab közvetlen érintkezése miatt alakul ki. A kiváltó ok általában a munkadarab felületén lévő oxidáció, vagy egyéb kémiai reakció. Ebben az esetben a munkadarab felülete keményebb, mint a munkadarab belső részei. Kivételes esetekben előfordulhat még az *él kitöredezése, bemetsződése, csorbulása*, vagy hősokk általi *repedés, mechanikus kifáradás, élrátét, törés* [3] [6, pp. 52-53].

3.3.2 Keménymegmunkálás során fellépő hőmérséklet

A forgácsolási hőmérséklet alapvető fontosságú ezeknél az eljárásoknál, de ezt a marási művelet során nehéz mérni, ezért a végelem modellezés és szimuláció (*FEM/VEM*) vizsgálat ilyen körülmények között jó alternatív eszköz a kemény marás alatt fellépő hőmérséklet-eloszlás kutatására. Továbbá ennek segítségével tanulmányozható az elérhető felületi érdesség, maradék feszültségek, az anyag mikrostruktúrája, a szerszám viselkedése és az élettartama [6, pp. 143-172] [30].

A 19. ábrán ábrázolt a forgácsolás során befektetett energia nagy részének hővé alakulása, amely a munkadarab rugalmas és képlékeny alakváltozása a forgácstőben (Q_{sp}), a homlokfelület (Q_γ) és a hátfelület súrlódásából (Q_α) keletkezik és a forgácsba (Q_{ch}) (~75%), a szerszámba (Q_c) (~25%), a munkadarabba (Q_w) (~4%) és a környezetbe (Q_r) (~1%) távozik a keletkezési helyről [30].



19. ábra: Forgácsolás során kialakuló hőforrások és hőáramok [30]

A kínai Shandong Egyetem kutatói Qing Zhang és Song Zhang (2017) végelem módszer használatával vizsgálták a hőmérsékletváltozásokat forgácsolás során és az alábbi eredményekre jutottak [30]:

- A forgácsolási hőmérséklet növekszik a forgácsolási sebesség növelésével.
- A forgácsolási hőmérséklet és a forgácsolási erők jelentősen növekednek az előtolás növelésével.
- A forgácsolási sebességnek a forgácsolási erőkre gyakorolt hatása nem jelentős.

A végelem módszer használatánál meg kell említeni a vizsgálatok hátrányait [6]:

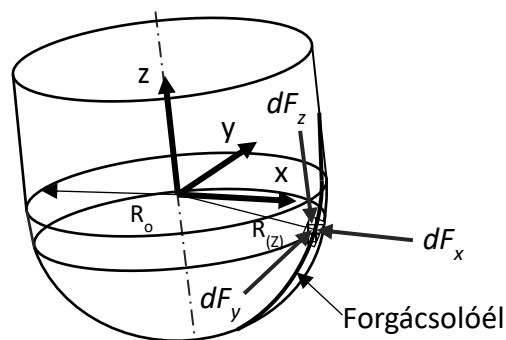
- Pontosabb eredmények eléréséhez a határfeltételek mennyiségét növelni kell, de ezekkel együtt a számítási idők is növekednek.
- Nem minden esetben lehet a valóságnak megfelelő paramétereket megadni.
- Az eredmények validálása nehéz feladat, ugyanis kellőképpen meg kell győződni, hogy minden bemeneti paraméter megfelelő módon van definiálva.

3.3.3 Keménymegmunkálás során fellépő erőhatások

A forgácsolási erők számításához Budak H. és munkatársai (1998) által bevezetett elméletet kiterjesztették a gömbvégű marási folyamatra. Az elmélet szerint feltételezzük, hogy a forgácsolóél éles, ezért az élerőket nem vesszük figyelembe [31] [32].

A kemény megmunkálási folyamat sajátos forgácsolási körülményeinek és az alkalmazott forgácsoló szerszámok összetett mikrogeometriai jellemzőinek köszönhetően a folyamatnak eltérő viselkedést kell eredményezniük a lágymarással szemben, beleértve a folyamat mechanikáját is. Így az erő alkotórészeinek és a köztük lévő viszonyoknak különbözniük kell a lágy anyagok megmunkálásakor kapott értékektől. A forgácsolási erők drasztikusan növekednek a 45 HRC-nél magasabb keménységű anyagok megmunkálásakor *(erre az értékre gyakran a keménymegmunkálások alsó határaként hivatkoznak)*. A szerszámok rádiuszának (R_0) növekedése miatt abszolút stabil és merev folyamatot kell biztosítani. Ezt a követelményt különösen akkor kell betartani, ha szuperkemény és összetett geometriájú szerszámokat használnak. A mikroötvöztött alapanyagok megmunkálása kisebb forgácsolási erőkkel jár, mint más alkalmazott hőkezelések után [6, pp. 91-95].

A gömbvégű CBN marószerszámoknál a legnagyobb erőket radiális erővel (F_x), a minél nagyobb negatív homlokszöggel lehet elérni, mivel intenzívebbé teszi a forgácsleválasztást, de a súrlódási erőkomponenst növeli. A legkisebb erőket ezeknél a szerszámoknál letört vágóélekkel regisztráltak, ha nagyobb előtolási sebességet alkalmaztak, ugyanis a letört forgácsolóél előtolásának növelése stabilabb forgácsolási folyamatot eredményez. Továbbá a nagyobb fogásmélység is nagyobb fellépő erővel jár. Ezzel szemben a forgácsolási sebesség elhanyagolható mértékben befolyásolta az erőket. Azonban a $15^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ tartományban a vezetősög hatása az erőkre alacsony, míg $\alpha = 0^\circ$ esetén a legnagyobb. A tengely irányú erő (F_z) a megmunkálás idejével kis mértékben növekszik. A legkisebb erőket az érintő irányú előtoló erővel (F_y) mérték. A leírt helyi forgácsoló erőket a 20. ábra szemlélteti [6, pp. 92-95] [33]:



20. ábra: Helyi forgácsoló erők ábrázolása [33]

3.4 Keménymegmunkálás forgácsolási paraméterei

A megmunkálások során akadtak olyan paraméterek, amelyek nem katalógus érték szerint kellett meghatároznom, vagy a katalógusban megadott paramétereket ellenőriznem kellett. Ebben a fejezetben ezeknek a forgácsolási adatoknak a meghatározásához gyűjtöttem szakirodalmi forrásokat.

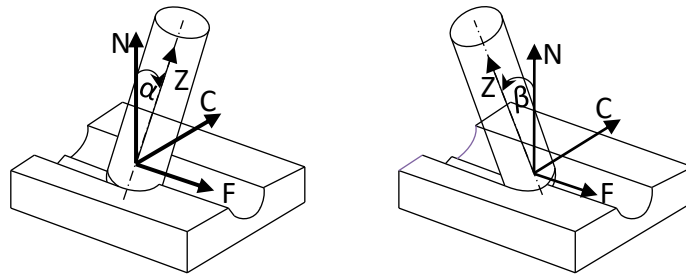
3.4.1 Vezető és dőlés szög

Még a mai modern CAD/CAM szoftverek segítségével is az összetett felületekkel rendelkező alkatrészek gyártása nagy kihívásokat jelent, mint például a szerszám hozzáférhetősége és a kontúr pontos lekövetése szempontjából. Az öttengelyes megmunkálás sokkal jobb hozzáférhetőséget biztosít a megnövekedett szerszámorientációs képességgel, mint a háromtengelyes megmunkálás. Az öttengelyes marás azonban a bonyolult folyamatgeometria és mechanika miatt extra nehézségekkel jár. Az előtolás irányára merőleges és/vagy az előtolás irányába eső döntési szög meghatározza a forgácsolószerszám tájolását és befolyásolja a folyamat mechanikáját és dinamikáját. A nem megfelelő szerszámorientáció csökkenti a termelékenységet és a munkadarab minőségét is ronthatja, csökkenti a szerszám élettartamot a helyi forgácsvastagság változása és nagyobb forgácsolási erők miatt. Éppen ezért nagyon fontos a szögek meghatározása az öttengelyes megmunkálásoknál. Az előtolási és a forgácsolási sebességgel szemben kevésbé ismert a hatása a döntési szögeknek és megbecsülni sem egyszerű feladat [33].

Öttengelyes marási műveletek geometriája modellezhető három koordináta rendszert használva. Az első egy rögzített koordináta-rendszer, az MCS, amelyet a szerszámgép X, Y és Z tengelyei alkotnak. A második koordináta-rendszer a folyamat koordinátarendszer, FCN, amely előtolás (F), keresztelőtolás (C) és felületi normál (N) tengelyekből áll. Végül a TCS az eszközkoordinátarendszer, amely az FCN elforgatott formája. A TCS-ben a szerszám tengelye ennek a koordináta-rendszernek a (z) tengelye, ahol az (x) és (y) tengely a transzverzális irányok a szerszámmal esnek egybe [33].

Öttengelyes marásnál a szerszám tájolását a bedöntött szögek által határozzák meg, amelyeket az alábbi 20. ábra szerint az adott felületelem normál tengelyéhez (N) mérnek. A vezetőszög (α), vagy az előtolás irányába eső döntési szög a szerszám tengelyének elfordulása a (C) tengely körül, a dőlésszög (β), vagy az előtolás irányára merőleges döntési szög pedig az (F) tengely körül forgat [33].

Az FCN és a TCS koordinátarendszert a 21. ábra illusztrálja:



21. ábra: FCN és TCS koordinátarendszerek [33]

Ahhoz, hogy minél jobb felületi minőséget tudjunk előállítani stabil kapcsolatra van szükség és a lehető legkevesebb rezgést kell a mozgások során kelteni. A legstabilabb állapotot a szerszám a munkadarabra merőlegesen érné el, mint háromtengelyes marás esetén. Sajnos ez nem kivitelezhető szabadfelületek marásánál, mivel megjelenik a csúcs hatás jelensége. A csúcs hatás jelenség során a szerszám csúcspontja is forgácsolási zónába kerül, így az effektív szerszám átmérő nulla mm-re csökken [32]. Emiatt érdemes az öttengelyes megmunkálást választani és kihasználni a szerszámbedöntés adta lehetőségeket. Viszont a szerszám dőlésszögét ajánlatos bizonyos keretek között tartani, mert a nagy bedöntés nagyobb instabilitási problémákat eredményez [33].

A vezető és a dőlési szögek különböző tényezőkre, például a szerszám csúcsának a munkadarabbal való érintkezésére, az érdességmagasságra, a forgácsolási erőkre, a nyomatokra, az alakhibákra és a stabilitásra vannak hatással, ezáltal többek között a felületi érdességre és a költségekre egyaránt. A dőlés szög hatása a forgácsolási erőkre nagyobb, mint a vezetőszögé. Háromtengelyes marás esetében a forgácsolás során fellépő erők a döntési szögek hiányában, akár háromszorosak is lehetnek az öttengelyes marással szemben. A csúcsérintkezés csak akkor fordulhat elő, ha a vezetőszög negatív, ezért a negatív vezetősi szögeket lehetőség szerint kerülni kell. Bizonyos esetekben azonban a szerszám hozzáférhetősége miatt negatív vezetőszöget kell használni, ekkor figyelni kell a kritikus fogásvételre. A fogásmélység (a) a szerszám legalacsonyabb pontja és a munkadarab felső felülete közötti távolság a normál tengely (N) irányában [33] [32].

3.4.2 Axiális fogásvétel

A szerszámgyártó katalógus értékei között fellelhető ennek a paraméternek az értéke, de negatív, vagy nulla vezetőszög hatására, ha a szerszám tolva halad előre (azaz negatív a vezetőszög), akkor egy kritikus fogásmélységet elérve már a szerszámcsúcs is részt fog venni a forgácsolásban, ezáltal többlet erőket és rezgéseket generál a forgácsolás során. A kritikus fogásmélységet a következő (1) képlettel számíthatjuk [33]:

$$a_{p \text{ krit.}} = R_0 \cdot (1 - \cos \alpha \cdot \cos \beta) \quad (1)$$

Ha az axiális fogásmélység (a_p) nagyobb, mint a kritikus fogásmélység (a_{krit}) akkor értelemszerűen nem kell figyelembe venni a továbbiakban a kritikus fogásmélységet. Szabadon csökkenthető a fogásmélység, de a fogásmélység növelése és a szögek módosításánál már szintén érdemes ellenőrizni a képlet alapján [33].

3.4.3 Radiális fogásvétel

A radiális fogásvétel (a_e) nagy mértékben befolyásolja a felület minőségét az előtolás irányára merőleges irányban. A felület mérőszámát a szerszám geometria miatt a két egymást követő szerszámútvonal között maradó anyagmennyiség magassága (h_s) fogja meghatározni. A háromtengelyes marásnál a felületi érdesség többnyire a szerszám sugarától (R_0) és a lépésköztől függ. Az öttengelyes marásnál azonban a helyes radiális fogásvétel megválasztását befolyásolhatja a dőlés szög is, míg a vezetősög nincs rá hatással, de mindig kisebb, mint a kritikus radiális fogásmélység ($a_{e\ krit.}$) [30].

Ha a radiális fogásvétel kisebb, mint az alábbi (2) összefüggés szerint kiszámolt magasság (22. a. ábra), akkor az egymást követő szerszám pályák kizárólag a gömbvégű maró gömb részével lesznek kivitelezve [33].

$$a_e \leq 2 \cdot R_0 \cdot \cos \alpha = a_{e\ krit.} \quad (2)$$

Ha a radiális fogásvétel meghaladja (2) összefüggés szerinti értéket (22. b. ábra), akkor az egymást követő szerszám pályák oly módon követik egymást, hogy az érdességi magasságot a szerszám gömb része és a henger palást része is egyaránt fogja kialakítani a (3) összefüggés szerint [33]:

$$a_e > 2 \cdot R_0 \cdot \cos \alpha = a_{e\ krit.} \quad (3)$$

Az első esetben az érdességi magasság csak a szerszám sugarától és a radiális fogásvétel nagyságától függ. A második esetben azonban a dőlési szög is befolyásolja a kapott felületi érdességet. Ezért minden esetben figyelembe kell venni a következő (4) követelményeket [33]:

$$h_s = \begin{cases} R_0 + N_i & , ha\ a_e \leq 2 \cdot R_0 \cdot \cos \alpha \\ R_0 + N_s & , ha\ a_e > 2 \cdot R_0 \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

, ahol N_i a szerszám gömbvégeinek középpontjából mutató gömb-gömb metszéspontba mutató vektor, N_s a szerszám gömbvégeinek középpontjából mutató gömb-henger metszéspontba mutató vektor [33].

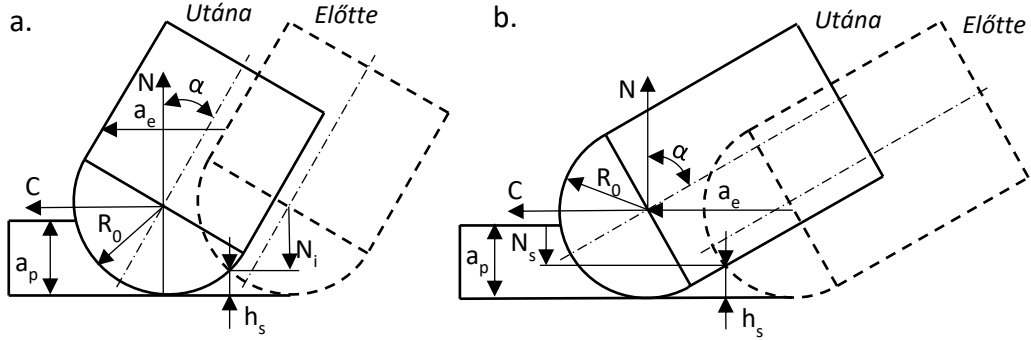
A szerszám gömbvégeinek középpontjából mutató gömb-gömb metszéspontba mutató vektor az alábbi (5) képlettel számítható [33]:

$$N_i = -\sqrt{R_0^2 - \frac{a_e^2}{4}} \quad (5)$$

A szerszám gömbvégének középpontjából mutató gömb-henger metszéspontba mutató vektor (6) képlettel számítható [33]:

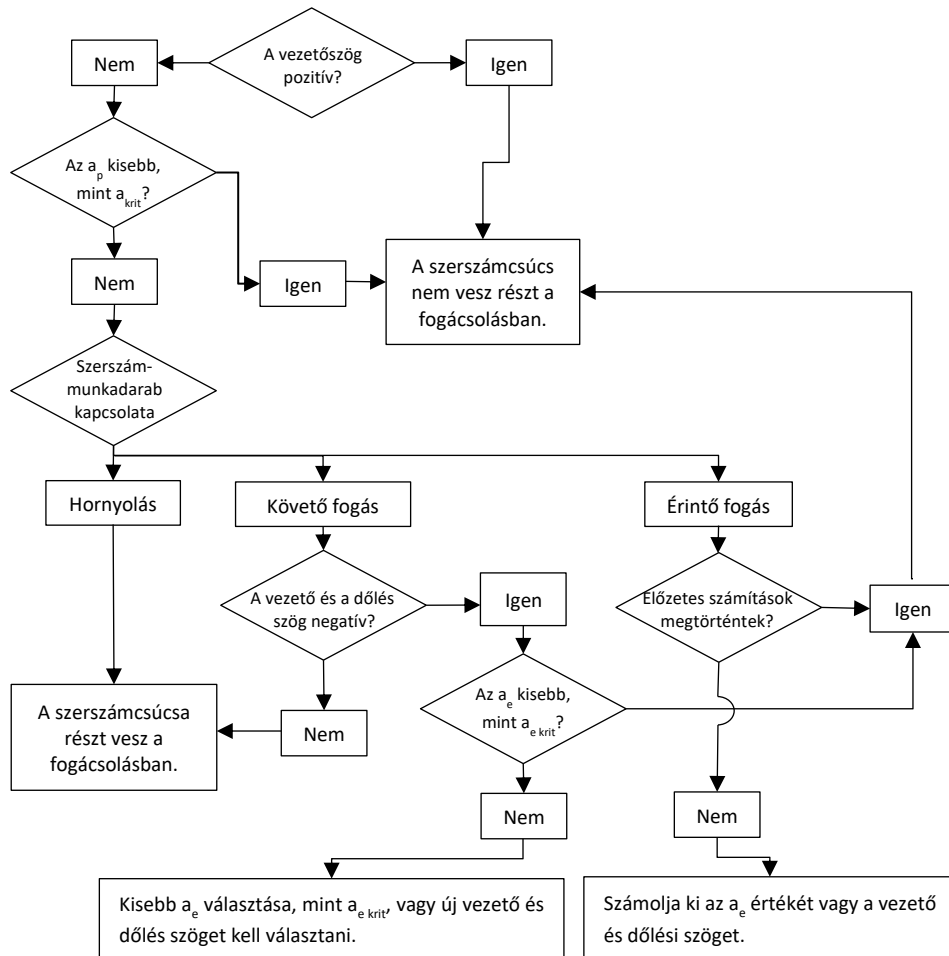
$$N_s = -\sqrt{R_0^2 - (R_0 - a_e \cdot \cos \alpha)^2} \cdot \cos \alpha - (R_0 - s \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

A második esetben a dőlésszög növelésével nagyobb radiális fogásvételi értékek használhatók a megfelelő felületi érdesség mellett [33].



22. ábra: Érdességi profil alakulása a dőlés szög és radiális fogásvétel arányában [33]

Ezt a fejezetet összefoglalva a 23. ábra szerint lehet elkerülni a szerszám és a munkadarab kontaktját [33]:



23. ábra: A szerszámcsőcs és munkadarab érintkezésének elkerülése [33]

4 KÍSÉRLETTERVEZÉS

A kísérleteket a már említett **Taguchi-módszert alkalmazva** végeztem el. A végleges kísérletterv meghatározása előtt elvégeztem az előkísérleteket. A módszer alapján megpróbáltam meghatározni azokat a paramétereket, amelyek az irodalmi források alapján a legnagyobb befolyással lehetnek a megmunkált felületre.

Ezen paraméterek közé tartozik a vezetősög (α), fogankénti előtolás (f_z) és a forgácsolási sebesség (v_c). Természetesen a **radiális fogásvétel** (a_e) és a **tangenciális fogásvétel** (a_p) változása is hatással van rá, de azért választottam ezen értékeket **állandóra**, mert a katalógus értéknél így is kisebb tangenciális fogásvételt alkalmazok és a számításaim alapján egyik stratégiánál sem forgácsol a szerszám csúcsa. A radiális fogásvétel változtatása többnyire a későbbiekben ismertetett előkísérletek során a számított felületi érdességi értékeket hozta, így inkább a többi paraméter változásának hatása keltette fel érdeklődésem.

A **vezetősög** lépésközének meghatározásában a már bemutatott irodalmi források segítettek, így 5°-ként határoztam meg 5°/10°/15°/20° értékekre. Az előkísérletek során 20°-kal is megmunkáltam a felületet, de a szerszámél kicsorbulásához vezetett. Végül szűkítettem az előkísérletek alapján 12.5°/15°/17.5° tartományba.

A **fogankénti előtolást** a **katalógus értéktől +/-20%** eltérésre választottam meg, amelynek inkább gyakorlati oka van, ugyanis így egy posztolt programmal az „Override” kapcsoló segítségével min. és max. érték is könnyen beállítható.

A **forgácsolási sebesség** lépésközének meghatározásánál sok lehetőségem nem volt, mert a katalógus értékben megadott értéktől a magas fordulatszám miatt nem sokkal tudtam eltérni az előkísérleteknél a szerszámgép maximális fordulatszáma miatt, mint +20%, ezért az egyszerűség kedvéért itt is a **katalógus értéknek +/-20%** eltérésére választottam meg az értékeket a katalógus értékhez képest, de a kísérletek során megoldottam más géppel.

Úgy tűnhet, hogy túlságosan is támaszkodom katalógus értékekre, amelyek nagyon sok esetben eltérhetnek a legjobb paraméterektől, de eddigi tapasztalataim alapján jó kiindulási alapnak szolgálhatnak. *(Végül többnyire beváltak a paraméterek értékei.)*

A marás során alkalmaztam nagyolást, elősimítást és simítást. Az elősimításra azért volt szükség, mert a nagyolásból maradt érdességi magasságok nem megfelelő módon alakították volna a felületi érdességet az irodalmi források szerint. A már felsorolt paramétereket csak a **simítás során változtattam**, ezzel biztosítva az állandó feltételeket a megbízható eredményekhez. A Taguchi-módszer szerint határoztam meg **L9(3³)** kísérlettervet a simítási művelethez keményfém (CC) és köbös bór-nitrid (CBN) szerszámok esetén, amit az alábbi 2. táblázat foglalja össze, amelyben a faktorok száma: 3 és a kísérletek száma: 9 darab.

2. táblázat: Kísérletterv a simítási művelethez

A kísérletek sorszáma	1. Paraméter CC-CBN $\alpha = (^\circ)$	2. Paraméter CC-CBN $f_z = (\text{mm/fog})$	3. Paraméter CC $v_c = (\text{m/min})$	3. Paraméter CBN $v_c = (\text{m/min})$
1. Kísérlet	12.5	0.028	164	315
2. Kísérlet	12.5	0.035	205	420
3. Kísérlet	12.5	0.042	246	525
4. Kísérlet	15	0.028	205	420
5. Kísérlet	15	0.035	246	525
6. Kísérlet	15	0.042	164	315
7. Kísérlet	17.5	0.028	246	525
8. Kísérlet	17.5	0.035	164	315
9. Kísérlet	17.5	0.042	205	420

Az előkísérletek során bebizonyosodott, hogy a 15° -os vezetőszög közelében érdemes vizsgálni, ezért szűkítettem a kísérletek során kisebbre a vezetőszög vizsgált határait.

4.1 Vizsgálathoz használt gépek

A dolgozatom elkészítése során használt megmunkológépek és mérőberendezések adatait az 1. számú melléklet részeként csatoltam.

Az előkísérleteket – erőmérés nélkül – a *HILTI Szerszám Kft.*-nél végeztem el **DMG DMU 75** típusú szimultán öt tengelyes (XYZAC) marógépen. A munkadarabokat és a szerszámokat egy **VWR Ultrasonic Cleaner USC-TH** típusú ultrahangos tisztító berendezésben tisztítottam meg. Az előkísérletek alkalmával egy **Leica M205A** típusú sztereó mikroszkóppal készítettem felvételeket a munkadarabokról és a szerszámokról.

Az előkísérletek során kiderült, hogy a lehető legpontosabb felületi érdesség mérés megvalósítása érdekében egy speciális készüléket kell készítenem. A készüléket egy második generációs **Mark Two** 3D nyomtatógép segítségével, teljesen saját tervezés alapján tettem kézzelfoghatóvá szintén a *HILTI Szerszám Kft.*-nél.

A kísérleteket – magasabb forgácsolási sebességgel – a nagyszombati székhelyű Szlovák Műszaki Egyetem Anyagtechnológiai Karán hajtottam végre egy **DMG HSC 105** típusú szimultán öt tengelyes (XYZBC) szerszámgépen. A szerszámok és szerszámtartók közötti zsugorkötést **Bilz ISG 3200-WK** berendezéssel hoztam létre.

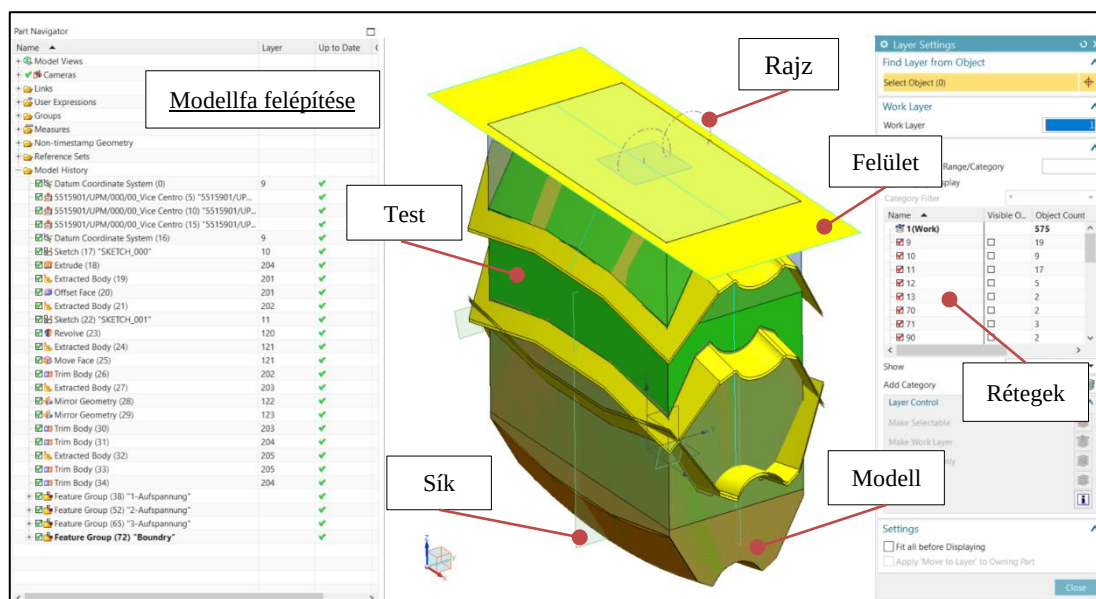
Az erőméréseket a *Neumann János Egyetemen* egy **NCT EmL-850D 5AX** típusú CNC megmunkálóközpont használatával hajtottam végre. Továbbá felületi érdesség méréseket végeztem egy **Mitutoyo C-3000** típusú felületi érdességmérő berendezéssel.

A Soproni Egyetemen Simonyi Károly Műszaki, Fatudományi és Művészeti Karán mikroszkópi felvételeket készítettem a megmunkált felületekről egy **MarSurf CM explorer** típusú konfokális mikroszkóp segítségével.

4.2 Vizsgálathoz használt munkadarabok

A megmunkálások során számos kelléket használtam a szabványos csavaroktól a speciális készülékekig, de ezek közül csak az általam tervezett és megvalósított két eszközt mutatom be. Az 1.számú melléklet részeként csatoltam a felsorolandó eszközzel kapcsolatos CAD (*Computer Aided Design*) dokumentációkat.

A kísérletekhez egy gyártás során használt hengerlőszerszám geometriáját alapul véve alkottam meg egy egyszerűbb munkadarabot *Siemens NX 12* elnevezésű PLM (*Product Lifecycle Management*) tervező szoftverben. Csak a számomra fontos és egyszerűbb felületek maradtak meg kisebb méretekkkel, így csökkentve a gyártási költségeket és a megmunkálási időket. A 24. ábrán a modell felépítése első ránézésre bonyolultnak bizonyulhat, ugyanis az előgyártmánytól egészen a kész munkadarabig magába foglalja, még a CAM-hez (*CAM, Computer Aided Manufacturing*) használt felületeket és testeket is, így kihasználva a szinkronmodellezés (*ST, Synchronous Technology*) által biztosított lehetőségeket. Ezt ún. rétegek (*Layer*) segítségével oldottam meg, amelyek ki/be kapcsolhatók a hozzájuk kapcsolt elemekkel, így tetszés szerint használhatók fel az általam kiválasztott felületek és testek.



24. ábra: A vizsgálathoz használt modell felépítése Siemens NX 12 szoftverben

A tervezési folyamat után kezdődött az előgyártmányok kialakítása. Alapanyagként újrahasznosítottam már az előző hengerlőszerszámok során megmaradt hulladék alapanyagokat. Így 15 próbadarabot tudtam kialakítani és 2 marási felületet határoztam meg rajtuk, ezért összesen 30 megmunkálására alkalmas felszín kaptam. Mivel a Taguchi-módszer alapján 9 kísérletet végeztem el külön keményfém és külön kőbős bór-nitrid

szerszámokkal, ezért további 6 munkadarabon tudtam előkészíleteket végezni. A darabolást lágymarások követték, majd egy hőkezelési folyamat. A hőkezelés után a lehető legpontosabb befogást a keménymaráshoz a síkfelületek köszörülése biztosította. A keménymegmunkálás után pedig a vésők tartósításához használt speciális olajban konzerváltam a munkadarabokat.

4.3 Vizsgálathoz használt szerszámok

A megmunkálások során három típusú gömbvégű marószerszámot használtam. A marószerszámok adatait, geometriáját az 1. számú melléklet részeként csatoltam.

A hengerlőszerszám gyártásához és elújításához eddig használt keményfém szerszám:

Nagyolás, simítás és elősimítás művelet:

BZL2D040R20L046S06M

A megmunkáláshoz használt TaeguTec Hungary Kft. által biztosított szerszámok:

Nagyolás művelet:

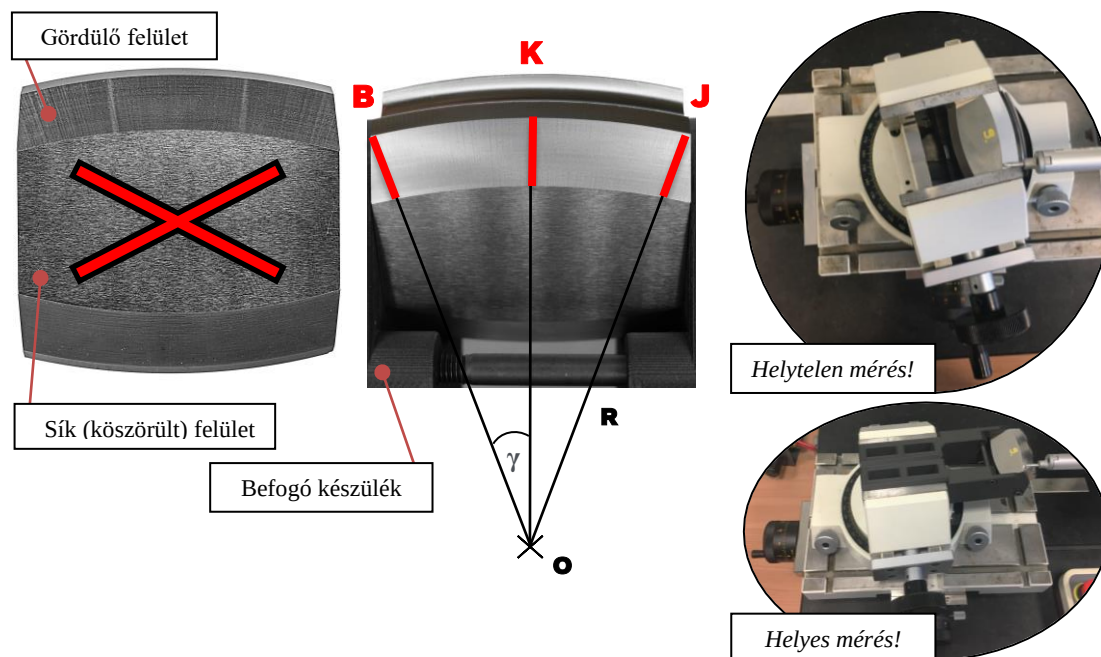
TNF080-12M

Elősimítás és simítás művelet:

HSB 2CBN 2040-8.0

4.4 Vizsgálathoz használt speciális befogó készülék

A 25. ábrán ábrázoltam a felületi érdesség mérés nehézségét, ami a vizsgált munkadarab geometriájából adódik. Mivel csak az „X”-el jelölt felület sík és a hengerléshez szükséges a legördülési felületet munkáltam meg, ezért kellett megtalálnom azt a módszert, amellyel a felületi érdességet vízszintes szakaszon tudom mérni, ezért szükséges volt egy speciális munkadarab befogókészülékre.

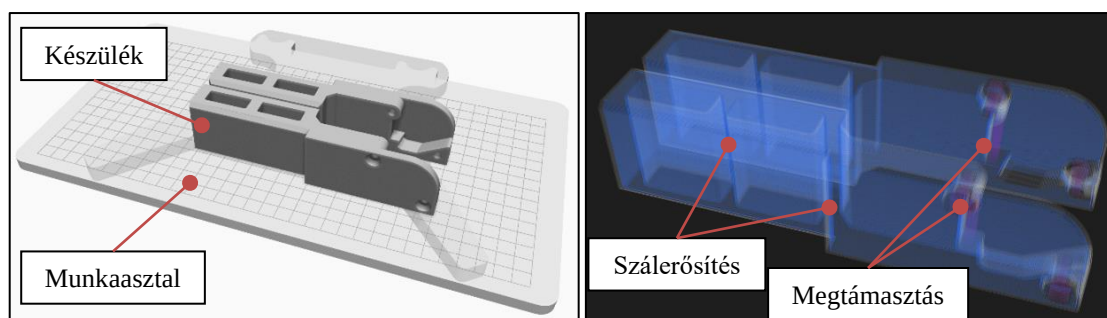


25. ábra: Mérési elv bemutatása és helytelen/helyes alkalmazásával

Ezt úgy valósítottam meg, hogy az „R” legördülési sugárral megegyező hosszal a mérősatu közepétől eltoltam a munkadarabot, ezáltal ha a mérősatut a tengelye körül „O” pontban bizonyos „ γ ” szöggel elfordítottam, akkor a gördülési felületen ahova került az érdességmérő berendezés tűje azon a felületen vízszintesen és a megmunkált felület textúrájára merőleges irányban tudtam mérni. A méréseket B-K-J (bal-közép-jobb) helyeken végeztem. A mérések során a mérősatut $+10^\circ/0^\circ/-10^\circ$ szögekkel fordítottam el, ezáltal a munkadarabok szélein és közepén is tudtam mérni a felületi érdességi jellemzőket.

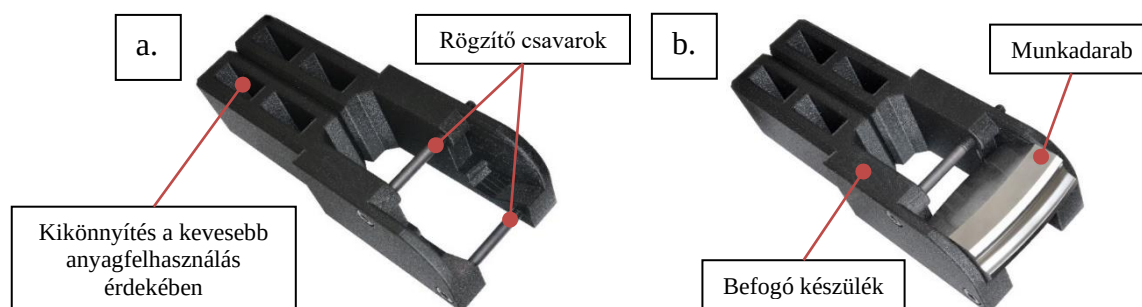
Ha készülék nélkül mértem volna a mérősatuban, akkor értelemszerűen mérési hibát vétettem volna a geometriából adódóan. A későbbiekben sztereómikroszkópi és konfokális mikroszkópi felvételek során is jobb minőségű felvételeket tudtam készíteni ezáltal.

A manapság felkapott eljárások közé tartozó a 3D nyomtatással öltött fizikai valóságot az általam tervezett eszköz. A modellezési feladatokat a már említett Siemens NX 12 szoftverrel végeztem, majd a kész modellt a 26. ábrán látható programba importáltam, amely a 3D nyomtató saját programja, emellett még a sötét kékkel jelölt részekben szálerősítést is alkalmaztam. Azért választottam ezt az eljárást, mert költséghatékonyabb megoldást biztosított, mintha forgácsolni kellett volna, de forgácsolással ugyanezt a geometriát nehezen tudtam volna kimunkálni és kompromisszumokat kellett volna kötnöm a kialakítással kapcsolatban.



26. ábra: A befogókészülék elhelyezése (a.) és kialakítása (b.)

A 27. ábrán megtekinthető a befogó készülék részei munkadarab nélkül és munkadarabbal:

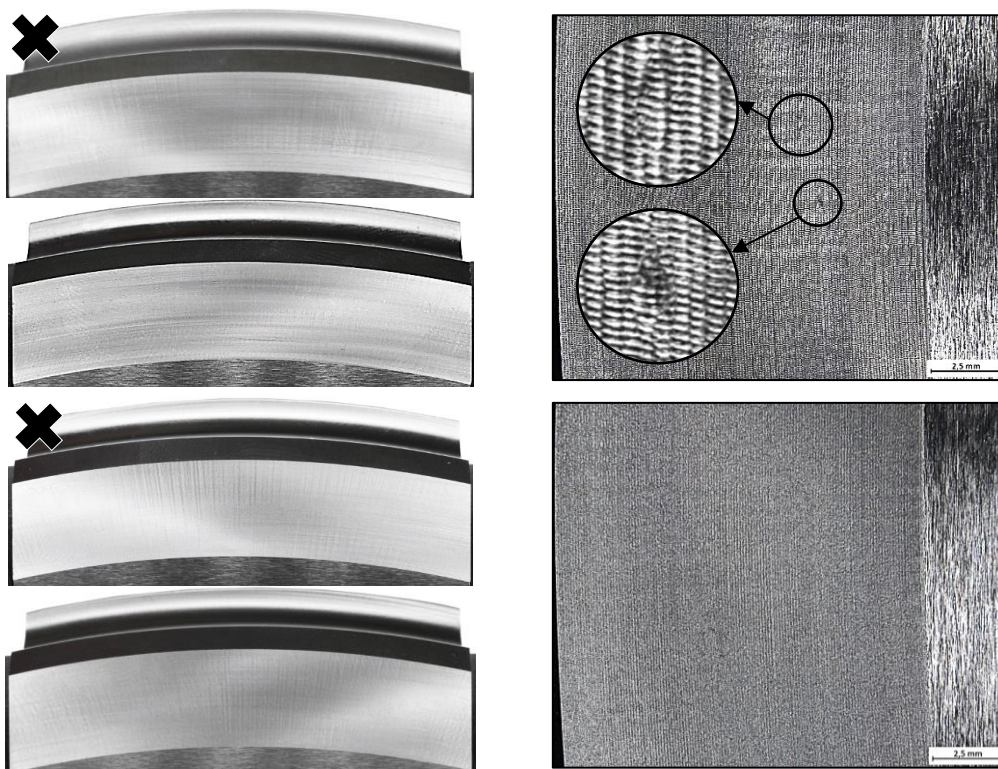


27. ábra: A befogókészülék (a.) és a befogókészülékbe befogott munkadarab (b.)

5 ELŐKÍSÉRLETEK

Az előkísérletek során számos tapasztalatot szereztem az öttengelyes megmunkálás területén, amelyekkel már magabiztosabban álltam neki a későbbiekben a további vizsgálatoknak. A már bemutatott katalógus értékek felhasználásával végeztem a marásokat, ugyanis az előkísérletek során próbáltam a kísérletekhez legközelebb eső technológiai paraméterekkel dolgozni, így kiszűrve azokat a hibákat, amelyek a kísérletek során véthettem volna. Az alábbi következtetésekre jutottam az előkísérletek által:

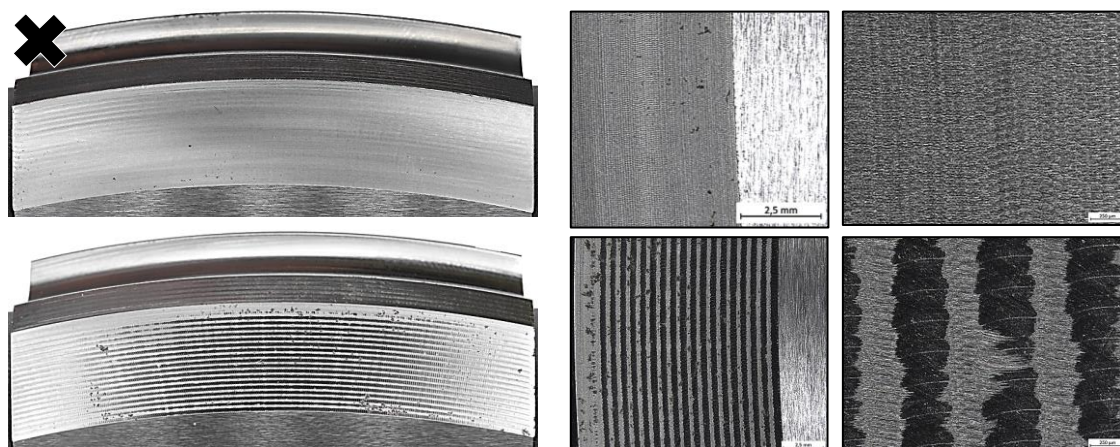
- Kezdetben **negatív vezetősöggel** munkáltam meg a felületet a rendszer merevségének biztosítása érdekében, azonban a 28. ábrán láthatóan nem ez a megfelelő módszer, ugyanis **felületi hibákat okozott**, mivel a szerszám eltávolodott a felülettől marás közben. Próbáltam kiküszöbölni a vezetősög, az előtolás és a kinyúlás csökkentésével, de nem hozta meg a várva várt eredményt. Ezért a továbbiakban pozitív vezetősöggel dolgoztam az előkísérletek és a kísérletek során.



28. ábra: A negatív (a.) és pozitív (b.) vezetősög hatása a felület minőségére

- A szakirodalmi források kifejezetten nem ajánlották a kemény marási művelethez a **hűtést**, vagy csak minimálkenés formájában, de mégis megpróbáltam. Már a nagyolás is a **szerszámél** szabad szemmel jól látható módon nagy mértékű **kicsorbulás**ához vezetett. Mire a 29. ábrán látható módon a szerszámgép forgóasztala beforgatta 180°-kal a

munkadarabot, addigra szerszámélek tönkrementek, így a kísérletek során a legrosszabb felületi minőséget sikerült elérni.



29. ábra: Hűtés hatása a keménymarásra a felület minőségére keménymarásnál

- Azt tapasztaltam, hogy a szerszámgép „C” tengelyének 180° befordítása után átlagban min. 0.05-0.1 μm -rel rosszabb felületi érdesség mérhető, amely hiba a 30. ábrán a munkadarab textúráján szabad szemmel is látszik:



30. ábra: A „C” tengely 180°-os forgatásának hatása a felület minőségére

- A számított elméleti felületi érdességek értékei (Ra_{ne}) a nagyolás ($Ra_{ne} = Ra_{nv} = 1,25 \mu\text{m}$) és az elősimítás ($Ra_{ee} = Ra_{ev} = 0.5 \mu\text{m}$) műveleténél szinte megegyeztek a valóságos megmunkált felületi értékekkel (Ra_v). A simítás ($Ra_{se} = 0.1 \mu\text{m} < Ra_{ev} = 0.34 \mu\text{m}$) során viszont ez nem mondható el, ugyanis még a szerszámpálya besűrítésével sem sikerült elérni, csupán megközelíteni az elméleti értéket. Azonban a gépgyártója az elérhető felületi érdességet ($Ra_{szg} < 0.4 \mu\text{m}$) szimultán öttengelyes marás esetén az általam elért eredménynél jobbat nem garantál, így egyértelműen a szerszámgép kinematikája fontos szerepet játszik a megmunkálás során. Az előkísérletek során a legjobbként felületi minőségként a 0.34 μm átlagos felületi érdességet értem el. Már ezzel jobb felületi minőséget értem el, mint ha háromtengelyes megmunkálással végeztem volna a

kísérleteket, mivel a háromtengelyes megmunkálással $0,73\ \mu\text{m}$ átlagos felületi érdességet tudtam elérni.

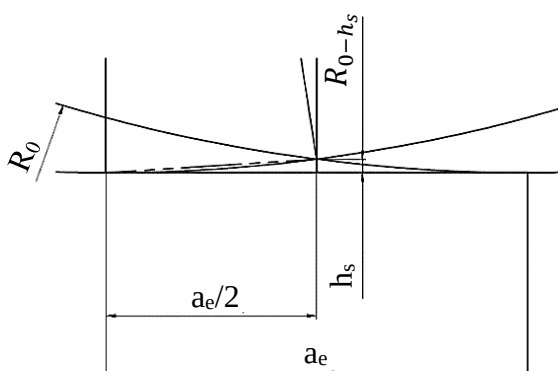
A számítások során az általam választott R_a felületi érdességet DIN4763-60 szabványnak megfelelően átváltva az R_z tábl. értéket feleltettem meg az „ h_s ” borda magasságnak, amelyet kivonva a szerszám R_0 rádiuszából a (7) képlet alapján a csökkentett sugár értékét kaptam:

$$R_{0-h_s} = R_0 - \frac{R_z \text{ tábl.}}{1000} \quad (7)$$

Továbbá a „ R_{0-z} ” értéket, a szerszám rádiusza és a bordamagasság különbségét felhasználva a következő (8) képlet segítségével kaptam meg az elérendő R_a felületi érdességhez beállítandó radiális fogásvétel értékét:

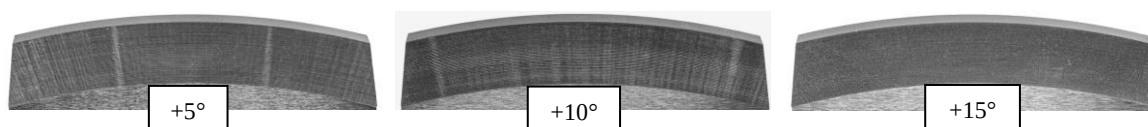
$$a_e = \sqrt{R_0^2 - R_{0-z}^2} \quad (8)$$

A 31. ábrán a már említett összefüggéseket ábrázoltam az elérendő R_a felületi érdesség és a beállítandó a_e radiális fogásvétel között.



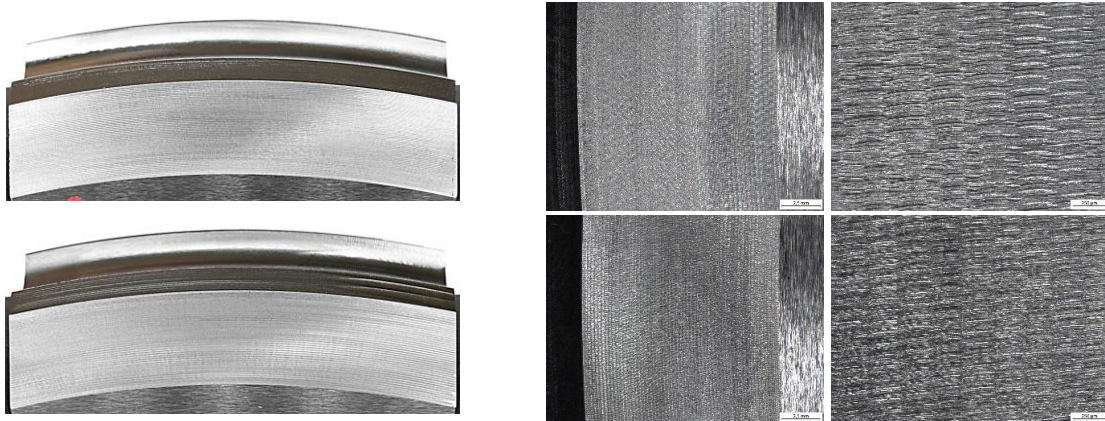
31. ábra: R_a felületi érdesség és a beállítandó a_e radiális fogásvétel közötti összefüggés

- Mivel a dőlési szöget a munkadarab geometriája miatt nem volt lehetőségem vizsgálni, ezért csak a vezetősög paraméterét változtattam meg. A felületi érdességen kívül a ciklusidőre volt nagy befolyással, ugyanis minden $+5^\circ$ után ~ 9 perccel növekedett a ciklus idő. Feltehetően a szerszámgép kinematikai mozgásai miatt. Ugyanezt az okot tartom annak háttérében is, hogy a megmunkált felületen a minél nagyobb beállított vezetősög után a munkadarab széleihez tartó jellegzetes minták jelentek meg, amelyek a felület minőségét a csíkok helyén negatív mértékben befolyásolták a 32. ábrán láthatóan:



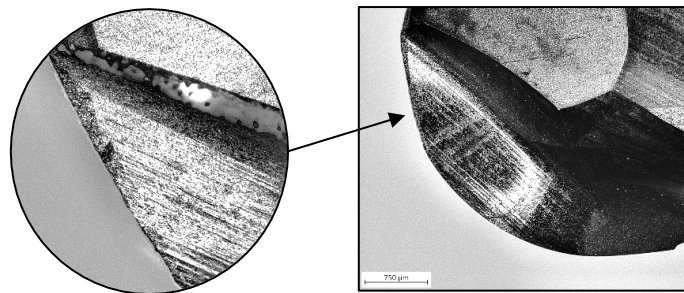
32. ábra: A vezetősög növelésének hatása a felület minőségére keménymarásnál

- Amikor $+20^\circ$ -os vezetőszöggel végeztem az előkísérletet, akkor már a nagyolásnál kicsorbult a szerszám éle és a munkadarab ugyanazon részénél a simítószerszám éle is követte a kicsorbulást az elősimításnál, ezért ennél a próbadarabnál a simítási műveletet már nem végeztem el, amely a 33. ábrán látható:



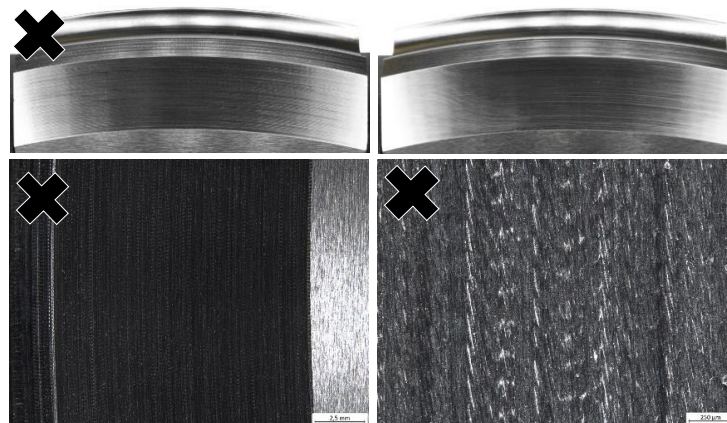
33. ábra: A $+20^\circ$ -os vezetőszög hatása a felület minőségére keménymarásnál

A 34. ábrán látható a fogásvételben résztvevő szerszámrész hiánya:



34. ábra: Kicsorbult szerszám éle az előkísérletek során $+20^\circ$ -os vezetőszögnél

- A 35. ábrán látható, hogy három tengely segítségével munkáltam az öt tengely helyett, de csak keményfém szerszámmal, mert nem szerettem volna a szerszám csúcsát és környékét kicsorbítani, ezáltal tönkre tenni egy köbös bór-nitrid szerszámot. Fényesebb a felülete, de a mérések alapján nem jobb, hiszen $R_a = 0.5 \mu\text{m}$ ebben az esetben.

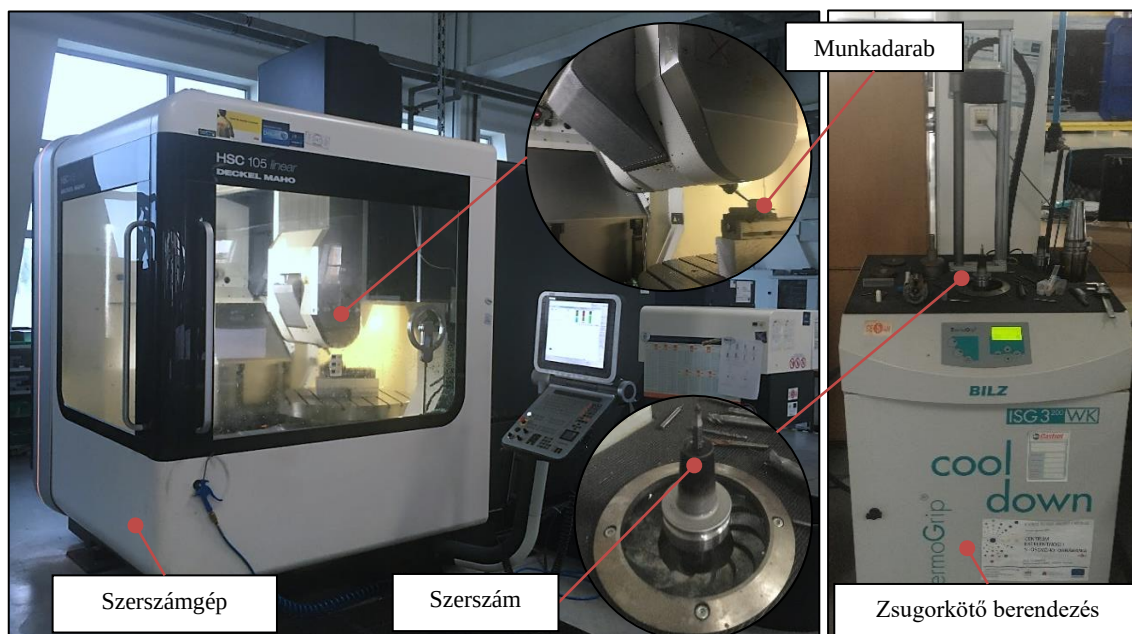


35. ábra: A három tengellyel marás hatása a felület minőségére keménymarásnál

6 KÍSÉRLETEK

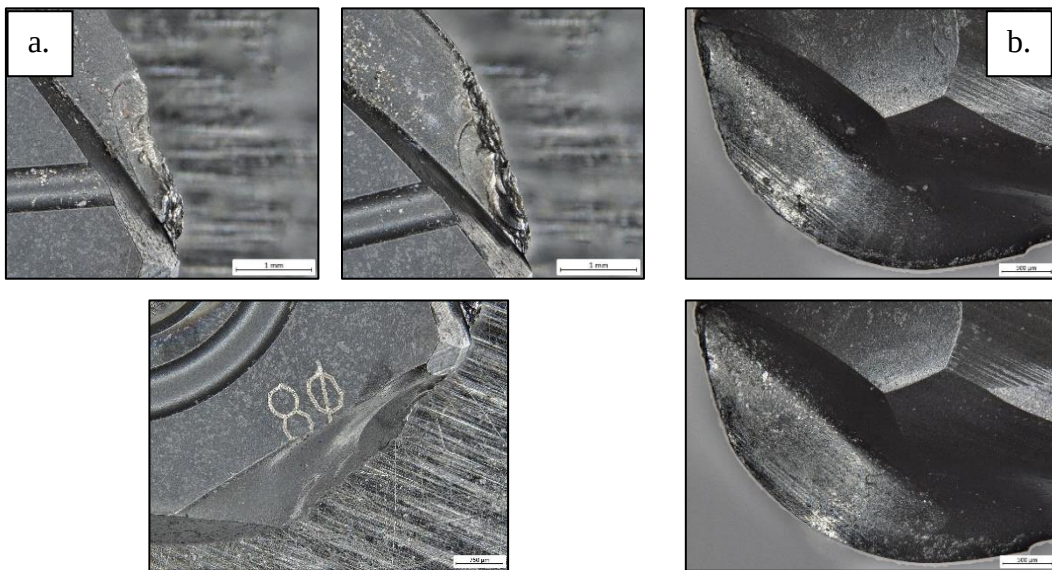
Az előkísérletek eredményei, irodalom kutatásom és eddigi tapasztalataim alapján nagyobb, mint 205 m/min forgácsolási sebesség felett folytattam kísérleteimet a továbbiakban, mert az előkísérletek során használt szerszámgép $n_{max.} = 20\,000\text{ 1/min}$ fordulatszáma alacsony a köbös bór-nitrid szerszámokhoz.

A nagyszombati székhelyű *Szlovák Műszaki Egyetemen Anyagtechnológia Karán* folytattam a megmunkálásokat, melynek helyszíne a 36. ábrán látható. Az előkísérletek és a kísérletek elvégzése során a két megmunkálógép kinematikája nem volt egyforma, de így nagyobb fordulatszámon és így nagyobb forgácsolási sebességgel (525 m/min) tudtam elvégezni a kísérleteket. További különbség volt, hogy nem hidraulikus, hanem zsugorkötéssel tudtam csak befogni a simító szerszámokat, de a nagyoló szerszámok továbbra is patronos befogással csatlakoztak.



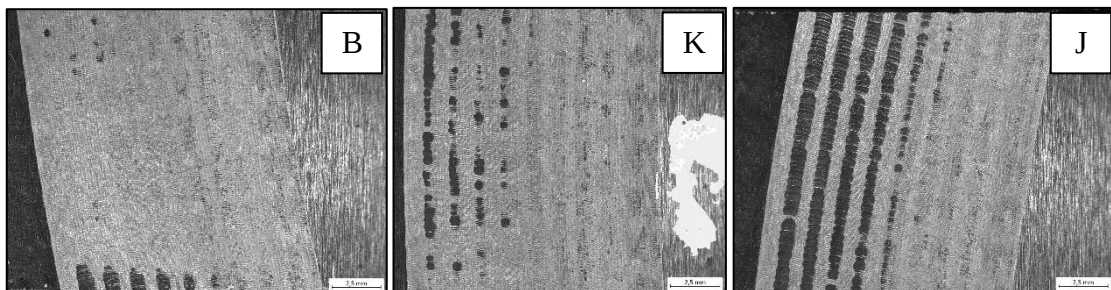
36. ábra: A felkészített munkaállomás a Szlovák Műszaki Egyetemen

A kísérletek során a köbös bór-nitrid szerszámok 2. Kísérlet során kitört a nagyoló szerszám éle, ami a 37. ábrán megfigyelhető. így rosszabb felületi minőséget értem el a simító szerszámmal is az elvártnál. A kiértékelésekre ez később hatással volt.



37. ábra: A CBN 2. Kísérletnél meghibásodott nagyoló (a.) és simító (b.) szerszámok

A köbös bór-nitrid szerszámos 2. Kísérlet során a szerszámmeghibásodása a 38. ábrán látható módon befolyásolta a felületi minőséget. A munkadarab jobb (J) oldalán kezdődik szerszámpálya a megmunkálás során, ahol a rezgések nagyobbak, majd a munkadarab (B) oldalára érve csökken, de a szerszámpálya végén az egyre kevesebb anyagmenyiség miatt ismét növekszik.



38. ábra: A CBN 2. Kísérletnél fellépő szerszámmeghibásodás hatása a felületre

7 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Tapasztalataim alapján egy nagyon komplex feladatot vállaltam el és igyekeztem a lehető legnagyobb területre kiterjedő, széleskörű munkát végezni a dolgozatom elkészítése során. Felhasználtam minden rendelkezésemre álló erőforrást, gondolok itt többek között az alapanyagokra, szerszámokra és a lehetőségekre.

7.1 Eredmények

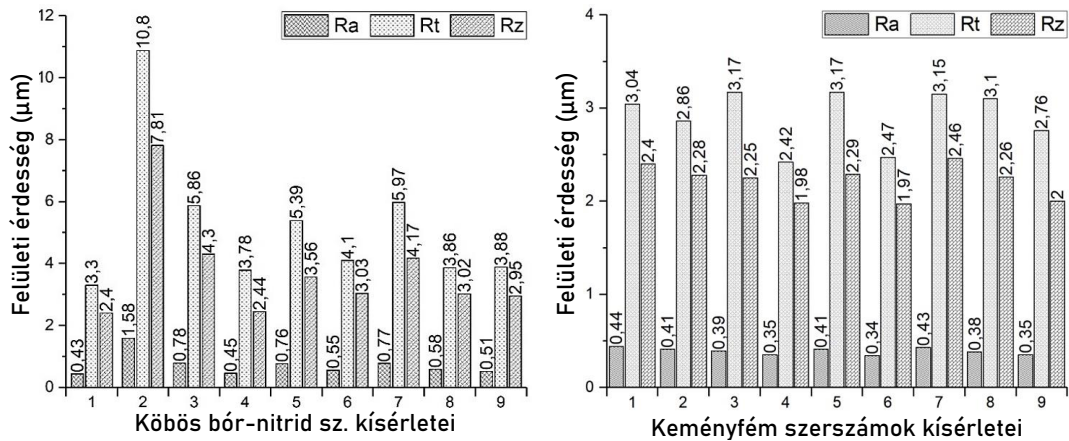
Több egyetemen végezhettem kutatómunkát, amely erősítette a kapcsolatot a kecskeméti *Neumann János Egyetem*, a nagyszombati székhelyű *Szlovák Műszaki Egyetem Anyagtechnológiai Kara* és *Soproni Egyetem* között. Különböző szerszámgyártó és forgalmazó cégek, mint *TaeguTec Hungary Kft.* és a *Lovász Forgácsoló Kft.* szerszámaikat használhattam fel.

A Szlovákiában található egyetem szerszámgépén nagy fordulatszám használatával, nagyobb forgácsolási sebességgel (525 m/min) tudtam a kísérleteket elvégezni. A Soproni Egyetemen először dolgozhattam konfokális mikroszkóppal. A Neumann János Egyetemen pedig felületi érdességméréseket és erőméréseket folytattam. A Hilti Szerszám Kft.-nél legyártottuk a kísérletekhez a munkadarabokat, bővítettem tudásomat gépkezelések, a CAM programok használata és a mikroszkópi felvételek készítése terén.

A *TaeguTec Hungary Kft.* által biztosított szerszámok ugyan nem bizonyultak jobbnak az eddig használt keményfém szerszámoknál, mivel a körülmények és a feladat komplexitása nem tette ezt lehetővé, de fontos szerepet tölthettem be a két vállalat kapcsolatának kialakításában.

Felületi érdesség mérés eredményei:

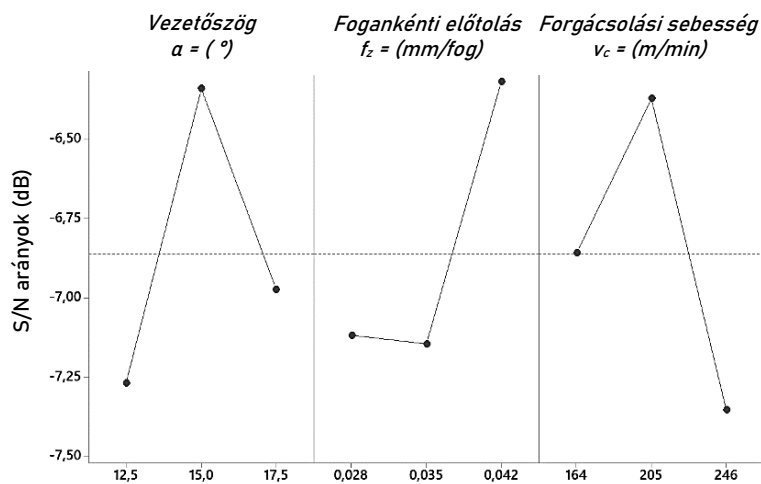
A forgácsolást követően minden egyes felületet a 4.4 *Vizsgálathoz használt speciális befogó készülék* fejezetben bemutatott helyen mértem. A műszaki életben és az iparban az R_z paraméter alkalmazása elfogadottabb, ezért a munkám során ezt a jelzőszámot használtam fel. A mérési eredményeket az alábbi 39. *ábra* tartalmazza, amelyen látszik, hogy a keményfém szerszámokkal jobb felületi minőséget lehet elérni, mint a kőbőr-nitrid szerszámokkal.



39. ábra: A mért felületi érdességek különböző szerszámanyagok esetében

Taguchi kiértékelés eredményei:

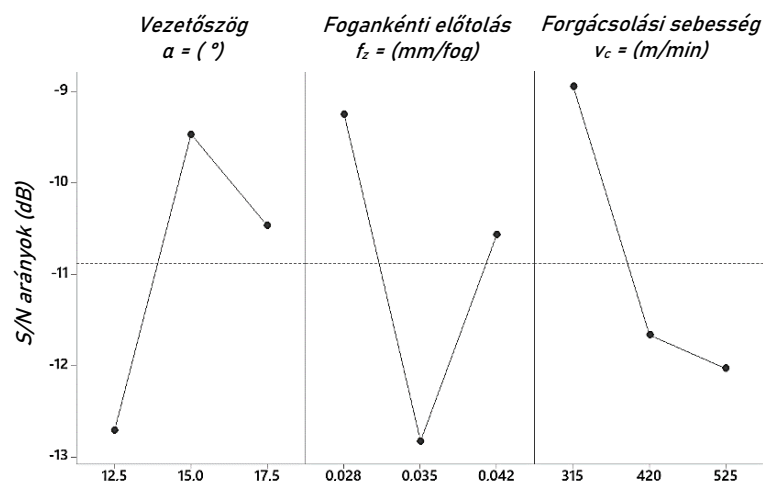
A Taguchi kiértékelés alapján a 40. ábrán az ideális Rz egyenetlenségi magasság eléréséhez a vizsgált technológiai paraméterek alábbi módon gyakorolják hatásukat keménymét szerszámok esetén:



40. ábra: Taguchi kiértékelés keménymét szerszámok esetén

A kiértékelés alapján megállapítható, hogy a forgácsolási sebesség és a vezetőszög változása okozza a legnagyobb hatást a felületi minőségre. Továbbá sikerült a vezetőszöget és a forgácsolási sebességet közel optimális értékekkel megválasztani, viszont a fogankénti előtolás értékét még lehetne növelni.

A köbös bór-nitrid szerszámok kísérletek esetén ismét meg kell említenem, hogy a 2. Kísérletnél meghibásodott marószerszámot, ahol kiugró értéket mértem a felületi egyenetlenségi magasság kapcsán és torzítja a 41. ábrán is látható eredményeket:

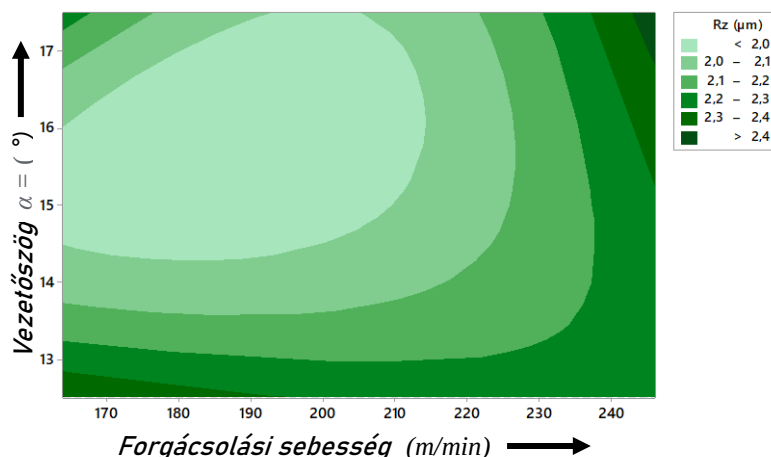


41. ábra: Taguchi kiértékelés köbös bór-nitrid szerszámok esetén

A Taguchi kiértékelés alapján a fogankénti előtolás és a vezetőszög változása okozza a legnagyobb hatást a felületi minőségre, de ezt a 2. Kísérlet megismétlésével érdemes lenne ellenőrizni.

Central Composite Design diagrammok:

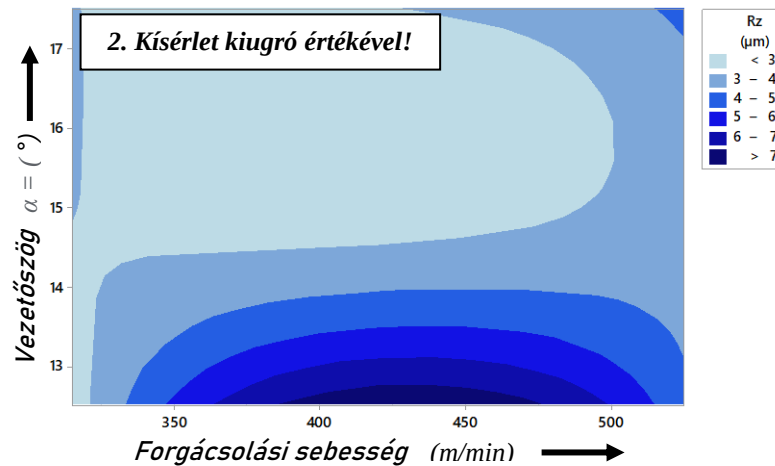
Mivel a keményfém szerszámok esetén a felületi minőségre a legnagyobb hatással a vezetőszög és a forgácsolási sebesség volt, ezért külön kiértékelésre került Central Composite Design diagramként (CCD), amelyet a 42. ábrán lehet látni:



42. ábra: Optimális vezetőszög és forgácsolási sebesség megválasztása keményfém szerszám esetén

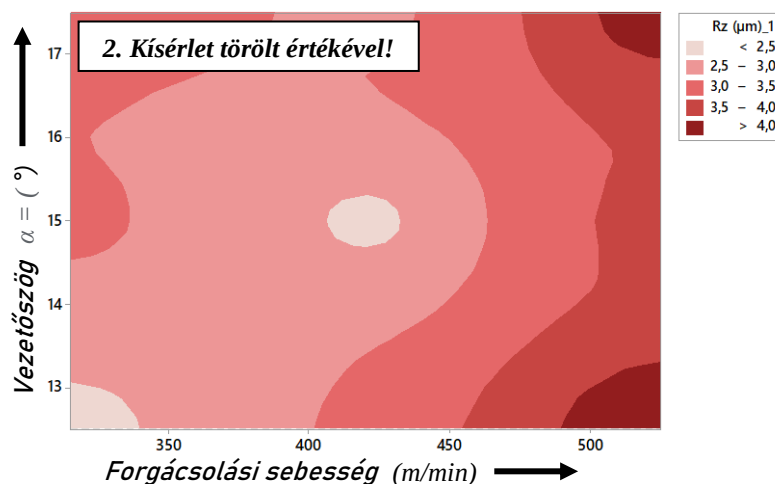
Az ábrán jól kivehetőek a gyártó által ajánlott forgácsolási paraméterek tartománya célfüggvényekkel alátámasztva. A világos zöld rész tartományba eső technológiai paraméterek tudják biztosítani, azokat a felületi minőség értékeket, amelyek még minőségbiztosítás szempontjából elfogadható értéket képviselnek.

A 43. ábrán az optimális tartomány nem behatárolható és túl nagy mezőt foglal el az egész technológiai beállításból. Ennek oka, hogy a 2. Kísérlet során a szerszám éle kicsorbult, ezáltal nem az elvárt felületi minőséget hozta. A keményfém szerszámos kísérletekkel ellentétben itt nem határolhatók be azon zónák, amelyek az optimális paraméterek megválasztásához szükségesek.



43. ábra: Optimális vezetőszög és forgácsolási sebesség megválasztása köbös bór-nitrid szerszám esetén

A 44. ábrán a 2. Kísérlet nélkül szemléltetem a CCD diagramokon az optimális tartományt. Mivel kimaradt a 2. Kísérlet paramétere, ezért félrevezetően két optimális mezőt is láthatunk a diagramon. Az ábra alapján következtetni tudunk, hogy a forgácsolási sebesség 450 m/min tartomány felett kedvezőtlen hatásokkal járna a felületi minőségre, míg a vezetőszög 15°-os tartományában látható a világos rész, amely az irodalomkutatásból megismert ajánlott értékeket is tükrözi.



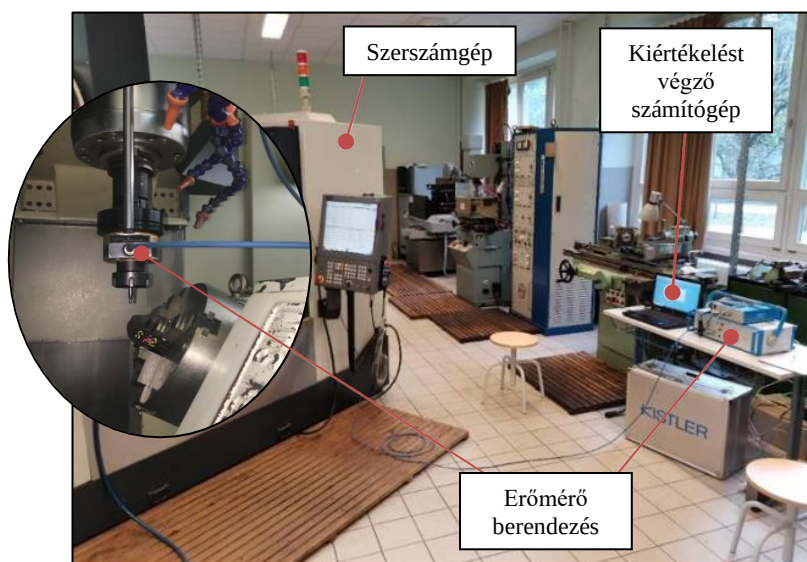
44. ábra: Optimális vezetőszög és forgácsolási sebesség megválasztása köbös bór-nitrid szerszám esetén

Erőmérések keményfém szerszámmal simítási műveletnél:

Az erőmérés kísérleteket a *Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatika Kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék Gyártástechnológia Kutatócsoport* műhelyében végeztem el.

Az erőméréseket csak a keményfém szerszám esetében végeztem el, mert számomra a két szerszámanyag közül ez bizonyult a jobbnak a felületi minőség és a szerszáméltartam szempontjából. Ha a köbös bór-nitrid szerszámok lettek volna jobbak, akkor már lehetőségem sem lett volna megmérni az erőket, ugyanis nem lett volna hozzá megfelelő eszköztáram. Erők és nyomatékok méréséhez **KISTLER 9125A24A2** típusú erőmérőt használtam. A mért adatokat a **DynoWare 2825A1-2** szoftver segítségével értékeltem ki.

A 45. ábrán látható az erőméréshez felkészített munkaállomás:

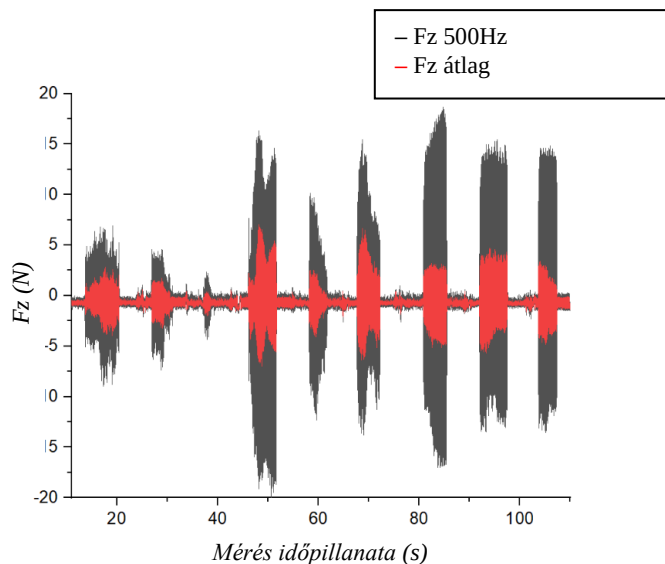


45. ábra: Az erőméréshez felkészített munkaállomás a Neumann János Egyetemen

A kísérletek során rezgéseket is tapasztaltam. Ennek eredményeként az eredmények zajosak lettek, így Fourier Transzformációval (*FFT-Fast Fourier Transformation*) szűrtem ki azokat. Majd átlagoltam is, amely piros színnel a 46. ábrán is látható.

Az Fz tengelyirányú forgácsoló erőket a kilenc kísérletnél nem a teljes felületen végeztem el, hanem az adott felületre kilenc darab pályát alakítottam ki.

A 46. ábrán látható eredményekből jól látható - ami már az előkísérletek során is tapasztalható volt - a megmunkált felületen a gömbvégű marószerszám folyamatosan eltávolodik a felülettől. Ezt támasztja alá az erőmérés során tapasztalt negatív értékek megjelenése.



46. ábra: Keményfém szerszámok használatával mért Fz tengelyirányú erők

Az elvégzett kísérletekről megvizsgáltam a felületi minőség hatását a technológiai paraméterekre regresszió segítségével, amelyből kiderült, hogy az F-szignifikáns értéke a keményfém szerszámok használatakor 0.5, illetve a köbös bór-nitrid szerszámok esetében ez 0.66 értéket képvisel. Ez azt jelenti, hogy nincs lineáris összefüggés a mért eredmény és a technológiai paraméterek között. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy az általunk választott technológiai paraméter skála szinte minden esetben megfelelő minőségű mutatószámot mutatott. Továbbá ez azt is jelenti, hogy az általam észlelt rezgések, valamint a szerszám gép kinematikája sokkal jobban befolyásolja a felületi minőséget, ezért a jövőben mindenképp érdemes ezzel a területtel is foglalkozni.

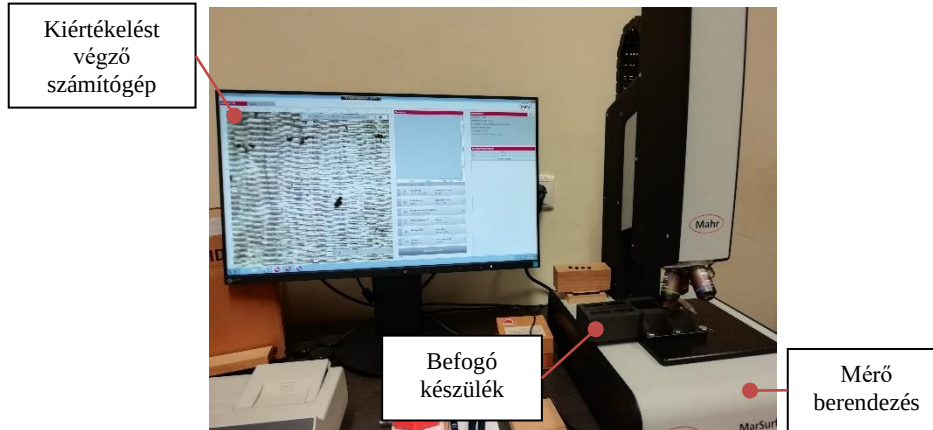
Megvizsgáltam az erőhatások regresszióját is, amelynél az F-szignifikáns értéke 0.008 értéket képvisel, ami egyértelműen arra utal, hogy a rezgések hatása sokkal jobban befolyásolja a felületi minőséget. Ezt a tény erősíti az előző bekezdésben állítottakat is. A felületi minőségre a legnagyobb hatással a vezetősög van, mivel minél nagyobb a vezetősög értéke, annál nagyobb tengelyirányú erők ébrednek. Viszont minél nagyobb a fogankénti előtolás, annál kisebb a tengelyirányú erő. Ezekkel ellentétben a forgácsolási sebesség változása elhanyagolható. Ezeket a megállapítások a 3. táblázat foglalja magába:

3. táblázat: Erőhatások regressziója a technológiai paraméterek függvényében

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Koeficiens
Tengelymetszet	y	1	-13,58133128
Vezetősög	α	°	2,296666667
Fogankénti előtolás	f_z	mm/fog	-196,4285714
Forgácsolási sebesség	v_c	m/min	-0,027635181

Konfokális mikroszkópi felvételek eredményei:

A 47. ábrán a konfokális mikroszkópi felvételek helyszínét mutatom be, amelyeket a *Soproni Egyetem Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Karán* készítettem:



47. ábra: A mérések elvégzéséhez felkészített mérőbázis a Soproni Egyetemen

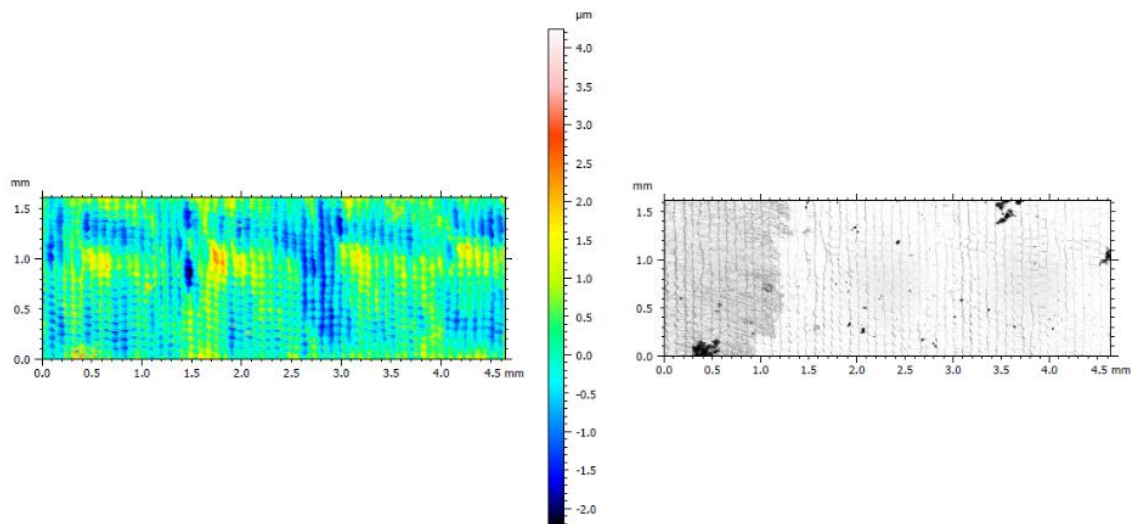
Mivel a keményfém anyagú szerszámokkal lehetett előállítani a legjobb felületi minőséget, ezért ezek közül a legjobbat értékelem a továbbiakban, ami a 6. Kísérletet jelenti. A 4. táblázat tartalmazza a konfokális mikroszkóp és a mechanikus tűs letapogatással mért felületi érdességi értékeket:

4. táblázat: A 6. Kísérlet konfokális és mechanikus felületi érdességmérés eredményei

Jelzőszám	Konfokális mikroszkóp	Mechanikus tűs let. mérőgép	Mértékegység
Ra	0.37	0.36	μm
Rt	3.33	2.80	μm
Rz	2.39	2.30	μm

A konfokális mikroszkópi felvételek alapján közel azonos felületi érdességi értékeket kaptam, mint a mechanikus tűs letapogatási módszerrel, viszont a konfokális mikroszkóp eredményei a középső (K) zónában pontosabbnak mondhatóak, hiszen a kibocsájtott fénysugárnak nincs geometriai korlátja, mint a tű esetében, ezért érzékenyebb a mérési eljárás a kisebb szakaszú és mélyebb felületi hibákra. Az általam tervezett és készített befogókészüléknek szintén nagy szerepe volt a mérés pontos kivitelezésében. Viszont ennél a mérésnél a munkadarabok szélén a bal (B) és jobb (J) zónában nehezebb volt a mérés kivitelezése, mivel nem lehetett elfogadni a készüléket semmilyen tengely körül. Emiatt a fénysugarak nem olyan pontosan verődtek vissza merőlegesen, mint a középső (K) zónában és számottevően eltérő értékekkel tér el a mechanikus tűs letapogatással kapott értékektől.

A 48. ábrán látható a felület egyenetlensége, ami a szerszámgép kinematikájából és a fellépő rezgésekből eredeztethető.



48. ábra: Topográfiai és intenzitás felvétel a keményfém szerszámos 6. Kísérletről

7.2 Javaslatok/Következtetések/Tanulságok

A három lineáris tengely mellett a két rotációs tengely használata számos előnyt biztosít a megmunkálások során, mint például a jobb felületi minőség elérése, viszont a *Hilti Szerszám Kft.*-nél található szerszámgéphez a köbös bór-nitrid szerszámok használata nem ajánlott és nagyobb költségekkel járna használatuk. A szerszámgép maximum fordulatszámának elérése mellett is alacsony forgácsolási sebesség érhető el ennél a vizsgált geometriánál.

Az alacsony forgácsolási sebesség használata a köbös bór-nitrid szerszámok esetében nem ajánlott. A magasabb forgácsolási sebesség ugyan elérhető lenne nagyobb átmérőjű szerszám használatával, de a vizsgált munkadarabok geometriája nem teszi ezt lehetővé.

Továbbá érdemes lehet a rezgések és a kinematika hatásának vizsgálata az előállítandó felületi minőségre, mivel az eredmények alapján nagy befolyással rendelkeznek.

Ezenkívül a köbös bór-nitrid szerszámok használata gyártási önköltség számítások alapján, amelyet az *1. számú melléklet* részeként csatoltam szintén nem ajánlott, ugyanis közel 1,75-szeres többlet költségekkel járna a felújítási és gyártási folyamat.

Továbbfejlesztési lehetőség későbbiekben az öt tengelyes megmunkálás használatának bevezetése, de emellett továbbra is a keményfém szerszámok használatát tartom a legköltséghatékonyabbnak. Emellett különböző ötvözésű és bevonattal rendelkező keményfém szerszámok használatának további vizsgálatát javaslom.

A közeljövőben megindul a hengerlőszerszám öttengellyel történő felújítása, így még több tapasztalatot lehet szerezni az öttengelyes megmunkálásokkal kapcsolatban. A kísérletek során sikerült a felhasznált keményfém szerszámokhoz megbízható technológiai paramétereket meghatározni, amelyeket gyártás során lehet majd használni.

ÖSSZEFOGLALÁS

Kitűzött céljaim közé tartozott az S390 porkohászati gyorsacél megmunkálása különböző szerszámanyagokkal a munkahelyemnél alkalmazott három tengelyes megmunkálás helyett öt tengelyes megmunkálással, így az eddiginél jobb felületi minőséget elérve. A köbös bór-nitrid és a keményfém szerszámanyagok használatával végeztem el a megmunkálásokat.

A dolgozatom elkészítését irodalomkutatással kezdtem el, amelyek alapján igyekeztem a helyes forgácsolási és beállítási paraméterek megválasztására. Ezeket az értékeket leellenőriztem az előkísérletek során és próbáltam azokat a hibákat felismerni, amelyek a kísérletek során felmerülhettek. A kutatásom kiterjedt forgácsoló erők és a felületi érdességek mérésére is.

Végül többnyire olyan eredményeket kaptam, amelyekre számítottam a kísérletek elvégzése előtt. Mivel rengeteg nehézségbe ütköztem a kivitelezések során és bizonyos kísérleti elemeket máshogy kellett megoldanom az eredeti elképzelésekkel ellentétben. De mindig igyekeztem a valósághoz legközelebb álló megoldást választani a vizsgálatok sikeréért és mindent megtettem a helyes kivitelezés érdekében. Helyben nem állt rendelkezésemre minden a kísérlet szempontjából tökéletes eszköz, megmunkáló- és mérőgép, de a távolság sem jelentett sok esetben akadályt. Elsajátítottam több megmunkológép és mérőgép használatát és jobban belemélyedtem a CAD/CAM világába.

Több egyetem segítségével tudtam egy átfogó kutatást végezni a választott témámban, amelyet több cég is támogatott számomra. Remélem tovább tudtam erősíteni az egyetemek közötti közös kutatómunkákat és a cégek közötti együttműködést.

Rengeteg tapasztalattal és élménnyel gazdagodtam vizsgálataim során. A jövőben szeretném a megszerzett tapasztalataimat a hengerlő szerszámok gyártásába beépíteni és bővíteni tudásomat az öt tengelyes megmunkálások területén. Továbbá a keménymegmunkálások témaköre szintén figyelemreméltó számomra. Remélem a későbbiekben is lesz lehetőségem hasonlóan komplex és sokrétű feladatok megoldására, kivitelezésére, vagy valamely számomra kevésbé ismert terület fejlesztésében részt venni és minél nagyobb sikereket elérni a műszaki területen.

SUMMARY

My goals included machining S390 powder metallurgical high speed steel with various tool materials with five-axis machining instead of three-axis machining used at my workplace, to achieve better surface quality than before. I performed the machining with cubicboron nitride and carbide tools.

I started my research with literature search, based on that I tried to choose the proper cutting and setting parameters. I checked these values during the pre-experiments and tried to identify any failures that might have occurred during the experiments. My research also included measuring cutting forces and surface roughness.

In the end, I mostly got the results I expected before performing the experiments. I encountered a lot of difficulties during the implementations. Due to this I had to solve certain experimental elements differently than I had originally planned. But I always tried to choose the solution closest to reality for the success of the research and I did everything I could to get it done properly. I did not have all the perfect tools, machining and measuring machines for the experiment, but the distance was not an obstacle in many cases. I mastered the use of several machine tools and measuring machines and delved deeper into the world of CAD/CAM.

With the help of several universities, I was able to conduct a comprehensive research on my chosen topic, which was supported by several companies. I hope I have been able to strengthen joint research between universities and collaboration between companies.

I have had a lot of experience in my research. I would like to incorporate my experience into the production of rolling tools and expand my knowledge in the field of five-axis machining in the future. Furthermore, the topic of hard machining is also remarkable to me. I hope that in the future I will have the opportunity to solve and perform similarly complex and diverse tasks, or to participate in the research of an area that is less known to me and to achieve as much success as possible in the technical field.

Ábrajegyzék

1. ábra: Hengerlőszerszám (a.) és az egyszerűsített próbadarab (b.)	1
2. ábra: Hilti kecskeméti szerszámgyár	2
3. ábra: A dolgozatot felépítése	2
4. ábra: A szerszámanyagok keménysége és a hőmérséklet kapcsolata	4
5. ábra: Szerszámanyagok keménysége és szívóssága/szilárdsága	5
6. ábra: Jelenleg rendelkezésre álló szerszámanyagok mechanikai tulajdonságai és az innovatív ultrakemény anyagok fejlesztésének iránya	5
7. ábra: Hagyományos öntési (a.) és porkohászati (b.) eljárás eredménye	8
8. ábra: A keményfémek felhasználásának csoportosítása az ISO 513 szerint	10
9. ábra: Hexagonális (a.) és köbös rácsszerkezet (b.) a bór-nitridben	11
10. ábra: CBN szerszámok alkalmazása a fémiparban használatos anyagoknál	12
11. ábra: A világon felhasznált szerszám anyagok eloszlása 2018-ban	13
12. ábra: A legelterjedtebb keménymegmunkálási műveletek	14
13. ábra: Egy felülettel érintkező (SK) (a.) és két felülettel érintkező (b.) (HSK) szerszámtartó rendszerek ..	20
14. ábra: Szerszám élettartam növelése a különböző bevonatok alkalmazásával keménymarás során	22
15. ábra: A keménymegmunkálást befolyásoló komponensek	22
16. ábra: Kopások helyzete végmarókon (ISO 8688-2:1989)	23
17. ábra: Hátkopás végmaró szerszámon (ISO 8688-2:1989)	24
18. ábra: Kráterkopás végmaró szerszámon (ISO 8688-2:1989)	24
19. ábra: Forgácsolás során kialakuló hőforrások és hőáramok	25
20. ábra: Helyi forgácsoló erők ábrázolása	26
21. ábra: FCN és TCS koordinátarendszerek	28
22. ábra: Érdességi profil alakulása a dőlés szög és radiális fogásvétel arányában	30
23. ábra: A szerszámcsúcs és munkadarab érintkezésének elkerülése	30
24. ábra: A vizsgálathoz használt modell felépítése Siemens NX 12 szoftverben	33
25. ábra: Mérési elv bemutatása és helytelen/helyes alkalmazásával	34
26. ábra: A befogókészülék elhelyezése (a.) és kialakítása (b.)	35
27. ábra: A befogókészülék (a.) és a befogókészülékbe befogott munkadarab (b.)	35
28. ábra: A negatív (a.) és pozitív (b.) vezetősög hatása a felület minőségére	36
29. ábra: Hűtés hatása a keménymarásra a felület minőségére keménymarásnál	37
30. ábra: A „C” tengely 180°-os forgatásának hatása a felület minőségére	37
31. ábra: Ra felületi érdesség és a beállítandó a_e radiális fogásvétel közötti összefüggés	38
32. ábra: A vezetősög növelésének hatása a felület minőségére keménymarásnál	38
33. ábra: A +20°-os vezetősög hatása a felület minőségére keménymarásnál	39
34. ábra: Kicsorbult szerszám éle az előkísérletek során +20°-os vezetősögnél	39
35. ábra: A három tengellyel marás hatása a felület minőségére keménymarásnál	39
36. ábra: A felkészített munkaállomás a Szlovák Műszaki Egyetemen	40
37. ábra: A CBN 2. Kísérletnél meghibásodott nagyoló (a.) és simító (b.) szerszámok	41
38. ábra: A CBN 2. Kísérletnél fellépő szerszámmeghibásodás hatása a felületre	41
39. ábra: A mért felületi érdességek különböző szerszámanyagok esetében	43
40. ábra: Taguchi kiértékelés keményfém szerszámok esetén	43
41. ábra: Taguchi kiértékelés köbös bór-nitrid szerszámok esetén	44
42. ábra: Optimális vezetősög és forgácsolási sebesség megválasztása keményfém szerszám esetén	44
43. ábra: Optimális vezetősög és forgácsolási sebesség megválasztása köbös bór-nitrid szerszám esetén ...	45
44. ábra: Optimális vezetősög és forgácsolási sebesség megválasztása köbös bór-nitrid szerszám esetén ...	45
45. ábra: Az erőméréshez felkészített munkaállomás a Neumann János Egyetemen	46
46. ábra: Keményfém szerszámok használatával mért Fz tengelyirányú erők	47
47. ábra: A mérések elvégzéséhez felkészített mérőbázis a Soproni Egyetemen	48
48. ábra: Topográfiai és intenzitás felvétel a keményfém szerszámos 6. Kísérletről	49

IRODALMI FORRÁSOK

- [1] „Gyártási helyszínek,” Hilti, [Online]. Available: <https://www.hilti.hu/content/hilti/EE/HU/hu/company/corporate-information/productionlocations.html>. [Hozzáférés dátuma: 01. 02. 2021.]
- [2] S. K. Karna és D. R. Sahai, „An Overview on Taguchi Method,” *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, Online, 2012.
- [3] V. P. Astakhov and J. P. Davim, "Tools (Geometry and Material) and Tool Wear," in *Machining*, London, Springer, 2008, pp. 29-57.
- [4] H. Sumya and K. Harano, "Innovative Ultra-hard Materials: Binderless Nano-polycrystalline Diamond and Nano-polycrystalline Cubic Boron Nitride," *SEI Technical Review*, 2016.
- [5] R. A. Mesquita, C. A. Barbosa és V. M. S. A., „High-speed Steels Produced by Conventional Casting, Spray Forming and Powder Metallurgy,” *Trans Tech Publications Ltd.*, Svájc, 2005.
- [6] J. P. Davim, „Basic Hard-machining Operations,” in *Machining of Hard Materials*, London, Springer, 2011, p. 14.
- [7] R. M'Saoub, T. Czotscher, O. Andersson és D. Meyer, „Machinability of Powder Metallurgy Steels Using PcBN Inserts,” *Elsevier B.V.*, 2014.
- [8] J. Jaworski and T. Trzepieciński, "Research on durability of turning tools made of low-alloy high-speed steels," *Kovove materialy*, Rzeszów, Lengyelország, 2016.
- [9] A. Bran és N. Constantin, „Improving the characteristics of the high speed steel wnr. 1.3243 by vacuum heat treatment,” *Science Bulletin*, Bukarest, 2015.
- [10] B. Liu, T. Qin, W. Xu, C. Jia, Q. Wu, M. Chen és Z. Liu, „Effect of Tempering Conditions on Secondary Hardening of Carbides and Retained Austenite in Spray-Formed M42 High-Speed Steel,” *MDPI*, Basel, Svájc, 2019.
- [11] S. Wei, J. Zhu és I. Xu, „Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high speed steel,” in *Tribology International*, Amsterdam, Elsevier Ltd., 2006, pp. 641-648.
- [12] A. M. Bayer, B. A. Becherer és T. Vasco, „High-Speed Tool Steels volume 16,” in *ASM Handbook*, ASM International, 1989, pp. 51-59.
- [13] H. Guo, Z. Dunwen, H. Xu, C. Su, C. Liu és W. Jin, „Study on Frictional Wear Property of the High Vanadium High Speed Steel,” *Trans Tech Publications Ltd.*, Svájc, 2011.
- [14] L. Yikuna, S. Nannanb, K. Xiuhongc és L. Dianzhong, „A Study of the Carbides in High-Speed Steel Rolls,” in *Materials Science Forum*, Shenyang, Kína, 2010.
- [15] J. Warren M. Garrison, „Cobalt and the Toughness of Steel,” in *Materials Science Forum*, Pittsburgh, Pennsylvania, 2012.
- [16] R. Narayanasamy, A. Veeramani és K. Pandey, „Effect of molybdenum addition on workability of powder metallurgy steels during cold upsetting,” *Materials Science and Engineering A*, 2009.
- [17] B. E. GmbH, „<https://www.boehler.hu/hu/products/s390pm/>,” [Online]. Available: <https://www.boehler.hu/app/uploads/sites/92/2020/12/productdb/api/s390de.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 03. 07. 2021.]
- [18] K. Tsuda, „History of Development of Cemented Carbides and Cermet,” *SEI Technical Review*, Japán, 2016.
- [19] Y. Huang, Y. K. Chou and S. Y. Liang, "CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses," *Springer*, London, 2006.
- [20] M. Georgieva, M. Petrova, N. Razkazov and D. Dobrev, "Chemical metallisation of cubic boron nitride," *Institute of Materials Finishing*, Birmingham, 2014.
- [21] S. N. Monteiroa, A. L. D. Skuryb and M. G. d. Azevedob, "Cubic boron nitride competing with diamond," *Elsevier Editora*, Brazília, 2013.
- [22] N. Tetsuo, "Application of Polycrystalline Cubic Boron Nitride for Cutting Tools," in *The Review of High Pressure Science and Technology*, Japán, Japan Society of High Pressure Science and Technology, 1994, pp. 118-125.
- [23] H. Gao, X. Liu és Z. Chen, „Cutting Performance and Wear/Damage Characteristics of PCBN Tool in Hard Milling,” *MDPI*, Harbin, 2019.

- [24] A. Rizzo, S. Goel, M. L. Grilli, R. Iglesias, L. Jaworska, V. Lapkovskis, P. Novak, B. O. Postolnyi és D. Valerini, „The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review,” MDPI, Basel, 2020.
- [25] S. Zhang és Y. B. Guo, „Taguchi Method Based Process Space for Optimal Surface Topography by Finish Hard Milling,” ASME, Department of Mechanical Engineering, University of Alabama, 2009.
- [26] C. Cao, X. Zhang, X. Zha and C. Dong, "Surface integrity of tool steels multi-cut by wire electrical discharge machining," School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Kína, 2014.
- [27] A. Caggiano és R. Teti, „CBN Grinding Performance Improvement in Aircraft Engine Components Manufacture,” Elsevier B.V., Nápoly, Olaszország, 2013.
- [28] P. E. Grieb, Machine tools designed for borazon, Ohio, USA: Proceedings of the Twenty-third International Machine Tool Design and Research Conference, 1983.
- [29] P. Palanisamy, I. Rajendran and S. Shanmugasundaram, "Prediction of tool wear using regression and ANN models," Springer-Verlag, London, 2007.
- [30] Q. Zhang, S. Zhang and J. Li, "Three Dimensional Finite Element Simulation of Cutting Forces and Cutting Temperature in Hard Milling of AISI H13 Steel," Elsevier B.V., China, 2017.
- [31] Y. Altintas és P. Lee, „Mechanics and Dynamics of Ball End Milling,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, Canada, 1998.
- [32] S. Wang, L. Geng, Y. Zhang, K. Liu és T. Ng, „Cutting force prediction for five-axis ball-end milling considering cutter vibrations and run-out,” Elsevier, International Journal of Mechanical Sciences, 2015.
- [33] E. Ozturk, L. T. Tunc és E. Budak, „Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes,” Elsevier, Istanbul, Törökország, 2009.
- [34] I. O. f. Standardization, „ISO 8688-2:1989(en) Tool life testing in milling — Part 2: End milling,” ISO, 1989. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8688:-2:ed-1:v1:en>. [Hozzáférés dátuma: 01 02 2021].