

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS –TECHNOLÓGIA TANSZÉK



**Vas alapú porkohászati anyagok forgácsolhatóságának
elemzése és javítása**

című PhD értekezés téziszüzet

Írta:

Czampa Miklós

okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Szalay Tibor

tanszékegyetemi docens

*Az értekezés bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben a Budapesti
Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának Dékáni
Hivatalában megtekinthetők.*

Budapest, 2017

1. A KUTATÁSI TÉMA ISMERTETÉSE, CÉLKITŰZÉSEK

Napjainkban egyre nagyobb igény jelentkezik az olyan technológiai megoldások iránt, melyek nagy sorozatban képesek méret és alakpontos darabok gyártására. Ezen igények kielégítésére a porkohászati technológia kínál egy lehetséges megoldást. A technológia képes mind egyszerű, és bonyolultabb geometriák nagy sorozatban történő, pontos gyártására; illetve lehetőség nyílik olyan összetételű anyagok előállítására, melyek más módon nem készíthetők el.

A porkohászati technológia elsősorban fémporokat, esetlegesen fém és nem fémes porok keverékét használja alapanyagként. Alkatrészgyártáskor kezdő lépésként e fémporokat készítik el. Ezt követően a kívánt mechanikai tulajdonságok elérésének érdekében összeállítják a porkeveréket. A különböző ötvöző anyagok is ekkor kerülnek hozzáadásra. A porkeveréket alakos szerszámformákban, nagy nyomáson sajtolják, majd ezeket a nyers darabokat hőkezelésnek (szinterelés) vetik alá. A fémporsemcsék ekkor összekapcsolódnak, a darabok elnyerik végső mechanikai tulajdonságaikat, illetve az anyagon belül lejátszódnak az ötvözési folyamatok is. Az így elkészített alkatrészek végleges rendeltetési helyükön közvetlenül felhasználhatók.

A technológia hátránya, hogy az előállítható geometriák mérete, és alakja korlátozott. Például a sajtolási irányra merőleges furatok, reteshornyok, alászúrások, menetek, nem, vagy csak nagyon költségesen állíthatók elő. Ekkor a porkohászati készterméket utólagos forgácsoló műveleteknek vetik alá, mely a hagyományos fúrási, esztergálási, és marási műveleteket foglalja magában.

Ipari eredmények alapján [1] a porkohászati technológiával készült termékek 60%-a igényel valamilyen utólagos megmunkálási eljárást, mely nagymértékben indokolja a terület bővebb kutatását. A fémek forgácsolhatósági, megmunkálhatósági vizsgálata a gyártástervezésben alapvető fontosságú. Az újonnan megjelenő anyagok esetében a technológizálhatóság miatt e vizsgálatok rendszeresen megjelenő igényt jelentenek.

A fémek megmunkálhatósága egy összetett fogalmat jelent, mely kifejezi, hogy az adott munkadarab anyagát adott szerszámmal és technológiai peremfeltételek mellett mennyire könnyen / nehezen lehet megmunkálni. Magában foglalja a kialakuló felület minőségét, a forgácsoló szerszám éltartamát, a megmunkálás közben ébredő forgácsoló erő nagyságát, a keletkező forgács alakját és a megmunkálási költséget is. Eddig nem ismertek olyan vizsgálati módszerek, melyek számszerűen képesek kifejezni az anyagok ezen összetett tulajdonságát, akár csak egy referencia anyaghoz viszonyítva is.

Ezen megfontolásokat alapul véve kutatási célkitűzéseim a következők:

- ❖ Különböző összetételű, vas alapú porkohászati szinteracélok anyagtulajdonságainak és forgácsolási viselkedésének összehasonlítása,
- ❖ A vizsgált anyagcsoport összetételének módosításával a jelenleginél előnyösebb utólagos forgácsolhatósági tulajdonságokkal rendelkező szinteracélok kifejlesztése,
- ❖ Az összetétel módosítás porkohászati gyártástechnológiára gyakorolt hatásainak vizsgálata, hogy a porkohászati gyártástechnológiában ne keletkezzen hátrány,
- ❖ A módosított összetételű szinteracélok mechanikai tulajdonságainak vizsgálata, hogy azok felhasználhatósága ne romoljon,
- ❖ Valamint megmunkálhatósági tesztek elvégzése, technológiai javaslatok kidolgozása, hogy adott körülmények között megfelelő legyen ezen anyagok forgácsoló megmunkálása.

2. ELŐZMÉNYEK, KUTATÁSI MÓDSZEREK

A megrendelők általában adott mechanikai tulajdonságokkal rendelkező porkohászati termékeket igényelnek, melyek elérését a porkohászati gyártástechnológia paramétereinek beállításával (anyagösszetétel, sajtolási sűrűség, szinterelési körülmények) tudják leginkább befolyásolni [2, 3]. Az utólagos forgácsoló megmunkálások során ezt a készterméket kell tovább munkálni, így a gyártástechnológiának igazodnia kell az alapanyaggal szembeni mechanikai elvárásokhoz.

A porkohászati úton előállított szinteracélok utólagos forgácsoló megmunkálása számos kihívással bír. Egyrészt, a változatos anyagösszetétel miatt a jelentős mértékben abrazív koptató hatású anyagoktól kezdve az élrátét képződésre hajlamos, lágyabb anyagokig sokféle eset előfordulhat. Az

anyag porózus szerkezete miatt mikro szinten állandó jellegű megszakított forgácsolás esete áll fenn, illetve megmunkáláskor emulziós hűtés használata sem javasolt a korrózió veszély elkerülése végett. Néhány anyagminőség esetében veszélyforrásként pedig a jelentős mértékű sorjaképződés is fennáll [1].

Az iparban elsősorban a különféle fúrási és esztergálási műveletek dominálnak utólagos forgácsolási megmunkálásként, de a marási műveletek is kezdenek elterjedni. Ezért a nemzetközi kutatásokban is ezekre a műveletekre koncentrálnak elsősorban.

A kutatók [4] előszeretettel kísérleteznek ki olyan plusz ötvözőelemeket, melyet hozzáadva az eredeti porkeverékhez kedvezőbb megmunkálhatósági tulajdonságokkal rendelkező anyag születik. A legtöbb esetben ez MnS, MnX, vagy más, egyéb, saját kóddal ellátott adalékot jelent. Azonban azt nem, vagy csak csekély mértékben vizsgálták, hogy az eredeti összetevők arányainak változtatásával elérhető-e ugyanezek a hatások.

A fúrási műveletekre alapozva többféle éltartam vizsgálatot is kidolgoztak [5], melynek lényege, hogy egy konkrét szerszámmal és forgácsolási paraméterrel mennyi furat készíthető el a szerszámtörésig. Ezek egyszerűen végrehajtható tesztek, de a felhasznált szerszám minőségét, és a technológiai paraméterek megváltozását nem veszik figyelembe.

Esztergálási műveleteken alapulva a megmunkálhatóságot elsősorban a forgácsolási erő komponensek mérésével vizsgálják. Ezen vizsgálatok alapja, hogy az eltérő összetételű szinteracélok megmunkálásakor az összetétel módosítás hatása közvetlenül megjelenik a mért erőkomponensekben. Az esztergálási műveletek alkalmazása mellett szól még a mért erőkomponensek könnyű kiértékelhetősége is [6].

Marási műveletek során, a folyamat összetettsége miatt, elsősorban az előállítható felületi minőség vizsgálatára törekednek, illetve előszeretettel dolgoznak ki modelleket, melyekkel a várható felületi minőség jósolható [7].

Másik irányzat még, hogy a porkohászati darabot közvetlenül a sajtolást követően, még a szinterelési folyamat előtt munkálják meg. Ezt nevezik nyers megmunkálásnak. Ezen kutatási eredmények is ígéretesek, de a megmunkált darabok csekély mechanikai tulajdonságai (pl. szilárdság), illetve a szinterelést követő méretváltozások újabb kihívásokhoz vezetnek.

A vasporkohászat területén belül a vas- réz-szén (Fe-Cu-C) rendszert használják legelterjedtebben. Ezen rendszeren belül szabványos

összetételekkel dolgoznak, melyeket nemzetközi szinten az ISO 5755 szabvány, Amerikában az amerikai porkohászati anyagok gyártó szövetségének szabványa (MPIF Standard 35), Európán belül pedig a DIN 30910 szerinti szabvány szabályozza.

Ezen szabványos összetételekre az 1. táblázat mutat példát:

1. táblázat: Szabványosított összetételek.

Anyagcsoport	Összetétel %				Sűrűség	Porozitás	Keménység	Szakító szilárdság
	C	Cu	Fe	Egyéb	g/cm^3	$\frac{\Delta v/v \times 100}{\%}$	HB	N/mm^2
Sint C00 (Sima vas)	<0,3	<0,1	Bal.	2	6,4 – 6,8	15±2,5	>35	130
Sint C01 (Vas-szén)	0,3-0,6	<0,1	Bal.	2	6,4 – 6,8	15±2,5	>70	260
Sint C11 (Vas- réz- szén)	0,4-1,5	1,5	Bal.	2	6,4 – 6,8	15±2,5	>80	320
Sint D11 (Vas-réz- szén)	0,4-1,5	1,5	Bal.	2	6,8 – 7,2	10±2,5	>95	400

Kutatásom során kiinduló anyagcsoportként a Sint C00, Sint C11 illetve Sint D11 anyagcsoportokat vettem figyelembe. Kétféle ötvözetlen porkeverék csoportot (NC100.24 illetve PMX), egy előtvözött porkeveréket (Distaloy AE), illetve egy rozsdamentes porkeveréket (410L) vizsgáltam meg. Ezen porkeverékek főbb tulajdonságait a 2. táblázat foglalja össze:

2. táblázat: A felhasznált vasporkohászati anyagminőségek főbb tulajdonságai

Anyagminőség	Látszólagos sűrűség g/cm^3	Átlagos szemcseméret μm	Főbb ötvözők %	Sajtolási sűrűség g/cm^3
NC 100.24	2,45	45 – 180	< 0,01% C	6,1 – 7,1
PMX	3,1	180 – 212	< 0,01% C	6,1 – 7,1
Distaloy AE	3,05	50 – 200	1,5% Cu, 4% Ni, 0,5% Mo	6,7 – 7,3
410L	3,3	75 – 100	12% Cr	6,2 – 6,8

A kutatási tervemben az egyes porkeverék csoportokon belül a réz és szén összetétel arányait módosítottam. A szenet alapvető ötvözőként alkalmazták a vasporkohászatban (legtöbbször grafit formájában). Hatására módosul a kialakult szinteracél szövetszerkezete, az anyag szakítószilárdsága és keménysége pedig megnő. A rezet szintén por alakban adják hozzá a vasporeverékhez. Az általánosan alkalmazott szinterelési hőmérsékleten

(1120°C) a réz olvadék állapotba kerül (olvadási pont 1083 °C), és a folyékony réz a kapilláris hatás miatt behatol a vasporszemcsék közé, illetve a szemcséken belüli üres helyekre. Szinterelés közben a folyékony állapotú réz gyors eloszlást tesz lehetővé a vas mátrixban, és diffúziós kapcsolat jön létre a vasporszemcsék között. Mivel a réz szubsztitúciós ötvöző, ez a diffúziós folyamat hosszabb időt vesz igénybe, viszont a diffúzió hatékonyabb kapcsolatot hoz létre a porszemcsék között, így az anyag szilárdsága megnő.

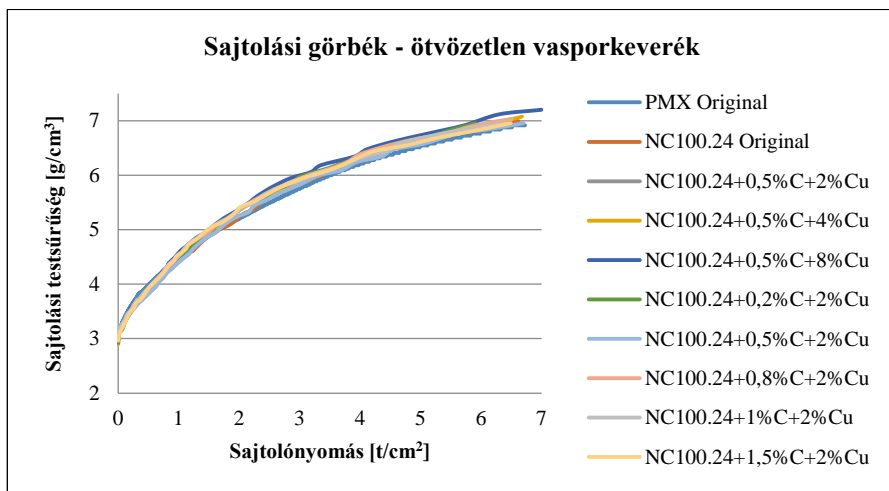
A 2. táblázatban szereplő anyagcsoportokon belül módosítottam a réz és szén összetétel arányait. Olyan mértékű összetétel módosításokat is elvégeztem, melyeket az ipar csak ritkán alkalmaz. Az ipari alkalmazhatóság szempontjából gyors és megbízható eredmények szükségesek. A széles körű összetétel módosítás indoka, hogy ha egy új összetételre van szükség, melynek előre nem teljesen ismertek a mechanikai és utólagos megmunkálhatósági tulajdonságai, legalább becslés szintjén érdemes információt szerezni az új összetétel várható viselkedéséről. A konkrét összetétel módosításokat a 3. táblázat foglalja össze:

3. táblázat: Az általam elvégzett összetétel módosítások

<i>Anyagösszetétel</i>	<i>Hozzáadott szén (C) tömeg %</i>	<i>Hozzáadott réz (Cu) tömeg %</i>
<i>NC 100.24</i>	-	-
<i>NC 100.24</i>	0,5	2
<i>NC 100.24</i>	0,5	4
<i>NC 100.24</i>	0,5	8
<i>NC 100.24</i>	0,2	2
<i>NC 100.24</i>	0,8	2
<i>NC 100.24</i>	1,0	2
<i>NC 100.24</i>	1,5	2
<i>PMX</i>	-	-
<i>Distaloy AE</i>	0,5	-
<i>410L</i>	-	2
<i>410L</i>	-	4

3. A KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

Az összetétel módosítások megállapítása után elsőként sajtolási kísérleteket végeztem el, hogy megismerjem az új összetételű porkeverékek sajtolhatósági viselkedését. A vizsgálatok célja a sajtoló gép beállítását lehetővé tevő sajtolási görbék felvétele volt. A vizsgálatokat a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékének laboratóriumában található 200 tonnás (1961,33 kN) hidraulikus sajtológép segítségével végeztem el. A berendezés piezo-elektromos elven működő erőmérővel, és abszolút útmérő rendszerrel volt felszerelve, ezáltal a sajtolási és a kilökési folyamat során ébredő erők, valamint a sajtolószerszám által megtett mozgás mérhetővé vált. Sajtolószerszámként 32,5 mm belső átmérőjű, tömör hengerek előállítására képes szerszám készletet alkalmaztam. A kísérletek során a szerszám álló (alakos üreg) és mozgó részét (sajtoló bélyeg) kézzel összejáratam megelőzve ezzel a törésüket. Az előre bekevert fémporokból egységesen 100 g tömegű próbatesteket sajtoltam. Sajtolási nyomásként 8 tonna / cm² értéket, sajtolási sebességként pedig 7 mm/s értéket állítottam be, melyet iparilag is alkalmaznak. A sajtolási műveletek elvégzése után elkészítettem a kívánt sajtolási diagramokat, melyre például, ötvözetlen vasporkeverékek esetére, az 1. ábra mutat.



1. ábra: Sajtolási görbék ötvözetlen vasporkeverékek esetén

A sajtolási vizsgálatok eredményei alapján azt a következtetést vonhattam le, hogy az általam meghatározott összetétel módosítások nem befolyásolják a porkeverékek sajtolási viselkedését. Az összetételek között egyedüli eltérés a

kilökési erőknél volt tapasztalható, azonban ott is kisebb erőket mérhettem, mint a módosítás nélküli porkeverékek esetében. Ez a miatt fontos, hogy kisebb kilökési erők esetén kisebb sajtoló szerszám terhelése, ezáltal kisebb szerszámkopás jelentkezik. A vizsgálatokhoz az [M1, M2] publikációim kapcsolódnak.

Következő lépésként roncsolásos mechanikai anyagvizsgálatokat végeztem el. Célom az volt, hogy megállapítsam, az új összetételű szinteracélok mechanikai tulajdonságai eltérnek-e a szabványos értékektől, ugyanis e tulajdonságok nagyban befolyásolják a késztermék rendeltetési helyén történő használhatóságát. Szakító vizsgálatok (MSZ EN ISO 2740:2010 szabvány szerint) és ütőmunka vizsgálatok (MSZ EN ISO 25754:1995 szabvány szerint) kerültek végrehajtásra a BME Anyagtudomány és Technológia tanszék laboratóriumában. A vizsgálatokhoz a próbatesteket a vonatkozó szabványok alapján (ISO 2740 – szakító vizsgálati próbatestek, MSZ EN 25754 – ütőmunka próbatestek) készítettem el, mely egyedi sajtolószerszám tervezést és gyártást igényelt. A vizsgálatok során a jellemző sajtolási sűrűség tartományba (6,0 – 7,0 g/cm³) elhelyezkedő darabok mechanikai tulajdonságaira fókuszáltam, ezért nem minden porkeverék került megvizsgálásra. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy az általam meghatározott összetételű szinteracélok mechanikai tulajdonságai nem térnek el az előírt értékektől, így azok minden további nélkül felhasználhatók a rendeltetési helyükön. A vizsgálatokhoz az [M3] publikációm kapcsolódik.

Következő lépésként a szinteracélok hőtani tulajdonságait vizsgáltam meg részletesebben. Megmunkálás közben a forgács-keletkezési zónában jelentős mértékű hő keletkezik, ami károsan hat a forgácsoló szerszám éltartamra. Mivel szinteracélok esetében nem javasolt az emulziós hűtés, elsősorban száraz megmunkálást kell alkalmazni, ami nagyobb hőfejlődéssel, és szerszámkopással jár együtt. Szinteracélokra vonatkozóan a szakirodalom nem ad tájékoztatást az anyagok hőtani tulajdonságaival kapcsolatban. Ezen kívül olyan, általánosan elfogadott anyagmodellek sem léteznek, mellyel az anyag hőtani viselkedése forgácsolás közben jósolható lenne. A vizsgálatokat a BME Polimertechnika Tanszékének laboratóriumában található, lineáris hővezetés mérésére átalakított COLLIN P200E típusú, szabályozott módon hűthető és fűthető préslapokkal rendelkező sajtológép segítségével végeztem el. Egyféle porkeverék került megvizsgálásra két különböző szinterelési hőmérséklet (1120 és 1250 °C) illetve négyféle sajtolási sűrűség érték mellett (6,4; 6,6; 6,8 illetve 7,0 g/cm³). A lineáris hővezetés mérésének módszere

alapján egy ismert hőtani tulajdonságokkal rendelkező referencia anyag (itt normalizált állapotú 1.1121 acél) ismeretében a vizsgálandó anyag hővezetési és hőátadási tényezői kiszámíthatók. Méréskor 30°C hőmérsékletkülönbséget hoztam létre a sajtológép lapjai között. A próbatetek véglapjaitól adott távolságban (3 mm), valamint a próbatetek fél magasságánál, a forgástengelyben mértem az állandósult állapotban kialakuló hőmérsékleteket. Ezt termoelemes hőmérsékletmérő szondák segítségével valósítottam meg. A szondák megfelelő elhelyezéséhez mind a referencia anyagból, mind a vizsgálandó anyagból készült próbatesteket megfelelően preparáltam. A hőveszteségek elkerülésének érdekében mérés közben a próbatesteket hőszigeteléssel láttam el. A vizsgálatokat egy ismert hőtani tulajdonságú (1.1191 normalizált állapotú acél) anyag esetén is elvégeztem, hogy a mérési módszer helyességét ellenőrizni tudjam. Eredményként elmondható, hogy a kísérleti összeállítás alkalmas a mérések elvégzésére, hiszen a referencia 1.1191 acél katalógusokban megtalálható hőtani adatait visszakaptam eredményül. Ezen felül kijelenthető, hogy a várakozásokkal ellentétesen, a szinterelt acélok hőtani viselkedése, ezen belül is a hővezetési és hőátadási tényezők nem változnak meg jelentősen a porkohászati technológia eltérő paramétereinek hatására. Értékeik a hagyományos metallurgiai úton készült acélok értékeivel közel megegyeznek. Így az anyag porózus szerkezete miatt nem fog különleges forgácsolási körülmény fennállni. A kísérlet eredményei alapján fogalmaztam meg első tudományos megállapításomat. A hőtani vizsgálatokhoz az [M8] publikációm kapcsolódik.

A mechanikai vizsgálatokat követően tértem rá az utólagos forgácsolhatósági tulajdonságok vizsgálatára. Információgyűjtés, illetve referencia mérési eredmények gyanánt hosszesztergálási kísérlet sorozatot hajtottam végre az eredeti, és módosított anyagminőségeken. Próbatestként 39 mm átmérőjű, 34 mm magas, 6,6 g/cm³ sűrűségű próbatesteket készítettem, melyeket 30 percig szintereltek 1120 °C-on, védőgáz atmoszférában. A kísérletsorozat kezdetén megmértem a próbatetek HV₃₀ keménységi értékeit a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék laboratóriumában található KB PRÜFTECHNIK DKD-K-02801 típusú keménységmérő géppel. Ezen keménységmérési eredményeket a későbbi vizsgálatok kiértékelésénél is felhasználtam. A hosszesztergálási kísérleteket a BME Gyártástudomány és – technológia Tanszék laboratóriumában végeztem el az ott található Hembrug SLANTBED MIKROTURN 50 CNC típusú, nagy pontosságú esztergagép segítségével. Megmunkálás közben forgácsolási erő komponenseket mértem.

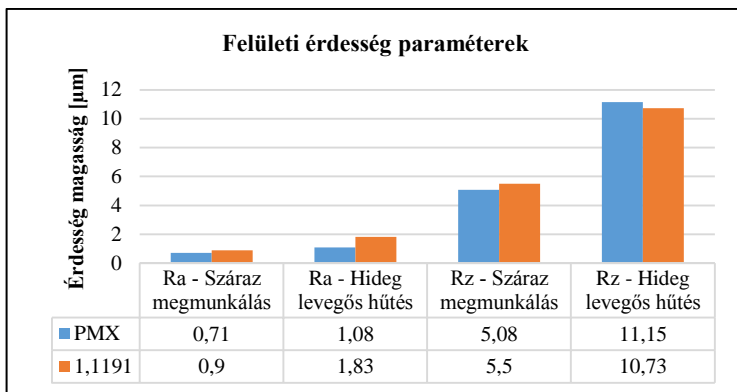
Az erőméréshez Kistler 9257A típusú, 3 komponensű erőmérő cellát, Kistler 5019 típusú töltés erősítőt, illetve egy National Instruments 6024E típusú adatgyűjtő kártyát alkalmaztam. Mérőszoftverként egy tanszéki fejlesztésű LabView-környezetben elkészített mérőprogramot használtam. A mintavételi frekvenciát pedig minden esetben, egységesen 1 kHz – értékre állítottam be. Célom volt, hogy e teszt során a beállítható technológiai paramétereket széles skálán vizsgáljam, mely a nagyoló és simító megmunkálásoknál alkalmazott tartományokat is felölelik. Ezért négy különböző forgácsoló sebesség (50, 100, 150, 200 m/perc), három eltérő előtolás (0,05; 0,1; 0,2 mm/ford), illetve három különböző fogásvételi érték (0,5; 0,8; 1 mm) mellett, teljes faktoriális kísérleti terv alkalmazásával történtek a megmunkálások. A forgácsoló szerszám Sandvik Coromant CSCLCR1616H09 szerszámtestből + CCMT09T304-PM típusú váltólapkából állt. A vizsgálatok eredményeit a Minitab v16 szoftver ANOVA eszköztárán belül található „Main Effects Plot” (Főhatás elemzés) funkciójának segítségével értékeltem ki. A kutatásokhoz az [M4 és M5] publikációim kapcsolódnak.

Következő lépésként a szakirodalmi adatokból kiindulva kidolgoztam egy saját fúrási tesztet. A vizsgálatok célja az eltérő szerszámanyagok és hűtési módok éltartamra és forgácsoló erőre gyakorolt hatásnak vizsgálata volt az előállítható átmenő furatok számán keresztül. Munkadarab anyagként csak egyféle összetétel (PMX ötvözetlen vasporkeverék) vizsgáltam. Próbatestként 82x41x20 mm méretű tömör hasábok készültek 6,8 g/cm³ sajtolási sűrűség értékre. Szintereléskor a próbatestek 30 percen keresztül tartózkodtak 1120°C-os hőmérsékleten, védőgáz atmoszférában. Az eredmények összehasonlíthatósága végett a kísérletet normalizált állapotú 1.1191 referencia anyag esetén is elvégeztem. A megmunkálások során 3 féle szerszám anyagminőséget (bevonat nélküli gyorsacél, bevonatolt gyorsacél illetve keményfém) használtam. A szerszámok egységesen 3 mm átmérőjűek voltak. Technológiai paraméterként a gyorsacél szerszámok esetében 0,04 mm/ford előtolás, és 15 m/perc-es forgácsoló sebességet állítottam be. A keményfém szerszám esetében ezeket az értékeket megkettőztem, hogy kihasználjam a jobb szerszámanyag képességeit. A fúrási kísérleteket a BME Gyártástudomány és –technológia Tanszék laboratóriumában található Kondia B640 típusú megmunkáló központjának segítségével végeztem el. A megmunkálások során 8x11-es raszter mentén készítettem átmenő furatokat. Száraz megmunkálás mellett a nagy nyomású, hideg levegővel történő külső hűtés (6 bar, -10°C) hatását is vizsgáltam. A fúrási műveletek során

forgácsolási erő komponenseket mértem, illetve rendszeres időközönként a szerszámkopást, a megmunkálásokat követően pedig az elkészült furatok minőségét is ellenőriztem. Az erőméréshez Kistler 9257A típusú erőmérő cellát, Kistler 5080 típusú erősítőt, és az erőmérő cég saját mérőszoftverét (Dynoware) alkalmaztam. A szerszám anyagminőségek, és a furatok geometriai minősítéséhez Dino-Lite AM431ZT típusú digitális mikroszkópot használtam fel. Összegezve a fúrási tesztek eredményeit elmondható, hogy a nagy nyomású, hideg levegővel történő külső hűtés minden esetben előnyösen hatott a megmunkálásra nézve. Alkalmazásakor hosszabb szerszám éltartam, és jobb furat minőség érhető el. Továbbá elmondható, hogy kis szériájú (~100 furat) gyártáskor a bevonatos gyorsacél szerszámok is sikeresen alkalmazhatók. Minden egyéb esetben keményfém szerszámok használata javasolt. A fúrási tesztekhez az [M6, M7 és M9] publikációim kapcsolódnak.

Ezt követően homlokmarási kísérleteket végeztem el, hogy megvizsgáljam a különböző technológiai paraméterek előállított felületi minőségre gyakorolt hatását. Ezért a próbatesteket egyfajta anyagminőségből, a PMX jelölésű ötvözetlen vasporkeverékből készítettem el. 82x41x20 mm méretű tömör hasábok készültek 6,8 g/cm³ sajtolási sűrűség értékre. A próbatesteket 30 percen keresztül szinterelték 1120°C-on, védőgáz atmoszférában. A szinterelt acél mellett, összehasonlítási alapként, a teljes kísérlet sorozatot normalizált állapotú 1.1191 acél esetében is elvégeztem. A két anyag összetétele nagyon hasonló, eltérés elsősorban csak az anyagok szerkezetében, előállítási módjában van, így a kísérlet sorozat során az eltérő anyagszerkezet hatását is megvizsgálhattam. A marási tesztek a BME Gyártástudomány és – technológia Tanszék laboratóriumában található Kondia B640 típusú megmunkáló központján végeztem el. Forgácsoló szerszámként 16 mm átmérőjű szármarót használtam, mely Sumitomo AXMT123504PEERG típusú, bevonatos keményfém váltólapkából, és Sumitomo WEX2016E típusú szerszámtestből állt. Egyidejűleg csak 1 forgácsoló élt használtam, hogy az 1 forgácsoló él előállított felületi minőségre gyakorolt hatását vizsgáljam. A kísérletek során a szerszám állapotát egy Dino-Lite AM431ZT típusú digitális mikroszkóppal ellenőriztem. Technológiai paraméterként a forgácsoló sebességet öt különféle szinten (50, 75, 100, 125, 150 m/perc), az előtolás három szinten (0,01; 0,04 és 0,16 mm/ford), a fogásvételt szintén három szinten (0,5; 1 és 2 mm) változtattam. Egyen illetve ellenirányú marási stratégiát is alkalmaztam, valamint száraz megmunkálás mellett a nagy nyomású hideg levegővel történő külső hűtést is alkalmaztam. A marási műveletek elvégzése

után az Ra és Rz felületi érdesség paramétereiket egy Mitutoyo SJ-400 típusú, metszettapintós elvű felületi érdesség mérő berendezéssel mértem meg. A megmunkált felületekről a Dino-Lite AM431ZT típusú digitális mikroszkóppal további képeket készítettem az esetlegesen keletkező sorja megfigyelése miatt. A vizsgálatok eredményeit elsősorban főhatás elemzések segítségével dolgoztam fel. Ezek alapján elmondható, hogy a hideg levegővel történő külső hűtés jelentős hatással van a megmunkálási folyamatra nézve. Az eltérő hűtési módok, és anyagminőségek esetére az átlagolt érdességi paraméterek alakulását a 2. ábra szemlélteti:



2. ábra: Felületi érdességek alakulása a technológiai beállítások függvényében

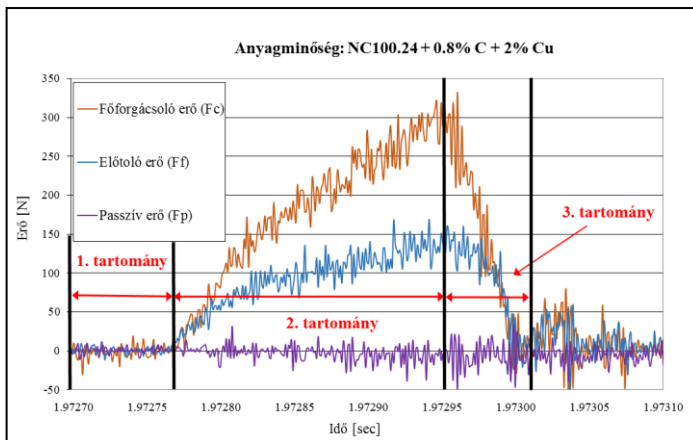
Az eredményeket kiértékelve két fő következtetést vonhattam le:

1. Azonos forgácsolási körülmények között a szinteracélok, és a referencia acél esetében közel azonos felületi minőség érhető el.
2. A hideg levegővel történő hűtésnek, a várakozással ellentétesen, általánosságban káros hatása volt a kialakuló felületi érdességre nézve mindkét anyagminőség esetén, viszont növelte az éltartamot.

Mivel az átlagértékek vizsgálata a végső megállapítások megfogalmazása során könnyen félrevezethető lehet, a konkrét mérési adatok alapján kiválogattam a legjobb felületi érdességet eredményező beállításokat, melyek alapján a következő mondható el: Létezik olyan paraméter kombináció, melynek alkalmazásakor elfogadható felületi minőség mellett a termelékenység is javul. Nagyobb forgácsoló sebesség, és előtolás alkalmazható, mint száraz megmunkálás esetében, és a szerszáméltartam is javul. A marási kísérletekhez az [M10 és M13] publikációim kapcsolódnak.

A fúrási, illetve marási tesztek eredményein alapulva pedig megfogalmaztam második tudományos megállapításként a hűtési módok megmunkálásra gyakorolt hatásával kapcsolatban.

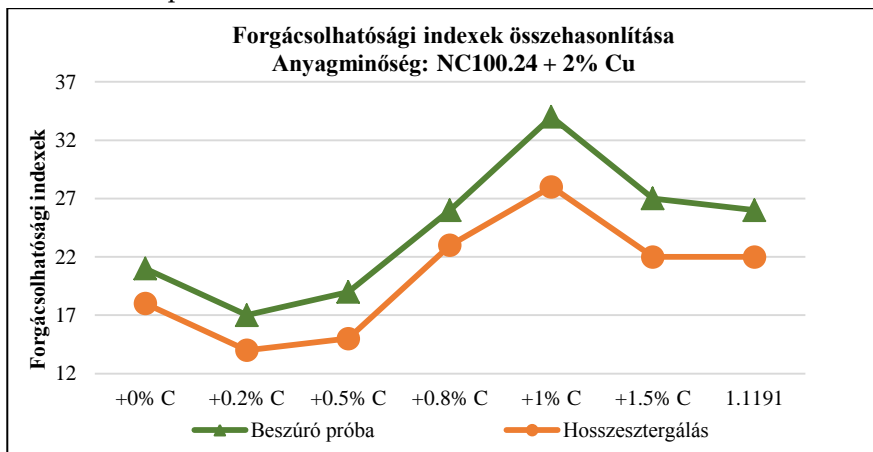
Ezek után, az elegendő információk birtokában, kidolgoztam egy újfajta, porkohászati szinteracélok megmunkálását számszerűen jellemezni képes tesztet. A teszt alapötletét két cikk szolgáltatta [8 és 9], ahol nagy terhelésű karcos próbat, illetve homlokbeszúrási műveletet használtak fel a megmunkálhatóság jellemzésére. A tesztet homlokbeszúró esztergálási műveleten alapul, azonban a szokványos élgeometria helyett a megmunkálás szimmetrikus kialakítású, „V” alakú lapkával történik (Sandvik Coromant SDJCR1616H11 szerszámtest + DCMT11T304-PM váltólapka). Ebben rejlik a teszt újdonsága. A szimmetrikus kialakítású lapka miatt megmunkáláskor a folyamatosan változó forgács keresztmetszet miatt a forgácsoló erő komponensek nagysága is pillanatról pillanatra változik. Így kiértékeléskor megtehettem, hogy közvetve ugyan, de a megmunkálás időpillanataival hoztam összefüggésbe a forgácsoló erő komponensek változását. Továbbá a forgácsoló él mentén jelentkező forgácsoló-sebesség változás elhanyagolható mértéke miatt a forgácsoló-sebesség változásának hatását sem kell figyelembe vennem a kiértékelés során. Próbatestként az összes anyagminőségből 39 mm átmérőjű tömör hengereket készítettem 6,6 g/cm³ sajtolási sűrűség értékűre. A próbatesteket 30 percen keresztül, 1120°C-on szinterelték. A szinterelési hőmérséklet a rozsdamentes porból készült darabok esetében 1240 °C volt. A vizsgálatokat normalizált 1.1191 jelű acél anyag esetére is elvégeztem, hogy referencia eredményeket kapjak. A tesztet a BME Gyártástudomány és –technológia Tanszék laboratóriumában található Hembrug SLANTBED MIKROTURN 50 CNC típusú, nagy pontosságú esztergagépének segítségével hajtottam végre. A forgácsoló erő komponensek méréséhez Kistler 9752A típusú piezo elektromos erőmérőt, illetve Kistler 5019 típusú teljesítmény erősítőt alkalmaztam. Az adatgyűjtést National Instruments 6024E típusú adatgyűjtő kártya segítségével valósítottam meg. A mintavételi frekvenciát egységesen 1 kHz értékre állítottam be minden esetben. A vizsgálat során, a teszt egyszerűsége miatt csak egyféle forgácsoló sebességet (150 m/perc), előtolást (0,1 mm/ford), és egyféle fogásvételi mélységet (0,5 mm) alkalmaztam. A mért erőjelekre példa a 3. ábrán látható:



3. ábra Homlokbeszúró kísérlet során regisztrált erőjel

A teszt rövidsége miatt az egyes megmunkálásokat követően mérhető szerszámkopást nem tapasztaltam. Az erőjelek kiértékelése során csak a 2. tartományban látható erőjel szakasz került figyelembe vételre. Kiértékelési jellemzőként a próbatestek HV₃₀ keménységi értékeit, a figyelembe vett jelszakaszra illesztett regressziós egyenes meredekség értékeit, a meredekség értékek arányát, az erőértékek maximum értékeit, és az erőjelek ingadozását vettem figyelembe. Mivel az egyes kiértékelési jellemzőkből nem lehetett általános következtetéseket levonni, kifejlesztettem egy kiértékelési módszert, mely az összes jellemzőt egyidejűleg veszi figyelembe azok megfelelő súlyozása mellett. A módszerem a kiértékelési jellemzők rangsorolásán alapszik. Elsőként, kiértékelési jellemzőkként (oszloponként) csoportba soroltam a mért értékeket. A csoportba soroláshoz bizonyos tűrést, jelen esetben egy ± 5 %-os határt engedtem meg. Amennyiben két mért érték 5%-on belül helyezkedett el egymáshoz képest, ők ugyanabba a csoportba estek, és ugyanazt a rangsor pontot kapták eredményül. A rangsorolásnál a legalacsonyabb értékeket tartalmazó csoport kapta a legkisebb, a legnagyobb értékeket tartalmazó csoport pedig a legnagyobb rangsor pontot. Ezen elv alapján azok a kiértékelési jellemzők, melyeknél több csoport hozható létre, hangsúlyosabbak az anyagleválasztási folyamatra nézve. Ezt az állítást Főhatás elemzések segítségével is alátámasztottam. Az így meghatározott rangsor pontokat pedig anyagminőségként (soronként) összegeztem. Az összegzett rangsor pontok (Megmunkálhatósági indexek) az egyes anyagok forgácsolhatóságára utalnak. A kisebb számérték jobb forgácsolhatóságot jelent.

A homlokbeszűrő próba eredményeit hitelesítés végett összehasonlítottam a hosszesztergálási kísérlet során kapott eredményekkel. Ehhez kikerestem a vonatkozó paraméter beállítások mellett történt méréseket, és ugyanazt a kiértékelési módszert alkalmaztam az adatokon, mint a homlokbeszűrő próba esetében. Eredményként elmondható, hogy az eltérő vizsgálatok ugyanazt az eredményt szolgáltatták eredményül, melyre példa a 4. ábrán látható. Továbbá az is kijelenthető, hogy az összetétel módosítás hatásai egyértelműen megjelennek a megmunkálhatósági indexekben. A homlokbeszűrő próba által nagy mennyiségű kísérletezési idő takarítható meg, egyúttal a módosító hatások számszerűsíthetők is, melyre eddig nem volt lehetőség. A homlokbeszűrő próba eredményei alapján fogalmaztam meg harmadik tudományos megállapításomat. A kutatás eredményeihez az [M11 és M12] publikációim kapcsolódnak.

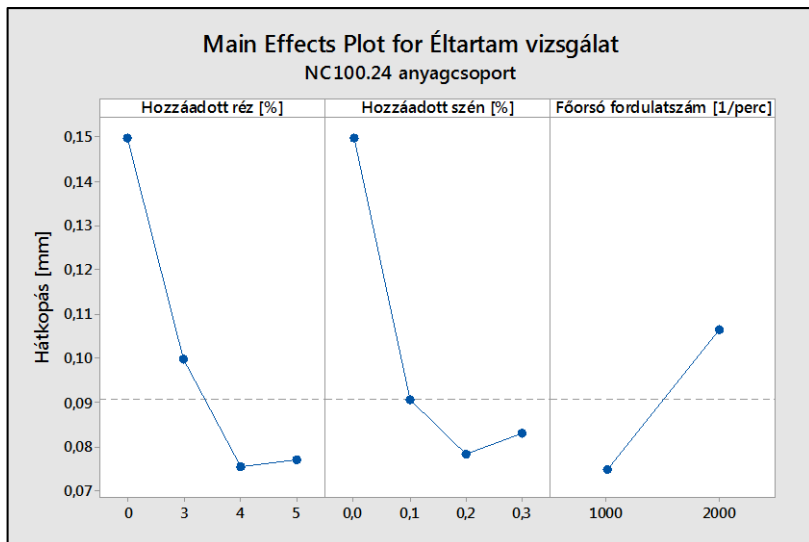


4. ábra: Forgácsolhatósági indexek összehasonlítása az eltérő tesztek esetében

A homlokbeszűrő próbát az ötvöztelen vasporkeverékek esetében kisebb mértékű összetétel módosításokra újra elvégeztem, (réztartalom módosítás 3, 4, 5 tömeg %, ezeken belül a szénttartalom módosítás 0,1; 0,2; 0,3 tömeg %), hogy a globálisan ideálisnak tűnő összetételi arányok együttes hatását, illetve pontos tartományait meghatározhassam. A próbatestek geometriája, és minden más egyéb, megmunkálással kapcsolatos feltétel azonos volt az előző vizsgálattal. Az eredmények kiértékelése, és a korábbi homlokbeszűrő próba eredményeivel történő összevetése után megfogalmazhattam negyedik, és ötödik tudományos megállapításomat az utólagos forgácsoló megmunkálást

elősegítő, ideális összetétel módosítások arányaival kapcsolatban. Ezen eredményeihez is az [M11 és M12] publikációim kapcsolódnak.

A homlokbeszúró próbákat követően éltartam tesztek végeztem el, hogy az ideálisnak vélt összetételi arányok szerszámkopásra gyakorolt hatását is megvizsgáljam. Ugyanis hiába ébrednek alacsony erőértékek megmunkáláskor, ha az alapanyag továbbra is erősen koptatja a forgácsoló szerszámot. Az éltartam vizsgálatok esetében keresztesztergálási műveleteket végeztem el. A próbatestek geometriája, és összetétele megegyezett a szűkített összetétel módosítások esetén használt homlokbeszúró próbatestekével. A kísérleteket a BME Gyártástudomány és –technológia Tanszék laboratóriumában található EEN-400 típusú NC eszterga gépén hajtottam végre. A próbatesteken a kísérletek megkezdése előtt egységesen 3 mm átmérőjű átmenő furatokat készítettem el, hogy elkerüljem a darabok forgástengelyénél jelentkező nulla forgácsoló sebesség értékét. A tényleges éltartam tesztek kétféle főorsó fordulatszám (1000 és 2000 1/perc) esetén is elvégeztem. A megmunkált átmérő változásával a forgácsoló sebesség is folyamatosan változott (125 – 9,42 illetve 250 – 18,48 m/perc értékek között). Ezáltal a sebesség szerszámkopásra gyakorolt hatását is megfigyelhettem. Az előtolás értéke minden esetben 0,05 mm/ford, az alkalmazott fogásvétel pedig 0,5 mm volt. Szerszámként SECO márkájú, CCMT09T304-F1 jelölésű váltólapkát használtam fel. Az éltartamot a váltólapkák hátkopásának mértékével fejeztem ki, melyet megmunkálás közben egy Dino-Lite AM4317T típusú digitális mikroszkóppal, egy anyagcsoport készre munkálását követően (egységesen 100 fogásvétel anyagcsoportonként) pedig digitális sztereó mikroszkóppal ellenőriztem. Ezen felül a megmunkált felületekről pásztázó elektronmikroszkóp segítségével nagy felbontású felvételeket készítettem. Az éltartam vizsgálat eredményei igazolták a homlokbeszúró próba eredményeit, és az eddig ideálisnak mondott összetétel módosítások mellett sikerült a legkisebb szerszámkopást regisztrálni. Ezen felül, az összetétel módosításnak ugyanazon hatása volt az éltartamra nézve, mint amit a homlokbeszúró próbánál számított megmunkálhatósági indexek jeleznek. Így az éltartam vizsgálat eredményei is alátámasztják a homlokbeszúró próba eredményességét, és eredményeit (5. ábra).



5. ábra: Az éltartam vizsgálat eredményei

4. TÉZISEK ISMERTETÉSE

A különböző, előzőekben részletezett anyagvizsgálati, és forgácsolhatósági vizsgálataim alapján az alábbi tudományos eredményeket fogalmaztam meg:

- 1. Tézis: A Sint C00 anyagcsoportba tartozó, adott vas-réz-szén összetételű, porkohászati úton előállított szinteracélok esetében, a darab egészére vonatkozóan, a termék – forgácsolási folyamatnál fontos szerepet játszó – hővezetési és hőátadási tényezői függetlenek a termék előállítása során alkalmazott sajtolási testsűrűségtől, valamint a szinterelési folyamat során használt hőmérséklet és idő nagyságától.**

Az 1. tézishez az [M8] publikációm kapcsolódik.

- 2. Tézis: Adott vas-réz-szén összetételű, porkohászati úton előállított szinteracélok homlokmarási megmunkálása során a nagy nyomású, hideg levegővel történő külső hűtés a száraz megmunkáláshoz képest rontja a kialakuló (forgácsolt) felület – Ra és Rz mérőszámokkal jellemzett – érdességét, de javítja a szerszám éltartamot. Használata megmunkálás közben akkor indokolt, ha az előírt érdességi értékek betartása mellett az éltartam növelése az elsődleges cél.**

A 2. tézishez az [M6, M7, M9, M10 és M13] publikációim kapcsolódnak.

3. Tézis: Adott vas-réz-szén összetételű, porkohászati úton előállított szinteracélok esztergálással történő megmunkálásának erőmérésen alapuló indikatív forgácsolhatósági értékelése az alábbi eljárással lehetséges.
- Le kell mérni a vizsgált anyagok HV₃₀ keménységi értékeit.
 - Szimmetrikus kialakítású szerszámmal, homlokbeszúró esztergálási művelet során mérni kell a megmunkálás közben kialakuló főforgcsoló és előtoló erő komponenseket.
 - A mért jelből meg kell határozni a kiértékelési jellemzőket (a lineáris trendvonalak meredekségét komponensenként, ezek arányát, az erőértékek maximumát valamint az erőértékek ingadozásának maximumát).
 - A mért és számított kiértékelési jellemzőket tűréshatár figyelembe vételével rangsorolni kell értékeik szerinti növekvő sorrendben. A tűréshatár értékei a vizsgált összetétel módosítás mértékétől függnnek. Az így keletkező rangsor számokat anyagminőségként összegezni kell. A kisebb számérték kedvezőbb forgácsolhatóságot jelent.
 - Az így kapott összegszám a vizsgált anyagok forgácsolhatóságának indikatív összehasonlítására ad számszerűsített lehetőséget egyidejűleg több jellemző figyelembe vételével.

A 3. tézishez az [M1, M2, M3, M4, M5 és M12] publikációim kapcsolódnak.

4. Tézis: A Sint C11 anyagcsoportba tartozó, vas-réz-szén összetételű, porkohászati úton előállított, 2 tömeg % rezet tartalmazó szinteracélok esetében 0,2 tömeg % szén ötvöző (grafit formájában történő) hozzáadása javítja a forgácsolhatóságot.
5. Tézis: A Sint C11 anyagcsoportba tartozó, vas-réz-szén összetételű, porkohászati úton előállított, 0,5 tömeg % széntartalmú szinteracélok esetében 4 – 5 tömeg % réz ötvöző hozzáadása javítja a forgácsolhatóságot.

A 4. és 5. tézisekhez az [M11 és M12] publikációim kapcsolódnak.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Höganäs Handbook No.5 1. fejezet, Höganäs AB, Sweden, 2004
- [2] ASM Metal Handbook, Powder Metal Technologies and Applications, Vol 7, ASM International Handbook Committee, 1998
- [3] F. Lorraine-Francis, Chapter 5 - Powder Processes, In Materials Processing, Academic Press, Boston, pp. 343-414, 2016 (<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385132-1.00005-7>)
- [4] https://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepoint-documents/ConferencePapersAllDocuments/TheUseofaNewMachinabilityEnhancerforImprovingtheMachinabilityofPre_AlloyedPowderMetalComponents.pdf (Megtekintve: 2016. 11. 23.)
- [5] J. Capus: Forward progress in the machining of PM steel parts, Metal Powder Report, 68, 5, pp. 22-24, 2013 ([http://dx.doi.org/10.1016/S0026-0657\(13\)70170-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-0657(13)70170-X))
- [6] Dr. Bali János: Forgácsolás, Tankönyvkiadó Vállalat (Budapest) , 1988
- [7] S. Sheth, P. M. George: Experimental Investigation and Prediction of Flatness and Surface Roughness During Face Milling Operation of WCB Material, Procedia Technology, 23, pp. 344-351, 2016
- [8] A. Šalák, K. Vasilko, M. Selecká, H. Danninger: New short time face turning method for testing the machinability of PM steels, Journal of Materials Processing Technology, 176, 1-3, pp. 62-69, 2006 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.014>)
- [9] D.R. Danks, D. Jones, H. Chowdhary, B. Naaykens: Extreme load scratch testing, Wear, 332–333, pp. 1200 – 1205, 2015 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.038>)

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [M1] M. Czampa, S. Zatykó, T. Szalay Tibor: Change of Physical and Geometrical Characteristics of Sintered Iron Components Due to Varying the Process Parameters In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2011, pp. 95-99, 2011 (ISBN:9788090450264; 8090450261)
- [M2] M. Czampa, Á. Németh, S. Zatykó: Porkohászati acélporok sajtolhatóságának vizsgálata In: XIV. Képlékenyalakító konferencia: Miskolc 2012, pp. 192-197, 2012
- [M3] M. Czampa, Á. Németh, S. Zatykó, T. Szalay: Improvement of the mechanical properties of sintered metals by modifying the process parameters, In: 2nd International Congress on Advances in Applied Physics and Materials Science (APMAS), pp. 208-211, 2012
- [M4] M. Czampa, S. Markos, B. Zs. Farkas, T. Szalay: Machinability of sintered metals In: Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tools: ICT 2012, pp. 139-144, 2012
- [M5] T. Szalay, M. Czampa, S. Markos, B. Zs. Farkas: Investigation of machinability of iron based metal matrix composite (MMC) powder metallurgy parts In: 2nd International Congress on Advances in Applied Physics and Materials Science (APMAS), pp. 300-303, 2012 (AIP Conference Proceedings; 1476.)
- [M6] M. Czampa, S. Markos, T. Szalay: Improvement the drilling possibilities of difficult to machine materials In: 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems: Economic Development and Wealth through Globally Competitive Manufacturing Systems, pp. 82, 2013

- [M7] M. Czampa, S. Markos, T. Szalay: Improvement of Drilling Possibilities for Machining Powder Metallurgy Materials, *PROCEDIA CIRP*, 7, pp. 288-293, 2013
- [M8] M. Czampa, T. Szalay: Porkohászati szinterelt acélok hőtani tulajdonságainak vizsgálata In: *OGÉT 2014: XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2014*, pp. 86-89, 2014
- [M9] Szalay Tibor, Czampa Miklós, Csala Vilmos, Farkas Balázs Zsolt: Mikrofúró kopásának vizsgálatára és kiértékelésére kifejlesztett módszer; *OGÉT 2014: XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2014. Konferencia helye, ideje: Nagyszeben, Románia, 2014.04.24-2014.04.27. Kolozsvár: Erdélyi Műszaki Tudományos Társaság, 2014. pp. 360-363.*
- [M10] István Biro, Miklós Czampa, Tibor Szalay: Experimental Model for the Main Cutting Force in Face Milling of a High Strength Structural Steel; *PERIODICA POLYTECHNICA-MECHANICAL ENGINEERING (ISSN: 0324-6051) 59: (1) pp. 16-22. (2015)*
- [M11] M. Czampa, B. Zs. Farkas, T. Szalay: Machinability improvement of powder metallurgy steel, *TEHNICKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETTE*, 23, 3, pp. 809-817, 2016 (ISSN: 1330-3651)
- [M12] M. Czampa, I. Biró, T. Szalay: A novel machinability test for determining the cutting behaviour of iron-based, carbon-containing and copper-containing powder metallurgy steels (PMS), *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 89, 9, pp. 3495-3507, 2017 (doi: 10.1007/s00170-016-9313-x. 13 p)
- [M13] M. Czampa, I. Biró, T. Szalay: Effects of different cutting conditions on the surface roughness parameters of iron-copper-carbon powder metallurgy composites (PMCs), *INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINING AND MACHINABILITY OF MATERIALS*, Vol. X, No. Y, pp.000–000. (xxxx) – Elfogadott cikk, megjelenés alatt áll.