

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



**A forgácsleválasztás energetikai modelljének kiterjesztése
nagy szilárdságú acél precíziós és mikroforgácsolási
technológiájához**

című PhD értekezés téziszüzet

Írta:

Biró István

okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Szalay Tibor

egyetemi docens, tanszékvezető

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

Budapest, 2017

1. A KUTATÁSI TÉMA ISMERTETÉSE, CÉLKITŰZÉS

A forgácsolással történő alakadás még hosszútávon az alkatrészgyártás egyik fő módszere lesz. Jóllehet, széleskörűen rendelkezésre állnak olyan technológiák, melyek közvetlen alakadást tesznek lehetővé (pl. kokillaöntészet, porkohászat), de az alámetszésekkel rendelkező daraboknál, illetve azon esetekben, ahol a formázás mechanikai és termodinamikai okokból nem valósítható meg (vagy csak túl költségesen), utólagos megmunkálás által biztosíthatók az adott alkatrészeire előírt műszaki és esztétikai követelmények.

A korszerű alkatrészgyártásban folyamatosan és egyre fokozódó ütemben jelenik meg a miniatürizálás. A hétköznapi életben is használt műszaki cikkek mérete csökken, mely szükségszerűen magával vonzza az egyes alkatrészek méretbeli csökkenését, illetve ezek előírt megmunkálási pontosságának szigorítását. E méretcsökkenés és az egyes geometriai alakjelöléseket jellemző tűréstartományok szűkítése egyre nagyobb igényt mutat precíziós és mikromegmunkálási technológiák alkalmazására, miközben új, modern anyagminőségek állnak a konstruktőrök rendelkezésére, melyekhez a gyártástechnológiának is igazodnia kell.

Annak érdekében, hogy e speciális megmunkálási folyamatok hatékony eszközök legyenek az ipari termelésben, a megfelelő infrastruktúra alkalmazása mellett kulcsfontosságú szereppel bír a korrekt technológiatervezés. Ehhez olyan prediktív modellekre van szükség, melyek megbízható, kielégítően pontos eredményeket szolgáltatnak adott körülményekre vonatkozóan, miközben gyakorlati szempontból egyszerűen és gyorsan alkalmazhatók.

Kutatásom célja a szabályos élű szerszámmal történő forgácsleválasztás energetikai körülményeit leíró technológiai modell kiterjesztése a forgácsolási paraméterek függvényében. E munka eredménye a forgácsolási erő komponenseinek alakulását figyelembe vevő fajlagoserő-modell olyan bővített alakja, mely a konvencionális, makromegmunkálási körülményeken kívül a mikroméretű elméleti forgácsvastagsággal történő forgácsolás esetére is alkalmazható. A bővített modell folytonos jelleggörbéként egyesíti e két, forgácsgeometria tekintetében nagyságrendi különbségekkel bíró megmunkálási tartományt, figyelembe véve a szakirodalomban már tárgyalt megállapításokat, eredményeket, továbbá kezelve a megmunkálás olyan

tranzien körülményeit, mint a szerszámél belépése és kilépése a munkadarab anyagából. Ehhez homlokmarási kísérleteket és homlokbeszűrő esztergálási tesztek hajtottam végre.

2. ELŐZMÉNYEK, KUTATÁSI MÓDSZEREK

A mai napig kiemelkedően magas az acél alapanyagok felhasználása más fémek, illetve nem fémek anyagokhoz képest az alkatrészgyártás azon területein, ahol az adott elem terhelhetősége mellett lényeges szempont annak minimalizált mérete és tömege, miközben magas hőállósággal, hőstabilitással, továbbá kifáradásos tönkremenetellel szemben kedvező ellenállással rendelkezik, megnövelve ezzel az alkatrész várható élettartamát. Ezen igényeknek megfelelően az acélok mechanikai, elsősorban szilárdsági tulajdonságai is folyamatosan új felső korlátokat feszegetnek, miközben megőrzik olyan, az ötvöztelen és gyengén ötvözött acélokra jellemző kedvező tulajdonságaikat, mint a jó hegeszthetőség, illetve a kifáradásos töréssel szembeni ellenállóság. E fejlődés következtében jött létre a nagy szilárdságú szerkezeti acélok csoportja.

Forgácsoló megmunkálások alkalmazása még mindig túlnyomó többségben jelenik meg az alkatrészgyártás terén. Ezt azt igényt olyan gyárthatósági problémák keltik, melyeket a közvetlen alakadást biztosító eljárások technológiai alkalmazásának korlátjai, illetve az előállítandó alkatrész méretei, tűrései állítanak fel.

A miniatürizálás a korszerű alkatrészgyártás egyik jellegzetes irányvonala [1]. Ez egyben jelenti az alkatrészek befoglaló méreteinek és az egyes alakajátosságok névleges méreteinek csökkentését, illetve az e méreteket jellemző tűréstartományok szűkítését. A méretbeli zsugorítás természetesen magával vonja a megmunkáló berendezések és technológiák célirányos fejlesztését: a megmunkológépek kinematikai és dinamikai tulajdonságai lehetővé teszik a szerszámmozgás pontos vezérlését azokban az esetekben is, ahol a kialakítandó geometriai elemek méretének nagyságrendje 1 mm alatti. Ez olyan, alakos megmunkáló szerszámok alkalmazását teszi szükségessé, melyek jellemző méretei (pl. maró- és fúrószerszám átmérője) szintén 1 mm-nél kisebb tartományban helyezkednek el. A méretek csökkenésével e szerszámok abszolút (értsd: nem fajlagos) terhelhetősége is lényegesen csökken a karcsú kialakítás miatt fellépő merevségi problémák következtében. Ahhoz, hogy e szerszámok üzemszerűen használhatóak legyenek, a technológiai paramétereket is arányosan módosítani szükséges. Ezek az igények együttesen

alapozták meg a precíziós és mikromegmunkálások alkalmazásának létjogosultságát.

Precíziós megmunkálás alatt értendők azok az eljárások, ahol az előállítandó alakzatot jellemző méretek tűréstartományja 0,01 mm alatti. E feltétel teljesítése gyakran teszi szükségessé a mikrométer nagyságrendű jellemzőkkel bíró forgácskeresztmetszet mellett történő megmunkálást, de ez nem kizárólagosan és nem minden kinematikai körülmény mellett igényli a technológiai paraméterek miniatürizálását, illetve speciális szerszámok és szerszámgépek alkalmazását. A megmunkálás energiaigénye lényegesen kisebb mértékben mutat tranziens, illetve sztochasztikus karakterisztikát, összehasonlítva a mikromegmunkálással.

Mikromegmunkálás alatt értendők azok a szabályos élű szerszámmal végzett forgácsolási eljárások, ahol a forgácskeresztmetszet jellemzői 0,01 mm alatti, tehát mikrométer nagyságrendben mozognak. A mikromegmunkálások indikatív technológiai paramétere az élenkénti előtolás, mely szintén mikrométer nagyságrendű, biztosítandó ezzel a mikroméretű elméleti forgácsvastagságot. Azonban jelentős mértékben öngerjesztő a rendszer, azaz a munkadarab anyagszerkezetének lokális inhomogenitásai és a lokális deformációk okozta, elsősorban a forgácstő szilárdsági jellemzőinek változása visszacsatoltan hat a folyamat pillanatnyi energiaigényére [2].

Forgácsolási folyamatok technológiai előtervezéséhez elengedhetetlenül szükséges a várható forgácsolási igénybevételek megbízható becslése. Ezt prediktív empirikus modellek teszik lehetővé, melyek a folyamat bemenő és kimenő jellemzői közötti korrelációkat írják le a gyártási tapasztalat és célzott megfigyelések által nyert információ alapján. Egy forgácsolási folyamat alapvető kimeneti információja az elkészült alkatrész geometriai pontossága, a gyártás időtartama, illetve a megmunkálási környezet állapota a forgácsolást követően (pl. szerszám kopásának mértéke). E jellemzők a folyamatot általánosító jelleggel értékelik, és végeredményben a szerszám élénél, a forgácstőben zajló mechanizmusok által kardinális módon befolyásoltak. Ezért a technológia-tervezés során a forgácsképződés közvetlen körülményeinek célzott és kontrollált beszabályozása szükséges. E körülményeket az energia-alapú folyamatjellemzők írják le szemléletesen, vagyis arról kaphatunk képet, hogy a megmunkálás egy egységnyi szakaszának realizálása során mekkora mechanikai és termikus igénybevételek érik a rendszert. A forgácsleválasztáshoz szükséges energia mennyisége a megmunkálási környezet adottságaitól függ (pl. munkadarab és szerszám anyagának

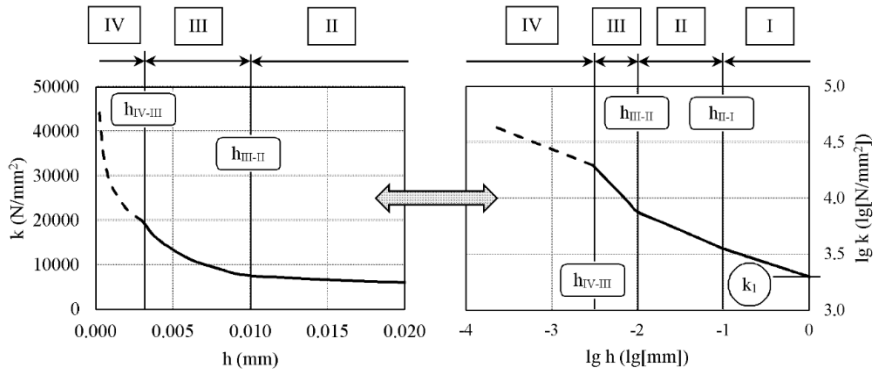
tulajdonságai, szerszám forgácsolóélének geometriája, alkalmazott technológiai paraméterek). Ez olyan, mérési adatok alapján közvetetten meghatározható mennyiség, mely a folyamatjellemzők alakulását a megmunkálás geometriai és kinematikai paramétereire viszonyítva mutatja meg. A folyamatleírás e megközelítése a *fajlagos energiaigény modellezés* (SEC – Specific Energy Consumption) [3]–[5], ami olyan prediktív modellek megalkotásának alapköve, melyek nem csak diszkrét paraméter-összeállítások mellett szolgáltatnak becsléseket, hanem alkalmazásuk a forgácsolási paraméterek kiterjedt tartományára általánosítható (adott technológiai eljárásra vonatkozóan, adott körülmények között). Ehhez praktikus egyszerű alkalmazhatóság társul, így e modellek elsősorban nem az alaptudományokon (pl. anyagszerkezettan, mechanika) keresztül levezetett általános fizikai törvényszerűségekre hivatkoznak, hanem a megmunkáló rendszer főbb bemeneti paraméterei és kimeneti jellemzői közötti korrelációkat írják le matematikai függvények képében.

A fajlagos forgácsolási erő a forgácsolási energia nagyságának reprezentatív mutatója. A fajlagos forgácsolóerő a fajlagos forgácsolási erő azon komponense, mely a forgácsoló sebességgel párhuzamos hatásvonalú igénybevételeket, nevezetesen a forgácsolóerőt jellemzi:

$$k_c = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{h \cdot b} \approx \frac{k_1}{h^{x_k}} + \text{const.} \quad (1)$$

ahol k_c (N/mm²) a fajlagos forgácsolóerő, F_c (N) a forgácsolóerő, A (mm²) a forgácskeresztmetszet, h (mm) az elméleti (más néven: deformálatlan) forgácsvastagság, b (mm) az elméleti forgácsszélesség, k_1 és x_k empirikus modell-együtthatók [6]. Az erő értéke nagymértékben függ a munkadarab anyagának deformációval, töréssel szemben tanúsított mechanikai ellenállásától, melynek mértéke (metallurgiai fémes anyagok esetén) elsősorban a mechanikai anyagjellemzőktől: folyáshatártól, szakítószilárdságtól és keménységtől függ. E jellemzők azonban lokálisan változnak a forgácstöbben a drasztikus alakváltozási folyamatok miatt, azaz alakítási felkeményedés tapasztalható. Emellett intenzív külső súrlódás lép fel a szerszám és a forgács között (vasaló-hatás), illetve belső súrlódás a munkadarab anyagában, a deformációs zónában. A k_c értéke nemlineárisan változik a forgácskeresztmetszet jellemzőivel (*mérethatás*), mely változás karakterisztikája szintén nem állandó, különösképp a mikroméretű elméleti forgácsvastagság tartományán. Ezen sajátosságok a fajlagos forgácsolóerő szakaszos modelljével jól leírhatók (ld. 1. ábrát). Tekintve, hogy a fajlagoserő-görbe az anyagalakítási folyamathoz

szükséges energia mennyiségét jelzi, az egyes szakaszok a deformációs folyamatok minőségi változására utalhatnak [7]–[9]. Ennél fogva kutatásom középpontjába a fajlagos forgácsolóerő jellemzését helyeztem, ahol céлом az 1. ábra IV., feltételezett szakaszának azonosítása és értékelése volt a többi, szakirodalomban már dokumentált tartományhoz képest.



1. ábra: A fajlagos forgácsolóerő szakaszos modellje [B1, pp. 2737]

3. A KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

Kutatómunkám közvetlen célja a fajlagos forgácsolóerő modelljének kiterjesztése az elméleti forgácsvastagság $h < 0,01$ mm tartományára, figyelembe véve az alkalmazott technológiai paraméterek hatását. Ennek eredményeként olyan átfogó, a paraméterek tartományán tekintve folytonos modell hozható létre, mely

- adott technológiai körülmények között becslést ad a mikromegmunkálás során fellépő erők, tágabb értelemben a forgácsoláshoz szükséges energia mértékére, miközben alkalmazható marad a hagyományos makromegmunkálás területére, és
- szemléletes módon teszi felismerhetővé azon kritikus állapotokat, ahol a forgácsolásban lejátszódó szignifikáns deformációs folyamat alapvető minőségében megváltozik.

E cél eléréséhez terveztem forgácsolási kísérletsorozatokat, ahol az eltérő anyagválasztási körülményeket a technológiai paraméterek szisztematikusan módosításával valósítottam meg, és a modellalkotást a megmunkálás során mért erők alapján végeztem S960QL minőségű nagy szilárdságú szerkezeti acélon. A kísérleti anyag szilárdsági paramétereinek méréséhez

szakítópróbákat folytattam, továbbá mikro-Vickers keménységet mértem. A szövetszerkezetet mikroszkópos felvételek alapján jellemeztem. Az anyagtechnológiai vizsgálatokat a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszéken végeztem.

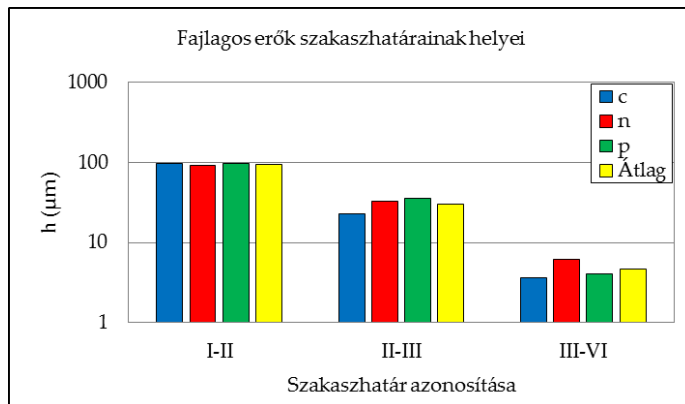
Homlokmarási kísérleteket hajtottam végre annak érdekében, hogy a fajlagos forgácsolási erő komponenseinek elméleti forgácsvastagsághoz viszonyított változását ($k(h)$ görbe) folyamatában vizsgálhassam. A marás kinematikájából adódóan h nem független bemeneti paraméter, hanem az élenkénti előtolás által adott tartományba helyezett, a szerszám forgásával periodikusan változó jellemző, ahol a tartomány felbontása a mintavételezési frekvenciától függ. E frekvenciát a szerszám szögsebességéhez hangolva határoztam meg, biztosítva ezzel a forgácsolás során mért értékek statisztikai kiértékelhetőségét. A kísérletekhez Sumitomo WEX AXMT123504PEER-G homlokmaró váltólapkát alkalmaztam Sumitomo WEX 2016 E szerszámszárral és 16 mm névleges átmérővel, ahol a megmunkálást egyetlen forgácsoló éllel végeztem annak érdekében, hogy kizárólag az egy forgács leválasztásából származó erőket mérjem. A méréseket Kondia B640 típusú, NCT-101 vezérlésű, függőleges főorsós CNC megmunkáló központon valósítottam meg, ahol az erőmérést Kistler 9257A 3-komponenses piezoelektromos erőmérővel és a hozzá csatlakoztatott Kistler 5019 töltéserősítővel végeztem. A mérési adatok regisztrálását National Instruments USB-4431 típusú adatgyűjtő segítségével hajtottam végre. A főorsó körbefordulásának periódusait Omron E3F-DS10B4 típusú kapacitív jelenlétszenzorral regisztráltam, melynek az erőmérő koordináta rendszerében értelmezett abszolút szöghelyzetét kalibrációs mérésekkel definiáltam. A kísérleteket és méréseket a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék CNC forgácsolási laboratóriumában végeztem. Az alkalmazott forgácsolási paraméterek listáját a 1. táblázat tartalmazza, ahol v_c a forgácsoló sebesség, f_z az élenkénti előtolás, a_p a tengelyirányú fogásvétel (fogásmélység), a_e a radiális fogásvétel (fogásszélesség), IR a marás kinematikai irányítottsága. Összesen 90 különböző paraméter-összeállítást vizsgáltam.

1. táblázat: Homlokmarási kísérletsorozat faktoraí és azok szintjei

Sorszám	v_c , m/min	f_z , mm/(1·1)	a_p , mm	a_e , mm	IR
1	50	0,01	0,5	8	egyen
2	75	0,04	1,0		ellen
3	100	0,16	2,0		
4	125				
5	150				

Az erőmérési adatokat az 1. ábrán szemléltetett modellezés szempontjából értékeltem ki, melyből az alábbi átfogó következtetéseket vontam le (ld. 2. ábrát az 1. ábra jelöléseinek megfelelően):

1. Új szakaszhatár (h_{III-IV}) azonosítható és különíthető el egyértelműen a többi, szakirodalomban már ismert szakaszhatároktól. Tehát az új szakaszhatár létezik, és helye számszerűen megadható a mérési sokaság kiértékelése útján.
2. Az általam kifejlesztett iteratív módszer alkalmas a fajlagos forgácsolóerő görbe szakaszainak és azok határainak azonosítására.
3. Az egyes erőkomponensekben azonosított szakaszhatárok jellemzően ugyanazon nagyságrendben találhatók, mely számszerűen mutatja, hogy a fajlagos forgácsolóerő (c) szakaszhatárai reprezentatívnak tekinthetők a többi komponensre (szerszámsugár-irányú normálerő (n) és tengelyirányú passzív erő (p)) vonatkozólag is, tehát a modellezést elegendő a c -komponensre elvégezni.



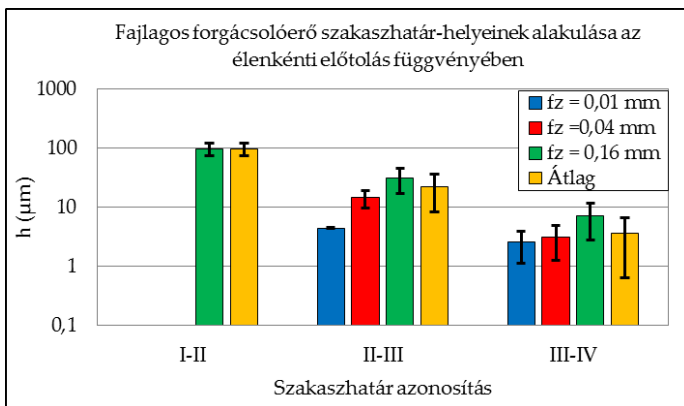
2. ábra: Fajlagos forgácsolóerő komponenseinek szakaszhatárai

Az azonosított szakaszhatárok alakulását a forgácsolási paraméterek függvényében ANOVA (variancia-analízis, „Analysis of Variance”) módszerével értékeltem. Ez alapján a következő megállapításokat tettem:

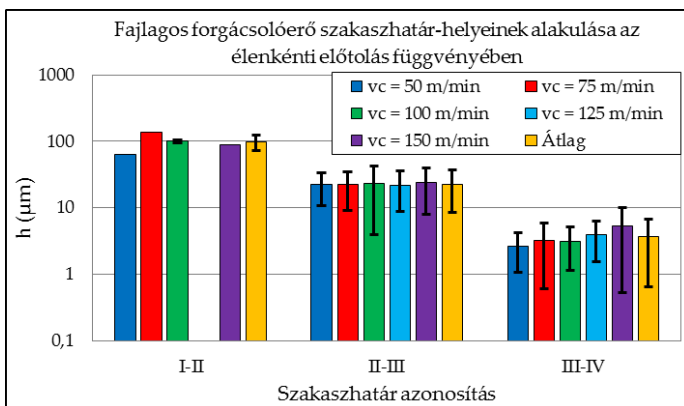
- A szakaszhatárok helyeire elsődlegesen és leginkább szignifikáns módon az f_z élenkénti előtolásnak van hatása. Az f_z növelésével a szakaszhatárok helye a nagyobb elméleti forgácsvastagság irányába tolódik.
- A b forgács szélesség hatása nem állapítható meg bizonyossággal a jelen adatok alapján.

- A v_c forgácsoló sebesség növelésével a h_{III-IV} szakaszhatár helye a nagyobb elméleti forgácsvastagság felé tolódik. A h_{II-III} szakaszhatár helyét v_c nem befolyásolja lényegi módon.
- A marás kinematikai irányítottága kis mértékben van hatással a szakaszhatárok helyeire, de e hatás nagyságrendileg kisebb, mint az f_z előtolásé általánosságban, illetve v_c befolyása a h_{II-III} szakaszhatárra.

Mindezt összegezve arra a következtetésre jutottam, hogy a h_{II-III} és h_{III-IV} szakaszhatárok helyének modell-szintű meghatározása célszerűen az f_z és v_c paraméterekkel történhet. A vonatkozó kiértékelési eredményeket a 3. és 4. ábrák foglalják össze az 1. ábra jelöléseit alkalmazva.



3. ábra: Fajlagos forgácsolóerő szakaszhatárainak alakulása az előtolással



4. ábra: Fajlagos forgácsolóerő szakaszhatárainak alakulása a sebességgel

Az ismertetett eredmények közvetett összhangban állnak a vonatkozó, szakirodalomban fellelhető független kutatási eredményekkel [7], [8], [10]. Mindezek alapján megállapítható, hogy az alkalmazott mérési és kiértékelési módszer megfelelő a jelen kutatási céloknak. A kiértékeléshez egyedi szoftvert fejlesztettem a jelen kiértékelési módszertanhoz illesztve.

A homlokmarási mérésekből származó eredmények ellenőrzéséhez homlokbeszúró esztergálási kísérleteket végeztem, ahol a forgácsolási erő komponensei mellett az elméleti forgácskeresztmetszet jellemzői is mérhetők (ellentétben a marással, ahol a forgácskeresztmetszet csak modell alapján becsülhető a megmunkálási körülményekből kifolyólag). A beszúró próbák közvetlen célja az volt, hogy a homlokmarás során mért adatokkal összehasonlítható információkat szerezzek a fajlagos forgácsolóerő alakulásáról, ezért a kísérleteket a marásnál alkalmazott szerszám élgeometriájához hasonló adottságokkal rendelkező beszúró szerszámmal (Seco 10EAR2.5FA váltólapka Seco CEAR2525M10D szerszámszárban), továbbá hasonló elméleti forgácskeresztmetszeti paraméterek mellett valósítottam meg. Utóbbit a technológiai paraméterek megfelelő választásával biztosítottam. Az elméleti forgácskeresztmetszet utólagos mérhetőségét biztosítandó, az egy kísérleten belül állandó átmérőn történő esztergálást úgy terveztem, hogy a szerszám a próbatest egyetlen körülfordulásán belül be- és kilépjen az anyagból. Ezáltal a marás különböző kinematikai irányítottságainál jellemző forgácsgeometria-változást is szimuláltam. A mozgások pontos megvalósítása érdekében a megmunkálást Hembrug Mikrotorn 50 típusú ultraprecíziós CNC-esztergagépen végeztem. A forgácsolási erőkomponensek méréséhez a homlokmarásnál is használt Kistler 9257A erőmérőt alkalmaztam Kistler 8050A töltéserősítővel és National Instruments USB-4431 adatgyűjtővel. A próbatest szögelfordulását Omron E3F-DS10B4 kapacitív jelenlét-érzékelővel mértem. A kísérleteket és méréseket a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék Ultraprecíziós és mikromegmunkáló laboratóriumában végeztem. Az alkalmazott paramétereket a 2. táblázat összegzi, ahol v_c a forgácsoló sebesség, Z_{max} a maximális megmunkálási mélység, χ olyan arányszám, mely meghatározza a horony kiterjedésének $\chi \cdot 2\pi$ szögtartományát a próbatest forgástengelyéhez rögzített polárkoordináta-rendszerben.

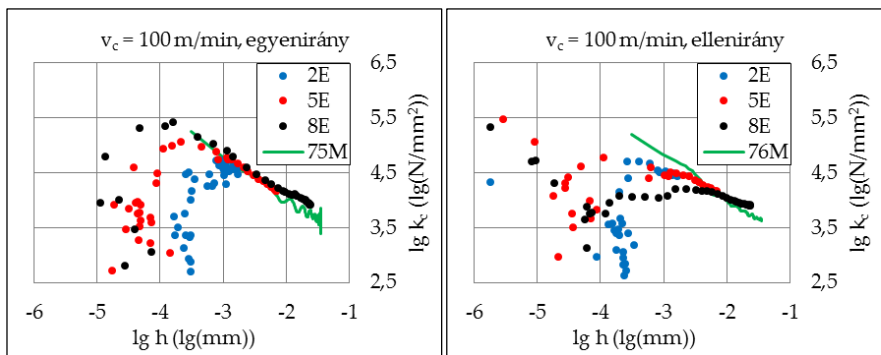
2. táblázat: Homlokbeszúró kísérletsorozat faktorai és azok szintjei

Sorszám	v_c , m/min	Z_{max} , mm	χ , 1
1	50	0,01	0,75
2	100	0,02	
3	150	0,04	

Az elméleti forgácskeresztmetszet jellemzőinek azonosításához meghatároztam a forgácsolt hornyok keresztmetszeti profilgörbéjét Mitutoyo SurfTest SJ-401 típusú tapintófejes érdesség- és profilmérő segítségével. Az így definiált elméleti forgácsvastagság és forgács szélesség értékeket a mért erőkhöz rendeltem a jelenlétszenzor által szolgáltatott referenciajel segítségével, melyet követően kiszámítottam a fajlagos forgácsolóerőt a hornyok adott keresztmetszetére vonatkozóan. Az ily módon elvégzett kiértékelés eredményei alapján a következő megállapításokat tettem:

- A homlokbeszűrő esztergálási kísérletekből azonosított fajlagoserőszakaszok és azok határainak helye nagy hasonlóságot mutatnak a homlokmarás eredményeivel. Ezt az 5. ábra példája szemlélteti, ahol az M-jelű adatsor marásból, az E-jelű az esztergálási próbákból származó adatsorok.
- Tehát a homlokbeszűrő esztergálási kísérletek alkalmasak a marási folyamat során fellépő energetikai viszonyok szimulálására a technológiai körülmények hasonlóságának biztosítása mellett, továbbá
- a végrehajtott homlokmarási kísérletek alkalmasak a fajlagos forgácsolóerő erőmérés útján történő meghatározására a technológiai paraméterek széles tartományában.

Mіндеzt összegezve elmondható, hogy a marási kísérletek során azonosított új szakaszhatár létezik, melynek elméleti forgácsvastagság által jellemzett helye kedvező hasonlósággal meghatározható eltérő típusú, szabályos élű szerszámmal végzett forgácsoló megmunkálások során.



5. ábra: Marási és esztergálási kísérletekből meghatározott fajlagos forgácsolóerők összehasonlítása

Az esztorgálási kísérlek eredményei és az ezekhez nagy hasonlóságot mutató független kutatási eredmények [11] alapján megállapítást nyert a marási eredmények értelmében tett feltételezés, miszerint az új szakaszhatár helye nem azonos a szakirodalomban minimális elméleti forgácsvastagságként (h_{min}) jegyzett paraméterrel, ugyanis míg h_{min} a stabil forgácsképzéshez szükséges legkisebb elméleti forgácsvastagságot mutatja meg, addig az új szakaszhatár helye az anyagleválasztás alsó határát azonosítja. Az új szakaszhatár helyénél kisebb értékű elméleti forgácsvastagság alkalmazása esetén a munkadarab felületének lokális rugalmas és képlékeny alakítása történik anyagleválasztás nélkül. Emellett az 5. ábra jól szemlélteti, hogy a fajlagos forgácsolóerő görbéje az új szakaszhatár helyénél kisebb h felé haladva először degresszíven nő, majd progresszíven csökken, tehát megmutatja a lehetőségét a fajlagos erő-modell azon problémájának feloldására, miszerint zérus elméleti forgácsvastagság felé haladva $k(h)$ is zérushoz tart ($a \infty$ helyett), ami megfelel a valós folyamatoknak. A homlokbeszűrő esztorgálási kísérletek kiértékelését is egyedileg fejlesztett szoftvercsomag segítségével végeztem.

4. TÉZISEK

Az elvégzett kísérletek mérési adatainak kiértékelése által kapott eredmények alapján az alábbi új tudományos megállapításokat fogalmaztam meg:

1. TÉZIS: Az S960QL minőségű nagy szilárdságú szerkezeti acél szabályos élű szerszámmal végzett forgácsolását jellemző, a h elméleti forgácsvastagság függvényében értelmezett fajlagos forgácsolóerő görbéjében a $h < 0,01$ mm tartományon belül is azonosítható szakaszhatár.

Az 1. tézishez a [B1], [B4] és [B7] publikációim kapcsolódnak.

2. TÉZIS: Adott megmunkálási körülmények között, adott anyagú munkadarab szabályos élű szerszámmal végzett forgácsolását jellemző fajlagos forgácsolóerő-modell szakaszainak és ezek határát definiáló szakaszhatároknak erőmérésen alapuló meghatározása a szakirodalomban eddig elterjedten alkalmazott, állandó elméleti forgácskeresztmetszet mellett végzett vizsgálatokhoz képest jelentősen kevesebb kísérlettel, az anyagalakítás tranzienst folyamatainak figyelembe vételével az alábbi módon lehetséges:

- **Állandó technológiai körülmények között végzett homlokmarási műveletelem során mérni kell a fellépő forgácsolási erő komponenseit**

(forgácsolóerő, normálerő, passzív erő) a szerszámél ortogonális koordináta rendszerében.

- Az erőmérést több, időben egymást folytatólagosan követő szerszámfordulat időtartamig kell végezni, ahol a diszkrét erőmérés mintavételezési frekvenciája a szerszám fordulatszámának egész számú többszöröse, és a szerszám $0 \dots 2\pi$ közötti elfordulásának az erőmérés pillanatában jellemző értékét jelenlét-érzékelő regisztrálja az erőméréssel szimultán.
- A mért jelekből meg kell határozni a szerszám adott elfordulási állapotához tartozó reprezentatív erőértékeket az azonos elfordulási állapotokban mért erők számtani középértékeként.
- A reprezentatív erőértékek alapján meg kell határozni a forgácsolási erőnek a szerszám adott elfordulási állapotában jellemző, elméleti forgácskeresztmetszetre vonatkozó fajlagos komponenseinek értékét az elméleti forgácsvastagság függvényében.
- Az így képzett pontpárok alkotta halmazban a fajlagoserő-modell szakaszhatárainak helyei iteratív módon azonosíthatók a következő lépésekben:
 1. Meg kell adni a szakaszhatárok feltételezett helyeit.
 2. E szakaszhatárok által meghatározott szakaszokra

$$k = f(h)$$

alakú regressziós függvénymodellt kell illeszteni, ahol k (N/mm²) a fajlagos erőkomponens értéke, h (mm) az elméleti forgácsvastagság.

3. A szakaszhatárok helyeinek iteratív meghatározására vonatkozó célfüggvény

$$\mu = 1 - \frac{h_{metszés,i,i+1}(k_i = k_{i+1})}{h_{manuális,i,i+1}} \rightarrow \min$$

alakú, ahol i a fajlagoserő-modell adott szakaszának azonosító sorszám, $h_{manuális,i,i+1}$ (mm) a szakaszhatár feltételezett helye az i és $i+1$ sorszámú szakaszok között, $h_{metszés,i,i+1}$ (mm) az i és $i+1$ szakaszokra vonatkozó regressziós görbék analitikusan számított metszésének helye, μ (1) a szakaszhatár feltételezett és számított helye közötti relatív eltérés.

A 2. tézishez a [B1]–[B4], [B6], [B7] és [B9]–[B11] publikációim kapcsolódnak.

3. TÉZIS: Az S960QL minőségű nagy szilárdságú szerkezeti acél szabályos élű szerszámmal végzett forgácsolását jellemző, a h elméleti forgácsvastagság függvényében értelmezett fajlagos forgácsolóerő görbéjében a $h < 0,01$ mm alatti elméleti forgácsvastagság tartományában azonosított szakaszhatár helye elsősorban az élenkénti előtolástól függ. E kapcsolatot a

$$h_{III-IV} = C_{h,f} \cdot f_z^{x_h}$$

modell írja le, ahol h_{III-IV} (μm) a szakaszhatár helyét definiáló elméleti forgácsvastagság, f_z (mm/(1·1)) az élenkénti előtolás, $C_{h,f}$ és x_h regressziós konstansok. Az elvégzett homlokmarási kísérletekre vonatkozóan, hűtés-kenés nélküli, $f_z = 0,01...0,16$ mm/(1·1) élenkénti előtolással végzett megmunkálás esetén:

$$C_{h,f} = 11,6 \text{ és } x_h = 0,51$$

A 3. tézishez a [B1], [B4] és [B8] publikációim kapcsolódnak.

4. TÉZIS: Az S960QL minőségű nagy szilárdságú szerkezeti acél szabályos élű szerszámmal végzett forgácsolását jellemző, a h elméleti forgácsvastagság függvényében értelmezett fajlagos forgácsolóerő görbéjében a $h < 0,01$ mm alatti elméleti forgácsvastagság tartományában azonosított szakaszhatár helye függ a forgácsoló sebességtől. E kapcsolatot a

$$h_{III-IV} = C_{h,v} \cdot v_c^{z_h}$$

modell írja le, ahol h_{III-IV} (μm) a szakaszhatár helyét definiáló elméleti forgácsvastagság, v_c (m/min) a forgácsoló sebesség, $C_{h,v}$ és z_h konstansok. Az elvégzett homlokmarási kísérletekre vonatkozóan, hűtés-kenés nélküli, $f_z = 0,01...0,16$ mm/(1·1) élenkénti előtolással és $v_c = 50...150$ m/min forgácsoló sebességgel végzett megmunkálás esetén:

$$C_{h,v} = 0,2 \text{ és } z_h = 0,551$$

A 4. tézishez a [B1], [B4]–[B6] és [B8] publikációim kapcsolódnak.

5. TÉZIS: A homlokmarási és homlokbeszűrő esztergálási kísérletek eredményei, illetve a kapcsolódó szakirodalmi adatok alapján bizonyossággal állítható, hogy a $h < 0,01$ mm alatti elméleti forgácsvastagság tartományában azonosított szakaszhatár helyét jelölő elméleti, deformálatlan forgácsvastagság (h) az anyagleválasztás alsó technológiai határát jelöli, melynél kisebb h érték mellett az anyag felszíni rétegének lokális rugalmas és képlékeny deformálása történik. Ez nem azonos a

minimális elméleti forgácsvastagsággal, ami a stabil anyagleválasztás alsó határát jelöli.

6. TÉZIS: Adott megmunkálási körülmények között, adott anyagú munkadarab szabályos élű szerszámmal végzett forgácsolását jellemző fajlagos forgácsolási erő egyenértékű elméleti forgácsvastagság függvényében való alakulása, valamint az anyagalakítás tranzienst folyamatainak meghatározása az alábbi módon lehetséges:

- Állandó technológiai körülmények között, állandó átmérőn végzett homlokbeszúró esztergálási művelet során mérni kell a fellépő forgácsolási erő komponenseit (forgácsolóerő, normálerő, passzív erő) a szerszámél ortogonális koordináta rendszerében, ahol a beszúró szerszám főéle névlegesen egyenes és párhuzamos a próbatest homlokfelületével, továbbá az anyagalakítási folyamatnak a próbatest egy körülfordulásán belül le kell zajlania.
- Az erőmérés során a szerszám $0 \dots 2\pi$ közötti elfordulásának az erőmérés pillanatában jellemző értékét jelenlét-érzékelő regisztrálja az erőméréssel szimultán.
- A homlokbeszúró esztergálással készült horony keresztmetszetének profilját le kell mérni a homlokfelületre merőleges és a horony vezérgörbéjének homlokfelület síkjában vett vetületéhez képest merőleges irányban.
- A profilmérés helyén érvényes deformálatlan forgácskeresztmetszet a

$$A = \left| \int_{x_{\text{kezdő}}}^{x_{\text{vége}}} p(x) \cdot dx \right|$$

összefüggéssel adott bizonyossággal meghatározható, ahol A (mm²) a deformálatlan forgácskeresztmetszet, x (mm) a horonyprofil mért értékének helye a mérési tartományon belül, $p(x)$ (mm) a horonyfenék mért profiljára illesztett görbe, $x_{\text{kezdő}}$ (mm) és $x_{\text{vége}}$ (mm) a horonyfenék pontjainak tartománya a mérési tartományon belül.

- A profilmérés helyén érvényes egyenértékű deformálatlan forgácsvastagság a

$$h_{\text{egy}} = \frac{A}{\left| x_{\text{vége}} - x_{\text{kezdő}} \right|}$$

összefüggéssel adott bizonyossággal meghatározható, ahol h_{egy} (mm) az egyenértékű deformálatlan forgácsvastagság, A (mm²) a deformálatlan forgácskeresztmetszet, $x_{kezdő}$ (mm) és $x_{vége}$ (mm) a horonyfenék határai a mérési tartományon belül.

- A mért erőértékek alapján meg kell határozni a forgácsolási erőnek a próbatest adott elfordulási állapotában jellemző, elméleti forgácskeresztmetszetre vonatkozó fajlagos értékét a h_{egy} egyenértékű elméleti, deformálatlan forgácsvastagság függvényében.

A 6. tézishez a [B5] publikációm kapcsolódik.

MŰSZAKI ALKOTÁS: A jelen kísérletek kiértékelésénél alkalmazott saját fejlesztésű szoftvercsomaggal a fajlagos forgácsolóerő görbéjének meghatározása, nevezetes szakaszainak és szakaszhatár-helyeinek azonosítása a kivitelezett homlokmarási és homlokbeszűrő esztergálási kísérletekhez hasonló technológiai körülményekre vonatkozóan következetesen és reprodukálható módon lehetséges.

5. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] S. Wojciechowski, „The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 89, pp. 110–123, 2015
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.006
- [2] V. García Navas *et al.*, „Mechanisms involved in the improvement of Inconel 718 machinability by laser assisted machining (LAM)”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 74, pp. 19–28, 2013
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.06.009
- [3] Z. Deng *et al.*, „Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption”, *J. Clean. Prod.*, 166, pp. 1407–1414, 2017
DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.022
- [4] S.-J. Shin, J. Woo és S. Rachuri, „Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters”, *J. Clean. Prod.*, 161, pp. 12–29, 2017
DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.013
- [5] N. Liu *et al.*, „A novel approach to predicting surface roughness based on specific cutting energy consumption when slot milling Al-7075”, *Int. J. Mech. Sci.*, 118, sz. pp. 13–20, 2016
DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.09.002
- [6] J. Bali, *Forgácsolás*. Budapest, Tankönyvkiadó, 1985.
- [7] M. H. M. Dib, J. G. Duduch és R. G. Jasinevicius, „Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro endmilling”, *Precis. Eng.*, Article In Press, 2017
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.08.016
- [8] M. Malekian *et al.*, „Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum”, *J. Mater. Process. Technol.*, 212:(3), pp. 553–559, 2012
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.022

- [9] H. T. Yun *et al.*, „Ploughing detection in micromilling processes using the cutting force signal”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 51:(5), pp. 377–382, 2011
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.003
- [10] X. Wu *et al.*, „Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting”, *Precis. Eng.*, 45, pp. 359–364, 2016
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.03.012
- [11] A. C. Ramos *et al.*, „Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut”, *J. Mater. Process. Technol.*, 212:(3), pp. 594–600, 2012
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.007

6. A DOLGOZAT TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

- [B1] I. Biró és T. Szalay, „Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 88:(9), pp. 2735–2743, 2017
DOI: 10.1007/s00170-016-8957-x
- [B2] M. Czampa, I. Biró és T. Szalay, „Effects of different cutting conditions on the surface roughness parameters of iron-copper-carbon powder metallurgy composites”, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 19:(5), pp. 440–456, 2017
DOI: 10.1504/IJMMM.2017.10008552
- [B3] M. Czampa, I. Biró és T. Szalay, „A novel machinability test for determining the cutting behaviour of iron-based, carbon-containing and copper-containing powder metallurgy steels (PMS)”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89:(9), pp. 3495–3507, 2017
DOI: 10.1007/s00170-016-9313-x
- [B4] I. Biró, M. Czampa és T. Szalay, „Experimental model for the main cutting force in face milling of a high strength structural steel”, *Period. Polytech. - Mech. Eng.*, 59:(1), pp. 8–15, 2015
DOI: 10.3311/PPme.7516
- [B5] I. Biró és T. Szalay, „A fajlagos forgácsolási erők vizsgálata paláston beszúró esztergálási próbával”, in *OGÉT 2015*, Csíksomlyó, Románia, 2015, pp. 46–49
- [B6] I. Biró és T. Szalay, „A forgácsolási sebesség hatása a fajlagos forgácsolóerőre: modellalkotás az S960QL nagy szilárdságú szerkezeti acél homlokmarásához”, in *OGÉT 2014*, Nagyszeben, Románia, 2014, pp. 46–49
- [B7] I. Biró, T. Szalay és S. Markos, „Machinability of S960QL high strength structural steel: energetic description of cutting at small chip-thickness in face milling”, in *IN-TECH 2013*, Budapest, Magyarország, 2013, pp. 237–240
- [B8] I. Biró, T. Szalay és B. Zs. Farkas, „Comparative evaluation of machinability of iron-based materials and tool wear in micro-drilling”, in *IN-TECH 2014*, Leiria, Portugália, 2014, pp. 139–142
- [B9] I. Biró és T. Szalay, „Nagy szilárdságú acélok forgácsolhatóságának energetikai aspektusai”, in: *OGÉT 2013*, Arad, Románia, 2013, pp. 61–64
- [B10] I. Biró és T. Szalay, „Forgácsolhatóság kísérleti vizsgálata S960QL nagy szilárdságú acélnál”, *Technika Műszaki Szemle*, 55:(12), pp. 18-22, 2012
- [B11] I. Biró, „Experimental machinability: Examination of S960QL high tensile steel”, in *GTE 2012*, Budapest, Magyarország, 2012, CD-ROM