



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



## Forgácsvastagság hatása a sorjaképződésre síkmarásnál

című PhD értekezés téziszfüzete

Írta:

Póka György

*okleveles gépészmérnök*

Témavezető:

Dr. Németh István

*egyetemi docens*

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

Budapest, 2021



## 1. A KUTATÁSI TÉMA ISMERTETÉSE, CÉLKITŰZÉSEK

A gyártás során a marással készült alkatrészeknél elvárt a munkadarab sorjamentessége. A sorja problémát okoz a későbbi műveletek (szerelés, mérés) elvégzésénél és a szerkezet működését is károsan befolyásolhatja. A gyártók a sorja utólagos eltávolítása helyett, annak költség- és időigénye miatt törekednek már a megmunkálás közben csökkenteni a sorját. Kutatók vizsgálták a szerszámgeometria és szerszám-pálya hatását és kimutatták, hogy síkmarás esetén jelentős a szerszámél pontjainak kilépési sorrendje és a síkbeli kilépési szög befolyása a sorjaképződésre. A kilépési szög értéke a munkadarab kontúrja és a szerszámél pályája segítségével határozható meg. A szerszámél pályáját gyakran körrel helyettesítik, mivel leegyszerűsíti a számítást. Azonban a közelítés pontossága az előtolás növelésével csökken. A kutatás egyik célja e közelítés hibájának meghatározása volt.

Megfelelő szerszám-pályák tervezésével a sorjaképződés csökkenthető. A szerszám-pályákkal szemben azonban számos további követelmény támasztható (hosszúság, töréspontok és hirtelen irányváltások minimalizálása...), melyeknek együttesen megfelelni sokszor nem lehetséges. A kutatás célja sorjaképződés szempontjából kedvező szerszám-pályák analitikus előállításának vizsgálata volt.

A kísérleteim során bebizonyosodott, hogy a kilépési szöggel nem arányosan változik kilépéskor a forgácsvastagság ( $h$ ). A kilépési szög hatása így nem egyértelmű. A kutatás fő célja a  $h$  hatásának a kiderítése volt. Először azonban a forgácsvastagság számítási módszereket kellett megvizsgálni. A munkasíkbeli homlokszög fontos szerepet játszik a sorjaképződés szempontjából, a létező módszerek azt azonban  $0^\circ$ -nak feltételezik. A kutatás célja ezért olyan modell kifejlesztése volt, ami a szerszám munkasíkbeli homlokszögét is képes figyelembe venni.

A forgácsvastagság hatásának vizsgálatához nem volt elegendő a képződött sorja minőségi értékelése. Kulcsfontosságú a sorja méretének meghatározása folytonosan a kontúr mentén. A sorja mérete a tapasztalatok szerint alumíniumnál 0.1-2.0 mm között változott, tehát optikai műszerekkel jól detektálható. Több különböző módszer létezik, amellyel lehetséges a sorja mérése. Nagy többségük azonban drága és hosszadalmas, nem alkalmas szerszámgépen történő mérésre illetve a

kiértékelő szoftver nem teszi lehetővé a mérést folytonosan a kontúr mentén. A kutatás másik fő célja egy megfelelő módszer kifejlesztése volt, amely a fenti követelményeknek megfelel.

## 2. ELŐZMÉNYEK, KUTATÁSI MÓDSZEREK

Az ISO 13715 számú szabvány a sorját a következőképpen definiálja: sorjásnak tekinthető a megmunkálás során kialakuló azon él, amelyen a maradék anyag nagysága mérhető, mérete nullától különböző [Iso].

Az ISO 13715 szabvány a sorját egyetlen paraméterrel jellemzi: a két határoló sík közül a nem megmunkált sík és a sorja csúcspontja közötti legkisebb távolság.

Beier [Bei] definíciója szerint a sorja egy, a megmunkálási folyamat során, akaratlanul, szinte mindig létrejövő képződmény, amely átlépi a munkadarabot határoló, a gyártás során létrejött felületeket. Térfogata mérhető, de a munkadarabhoz viszonyítva jelentősen kisebb.

Gillespie [Gil] definíciója - eltérően az előbbtől -, nem a ténylegesen megmunkált, hanem az ideális, elméleti felületeket tekinti referenciának. Így akkor is sorjásnak kell tekinteni egy élt, ha a vizsgált szakasz mentén az elméleti kontúrhoz képest nem csak anyag többlet, hanem hiány (kitöredezés) is megfigyelhető. A sorja tehát egy, a gyártás folyamán keletkező, meghatározható méretű és térfogatú eltérés az elméleti határoló éltől, lehet anyagihiány vagy -többlet.

Egy alkatrész élének minősítése, annak eldöntése, hogy az sorjás-e vagy sem, gyakran nem egyértelmű. Az alkatrészek funkciója, a vele szemben támasztott követelmények rendkívül sokfélék lehetnek, ezért is nehéz nemzetközileg elfogadott szabványt létrehozni. A gyártók leginkább a saját szempontjaikat figyelembe vevő, egyedi utasításokat használnak [Aur].

Gillespie elsőként sorolta a sorjakat különböző típusokba [Gil2]. Megfigyelései alapján négy típust határozott meg: Poisson-sorja, kihajló sorja, szakadási sorja és „levágási” sorja.

Gillespie [Gil] hat fizikai folyamatot állapított meg, melyek sorjaképződéshez vezethetnek.

1. Forgácsolt anyag oldalirányú folyása.
2. Anyag kihajlása.
3. Forgács letépése a munkadarabról.
4. Anyag lerakódás több rétegben (megfolyás után megszilárdulás a

szerszámélen).

5. Az anyag nem nyíródik el a nyírási vonal teljes hossza mentén.
6. Anyag befolyása résekbe.

A folyamatok függenek az anyagjellemzőktől és a technológiai paraméterektől. Az első három az anyag képlékeny alakváltozásából következik, a hatodik öntésnél és előformálásnál létrejövő sorjára vonatkozik.

A sorjaképződés folyamatának és a sorjaképződés csökkentésének a kutatása két különböző terület. Gillespie [Gil2] már korábban megfigyelte, hogy a sorjaképződés nem előzhető meg csak az előtolás, forgácsolási sebesség vagy szerszámgeometria megváltoztatásával. Csak egy paraméter változtatása nem elegendő a többi paraméterrel való kölcsönhatása miatt. A szerszámhátránya megváltoztatása is csak korlátozott mértékben valósítható meg, mert a ciklusidő hátrányosan növekszik.

Hashimura [Has] leírta és osztályozta a síkmarásnál keletkező sorjakat. Megfontolásai szerint a sorjaképződést nemcsak a forgácsolási paraméterek, a szerszám és munkadarab geometria, hanem az anyag mechanikai tulajdonságai is befolyásolják. A sorjaképződés mechanizmusát 8 állapotra osztotta. Egy bizonyos állapotnál a folyamat elágazik aszerint, hogy a vizsgált anyag képlékeny vagy rideg. A két anyagtulajdonság eltérő viselkedése, a repedések előtti deformáció és a repedések tovább terjedése miatt a sorja alakja különböző lesz. A Hashimura által leírt sorjaképződési mechanizmust megerősítették végeelemes analízissel, amely rugalmas-képlékeny anyagmodellt használ síkbeli feszültségi állapottal.

Hashimura [Has] megfigyelése szerint a homlokmarás során képződött sorja függ a szerszámél pontjainak kilépési sorrendjétől. A sorja kialakulását közvetlenül befolyásolja még a forgács leválásának a szöge. Ennek a szögnek a pontos meghatározása azonban marási műveleteknél nagyon bonyolult. Közelítőleg meghatározható váltólapkás szerszám esetén a lapka és a munkadarab kilépési felületének helyzetéből és összefügg a szerszámél kilépési sorrendjével [Has, Has2]. A kilépési sorrendet befolyásolja a szerszám axiális, illetve munkasíkbeli homlokszöge, a kilépési szög, a főél-elhelyezési szög, továbbá a forgácsolási paraméterek: a fogásmélység és az elméleti forgácsvastagság ami közvetlen kapcsolatban áll az fogankénti előtolással. A kilépési sorrend segítségével hatékonyan előrejelezhető marásnál a sorja

keletkezésének várható helye.

A képződött sorját gyakran el kell távolítani, ami egy további műveletet, időráfordítást és költséget jelent. A sorjaeltávolítási módszerek négy fő csoportba sorolhatók [Gil3]: mechanikus, termikus, kémiai és elektromos sorjaeltávolítás. Gillespie kézikönyvében mintegy 100 különböző módszert ír le. A különböző módszereket és eszközöket általában egy jellegzetes felület- vagy alkatrésztípushoz fejlesztették ki, ezért felhasználásuk korlátozott. A megfelelő módszer kiválasztásához ismerni kell a hatásait a munkadarab tulajdonságaira (a kialakult felület minősége, a méretpontosság, alakhibák, bevonatok, maradó feszültségek, vagy a munkadarab végső színe).

A kutatások alapvető célja a sorja megbízható detektálása, paramétereinek mérése [Aur2]. A legfontosabb mérhető paraméterek a sorjamagasság, sorjatövestagság és sorjavastagság, sorjatérfogat és sorjakeménység. Leggyakrabban a sorjamagasságot és sorjavastagságot mérik, mivel ezek mérése a legegyszerűbb. Számos módszert dolgoztak ki különböző felhasználási területekhez, paraméterekhez és pontosságokhoz. Ipari környezetben gyakran fontosabb annak ismerete, hogy mely sorjaparaméterek jelenthetnek potenciális veszélyt a gyártott termék működésére, mint a keletkezett sorja paramétereinek számszerű meghatározása.

A különböző sorjamérési módszerek az alábbi csoportokba sorolhatók:

- egy-, kettő-, vagy három-dimenziós mérés
- roncsolásmentes vagy roncsolással járó
- érintéses vagy érintésmentes
- folyamat közbeni vagy folyamaton kívüli.

A sorja mérése érintés nélkül optikai úton oldható meg, kamera rendszerek, mikroszkóp vagy lézeres interferometria alkalmazásával.

A sorja mérését furatoknál lézeres háromszögeléssel először Aurich [Aur3] mutatta be.

Chern [Che3] a furatok peremén képződött sorja méretének megállapítására képfeldolgozó szoftvert használt, ami a fekete pixelek számából következtet a sorja méretére. A módszer jól alkalmazható egymást metsző furatok vizsgálatához.

A sorjáról készült képek az él vagy kontúr detektálásával használhatók a sorja méretének megállapítására. Az élek detektálását könnyebbé teszi a képek szegmentálása (csak fekete és fehér pixelek). Az Otsu [Ots] által leírt

módszerrel a fekete és fehér szintet elválasztó küszöbérték automatikusan meghatározható. Ezzel az értékkel szegmentálva a képet a fekete és fehér területek átlagértékének (az eredeti képen) különbsége maximális. A Chan és Vese [ChV] által leírt módszer a képen felvett kiindulási görbe iterálásával a bezárt területek szórásának súlyozott összegének minimumát keresi. Két paraméter változtatható,  $\mu$  a határológörbe hosszát (a nagyobb érték rövidebb görbét eredményez),  $\nu$  pedig a belső területet befolyásolja (a nagyobb érték kisebb területet ad).

Éldetektálásra általánosan használható a gradiens módszer numerikusan számítva. A konvolúció alkalmazható a képzaj és élesség csökkentésére (Gauss filter) illetve élek kiemelésére. Előbbiben a kernel egy Gauss felület diszkretizálva, utóbbiban a Gauss felület  $x$  és  $y$  iránti deriváltja vagy azok négyzetösszege diszkretizálva. A második derivált jól közelíthető két különböző paraméterű Gauss felület különbségével. Canny [Can] éldetektáló módszere a Gauss felület deriváltjára épülő speciális kernelt használ.

A szerszámnak az anyagba történő be- és kilépése befolyásolja a sorjaképződést, továbbá a munkadarab és a szerszám geometria valamint a szerszám pálya. Általában a szerszám és a munkadarab geometriája nem változtatható, azonban a szerszám pálya módosítható. Ezt kihasználva a szerszám pályák gondos tervezésével, a kilépés megelőzésével és a kilépési szög megfelelő tartományra szűkítésével csökkenthető a sorjaképződés [Aur2].

A forgácsvastagság pontos ismerete számos esetben szükséges. Alapvető a forgácskeresztmetszet, a forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő meghatározásához, valamint a folyamat modellezéséhez.

Síkmarásnál, egyenes irányú előtolás esetén a forgácsvastagság meghatározásához szükséges a szerszámélen felvett pontok pályájának ismerete, ami a forgó főmozgás és a lineáris előtolásból adódik. Martellotti [Ma2] kutatása során a '40-es években ehhez cikloisgörbéket használt. Később Spiewak [Sp2] megerősítette e modell helyességét.

A forgácsvastagság meghatározásához legegyszerűbb közelítésben a fogankénti előtolást ( $f_z$ ) és a szerszám szöghelyzetét ( $\phi$ ) kell figyelembe venni:  $h(\phi) = f_z \cdot \cos(\phi)$ .

A kör és a cikloisgörbe alaki hasonlóságát kihasználva a forgácsvastagság számítására viszonylag egyszerű analitikus összefüggés

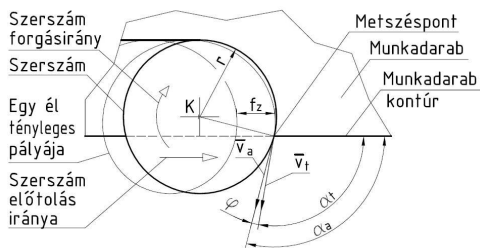
vezethető le [Ma2]. Ez a módszer gyakorlatilag pontosnak mondható, ha a szerszámsugár,  $r$  jelentősen nagyobb a fogankénti előtolásnál:  $r \gg f_z$ , ezért több kutató is használja. A szerszám pontjainak pályáját a szerszámhoz rögzített koordináta rendszerben Spiewak sikeresen felírta [Sp2]. Ennek segítségével a forgácsvastagság pontosabban meghatározható a levezetett transcendens egyenletből.

Egy másik lehetséges út a trigonometrikus függvény polinomiális vagy Taylor sorral közelítése, mely zárt alakú megoldást tesz lehetővé. Ezt a módszert számos kutató sikeresen használja.

### 3. A KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

A kutatás során alapvetően az ellenirányú marást vizsgáltam, ahol a szerszámél munkadarabból történő kilépésekor sorja keletkezhet. Egyszerű munkadarab geometria esetén egyenirányú marással dolgozva elkerülhető a kilépés. Sok esetben azonban nem kerülhető el, tehát szükséges azok vizsgálata.

A kutatásomban először a kilépési szög közelítő számításának a hibáját vizsgáltam. A kilépési szög elméletileg pontos értéke síkmarás esetén két görbe közös metszéspontjában vett két érintővel határozható meg. Az egyik görbe a munkadarab kontúrja, a másik pedig a marószerszám egyik forgácsoló élén, a forgástengelytől legtávolabb lévő pontnak a pályája (1. ábra). A kilépési szög,  $\alpha$  értéke  $0^\circ$  és  $180^\circ$  közötti.



#### 1. ábra A kilépési szög pontos és közelítő értéke közötti különbség

Az 1. ábrán a metszéspontban az elméletileg pontos pályához tartozó sebességvektor  $\vec{v}_t$ , ehhez tartozik a elméletileg pontos kilépési szög,  $\alpha_t$ . A szerszámél pályája közelíthető körrel, ehhez  $\vec{v}_a$  sebességvektor és  $\alpha_a$  kilépési szög tartozik. A két sebességvektor által bezárt szög  $\varphi$ , ami megegyezik a kilépési szög pontos és közelítő értékének különbségével. A



szögeltérést a szerszámél szöghelyzete és az aktuális előtolás befolyásolja.

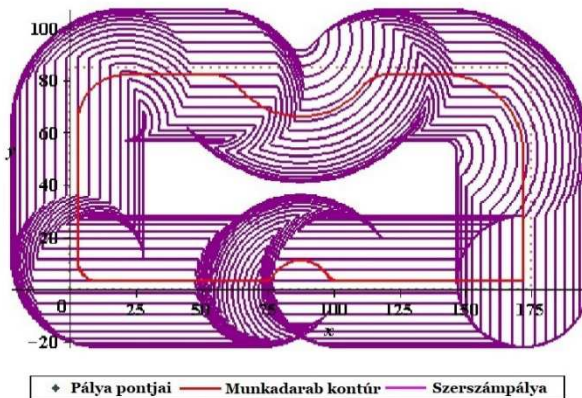
A közelítés pontossága vizsgálható a  $\varphi$  szögeltérés szélsőértékének megkeresésével tetszőleges előtolás esetén. A  $\varphi$  szögeltérés meghatározható a pontos és közelítő görbék radiánban vett meredekségének különbségéből, ennek szélsőértékére az alábbi összefüggések adódtak:

$$\Phi(k) = \arcsin(f/2r\pi) \quad (1a)$$

$$\Phi(k) = -\arcsin(f/2r\pi) \quad (1b)$$

Az összefüggésekben  $f$  a fordulatonkénti előtolás és  $r$  a szerszámsugár. A vizsgálatot kiterjesztve kör mentén történő előtolásra előbbivel megegyező eredmény adódott. A gyakorlatban használt paraméterek mellett a közelítés elfogadhatónak mondható és használatával egyszerűsödik a kilépési szög számítása.

Az eredményt felhasználva a szerszám egy pontjának pályáját körrel közelítve az állandó kilépési szöget adó szerszám pályák analitikusan tervezhetők. Egy köríveket és egyeneseket tartalmazó kísérleti munkadarab geometriát terveztem, amihez  $0-180^\circ$  között kilépési szöget biztosító szerszám pályákat hoztam létre. A 2. ábrán jól megfigyelhető, hogy egyenes kontúrelemhez egyenes, kör kontúrelemhez kör pályaelem tartozik. A szerszám pályát leíró egyenletekkel ez analitikusan bizonyítható.

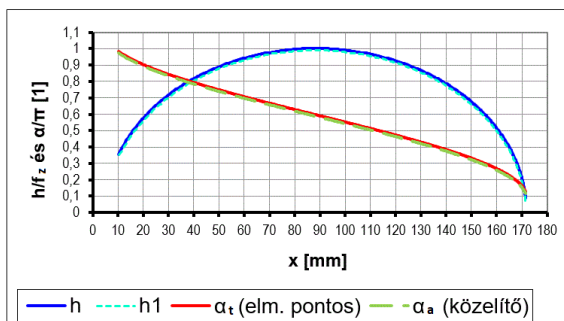


**2. ábra** A kísérleti munkadarab ellenirányú marásához tartozó szerszám pályák, a kilépési szög  $0-180^\circ$  közötti

A munkadarabon kísérleti forgácsolást végezve megállapítható volt, hogy hegyes- és tompaszögű kilépési szög esetén a sorja mérete csökkent.

A sorjaképződés szempontjából kedvezőnek mondható szerszám pályák számos más szempontból előnytelenekek. A hagyományos síkmarási ciklusokhoz képest a szerszám által megtett út jelentősen hosszabb. Nagyobb munkadarab közepén belső megmaradó szigeteket keletkezhetnek, amelyek csak további megmunkálással távolíthatók el. A szerszám pályája töréspontokat tartalmaz, amely miatt az állandó előtolási sebesség nehezen biztosítható. Ha a szerszám egynél több pontban lép ki, akkor nem biztosítható állandó kilépési szög. A szerszám pályája a felsorolt szempontok alapján tovább finomítható, azonban a kutatást nem ebben az irányban folytattam.

A kilépési szög hatását megvizsgáltam úgy, hogy az  $0^\circ \dots 180^\circ$  között folyamatosan változott. A munkadarab geometriája egy az előtolás irányával adott szöget bezáró élből állt, a szerszám kilépése e mentén történt. A metszéspontokban meghatározható a kilépési szög közelítő ( $\alpha_a$ ) és elméletileg pontos értéke ( $\alpha_t$ ), a forgácsvastagság a kilépés kezdő ( $h$ ) és befejező ( $h_1$ ) pillanatában (a kilépés a valóságban nem egy pontban történik). A kilépési szög értéke  $0..+\pi$ , a forgácsvastagság pedig  $0..f_z$  tartományban változik. A 3. ábrán a kilépési szög  $\pi$ -hez viszonyítva ( $\alpha/\pi$ ), a forgácsvastagság pedig a fogankénti előtoláshoz viszonyítva ( $h/f_z$ ) látható.

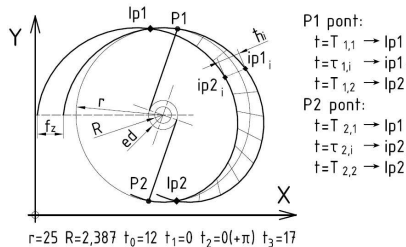


3. ábra A kilépési szög és a forgácsvastagság a metszéspontokban

A forgácsvastagság változásának jellege jól láthatóan eltért a kilépési szögétől. Feltételezésem szerint a forgácsvastagságtól önmagában is függ a sorja hossz mérete, ezért a kutatás további részében a  $h$  hatásának vizsgálatával foglalkoztam. Ehhez először a különböző forgácsvastagságot leíró modelleket tekintettem át. A modellek mindegyike a szerszám munkasíkbeli homlokszögét  $0^\circ$ -nak feltételezi. Mivel a munkasíkbeli homlokszög szerepet játszik a kilépési sorrend és a sorjaképződés

folyamatában, ezért a létező módszereket átdolgoztam úgy, hogy azokban a munkasíkbeli homlokszög egy változtatható paraméter legyen.

A fogásban levő élhossz síkmarásnál két egymást követő élen kijelölt pont pályája (ciklois) és a szerszámél metszéspontjával határozható meg (4. ábra). A metszéspont numerikusan számítható, célszerű szerszámhoz rögzített koordináta rendszert használni. Egyszerűsíti a számítást a cikloisgörbe körrel történő helyettesítése vagy a metszéspontot adó egyenletnél a trigonometrikus függvény Taylor sorral történő közelítése. A szinusz függvény elsőfokú polinommal közelítése használható eredményt ad. Egy új megoldás a harmadfokú polinommal közelítés, azonban a számítási igény jelentősen növekszik és a pontosság csak kismértékben javul. A forgácsvastagság numerikus módszerrel kiszámított pontjaira illeszthető egy negyedfokú polinom. A polinom konstansaira szintén illeszthető egy harmadfokú polinom. Az összefüggés a gyakorlatban pontosnak mondható, számítási igénye nagyon alacsony. Az elméleti forgácsvastagság a fogásban levő élhosszból számítható a sebességvektorok irányával korrigálva.

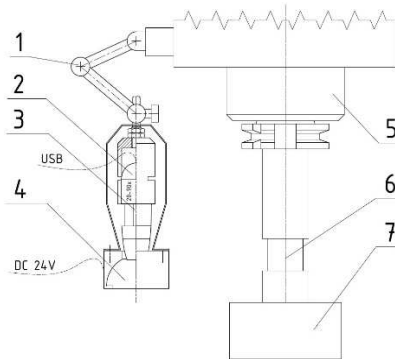


4. ábra Az elméleti forgácsvastagság modellezése síkmarásnál

A modellt kísérleti eredményekkel vettem össze. A kísérleteknél több mm-es fogankénti előtolást állítottam be és a forgácsoló erőt mértem. A kiértékelés során kimutatható volt a szerszám munkasíkbeli homlokszögének hatása. A kísérlettel mért és a modellel számított eredmények egyezést mutattak.

A forgácsvastagság hatásának vizsgálatához szükséges a forgácsolt élen képződött sorja hosszmeretének ismerete. Ehhez a speciális követelmények és a nagyszámú kísérlet miatt egyéni módszert fejlesztettem. A sorja hosszmeretének meghatározása mikroszkóppal készített képek feldolgozásán alapul. A hordozható mikroszkóp a szerszámgép főorsójához rögzíthető és pozícionálható. Az összeállítás

képe az 5. ábrán látható. A mart felületek csillogásmentes megvilágításához szórt fényt kellett használni. Az alkalmazott hordozható mikroszkóp gyártója nem biztosít ilyen eszközt, egyéni világítótestet terveztem és készítettem. A kontúr a darab megfestésével majd a képen speciális szűrő használatával tehető láthatóvá. A kiértékelés során kedvező, ha az eredményül kapott kontúr egy összefüggő vonallánc. Nagyobb mennyiségű kép esetén a feldolgozási idő is fontos szempont. A létező éldetektáló algoritmusok nem vagy csak részben teljesítik ezeket a követelményeket, ezért egyéni módszert használtam a kép szegmentálásához.

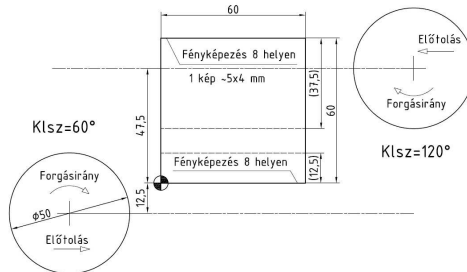


**5. ábra** Kísérleti elrendezés sorja méretének becsléséhez; 1: tartó eszköz 2: befogó eszköz 3: mikroszkóp 4: világító eszköz 5: főorsó 6: szerszám 7: munkadarab

A képfeldolgozó módszer hatékonyságát mintaképekkel és mintadarabról készített képekkel ellenőriztem. Az elérhető pontosság  $\pm 0,06$  mm-nek adódott. Az érték sajnos nagymértékben függött a mikroszkóp pozíciójának és orientációjának megfelelő beállításától valamint a megvilágítás egyenletességétől. Felmerült a mikroszkóp precíziós befogásának lehetősége. Ezt azonban egyénileg lehetne megtervezni és kivitelezni, mivel az alkalmazott hordozható mikroszkóp gyártója nem biztosít ilyen eszközt.

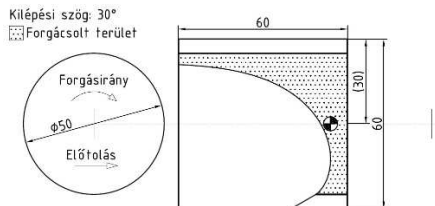
A sorja mérésére fejlesztett módszert elfogadhatónak találtam a sorja hossz méretének összehasonlító vizsgálatához. Az első kísérletsorozatban állandó kilépési szöggel és állandó forgácsvastagsággal végeztem kísérletet. Egy kísérleti elrendezés a 6. ábrán látható. A kísérlet kiértékelése alapján a sorja viselkedését célszerűbb sztochasztikus jellemzőkkel modellezni. A sorja hossz mérete és a kilépési szög valamint a

forgácsvastagság között kapcsolatot teremtő függvény nem bizonyult kellően megbízhatónak. Eredményként azonban megállapítható, hogy a sorja méretének eloszlása bizonyíthatóan nem normál eloszlás.



6. ábra Munkadarab geometria állandó forgácsvastagság vizsgálatához,  $\alpha=60^\circ$  és  $120^\circ$

Megvizsgáltam a kitöredezést is, ahol az automatikus szegmentálás legtöbbször nem működött. Emiatt a képek többségét manuálisan kellett feldolgozni, ami jelentősen lassabb volt az automatizálnál, azonban pontossága attól nem maradt el szignifikánsan. A jövőben másfajta megvilágítás használatával várhatóan jobb eredmény érhető el a képfeldolgozásnál. A kiértékelésénél kapott eredmények alapján a kitöredezés viselkedését is inkább sztochasztikus jellegűnek tartottam. Eredményként itt is megállapítható volt, hogy a kitöredezés méretének eloszlása nem normál eloszlás.



7. ábra Munkadarab geometria változó forgácsvastagság vizsgálatához,  $\alpha=30^\circ$

Vizsgáltam a változó forgácsvastagság hatását. Ehhez a szerszámél egy pontjának pályáját körrel helyettesítve egyéni munkadarab geometriát terveztem (7. ábra), amelynél a szerszám egyenes mentén egyenletes sebességgel haladhatott. A tényleges kilépési szög tartománya a korábban levezetett összefüggés segítségével ismert. A kifejlesztett speciális kontúrok használatával a forgácsvastagság egy nagyobb tartományon belül változott, a változás mértéke azonban nem egyenletes. (Véleményem szerint állandó kilépési szöget és egyenletesen változó forgácsvastagságot

biztosító görbe nem létezik.)

A kísérletek alapján sem a  $h$ , sem a  $h$  változásának a sorjaképződésre gyakorolt hatását meggyőzően leíró analitikus összefüggést nem sikerült felállítani. A kísérlet a sorjaképződés folyamatának bonyolultságát szemlélteti.

Az előbbi két kísérlet eredményei alapján a forgácsvastagság hatása a sorjaképződésre bizonyítható. A következtetések azonban korlátozottan általánosíthatók, mivel a kísérleteknél ugyanazt a szerszámot, forgácsolási sebességet és anyagminőséget használtam. Ezek hatásának részletes vizsgálata csak igen nagyszámú kísérlettel lenne lehetséges, ami túlmutat jelen kutatáson.

#### 4. TÉZISEK ISMERTETÉSE

A kutatómunka eredményei az alábbi tudományos tézisekben foglalhatók össze:

##### 1. Tézis:

Síkmarásnál az elméletileg pontos ciklois szerszámpályát körrel közelítve, ha  $f < 2r\pi$ , egyenes és kör mentén történő előtolás esetén a kilépési szög tényleges és közelítő értéke közötti eltérés egy zárt tartományba esik, a tartomány határai egzaktul kifejezhetők:

$$-\arcsin(f/2r\pi) \leq \varphi \leq \arcsin(f/2r\pi) \quad (\text{T1.1})$$

Az összefüggés a gyakorlatban kielégítő pontosságot nyújt  $f \ll r$  esetén  $\arcsin(f/2r\pi) = f/2r\pi$  behelyettesítéssel.

Ahol:

$f$  fordulatonkénti előtolás

$r$  szerszámsugár

$\varphi$  a kilépési szög közelítő és elméleti értéke közötti különbség ( $\alpha_t - \alpha_a$ )

$\alpha_t$  a kilépési szög elméleti értéke

$\alpha_a$  a kilépési szög közelítő értéke

Az 1. tézishez az [S2, S5] publikációim kapcsolódnak.

**2. Tézis:**

A szerszámél elméletileg pontos pályáját körrel helyettesítve, ha a munkadarab kontúrja síkbeli és leírható két paraméteres egyenlettel ( $X(t)$  és  $Y(t)$ ), ellenirányú marás esetén állandó kilépési szöget biztosító szerszám pályák hozhatók létre az alábbi összefüggésekkel:

$$X_{center}(t) = X(t) + r1 \cdot \cos(\mu(t) + (\pi/2) + \alpha) \quad (T2.1)$$

$$Y_{center}(t) = Y(t) + r1 \cdot \sin(\mu(t) + (\pi/2) + \alpha) \quad (T2.2)$$

**Ahol:**

$t$  a szerszám szögelfordulásához tartozó paraméter

$\alpha$  kilépési szög

$\mu(t)$  a kontúr meredeksége radiánban, mely  $-\pi \dots \pi$  értékészlettel a

(T2.3) egyenlettel írható fel:

$$\mu(t) = 2 \arctan \frac{\left( \sqrt{(dX(t)/dt)^2 + (dY(t)/dt)^2} - (dX(t)/dt) \right)}{(dY(t)/dt)} \quad (T2.3)$$

A 2. tézishez az [S1, S4] publikációm kapcsolódnak.

**3. Tézis:**

Síkmarásnál, egyenes előtolási irány esetén a fogásban levő élhossz új módszerrel modellezhető, amellyel a fogankénti előtoláson és szerszámsugáron kívül a munkasíkbeli homlokszög is figyelembe vehető. A modell numerikus metszéspontkeresésen alapul, szerszámhoz rögzített koordináta rendszer használatával. A fogásban levő élhossz nagyságát a sebességvektorok irányával korrigálva a korábbi módszerekhez képest pontosabban határozható meg az elméleti forgácsvastagság.

A forgácsolás – új módszerrel meghatározott - kezdő- és befejező pontjához tartozó, a szerszám szögelfordulását leíró paraméter középértéke igen jó közelítéssel független az előtolástól. Ha a munkasíkbeli homlokszög nagyobb, mint  $0^\circ$ , akkor az elméleti forgácsvastagság és fő-forgácsolóerő legnagyobb értékének helye ettől a középértéktől eltérő helyen van, a szögelfordulás szerinti lefutás aszimmetrikus, a növekedő szakasz hosszabb.

A 3. tézishez az [S3, S6] publikációim kapcsolódnak.

#### 4. Tézis:

Síkmarásnál a munkadarab élén, a megmunkálás síkjában keletkező sorja hosszmérete meghatározható egy újfajta módszerrel. Az eljárás digitális mikroszkóppal sorozatban készült képek feldolgozásán alapul, melynek lépései a következők:

1. A mikroszkóppal ismert pozícióban képek készítése először a sorjátlanított élről majd a sorjás élről.

2. A képek szegmentálása, a kontúrvonal meghatározása.

3. A megmunkált kontúr pontjai és az elméleti kontúr pontjai távolságának meghatározása.

4. Sorja hosszméretének meghatározása a normál irányú távolságok különbségéből

5. Eredmények ábrázolása és mentése.

A módszer főbb előnyei:

- a kontúr mentén a sorja hosszmérete folytonosan meghatározható;  
- a sorja mérete a szerszámgépen határozható meg, a munkadarabot nem szükséges kivenni;

- a kiértékelés eredménye gyorsan megkapható.

A módszer különösen érzékeny a mikroszkóp pozíciójának és szöghelyzetének beállítására, a megvilágítás minőségére valamint a munkadarab (vagy mikroszkóp) mozgásának pontosságára.

A 4. tézishez az [S7, S8] publikációim kapcsolódnak.



### 5. Tézis:

Ellenirányú síkmarásnál, a szerszám anyagból történő kilépésénél vett forgácsvastagság befolyásolja a sorjaképződést, hatása elkülöníthető a kilépési szögtől és annál kisebb mértékű. A kilépésnél állandó értéken tartott forgácsvastagság 30°, 60°, 90° és 120°-os kilépési szög esetén kisebb, 150° esetén jelentős mértékben befolyásolja a sorja átlagos méretét.

Sorjaképződés szempontjából kedvező beállítás a 30° és 60° közötti kilépési szög vagy a kilépés pontjában vett 0,1 és 0,3 mm közötti forgácsvastagság. A sorja átlagos mérete ekkor 0,1 mm vagy kisebb, a szórás pedig 0,1 mm vagy kisebb. Ezek az értékek kitöredezés szempontjából is kedvezőnek mondhatók.

A szerszám munkadarab anyagából történő kilépésénél vett forgácsvastagság folyamatos változása befolyásolja a sorjaképződést, a sorja várható méretének bizonytalanságát növeli.

Ellenirányú síkmarásnál a munkadarab élén, a megmunkálás síkjában vett sorja és kitöredezés mérete állandó kilépési szög, forgácsolási sebesség és fogásmélység mellett nem normál eloszlású. Használható modell kapható 2 vagy 3 eloszlás sűrűségfüggvényének kombinálásával. A legjobb eredmény a Loglikelihood függvény maximalizálása alapján a sorjánál 2 Normál vagy 2 Skewnormal eloszlás sűrűségfüggvény kombinálásával, kitöredezésnél pedig 3 Normál vagy 2 Skewnormal eloszlás sűrűségfüggvény kombinálásával adódott.

## 5. IRODALOMJEGYZÉK

- [Aur] Aurich JC. (2006) SpanSauber: Untersuchung zur Beherrshung der Sauberkeit von zerspanend hergestellten Bauteilen, Ergebnisworkshop, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Technische Universität Kaiserslauten.
- [Aur2] Aurich JC, Dornfeld D, Arrazola PJ, Franke V, Leitz L, Min S. (2009) Burrs – analysis, control and removal. *CIRP Annals- Manufacturing Technology* 58 (2009) pp. 519-542.
- [Aur3] Aurich JC, Wiese M, Tries T, Gsänger D (2004) Gratbildung und Grattmessung beim Bohren. *WB Werkstatt und Betrieb* 137(12):44–47.
- [Bei] Beier HM (1999) *Handbuch Entgrattechnik: Wegweiser zur Gratminimierung und Gratabseitigung für Konstruktion und Fertigung*; Hanser Verlag
- [Can] Canny J (1986): A Computational Approach To Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 6, pp. 679–698. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
- [Che3] Chern, GL, Liang, JM (2007) Study on Boring and Drilling with Vibration Cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47(1):133–140.
- [ChV] Chan, TF, Vese, LA (1999): An active contour model without edges, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1682, pp. 141–151, [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-48236-9\\_13](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-48236-9_13)
- [Gil] Gillespie LK (1996); The Battle of the Burr: New Strategies and New Tricks; *Manufacturing Engineering* 116(2); 69–78.
- [Gil2] Gillespie LK (1999); *Deburring and Edge Finishing Handbook*; Society of Manufacturing Engineers
- [Gil3] Gillespie LK, Blotter PT (1976); The Formation and Properties of Machining Burrs; *Transactions of ASME Journal of Engineers for Industry* 98: 66–74
- [Has] Hashimura M, Hassamontr J, Dornfeld DA (1999); Effect of In-plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation; *Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*
- [Has2] Hashimura M, Dornfeld DA (1995) Analysis of Burr Formation Mechanism in Machining Process. Technical Paper. Society of Manufacturing Engineers, MR98-178, 1–14.
- [Iso] International standards ISO 13715, second edition, 2000.06.15
- [Ma2] Martellotti, M.E. (1945) An Analysis of the Milling Process, Part 2. Down milling. *Trans. ASME*, 67, pp. 233-251.
- [Ots] Otsu, N. (1979): A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 9..
- [Sp2] Spiewak, S. (1995). An Improved Model of the Chip Thickness in Milling. *Ann. CIRP* 44 (1), pp. 39-42.

## 6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] Póka György, Mátyási Gyula, Rakita Tamás: Sorjaképződés minimalizálása homlokmarásnál a szerszámhály új módszerrel történő meghatározásával. . XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Arad (Románia), 2013. 04. 25-28., Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Konferenciakiadvány, pp. 273-277
- [S2] Póka György: Ciklois szerszámhály körrel történő közelítésének hibája. XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Nagyszeben (Románia), 2014. 04. 24-27., Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Konferenciakiadvány, pp. 293-296.
- [S3] Póka György, Németh István: Ciklois szerszámhály körrel történő közelítésének hibája a forgácsvastagság meghatározásánál. Gyártás 2015, Budapest, 2015. nov. 20., Gépgyártás 55, pp. 109-114
- [S4] Póka György, Németh István, Mátyási Gyula: Burr minimisation in face milling with optimised tool path. 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Stuttgart, 25-27 May 2016, PROCEEDIA CIRP (Westkamper, E; Bauernhansl, T), pp. 653-657, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.113
- [S5] György Póka, István Németh: Cycloid approximation with circle for the calculation of exit angle. Tehnički Vjesnik - Technical Gazette, 26, 4, 893-901, (2019)
- [S6] György Póka, István Németh: The effect of radial rake angle on chip thickness in the case of face milling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 234, 1-2, 40-51, (2020)
- [S7] Geier Norbert, Póka György, Szalay Tibor: Direct monitoring of hole damage in carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composite. IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 448:1 pp. 1-7., 7 p. (2018), DOI ISSN: 1757-899X
- [S8] Geier Norbert, Póka György, Pereszlai Csongor: Monitoring of orbital drilling process in CFRP based on digital image processing of characteristics of uncut fibres. PROCEEDIA CIRP 85 pp. 165-170. , 6 p. (2019)

