

Forgácsolás dinamikája és felületi minőség

PhD Tézisfüzet



Bachrathy Dániel

Témavezető: Dr. Gábor Stépán

Műszaki Mechanikai Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Doctor of Philosophy

2013

A kutatás módszerei, az értekezés felépítése

Az értekezésben azokat a vizsgálati eredményeimet foglalom össze, amelyek a forgácsolással megmunkált munkadarabok felületi minősége és a megmunkálási folyamat dinamikája közötti összefüggéseket írják le. A vizsgálatok végső célja, hogy a forgácsolás közben kialakuló szerszámgép-rezgések alapján becsülni tudjam a várható felületi mintázatot kemény esztergálás és általános marási folyamatok esetén. A rezgésekkel és azok felületi minőségre gyakorolt hatásával különösen akkor kell számolni, amikor a maximális anyagleválasztásra optimalizált megmunkálási paraméterekkel forgácsolunk.

A kutatási témát három csoportba rendeztem annak megfelelően, hogy bizonyos esztergálási folyamatokat, marási folyamatokat, vagy pedig a vizsgálatokhoz szükséges matematikai módszereket tárgyalom. Az értekezés ennek megfelelően három fő fejezetre tagolódik, melyeket az alábbiakban röviden összefoglalok.

Felületi minőség megszakított esztergálás esetén

Keményesztergálás során kialakított felületeket modelleztem annak érdekében, hogy feltárjam a felületi minőség és a megmunkálási paraméterek közötti kapcsolatokat. Ezen vizsgálatok eredményeként a szerszámgép dinamikájának figyelembe vételével tudok optimális megmunkálási paramétereket ajánlani a megmunkált felület minőségének javítására.

A modellezés során négyeszőg időjelű forgácsoló erőt feltételezve egy egyszerű, könnyen használható összefüggést határoztam meg az optimális forgácsolási sebesség állandó értékére, amikor a megmunkált felület hibáját jellemző paraméter minimálisra csökkenthető. Általános geometriájú munkadarab esetén a szerszámgép dinamikai paraméterei és a megmunkálási paraméterek alapján meghatároztam a kialakuló felületi mintázatot, amit azután összehasonlítottam a munkadarabok megmunkálás utáni felületeiről készült felvételekkel.

A modell további pontosítása érdekében bevezettem egy simított időjelet is a forgácsoló erő időbeli változásának leírására, majd megvizsgáltam a dimenziótlan simítási paraméterek hatását mind a felületi minőségre, mind az optimális forgácsolási sebességre.

Az elméleti eredményeket keményesztergálás esetén számszerűen is ellenőriztem a szerszámcsúcs gyorsulásának mérése alapján.

Marással kialakított felületek minőségének jellemzése, marási folyamatok stabilitása

A marási folyamat során mindig létrejön relatív rezgés a szerszám és a munkadarab között, aminek oka a szerszám forgása miatt kialakuló periodikus anyagleválasztás. A kialakuló erőgerjesztett rezgés alkalmanként kombinálódhat a gyártástechnológiai szakirodalomban általánosan "chatter" elnevezésű öngerjesztett rezgéssel – ez utóbbi a forrása a periodikus szerszámmozgás instabilitásának.

A szerszámgépek szerkezetének nagy dinamikus merevsége miatt a stabil periodikus erőgerjesztett rezgések amplitúdója általában kicsi, ami elhanyagolható felületi hibákat okoz. Ennek ellenére nagy amplitúdójú periodikus erőgerjesztett rezgések is kialakulhatnak, pontosan a legnagyobb anyagleválasztási hányaddal rendelkező, rezonáns megmunkálási sebességek alkalmazása esetén, amelyek általában egy kis csillapítású lengésképhez tartoznak. Ilyen esetben a felület integritása még megfelelő lehet, de elfogadhatatlanul nagy felületi eltolódás, felületi érdesség vagy felületi hullámosság jöhet létre. Ezek a rezonancia közeli erőgerjesztett rezgések nem kívánt többlet terhelést is jelentenek a szerszámgépre. Az ilyenkor várható felületi hibák további határt szabhatnak az anyagleválasztási hányad növelésének, és megakadályozhatják az öngerjesztett rezgések elkerülése szempontjából hatékony paramétertartományok kihasználását.

Az említett erőgerjesztett rezgések esetében merev testként modellezett csavart élű marószerszámok térbeli mozgásának pontos modellezésével írtam le a marószámgép rezgéseinek hatását a kialakuló felületi hibákra. A modell segítségével bevezettem három felületeti minőséget leíró paramétert, amelyekkel mérnöki szempontból kielégítően jellemezhető a csavart élű marószerszám által rezgés közben megmunkált térbeli felület. Analitikusan és méréssel is igazoltam, hogy csavart élű szerszám esetén a periodikus fogácsoló erő által gerjesztett rezonáns rezgések minimalizálhatóak megfelelően megválasztott axiális fogásmélységek esetén. Ezek az értékek jelentős kiterjesztését jelentik az eddig ismert, triviálisnak is nevezett optimális axiális fogásmélységeknek.

A szerszám merevtestszerű mozgásának leírása nem ad kielégítően pontos eredményt hosszú, vékony marószerszámok esetén. Ilyenkor a felületi topográfia előzetes becsléséhez szükséges a marószerszám deformációját is figyelembe venni. Ennek érdekében a szakirodalomban már kidolgozott részekből, mint a szerszám végeelemes modellje és a szerszámgép kísérleti modális analízise, felépítettem egy olyan dinamikai modellt, ami a rugalmas szerszám esetén is alkalmazható megmunkált felületek tulajdonságainak elemzésére. Ezeknél a vizsgálatoknál is tö-

rekedtem a kísérleti munkával való egyeztetésre.

Az öngerjesztett rezgések nagymértékben meghatározzák az elérhető maximális anyagleválasztási hányadot. Ezek a rezgések a felületi regenerációs hatásnak a következményei. Periodikus, kvázi-periodikus vagy kaotikus rezgés jelenik meg, amikor a stacionárius marási folyamat elveszti a stabilitását, azaz, amikor a periodikus erőgerjesztett rezgés instabillá válik. Ezek a rezgések elfogadhatatlan megmunkált felületi minőséget okoznak és nagy terhelést jelenthetnek a szerszámra és a szerszámgépre egyaránt. Az úgynevezett stabilitási térképek, amelyeket a szögsebesség és az axiális fogásmélység paraméterek síkján szokás ábrázolni, megadják, hogy mely technológiai paraméter tartomány esetén stabil a stacionárius marási folyamat.

A legtöbb mechanikai modell elhanyagol néhány alapvetően nemlineáris jelenséget akkor, amikor a megmunkálási sebességgel fordítottan arányos állandó időkésést feltételez. Ezen felül, rezonancia közeli fordulatszámok esetén a kialakuló nagy amplitúdójú erőgerjesztett rezgések mellett a szerszám vágóélének pályája már jelentős mértékben eltérhet az egyszerű közelítésként használt körpályától.

Mindezek figyelembe vételével a marási folyamat mozgásegyenletét általánosítottam pontosabb forgácsvastagság számítási eljárás alkalmazása mellett, ami állapotfüggő időkésést tartalmazó egyenletekhez vezet. Meghatároztam a kapott nemlineáris egyenlet periodikus megoldását és a linearizált rendszer stabilitását. Megállapítottam, hogy rezonancia közeli fordulatszámok esetén az állapotfüggő időkésés lényegesen befolyásolja a kapott stabilitási térképet. Ezzel a módszerrel egy szerszámgép-rezgések esetén szokatlan statikus stabilitásvesztési jelenséget is azonosítottam, amely hiszterézis jelenséghez vezethet két stabil periodikus pálya között.

A szakirodalom ismeretében elmondható, hogy az elmélet alapján számított stabilitási határok a méréssel jó egyezést mutatnak magas főorsó fordulatszám tartományokban. Kis fordulatszámok esetén a számítás túlságosan konzervatív becslést mutat, azaz a méréssel kapott kritikus axiális fogásmélység lényegesen nagyobb, mint az elméleti modellekből származó értékek. Ezen eltérés kiküszöbölésére vezették be a megmunkálási csillapítás fogalmát, amellyel időkéséssel arányos, azaz a megmunkálási sebességgel fordítottan arányos csillapítást adnak a szerszámgép rendszer egyébként általában kismértékű csillapításához. Ennek fizikai alapja a kopott szerszám-hátlap és a deformálódott munkadarab között létrejövő érintkezési erő.

Ezt a klasszikus megmunkálási csillapítási fogalmat fejlesztettem tovább és alkalmaztam marási folyamatok esetén. Ez a modell egy

nem-sima csillapítású rendszert eredményezett. A pontosított modell szintén megadja az eltolódott stabilitási határokat alacsony főorsó fordulatszámok esetén, de az eddigieknél sokkal bonyolultabb stabilitási határú tartományt ír le.

A pontosított modell segítségével azt is meg tudtam mutatni, hogy a széles körben alkalmazott megmunkálási csillapítás matematikailag pontos leírása azonos az úgynevezett rövid-regeneratív modellben kapott megoszló időkésést tartalmazó matematikai leírással. Beláttam azt is, hogy a rövid-regeneratív hatásra épülő modell időkésés szerinti linearizálása visszaadja a megmunkálási csillapítás klasszikus modelljét, valamint azt, hogy a magasabb rendű sorfejtések a megmunkálási csillapítás általánosított eseteit adják.

Több-dimenziós felező módszer

Számos mérnöki probléma megfogalmazható $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ alakban, ahol a nemlineáris egyenletrendszer gyökeinek megkeresése a feladat. A megmunkálási folyamatok szemi-diszkretizációs stabilitás vizsgálatánál két dimenziós paraméter térben (fordulatszám és axiális fogásmélység) kell meghatározni egyetlen egyenlet gyökeit. Ha azonban a kiterjesztett többfrekvenciás megoldást (Extended Multi-Frequency Solution) alkalmazzuk a stabilitás vizsgálatra, akkor három dimenziós paraméter térben kell két egyenlet gyökeit megtalálni. A gyökkeresési feladatok számítási ideje drasztikusan csökkenthető, ha a megadott egyenleteket csak a stabilitási határok mentén értékeljük ki. A gyakorlatban fontos, hogy olyan gyökkereső algoritmust használjunk, amely megbízhatóan és automatikusan találja meg az összes gyököt, akkor is, ha azok zárt görbéket alkotnak a paramétertérben.

Tézisek

1. Tézis

Megszakított esztergálási folyamatot vizsgáltam feltételezve, hogy az esztergának egy jól elkülönülő ω_n domináns saját-körfrekvenciája van. Négyszög időjelű forgácsoló erő figyelembe vételével a mérnöki gyakorlatban egyszerűen használható összefüggést vezettem le a v_{opt} optimális forgácsolási sebességek meghatározására, amelyek alkalmazása esetén a megszakítást követő tranziens rezgés hatására kialakuló felületi hullámosság minimális. Ez a konstans optimális forgácsolási sebesség meghatározható az e horonyszélesség és a szerszám szabad rezgésének $T_n = 2\pi/\omega_n$ periódusideje alapján:

$$v_{opt} = \frac{e}{jT_n} \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Általános megszakításokkal rendelkező munkadarab geometria esetén pontosan modelleztem a felületi mintázatot az időbeli numerikus szimulációból nyert szerszámelmozdulás időjelének a szerszám munkadarabhoz viszonyított pályájára vett transzformációjával.

Egy simított dimenziótlan erő modellt is létrehoztam a pontosabb optimális forgácsolási sebességek meghatározására. Megmutattam, hogy a forgácsoló erő folyamatos le- és felépülése a megszakításnál létrejövő ki- és belépésnél leírható az ε_{exit} és ε_{enter} időállandókkal. Beláttam, hogy a belépésnél esetlegesen létrejövő megnövekedett forgácsolási tényezőnek nincs lényeges hatása az optimális forgácsolási sebességekre. A simított erőmodellel kapott pontosított összefüggés a következő:

$$v_{opt} = \frac{e}{T_n} \frac{2\pi}{j2\pi - \arctan\left(\frac{\varepsilon_{enter}}{1+2\xi\varepsilon_{enter}}\right) - \arctan\left(\frac{\varepsilon_{enter}}{1+2\xi\varepsilon_{enter}}\right)} \quad j = 1, 2, 3, \dots,$$

ahol ξ a relatív csillapítási tényező.

A megszakított keményesztergálási modellel kapott elméleti eredményeket igazoltuk egy ipari esettanulmány és tesztmérések segítségével.

Kapcsolódó publikációk:

[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

2. Tézis

Palástmarás dinamikai modellezése során a szerszámtengelyre merőleges két lengéskép figyelembe vétele sok esetben kielégítő pontosságú. Ezekben az esetekben megmutattam, hogy csavart élű szerszám alkalmazásakor a megmunkált felület egy komplex térbeli alakzat, amely változik a szerszám tengelyének iránya mentén is.

A csavart élű marószerszám által létrehozott térbeli felület jellemzésére három, mérnöki szempontból egyszerűen alkalmazható, általánosított paramétert vezettem be.

Az első paraméter a maximális felület eltolódási hiba, amely általánosítása az egyenes élű szerszámnál meghatározott felület eltolódási hibának. A második paraméter a teljes profilmagasság előtolás irányban mérve, amely a felületi érdességet jellemzi. Ezt a paramétert csak kis mértékben módosítja a szerszám menetemelkedési szöge. A harmadik paraméter a teljes profilmagasság tengelyirányban mérve, ami a felületi hullámosságra jellemző mérőszámot ad. Ez a legfontosabb paraméter csavart élű szerszám esetén, amelynek nincs megfelelője a klasszikus mérőszámok között.

Kapcsolódó publikációk:

[8, 9, 10, 11]

3. Tézis

A klasszikus marási modellek alapján számolt stabilitási térképek szerint a legnagyobb anyagleválasztási hányadú technológiai paraméterek akkor érhetők el, ha a periodikus forgácsoló erő egyik felharmonikusa a szerszámgép egyik ω_n sajátfrekvenciájához közel esik. Ezekben az esetekben a rezonancia közeli szögsebességek a megfelelő instabil tartományok (lebenyek) közé esnek. Megmutattam, hogy bár ekkor nem alakul ki öngerjesztett rezgés, mégis nagy felületi hullámosság jöhet létre. Analitikus számítással és méréssel is igazoltam, hogy csavart élű szerszám használata esetén, megfelelő axiális fogásmélység alkalmazásával még rezonancia közeli fordulatszámok esetén is lehet csökkenteni a periodikus erőgerjesztett rezgés amplitúdóját.

Ezek alapján kétféle optimális axiális fogásmélységet határoztam meg. Az első a triviális megfelelő axiális fogásmélység: $a_p = jp/N$, amely a maró szerszám p menetemelkedésének és az N fogszám hányadosának j egész számú többszöröse. Ennek alkalmazásakor a forgácsoló erő konstans, így erőgerjesztett rezgés nem alakul ki. Bebizonyítottam, hogy létezik nem-triviális megfelelő axiális fogásmélység is, amely lineárisan arányos a főorsó Ω szögsebességével:

$$a_p = \frac{p\Omega}{\omega_n} j \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Megmutattam, hogy ezeknél a nem-triviális paraméter értékeknél a forgácsoló erő ugyan nem konstans (mint a triviális paraméter értékeknél), de az időjel Fourier sorfejtésének felharmonikusai közül a rezonáns frekvenciához közel eső komponense zérus.

Megmutattam továbbá, hogy a fent megadott nem-triviális megfelelő axiális fogásmélység képlete alkalmazható több szabadsági fokú modell esetén is, ha a rezonáns főorsó fordulatszámok egymástól kellően távol helyezkednek el.

Kapcsolódó publikációk:

[8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]

4. Tézis

Karcsú marószerszámok esetén fellépő megmunkálási felületi hibák pontosabb leírása érdekében egy összetett mechanikai modellt állítottam össze, amely három komponensből épül fel: az ujjszerű szerszám véges elemes rúdmodellje, a szerszámgép egy méréssel meghatározott frekvencia átviteli függvényen alapuló mechanikai modellje és a közöttük lévő, méréssel ellenőrzött csatolási modell. Az így kialakított mechanikai modell numerikus időbeli szimulációjához a mérés során rögzített forgácsoló erőt használtam. A szerszámél pályája alapján a térbeli felületet nagy pontossággal tudtam modellezni. A módszer előnye, hogy a felületi minőséget akár megmunkálás közben is meg lehet becsülni a mért forgácsoló erő alapján.

A numerikusan meghatározott és a mért felületi topográfia összehasonlításával megmutattam, hogy a bevezetett eljárás mind állandósult, mind tranzienst folyamatok esetén nagy pontossággal alkalmazható. Öngerjesztett rezgések esetén ugyanez az összehasonlítás csak kvalitatív egyezést mutat, mindazonáltal a módszer jól használható az öngerjesztett rezgések kialakulásának felismerésére.

Kapcsolódó publikáció: [16]

5. Tézis

Megmutattam, hogy az erőgerjesztett rezgések amplitúdója nem elhanyagolható a szerszám sugárhoz képest rezonancia közeli főorsó szögsebességek esetén, amely szokatlan, statikus típusú stabilitásvesztéshez vezethet. A megjelenő két állandósult megoldás paraméter tartományában kimutattam, hogy a lineáris időkéséses mechanikai modellekből származó stabil technológiai paraméter tartomány nem ad konzervatív becslést a stabilitásra. Ezt két különböző továbbfejlesztett fogácsvastagság számítási modell alapján is beláttam.

Az első modellben az aktuális forgácsvastagságot a szerszámcsúcs sebesség vektorára merőleges vetítéssel állítottam elő, szemben a hagyományos, köríves szerszámcsúcs pályát feltételező vetítéssel ellentétben.

A második, tovább pontosított modellben a forgácsvastagságot meghatározó számítás figyelembe veszi az előző szerszámél egzakt pályáját is, ezáltal állapotfüggő időkésést tartalmazó mechanikai modellt használok, amelyben egy implicit algebrai egyenlet határozza meg az időkésést. Numerikus módszert dolgoztam ki az állapotfüggő időkésést tartalmazó egyenletek periodikus pályájának meghatározására és a bifurkációs paraméter (a axiális fogásmélység) szerinti követésére.

Mindkét modell alapján meg tudtam határozni az első statikus típusú bifurkációs ponthoz tartozó technológiai paramétereket rezonancia közeli főorsó szögsebességek esetén.

Kapcsolódó publikációk:
[17, 18, 19, 20, 21]

6. Tézis

Általánosítottam a megmunkálási csillapítás modelljét marási folyamatokra, és ezáltal pontosítottam az alacsony főorsó fordulatszám tartományon létrejövő kedvező stabilitási határokat, amelyek a szakirodalomban feltételezettnél bonyolultabb struktúrát alkotnak.

Modellem figyelembe veszi a vágási sebesség és az előtolási sebesség viszonyát, amelyet a klasszikus modellek elhanyagolnak. Ez egy nemlineáris jelenség felismeréséhez vezet azáltal, hogy a hátlapon jelentkező megmunkálási csillapítást létrehozó erő megszűnik, ha a kialakult nagy amplitúdójú erőgerjesztett rezgés során a szerszámél sebessége a munkadarab anyagából kifelé mutat. A modell alapján egy pontosított állandósult pályát tudtam meghatározni, amelyhez tartozó stabilitás térkép eltér a klasszikus megmunkálási csillapítást tartalmazó mechanikai modell stabilitási térképétől.

Megmutattam, hogy a széles körben alkalmazott megmunkálási csillapítás pontos térfogatszámításon alapuló matematikai modellje azonos az úgynevezett rövid-regeneratív hatás modelljével, amely elosztott időkésést tartalmaz. Bebizonyítottam, hogy a rövid-regeneratív hatás modelljének időkésés szerinti linearizálása a klasszikus megmunkálási csillapítás modelljét adja vissza, valamint azt, hogy magasabb rendű közelítései a megmunkálási csillapítás általánosított eseteit adják.

Kapcsolódó publikáció:

[22]

7. Tézis

Ipari alkalmazások esetén fontos követelmény, hogy gyors, lehetőleg valós időben határozzuk meg a megmunkálási folyamat stabilitási térképét komplex dinamikai tulajdonságok mellett is. Ezen cél elérése érdekében általánosítottam a felező módszert magasabb dimenziókra. A javasolt több-dimenziós felező módszer (Multi-Dimensional Bisection Method) gyors numerikus algoritmusát készítettem el Matlab környezetben, amely képes megtalálni egy nemlineáris egyenletrendszer megoldásait tetszőleges számú paraméter esetén, ha az egyenletek D_C kodimenziós száma kisebb vagy egyenlő a független paraméterek D_S számánál. A kifejlesztett algoritmus automatikusan meg tud keresni diszjunkt megoldási halmazokat is, amelyek a stabilitási térképeken egyébként nehezen azonosítható stabil vagy instabil szigeteket jelentenek.

Bevezettem a hatékonysági számot, amely jellemzi az adott numerikus kereső eljárás hatékonyságát. A hatékonysági szám a paraméterterben kiértékelt ponthalmaz D_P fraktáldimenzióján alapul:

$$E = \frac{1}{D_P - D_F},$$

ahol D_F a keresett objektum fraktáldimenziója. Megmutattam, hogy ha a teljes paraméterterben létrehozott egyenletes háló mentén minden pontot kiértékelünk, a hatékonysági szám igen kicsi: $E = 1/(D_S - D_F)$, ami nem fraktál jellegű objektum esetén $E = 1/D_C$. Egy ideális módszer csak a keresett objektum pontjai mentén értékeli ki a függvényt ($D_P = D_F$), ekkor $E \rightarrow \infty$. Numerikus tesztek alapján az általam javasolt több-dimenziós felező módszer hatékonysági száma $E \approx 3/D_C$. Ez alapján a módszer hatékonyan alkalmazható marási folyamatok stabilitási térképeinek valós idejű meghatározására, még akkor is, ha a határgörbék fraktálszerű struktúrát és/vagy zárt stabil vagy instabil szigeteket alkotnak.

Kapcsolódó publikációk:
[23, 24, 25]

Irodalomjegyzék

- [1] Meszaros, I., Bachrathy, D., and Farkas, B., 2008. „Dynamical problems in high precision hard cutting”. In Biannual 19th International Conference on Manufacturing 2008. Budapest, Hungary, 11.06-11.07, no. ISBN: 978-963-9058-24-8, pp. 18–24.
- [2] Bachrathy, D., and Meszaros, I., 2009. „Dynamical problems in interrupted high precision hard turning”. In LAMDAMAP 2009: 9th International Conference and Exhibition on Laser metrology, machine tool, CMM and robotic performance. London, England, 06.30-07.02, no. ISBN: 978-0-9553082-7-7, pp. 357–367.
- [3] Bachrathy, D., and Meszaros, I., 2009. „Dynamical analysis of high precision hard turning processes for interrupted machining (Nagypontossagu kemeny esztergalas dinamikai vizsgalata megszakitott feluletek eseten) (in: Hungarian)”. *Gepgyartas*, **XLIX**(4-5), pp. 47–53.
- [4] Bachrathy, D., and Meszaros, I., 2010. „Optimal cutting speeds, entrance and exit force in interrupted high precision hard turning”. In CIRP ICME Š10 - 7th CIRP International Conference: Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Capri, Italy, 06.23-06.25, Vol. B4/3, ISBN: 978-88-95028-65-1, pp. 1–4.
- [5] Bachrathy, D., Reith, M. J., and Meszaros, I., 2010. „Optimal cutting speeds and surface prediction in interrupted high precision hard turning”. In *Gepeszet 2010, Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering. Budapest, Hungary, 05.25-05.26*, no. 036, ISBN: 978-963-313-007-0. Budapest University of Technology and Economics, Budapest University of Technology and Economics, pp. 241–246.
- [6] Bachrathy, D., and Meszaros, I., 2010. „Surface Modeling, Optimal Cutting Speeds and Entrance and Exit Force in Interrupted High

- Precision Hard Turning". In 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting. Gifu, Japan, 10.24-10.26, no. C16, pp. 1–6.
- [7] Reith, M. J., Bachrathy, D., and Meszaros, I., 2010. „Smoothed Force Model for Interrupted High Precision Hard Turning". In Manufacturing 2010: The XX. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies. Budapest, Hungary, 10.20-10.21, no. 17, ISBN: 978-963-9058-31-6, pp. 1–8.
- [8] Bachrathy, D., Insperger, T., and Stepan, G., 2009. „Surface properties of the machined workpiece for helical mills". *Machining Science and Technology*, **13**(2), pp. 227–245.
- [9] Bachrathy, D., Homer, M., Insperger, T. I., and Stepan, G., 2007. „Surface location error for helical mills". In 6th International Conference on High Speed Machining. San Sebastian, Spain, 03.21-03.22, no. Paper C100., pp. 379–384.
- [10] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2007. „Surface error for helical mills". In 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Zurich, Switzerland, 07.16-07.20, no. Paper 1268, p. 131.
- [11] Bachrathy, D., Insperger, T., and Stepan, G., 2007. „Computation of surface quality in case of helical milling tools (Felületi minőség számítása csavart élű szerszámmal történő marás során) (in Hungarian)". In X. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, Hungary, 08.27-08.29, pp. 1–4.
- [12] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2010. „Optimal axial immersion for helical milling tools based on frequency response function (Optimalis axialis fogasmelység csavart elu maroszerszamra frekvencia atviteli fuggveny alkalmazasaval (In Hungarian)". *Gep*, **LXI**(9-10), pp. 3–6.
- [13] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2007. „Good surface properties at efficient technological parameters in milling process". In 24th Danubia-Adria: Symposium on Developments in Experimental Mechanics. Sibiu, Romania, 09.19-09.22, no. ISBN: 978-973-739-456-9, pp. 45–46.
- [14] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2008. „Experimental Setup for Fast Stability Chart Reconstruction of Milling Processes". In Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering. Budapest,

Hungary, 05.29-05.30, no. G-2008-H-17, ISBN: 978-963-420-947-8, Budapest University of Technology and Economics, pp. 1–7.

- [15] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2008. „Efficient experimental detection of milling stability boundary and the optimal axial immersion for helical mills”. In International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation: IMETI 2008: International Symposium on Manufacturing Systems and Technologies: ISMST 2008. Orlando, USA, 06.29-07.02, Vol. 1, pp. 7–11.
- [16] Denkena, B., Kruger, M., Daniel, B., and Gabor, S., 2012. „Model based reconstruction of milled surface topography from measured cutting forces”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **54-55**, pp. 25–33.
- [17] Bachrathy, D., Stepan, G., and Turi, J., 2011. „State dependent regenerative effect in milling processes”. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, **6**(4), p. 9.
- [18] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2009. „Bistable parameter region caused by velocity dependent chip thickness in milling process”. In 12th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. San Sebastian, Spain, 05.07-05.08, no. 14, ISBN: 978-84-608-0866-4, pp. 867–871.
- [19] Bachrathy, D., Turi, J., and Stepan, G., 2009. „Analysis of the state dependent regenerative delay model of the milling process”. In SICON CF: Nonlinear dynamics, stability, identification and control of systems and structures. Roma, Italy, 09.21-09.25, pp. 1–3.
- [20] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2011. „State dependent regenerative effect in milling processes”. In Proceedings of the 7th European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2011): Systems with Time Delay (MS-11). Rome, Italy, 07.24-07.29, no. MS11-21, ISBN: 978-88-906234-2-4, pp. 1–2.
- [21] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2011. „Fold bifurcation in the state-dependent delay model of milling”. In ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE): 8th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC). Washington DC, USA, 08.28-08.31, DETC2011-48300, pp. 1–7.

- [22] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2010. „Time-periodic velocity-dependent process damping in milling processes”. In 2nd CIRP International Conference on Process Machine Interactions. Vancouver, Canada, 06.10-06.11, no. M09, ISBN: 978-0-9866331-0-2, pp. 1–12.
- [23] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2012. „Bisection method in higher dimensions and the efficiency number”. *Periodica polytechnica. Mechanical engineering*, **56**(2), pp. 81–86.
- [24] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2013. „Improved prediction of stability lobes with extended multi frequency solution”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **62**(1), pp. 411 – 414.
- [25] Bachrathy, D., and Stepan, G., 2013. „Efficient stability chart computation for general delayed linear time periodic systems”. In ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE): 9th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC). Portland, Oregon, USA, 08.04-08.07, DETC2013-13660, pp. 1–9.