

# Esztergálási folyamatok dinamikája, stabilitása és az anyagleválasztási hányad

PhD Tézisfüzet



Reith Márta Janka

Témavezető: Dr. Stépán Gábor

Műszaki Mechanikai Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

*Doctor of Philosophy*

2016



# Az értekezés előzményei, összefoglalása

Az ipari követelményeknek való megfelelés érdekében a forgácsolások megmunkálási folyamatok területén folyó kutatások és fejlesztések a vágási teljesítmény és a megmunkálási pontosság párhuzamos növelésére irányulnak. A vágási teljesítmény szoros kapcsolatban van az anyagleválasztási hányaddal (angolul: material removal rate (MRR)), ezért az MRR maximalizálása egy egyik legfontosabb célkitűzés. Pontossági és minőségi követelmények kielégítése csak stabil, rezgésmentes megmunkálási körülmények mellett biztosítható. Ebben az értekezésben az egy- és a több-képes esztergálási folyamatok stabilitásával kapcsolatos kutatási eredményeim kerülnek összefoglalásra.

Az értekezés 1. fejezetben bemutatásra kerül az ortogonális esztergálás mechanikai modellje, amely alapjául szolgál a stabilitási számításoknak. A 2. fejezetben néhány eljárást tárgyalok, amelyek az esztergálási folyamatok teljesítményének növelésére szolgálnak. A vizsgált esztergálási folyamatok optimalizálására szolgáló kritérium a regeneratív (öngerjesztett) rezgésektől mentes MRR érték maximalizálása volt. Olyan megmunkálási esetekben, amelyekben csúcsteljesítményre van szükség, előfordul, hogy a stabilitási határok közelében, a paramétertér úgynevezett stabil zsebeiben kell a fordulatszám és a forgácsszélesség paraméterpárt megválasztani. Bemutatásra kerül, hogy a gyakorlatban releváns csillapítási tartományokon két szomszédos stabilitási görbe, úgynevezett lebeny metszéspontjában található az MRR maximuma.

Ennél biztonságosabb módszer, ha olyan paraméterpárokat választunk, amelyek robusztusan stabil megmunkálást biztosítanak. Ezt például abban az esetben garantálható, amikor olyan fogásmélységet állítunk be, ami stabil forgácsolást eredményez valamennyi munkadarab fordulatszámra. Ez a stratégia természetesen csak akkor lehet célravezető, ha a termelékenységgel szemben támasztott követelményeket nem sértjük meg, nevezetesen, amikor a robusztus stabilitási határ elegendően nagy. Amennyiben ez nem biztosított, törekedni kell a robusztus stabilitási határ növelésére. A értekezésben bemutatásra kerül néhány, a robusztus stabilitási határ növelését szolgáló módszer, melyeket elemeztem és kísérletileg is ellenőriztem.

Az egyik termelékenységet növelő technika több, egymáshoz képest elhangolt dinamikával rendelkező esztergakést alkalmaz, amelyek egyszerre vesznek részt a forgácsolási műveletben. A dolgozat 3. fejezetében bevezetésre kerül a dinamikailag csatolatlan,  $n$  darab késből álló esztergáló rendszer mechanikai modellje és stabilitási tulajdonságainak számítási módja. Bemutatásra kerül továbbá a dinamikai paraméterek elhangolásának hatása a robusztusan stabil forgácsszélességre külön-

böző késszámok esetén. Elméleti stabilitási számításainkat és a meghatározott robusztus stabilitási határokat ipari párhuzamos esztergán végrehajtott vágási kísérletek mérési eredményeivel hitelesítettük.

Kísérletsorozatot állítottunk össze egy előtolás irányba kilágyított két-késes befogószerkezeten is, melyet a dolgozat 4. fejezete foglal össze. A kifejezetten az esztergálási kísérletek céljára gyártott befogószerkezet tervezése során különböző modális paraméter becslési módszereket alkalmaztunk. A szerkezet segítségével forgácsolási kísérleteket végeztünk azzal a céllal, hogy az elméleti stabilitási térképeket igazoljuk. A modális kísérletek felhívták a figyelmet arra, hogy a késtartó szerkezet nem-arányos csillapítása fontos szerepet játszik az elhangolt szerkezet jelentősen megnövekedett csillapításában. Ezáltal a kiindulási mechanikai modell, amely két dinamikailag csatolatlan szerszámot feltételezett, továbbfejlesztést a késtartó befogó rész dinamikájának figyelembevételével. Az így megfogalmazott nem-arányos csillapítást tartalmazó mechanikai modellel mind a rendszer dinamikai viselkedése, mind pedig a stabilitási tulajdonságok fizikailag megalapozott módon magyarázhatók, ami fontos eszköz a forgácsolási technológiák fejlesztése, tervezése során.

# Tézisek

## 1. Tézis

Analitikus számítások alapján meghatároztam az ortogonális esztergálás regeneratív rezgéseiből származó stabilitási lebenyeket az  $\Omega$  fordulatszám és  $w$  forgács szélesség paraméterek síkján. A szerszám gép domináns, jól elkülöníthető első módusa a  $k$  modális merevség, a  $\omega_n$  sajátkörfrekvencia és a  $\zeta$  csillapítási tényező segítségével jellemezhető. A stabilitási lebenyek szolgálnak felső határként az anyagleválasztási hányad optimalizálása során. Ezek nemlineáris és konkáv megengedett technológiai paraméter tartományt eredményeznek, aminek kezelése a hagyományostól eltérő optimalizálási módszereket igényel. Az alábbi maximális és minimális anyagleválasztási hányadot eredményező paraméter pontokról szóló megállapítások iránymutatásként szolgálnak a reális technológiai paraméter tartományban történő optimalizáláskor:

i) **Két szomszédos,  $r$  és  $r + 1$  indexszel jelölt stabilitási lebeny görbék metszéspontja a**

$$\tilde{\Omega}_{\text{INT}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{4\zeta^2}{\tilde{\omega}_c^2 - 1}}}{(r + 1) - \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{2\zeta}{\sqrt{(\tilde{\omega}_c^2 - 1)(\tilde{\omega}_c^2 + 4\zeta^2 - 1)}}\right)}$$

és

$$\tilde{w}_{\text{INT}} = \frac{1}{2} \left( \tilde{\omega}_c^2 \left( 1 + \frac{4\zeta^2}{\tilde{\omega}_c^2 - 1} \right) - 1 \right),$$

összefüggésekkel adható meg, ahol a dimenziótlan forgács szélesség  $\tilde{w}_{\text{INT}} = k_c/k$  a vágási tényező és a modális merevség hányadosa, a dimenziótlan fordulatszám  $\tilde{\Omega}_{\text{INT}} = \Omega/\omega_n$  és az  $r$ . lebeny görbéhez tartozó dimenziótlan berezgési frekvencia  $\tilde{\omega}_c = \omega_c/\omega_n$ .

Ezek a paraméter pontok lokális maximumok az anyagleválasztási hányad tekintében 40-nél kisebb lebeny sorszám és 0.1 alatti relatív csillapítási tényező értékek esetében.

ii) Az úgynevezett vágási folyamat-csillapítást a  $c_p$  vágási folyamat-csillapítási tényezővel és ennek  $\tilde{c} = c_p/k$  dimenziótlan alakjával jellemzik. Ortogonális esztergálás esetén az

$$\tilde{\Omega}_T = \frac{\tilde{c}\pi}{\sqrt{\zeta(1+\zeta)}}$$

és

$$\tilde{w}_T = 2\sqrt{\zeta(1+\zeta)} \left( 1 + 2\zeta + 2\sqrt{\zeta(1+\zeta)} \right),$$

paraméter pontban az anyagleválasztási hányad minimális a robusztus stabilitási határ mentén, ami a stabilitási lebeny görbék alsó burkolója.

Kapcsolódó publikációk:

[1, 2]

## 2. Tézis

Egy dinamikailag csatolatlan  $n$ -késes esztergáló rendszer, amelyben az esztergakések tetszőleges kerületmenti szögkiosztásban vannak elhelyezve és a kések csak a munkadarabon keresztül érvényesülő regeneratív hatással csatolódnak, egyenértékű egy egy-késes  $n$  szabadságfokú esztergáló rendszerrel, amelynek időkésése a munkadarab forgásának periódusideje.

Kapcsolódó publikáció:

[3]

## 3. Tézis

Egy  $n$ -késes, dinamikailag csatolatlan, azonos szerszámokból álló esztergáló rendszer robusztus stabilitási határa megegyezik az egy-késes rendszerével. Ez a határ a

$$\tilde{w} = 2\zeta(1 + \zeta)$$

összefüggéssel határozható meg, amelyben  $\tilde{w} = k_c/k$  a dimenziótlan forgács szélesség,  $\zeta$  az egységes relatív csillapítási tényező. A stabilitási lebenyek közötti stabil zsebek területe csökken a kések számának növelésével, ami rontja a stabilitási tulajdonságokat.

Kapcsolódó publikációk:

[4, 5, 6]

## 4. Tézis

Egy  $n$ -késes, dinamikailag csatolatlan, arányosan csillapított szerszámokkal rendelkező rendszert vizsgáltam, amelyben a kések sajátfrekvenciája a merevségük változtatásával került elhangolásra. Elméleti stabilitási számítások bizonyították és kísérleti eredmények megerősítették, hogy:

**Létezik egy optimális merevségi arány a csatolatlan  $n$ -késes esztergáláskor, ahol a robusztus stabilitási határ maximális, és ez a határ jelentősen nagyobb, mint az azonos dinamikájú szerszámokkal rendelkező  $n$ -késes rendszer esetén.**

A számításokat egy két-késes rendszerre végeztem el, amelyet laboratóriumi kísérletek során is vizsgáltam. Az eredmények alapján optimális elhangolást a gyakorlatban az egyik szerszám kilágyításával értem el. Egy ipari párhuzamos esztergagépen végrehajtott forgácsolási kísérleteim eredményei jó egyezést mutattak az elméleti stabilitási számítások által meghatározott, a két szerszám különböző sajátfrekvencia arányához tartozó robusztusan stabil forgácsszélesség értékekkel. Az eredményeket általánosítottam  $n$  kés esetére.

Kapcsolódó publikációk:

[3, 7, 5, 8]



## 5. Tézis

Egy két-kékes befogószerkezetet terveztünk és gyártottunk az elméleti modellek igazolása érdekében. Kísérleti modálanalízis segítségével az elhangolt rendszer esetén egy nagyságrenddel nagyobb csillapítási tényezőket határoztam meg a szimmetrikus rendszerben mért értékekhez képest. Különböző mechanikai modelleket vizsgáltam a befogó szerkezet dinamikájának leírására.

**Az a feltételezés, miszerint a befogás ideálisan merev, jellegre helyes robusztus stabilitási határokat eredményez, de nem ad megfelelő fizikai magyarázatot a kísérleti úton meghatározott, megnövekedett csillapítási tényezőkre abban az esetben, amikor az egyik szerszám sajátfrekvenciája a másikhoz képest el van hangolva.**

**Az a mechanikai modell írja le pontosan a befogószerkezet megnövekedett csillapítását, amely figyelembe veszi a fizikai csatolást a két szerszám között, és tartalmazza a befogó rész nem-arányos csillapítású dinamikáját. Ez a modell a robusztus stabilitási határokat is megfelelően szolgáltatja.**

Forgácsolási kísérleteket végeztem két-kékes rendszeren az elméleti stabilitás számítások igazolására. A nem-arányos csillapítást feltételező mechanikai modellel megfelelően becsülhető a befogószerkezet dinamikai viselkedése és az esztergálási folyamat stabilitása.

Kapcsolódó publikációk:

[9, 4, 10, 6, 7, 11]

# Irodalomjegyzék

- [1] Reith, M. J., and Stepan, G., 2012. „Optimization of material removal rate for orthogonal cutting with vibration limits”. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, 56(2), pp. 91–97.
- [2] Reith, M. J., and Stepan, G., 2012. „Stability boundaries of the turning process for extreme damping values”. In 8th International Conference on Mechanical Engineering, Budapest.
- [3] Reith, M. J., Bachrathy, D., and Stepan, G., 2013. „Stability properties and optimization of multi-cutter turning operations”. In ASME 9th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control.
- [4] Reith, M. J., Bachrathy, D., and Stepan, G., 2014. „Comparing stability and dynamic behaviour of different multi-cutter turning models”. In ENOC 8th European Nonlinear Dynamics Conference, Vienna.
- [5] Reith, M. J., and Stepan, G., 2015. „Duplakéses esztergálási folyamat stabilitása és optimalizálása”. In XII. Magyar Mechanikai Konferencia MaMeK, Miskolc.
- [6] Reith, M. J., Bachrathy, D., and Stepan, G., 2016. „Improving stability of multi-cutter turning with detuned dynamics”. *Machining Science and Technology*(20(3)), pp. 440–459.
- [7] Reith, M. J., Bachrathy, D., and Stepan, G., 2015. „Optimization of the robust stability limit for multi-cutter turning processes”. In ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, Boston.

- [8] Reith, M. J., Bachrathy, D., and Stepan, G., 2016. „Optimal detuning of a parallel turning system – theory and experiments”. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*(accepted).
- [9] Reith, M. J., Bachrathy, D., and Stepan, G., 2013. „Mode coupling in multi-cutter turning: simulation and experiments”. In DAS 30th Danubia-Adria Symposium on advances in experimental mechanics, Primosten.
- [10] Reith, M. J.; Stepan, G., 2014. „Sajátfrekvenciák hangolása duplakéses szerszámbefogó-szerkezet tervezésénél”. *Gép folyóirat*(6-7), pp. 81–84.
- [11] Reith, M. J.; Stepan, G., 2016. „Exploitation of non-proportional damping in machine tools for chatter suppression”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*(under revision).