

FÚRÁS SORÁN FELLÉPŐ NEMLINEÁRIS REZGÉS VIZSGÁLATA

Béres Miklós

Miskolci Egyetem, Fizikai Tanszék,
Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros,
e-mail: mechbere@uni-miskolc.hu

Összefoglalás

Jelen cikk a fúrási forgácsolási folyamat során fellépő öngerjedő rezgések tanulmányozásához elvégzett gyakorlati mérési és számítási eredményeket tartalmazza. A forgácsolás során fellépő erőket a szerszám és a munkadarab közti erőtől származtatjuk. Az elvégzett feladatok célja, hogy a fúrási megmunkálási folyamat ellenőrzéséhez olyan adatokat és formulákat jelöljön meg iránymutatásul, melyek segítséget jelenthetnek egy állapot-felügyeleti rendszer algoritmusának kidolgozásához. Ezáltal az öngerjesztő rezgések jelenségeinek kedvező irányú befolyásolására kínálkozik lehetőség.

Kulcsszavak: fúrás, csúszó-tapadó súrlódás, öngerjesztő rezgés

Abstract

This paper deals with computational and measurements results, which helpful to the study of the regenerative chatter vibration by drilling as during metal cutting process. These nonlinear vibrations derive from the changing of the stick-slip friction as a source. The mean goal of the work the critical data and formulas to find which are helpful in a machine tool process monitoring algorithm.

Keywords: Drilling, chatter, stick-slip friction

1. Bevezetés

A gépipari termelés mai leggyakoribb eljárása a forgácsleválasztás. Emiatt igen fontos, hogy a munkafolyamatok egyenletesen és hibamentesen menjenek végbe. A számítástechnika és az elektronika fejlődése révén a fent említett célt szabályozás-technikai úton valósítjuk meg. Ilyen lehetőséget kínálnak az állapot-felügyeleti rendszerek. Egyszerűbb esetekben - és egyre inkább terjedőben lévő eljárás, hogy - lokális aktív visszacsatolást valósítanak meg. A forgácsleválasztás ugyanakkor számtalan problémával terhelt. Míg az elektronika területén gyakran öngerjesztett állapotok előállítása a cél, addig a gépiparban ez a folyamat jelenti az egyik legnagyobb kihívást.

A gépgyártás-technológia elmúlt évtizedekben végbemenő nagymértékű fejlődése (szárazforgácsolás, nagysebességű forgácsolás, stb.) megkívánja a korábbi tapasztalati eredmények ismételt vizsgálatát, újabb összefüggések keresését. Különösen a fellépő nemkívánatos jelenségek elemzése fontos. Ilyen folyamat a megmunkálásnál fellépő öngerjesztett rezgés is. Az elsődleges és másodlagos gerjesztő erők harmonikus, kvázi-harmonikus és

fűrészfog-jellegű (relaxációs) lengéseket okoznak [1][2]. Számos vizsgálat irányul ezek közül a munkadarab és a szerszám közt keletkező nemlineáris öngerjesztett rezgésre, mely a forgács leválasztásakor jön létre. Ez az chatter jelenség, mely korlátozza a termelés hatékonyságát azáltal, hogy rontja a felületi minőséget, és rövid szerszám-élettartamot eredményez. Ez a probléma különösen a nagysebességű forgácsolásnál jelent gondot.

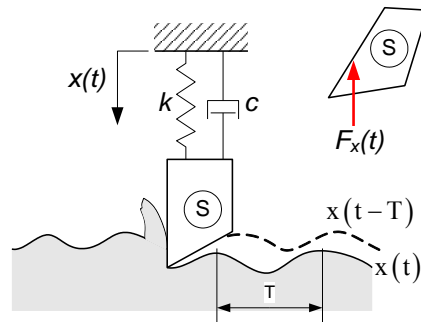
A chatter fizikai okainak vizsgálata közel egy évszázadra nyúlik vissza, de a mélyreható elemzések az 50-es 60-as évektől váltak gyakorivá. Tlusty [3] majd később Tobias [4] tanulmányozta a regeneratív rezgéseket, melyek dinamikai modellezését lineáris késleltetett differenciál-egyenletekkel végezték. Meg kell említenünk Altintas, Budak [5] munkásságát is, akik szoftveres eszközt is (MillPro) készítettek maráshoz az öngerjesztési jelenség előrejelzésére.

A megmunkálások közül a fűrés elsősorban nagy számosságával tűnik ki. Például a repülőgépiparban mintegy 40%-át teszi ki a gyártási műveleteknek. Ezért igen fontos, hogy foglalkozzunk az anyagleválasztás ezen módjával.

A folyamatos fűrés forgácsleválasztási mechanizmusát Oxford és Shaw kezdte mélyrehatóan tanulmányozni [14]. Később az analitikai modellek mellett számítógépes feldolgozások is készültek. Agapiou [15] és Ulsoy például véges-elemes modellt dolgozott ki a fűrészár hajlító és csavaró rezgéseit vizsgálva.

A chatter magyarázatához lineáris és nemlineáris elméletek egyaránt felállíthatók. Gyakran a fordulatszám okozta késleltetést is figyelembe veszik a nemlinearitás mellett.

Egy ilyen egyszerű egydimenziós modellt szemléltet az alábbi 1. ábra.



1. ábra. Ortogonális forgácsolási modell

A fenti példa esetén a forgácsoló erő okozta szerszámrezgés mozgásegyenletét a

$$\frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} + \frac{c}{m} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{k}{m} \cdot x(t) = \frac{1}{m} F_x(t, T) \quad (1)$$

összefüggéssel írjuk fel, ahol (m) a szerszám tömege, (k) a szerszám rugómerevsége, (c) a csillapítás, (T) a szerszám egy körülfordulásának ideje. Az egyenlet jobb oldalán álló tag a forgácsoló erő, melynek van egy konstans része (egyenletes forgácsolásnál fellép erő) és egy változó része. Ez utóbbi a felelős a nemlineáris rezgések kialakulásáért.

$F_x(t, T)$ meghatározását számos modell került kidolgozásra. Legegyszerűbb esetben még az időfüggéstől is eltekintünk (Kinzle-féle összefüggés):

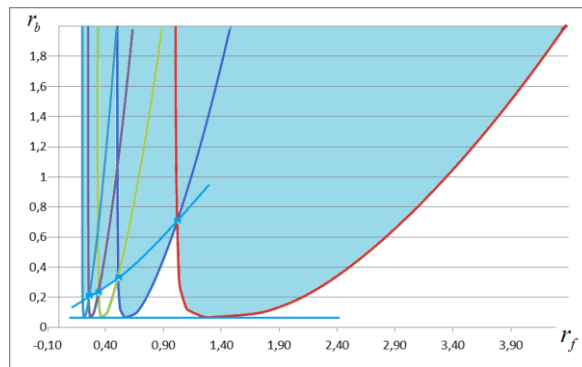
$$F_x = k_{c1.1} h^{x_F} b^{y_F} \quad (2)$$

A képletben ($k_{c1.1}$) a fajlagos forgácsoló erő főértéke, (h) a forgácsvastagság (b) a forgácsszélesség. (x_F , y_F) pedig olyan tapasztalati állandók, amelyek a szerszám anyagi tulajdonságait összevontan jellemzik. A modell előnye, hogy jól kezelhető matematikailag.

Ha azonban a forgácsoló erő képletében használt fogásmélységet vagy a szerkezeti merevséget variáljuk, nemlineáris egyenlethez jutunk, Nayfeh [6] modelljében a nemlinearitás mellett az időképletetés is figyelembe lett véve.

A forgácsolási jelenségek összetettebb vizsgálatánál azonban kísérleti tapasztalatok felvetették a megmunkálási folyamat esetleges kaotikus voltát.

A nemlineáris modellek kutatásának egyik fázisában stabilitási diagramokat készítenek azért, hogy megállapítsák, mely paraméterek mellett következik be stabil forgácsolás és hol válik instabillá a jelenség. Egyszerű modellre számos analitikus bizonyítást adta a szubkritikus Hopf bifurkáció létezésének Stépán [7].



2. ábra Relatív stabilitási diagram első öt görbéje

Egy ilyen diagramot mutat a 2. ábra, ahol a vízszintes tengelyen az $r_f=f/f_{\min}$ relatív fogásmélység, a függőleges tengelyen pedig az $r_b=b/b_{\min}$ relatív fordulatszámot tüntettük fel (mely fordítottan arányos a késleltetéssel). A tényleges diagram az egyes hurkok egybevetéséből származik. A rajzon két elkülönített rész látható. A sötétített tartomány olyan előtolás – főorsó-fordulatszám párosításokat jelöl, amelyek instabil forgácsolási körülményeket jelentenek, míg a diagram alsó része az öngerjesztés nélküli területet adja. A grafikon csúcsai mutatják azokat a fordulatszámokat, ahol a forgácsolási teljesítmény a lehető legnagyobb. Kiolvasható az ábrából továbbá az is, hogy egyre növekvő fordulatszám mellett egyre nagyobb fogásmélység választható stabil munkafolyamat mellett. A dimenziómentes ábrázolás segíti a különböző gépbeállítások összehasonlítását. Érdekes megállapítani a fentiek mellett, hogy bizonyos tapasztalati esetekben akkor is jelentkeztek öngerjesztett rezgések, ha a forgácsolási paraméterek a stabilitási határ alatti munkapontot jelölnek meg.

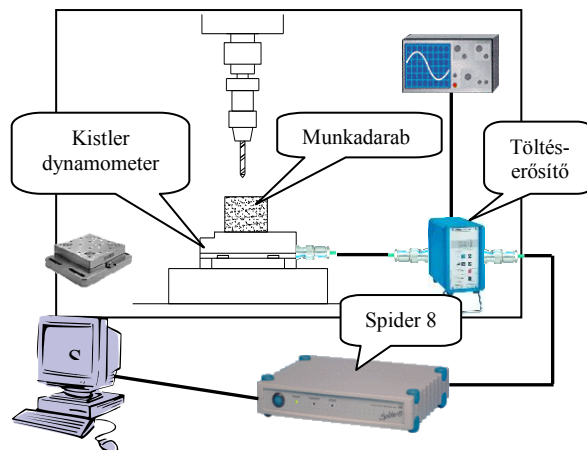
Nemlineáris modellhez vezet a fentiekén kívül az is, ha a forgácsnak a szerszám homloklapján történő súrlódását nemlineáris módon vesszük figyelembe. A száraz súrlódásra vonatkozó eseteket Moon, Weircigroch [8] és Wu-Liu [9], [10] szerzőpáros vizsgálta mind elméleti mind kísérleti úton.

2. Mérési és számítási eredmények

Ahhoz, hogy a fúrás stabilitási diagramját meg tudjuk rajzolni, egyrészt ismerni kell a vizsgált rendszer dinamikai paramétereit, másrészt elemezni kell a gerjesztő erőket.

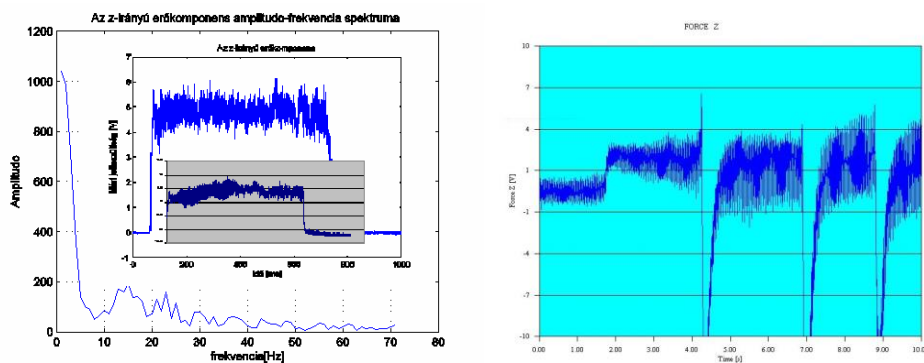
A rendszer paramétereinek megállapításához CNC megmunkáló gépen végeztünk méréseket. Sántha korábbi munkája [11] alapján kiválasztásra kerültek a fúrási technológiai paramétereit.

A mérés összeállítási vázlatát mutatja a 3. ábra.



3. ábra. Mérési elrendezés a dinamikai paraméterek tapasztalati meghatározásához

A fúrás acél fémfogácsokban (Fe490-2) történt $d=8\text{mm}$ fúróátmérő mellett, melyeket egy 3-irányban erőt mérő mérőasztalra helyeztünk. A munkadarabot kenőfolyadék nélkül telibe fúrtuk, majd a mérési adatokat számítógépen elemeztük. Néhány mérési eredményt közül a 4. ábra. Az eredmények egyeznek a szakirodalomban fellelhető észlelésekkel.

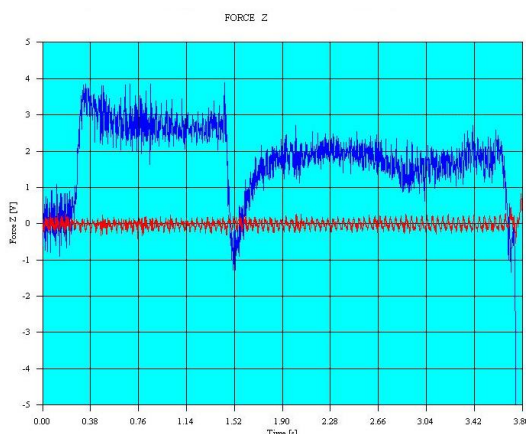


4. ábra Axiális erő – idő grafikonon valamint ezen irányú frekvencia spektrum

A kép bal oldalán chatter nélküli fúrások erőamplitúdó-idő diagramjai láthatóak a fúró-szár tengelyirányában mérve, valamint ezen erő frekvenciaspektruma. A jobb oldali mérési

eredmény ugyanakkor olyan beragadási jelenséget szemléltet, amelynek végén instabil rezgések is megjelennek.

A mérési eredményeket elemezve egyértelműen észrevehető volt a tengelyirányú erőkomponens dominanciája a tengelyre merőleges erő-összetevőkhöz képest. Ezt mutatja be az 5. ábra, amelyen az axiális (z-tengelyű) és az egyik oldalirányú terhelés intenzitásának aránya olvasható le. A képen az is látható, hogy amennyiben a fúrószár újból az anyagba mélyed, a következő szakaszon a forgácsoló erő kisebb mértékű is lehet. Megfigyelhető volt továbbá, hogy az x- ill. az y-irányú erőösszetevők közel azonos mértékkel vesznek részt a folyamatban.



5. ábra. A z-irányú és az x-irányú erők aránya

A mérések alapján megvizsgáltunk néhány kritikus frekvenciát. Miután megfelelő végeselemes dinamikai modelleket készítettünk a fúrószárra, ezen rezgéseket összehasonlítottuk a kapott eredményekkel majd megkerestük a lehetséges kapcsolatokat.

A kiadódott módusok közül első közelítésben azokkal érdemes foglalkozni, amelyek modellezése során egyszerűsítéseket, linearizálásokat tudunk alkalmazni. Továbbá mivel a fúrószár vágóélének mozgása és a fúrószár formája összetett, célszerű olyan modellt választani, amely megfelelő körülmények között jól helyettesíti viselkedését.

Ha például a fúrószár első torziós lengéseit vizsgáljuk, a hosszirányú méret is változik. Ugyanakkor, ha az ortogonális sík felől megfelelő módon [12] írjuk fel a mozgást, egydimenziós forgácsolási modellt állíthatunk fel.

Ezen modell esetén használjuk fel a forgácsképződésre felírt Merchant-féle modellt [1], amikor is az alakváltozásokat a iránysíkbelinek tételezzük fel. Az egyenletek felírásához a 6. ábra szemlélteti a jelöléseket.

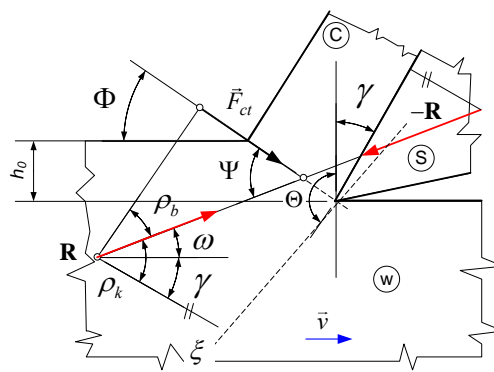
Az eredő forgácsoló erőre, különböző geometriai megfontolások figyelembe vétele után, felírhatjuk a következő összefüggést:

$$R = \tau \cdot A_f = \tau \cdot b \cdot l = \tau \cdot b \cdot \frac{h}{\sin(\Phi)} = \frac{\tau \cdot b \cdot h}{\cos(\Phi + \rho_k - \gamma) \sin(\Phi)} \quad (3)$$

Itt τ a nyírási síkban ébredő átlagfeszültség, Φ a nyírási sík szöge, ρ_k a súrlódási félkúpszög a szerszám homlokfelületén, b forgács-szélesség, h pedig a forgácsvastagság. Az erő rezgésirányú (Θ) összetevőire elméleti megfontolások után kapjuk, hogy

$$F_{\xi} = \frac{-\tau \cdot b \cdot (h - \xi \cdot \cos(\Theta))}{\cos(\Phi + \rho_k - \gamma) \sin(\Phi)} \sin(\Theta + \gamma - \rho_k), \quad (4)$$

amelyben a Θ szög az ortogonális sík elhelyezkedését jelöli. (lásd **6. ábra**).



6. ábra A forgácsolóerő jelölései

Ha az anyagmegmaradás törvényét is figyelembe vesszük, kapjuk a folyó forgács sebességére a következő kifejezést.

$$v_{\xi} = \frac{v \cdot \sin(\Phi) - \frac{d\xi}{dt} \cos(\Theta - \Phi)}{\cos(\Phi - \gamma)} \quad (5)$$

Ezek után írjuk fel a mozgásegyenletben szereplő erőhatást. Mivel a szerszám kopásának létrejöttében szerepe van a forgács és a szerszám egymáson elmozduló felülete kölcsönhatásának, a forgácsleválást kísérő jelenségek közül a súrlódás hatását vizsgáljuk. A lehetséges modellek közül egy szakadáson modellt használjuk fel [13]:

$$\tan(\rho_k) = \tan\left(\frac{\pi}{2} - 2\Phi + \gamma\right) = \mu_a + (\mu_b - \mu_a) \cdot e^{-\left(\frac{v_{\xi}}{v_{\xi 0}}\right)^2} \quad (6)$$

ahol μ_a és μ_b tapasztalati súrlódási együtthatókat, $v_{\xi 0}$ pedig a forgácsszületnek a szerszám homlokfelületén lévő megcsúszási határsebességét jelenti.

Amennyiben azonban a (6) egyenletet visszahelyettesítjük a (4) egyenletbe, akkor transzcendens egyenletre jutunk.

Ezen probléma megoldására közelítéssel élünk. Linearizálást és egyszerűsítéseket felhasználva a súrlódási összefüggésre, a levezetéstől eltekintve kapjuk, hogy

$$\mu = g(v_\xi) = \mu = \mu_b + \frac{\mu_a - \mu_b}{\xi_0^2} \xi^2 = C_1 v_\xi^2 + C_2 \quad (7)$$

Ezt a súrlódási erőt behelyettesítve az egydimenziós mozgásegyenlet (1) összefüggésébe, írhatjuk fel a dinamika alapegyenletét. A dimenziótlanított mozgásegyenletet így tudjuk felírni:

$$\ddot{\xi} + A\dot{\xi} + \xi = B_1 (1 - (\xi - \xi_T) \cos(\Theta)) (C_1 + C_2 \xi^2), \quad (8)$$

ahol az A, B, B₁ és B₂ paraméterek kísérleti úton határozandók meg.

3. Összefoglalás

Méréseket végeztünk a fúrási folyamat dinamikai körülményeinek meghatározására. A forgácsolási folyamatnál előállítottunk öngerjesztett rezgéseket is. Korábbi eredményekre támaszkodva bemutatásra került egy egyszerűsített dinamikai modell. További feladat marad ezen összefüggés egybevetése, ellenőrzése más tapasztalatokkal. Majd meg kell vizsgálni az eredmény használhatósági feltételeit.

4. Köszönetnyilvánítás

A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

5. Irodalom

- [1] Dudás, I.: *Gépgyártástechnológia*, Műszaki Kiadó, Budapest, 2011.
- [2] Békés, J.: *A fémforgácsolás tervezése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.
- [3] Tlustý-Poláček, Danek, Spacek: *Selsterregte Schwingungen an werkzeugmaschinen*, VEB Verlag, Berlin, 1962.
- [4] Das, Tobias: *The Relation Between the Static and The Dynamic Cutting Forces of Metals*, IJMTDR, 7, pp.63-89.
- [5] Altintas, Y., and Budak, E.: *Analytical prediction of stability lobes in milling*, 1995. Annals of the CIRP, 44 (1): pp. 357-362.
- [6] Nayfeh, A. H., Chin, C.-M., and Pratt, J.: *Perturbation methods in nonlinear dynamics-applications of machining dynamics*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119 (4A), 1997. pp. 485-493.
- [7] Stépán, G.: Delay-differential equation models for machine tool chatter. Dynamics and Chaos in Manufacturing Processes, edited by F. C. Moon (New York: Wiley), 1998, pp. 165-191.
- [8] Weircigroch, M., Material removal rate prediction for ultrasonic drilling of materials using an impact oscillator approach. Physics Letters A, 1999 **259** (2): pp. 91-96.

- [9] Wu, D. W., Liu, C. R., *An analytical model of cutting dynamics. Part 1: Model building*. 1985. Journal of Engineering for Industry, **107**: pp.107-111.
- [10] Wu, D. W., Liu, C. R., *An analytical model of cutting dynamics. Part 2: Verification*. 1985. Journal of Engineering for Industry, **107**: pp.112-118.
- [11] Sántha Csongor: *Méretes forgószerszámokkal végzett furatmegmunkálások automatikus állapotfelügyelete*, 1996, Egyetemi Doktori értekezés
- [12] Bayly, P. V., Metzler, S. A., Schaut, A. J., and Young, K. A.: *Theory of torsional chatter in twist drills: model, stability analysis and comparison to test*. 2001. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123. pp. 552-561.
- [13] Princehouse, D. W.: *Observations of high-frequency oscillation in drilling*. 1998. Technical Document Series, SSGTECH-98-201, SSG Applied Research and Technology.
- [14] Shaw, M. C., Oxford Jr., C. J.: *On the drilling of metals I, II*. Transactions ASME,
- [15] Stephenson, D. A., Agapiou, J. S., *Calculation of main cutting edge forces and torque for drills with arbitrary geometries*. 1992, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 32 (4)