

AZ ACÉL NAGY GYORS DEFORMÁCIÓJÁNÁL FELLÉPŐ ANOMÁLIA DINAMIKAI VIZSGÁLATA

THE DYNAMIC EXAMINATION OF AN ANOMALY DURING THE LARGE, FAST DEFORMATION OF STEEL

Dr. Pálmai Zoltán*

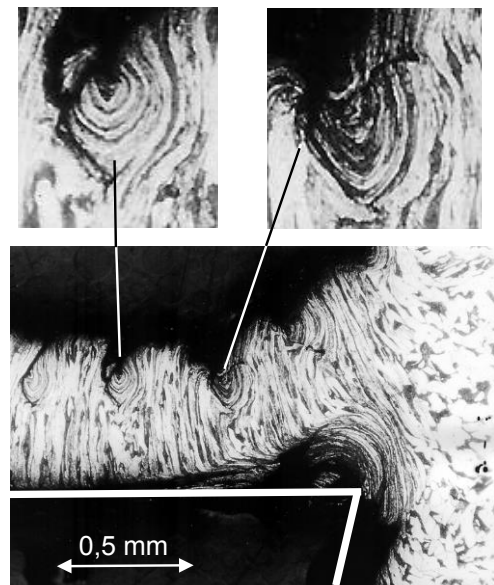
ABSTRACT

It may occur occasionally during turning that a metallic deposit, the so-called built-up edge (BUE) is formed that dilapidates the surface of the workpiece and shortens tool life. We have observed its effect on chip formation with microscopic techniques and have developed a mathematical model for the process. The laboratory experience confirms the numeric solution of the time delayed autonomous differential equations. This model can be applied to other technologies as well where the undeformed chip thickness varies.

1. ELŐZMÉNYEK

Az acélfeldolgozás növekvő minőségi követelményei már a XX. század első felében arra késztette az anyagkutatókat, hogy behatóan tanulmányozzák termékeik technológiai tulajdonságait. A szakirodalom rendszeresen közölt jelentéseket ezekről a kutatásokról, mint pl. Rapatz cikkét [1], aki az ún. élsisakképződést tanulmányozta. Elsőként mutatta ki, hogy a nagy, gyors deformáció hatására megemelkedő hőmérsékleten a munkadarab anyagából a szerszám élére fémes réteg rakódik fel (1. ábra), amelyet a szakirodalom az angol elnevezése alapján csak BUE névvel (built-up edge) tárgyal. Ezt az anyagalakítási anomáliát egy korábbi beszámolóinkban már említettük [2]. A BUE instabil, a megmunkálás közben, amikor kialakulásának feltételei teljesülnek, átveszi a szerszámél funkcióját, rendszeresen felépül, majd leszakadozik. Jól látszik ez az 1. ábrán, amely fúrásnál keletkező forgács hosszmetsetét mutatja. Megfigyelhető, hogy a fúró előző körülfordulásakor a munkadarab felületén maradt BUE a fúró következő körülfordulásánál az éppen keletkező forgács külső felületére kerül. Az élsisak relative kis intenzitású forgácsoláshál képződik ugyan, amely a korszerű gyártási folyamatokra látszólag kevésbé jellemző, de vannak olyan technológiai

műveletek, amelyeknél most is kis sebességgel dolgozunk, mint pl. a fúrásnál. A BUE kialakulásának számos feltétele van. Ezért, noha a forgácsolás elméletének mintegy 150 éve alatt igen sokan foglalkoztak az élsisakkal, még mindig maradtak tisztázatlan részletek. Jellemző, hogy amikor Pekelharing a C.I.R.P. (College International pour la Recherche en Productique) felkérésére egy teammel összegezte az élsisakról addig szerzett ismereteket, a „Built-Up Edge (BUE): Is the Mechanism Understand?” címmel publikálta azt [3]. A témakör azóta is a technológia fejlesztésével foglalkozók érdeklődési körében maradt [4, 5].



1. ábra. Az élsisak nyomai C35 acél fúrásakor

Az e dolgozatban bemutatott munka során magával az élsisak keletkezésének folyamatával nem foglalkoztunk. Tényként fogadtuk el, hogy a BUE jól körülhatárolható és meglehetősen jól ismert technológiai feltételek mellett kialakul, és erősen befolyásolja a forgácsképződést. Célunk az volt, hogy a forgácsképződés folyamatára korábban kidolgozott és bemutatott [6] dinamikai modellünket alkalmassá

*ny. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék, palmayz@t-online.hu

tegyük a változó rétegvastagságú forgácsolás, így az élsisak képződés hatásának leírására is.

2. AZ ÉLSISAK HATÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

Az élsisak a szerszámon mintegy második élt képez, amely kinyúlik a szerszám elé is (1. ábra), azzal a következménnyel, hogy megváltozik a leválasztott anyagréteg vastagsága. Minthogy pedig a folyamat instabil, a leválasztott réteg vastagsága folyamatosan változik. Tapasztalat szerint ez a folyamat periodikus, azaz a megmunkáló rendszer egy jól meghatározható frekvenciájú rezgésgerjesztést is kap [7].

A korábban már bemutatott modell [6] a leválasztott h réteg állandóságának feltételezésével készült. Amikor ez a feltétel nem teljesül, akkor a folyamatot meghatározó képlékeny nyírési zónában ébredő $F_{\phi t}$ erőnél, illetve a forgácsban ezzel egyensúlyt tartó σ nyomás hatására kialakuló rugalmas y_{el} deformációnál a h változását figyelembe kell venni (2. ábra). Az y_{el} deriválásánál ([6]) most $\dot{y}_{el} = (h\dot{\sigma} + h\sigma)/E \sin\phi$ adódik. Az időben változó rétegvastagság megadható a

$$h(\hat{t}) = h_0 [1 + f(\hat{t})] \quad (1)$$

alakban, ahol h_0 az elméleti leválasztott rétegvastagság, $\hat{t} = t/K$ dimenziótlán idő, K az időlépték. A forgácsstó nyírési zónájában ébredő $\hat{\tau} = \tau/\tau_\phi$ csúsztató-feszültséggel felírható új egyensúlyi egyenlet

$$\frac{d\hat{\tau}}{d\hat{t}} = \frac{1 - F(\hat{t})}{[1 + f(\hat{t})]^2} - 2 \frac{\hat{\tau}}{h} \frac{dh}{d\hat{t}} \quad (2)$$

Itt $F(\hat{t})$ a korábbi modellnél alkalmazott anyagfüggvény, τ_ϕ pedig az olyan esetben ébredő nyírófeszültség, amikor nemcsak a leválasztott réteg vastagsága konstans, hanem a leváló forgácsé is, azaz ún. folyóforgács keletkezik. A modell többi egyenlete változatlan, ahogyan korábban már bemutattuk [7]:

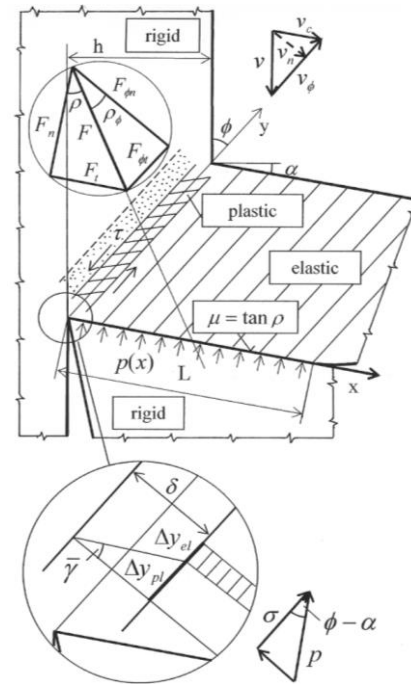
$$\frac{d\hat{T}_0(\hat{t})}{d\hat{t}} = \zeta [\hat{T}(\hat{t}) - 2\hat{T}_0(\hat{t})] - \frac{1}{\delta\hat{t}} \hat{T}_0(\hat{t}) \quad (3)$$

$$\frac{d\hat{T}(\hat{t})}{d\hat{t}} = \eta \hat{\tau}(\hat{t}) F(\hat{t}) - \zeta [\hat{T}(\hat{t}) - \hat{T}_0(\hat{t})] - \frac{1}{\delta\hat{t}} [\hat{T}(\hat{t}) - \hat{T}_0(\hat{t} - \delta\hat{t})] \quad (4)$$

$$\frac{d\hat{\gamma}(\hat{t})}{d\hat{t}} = [F(\hat{t}) - F(\hat{t} - \delta\hat{t})] \frac{1}{\delta\hat{t}} \quad (5)$$

és itt $\hat{\gamma}$ a nyírési zóna deformációja, $\hat{T} = (T - T_w)/T_w$ a nyírési, azaz aktív deformációs zóna dimenziótlán hőmérséklete, ahol T_w a munkadarab hőmérséklete, \hat{T}_0 pedig a 2. ábrán pontozással jelölt inaktív, csak a hőátadásban szerepet játszó réteg hőmérséklete. Az η , ρ és $\delta\hat{t}$ rendszerparaméterek, ahol η a fizikai teljesítmény jellemzője, $\delta\hat{t}$ az időtartam, amennyit az

anyag a nyírési zónában tölt, ρ pedig a hővezetessel összefüggő rendszerparaméter.



2. ábra. A forgácsképződés új egyszerűsített technológiai modellje

Az anyagegyenlet

$$F(\hat{\gamma}, \hat{\tau}, \hat{T}) = F(t) = \frac{\dot{\hat{\gamma}}}{\dot{\hat{\epsilon}}_\phi} = \frac{\hat{T} + 1}{\hat{T}_0 + 1} \exp \frac{\tau - \frac{1 + \epsilon_\phi^n \dot{\hat{\gamma}}^n}{1 + \epsilon_\phi^n} + a(\hat{T} - \hat{T}_0)}{b(\hat{T} + 1)} \quad (6)$$

ahol ϵ_ϕ a τ_ϕ feszültségnél kialakuló deformáció, \hat{T}_0 ugyanott a hőmérséklet.

Ez az egyenletrendszer a modell négy állapot-jellemzőjének, $\hat{\tau}$, \hat{T}_0 , \hat{T} és $\hat{\gamma}$ meghatározására szolgál. A forgács képződésének általánosított modellje tehát a (2)-(5) autonóm differenciálegyenlet és a (6) anyagegyenlet. A kezdeti feltétel $\hat{T}_0(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$, illetve $\hat{\tau}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$, a (4) és (5) eltolásos differenciálegyenleteknél a $\hat{t} = \mathbf{0} \dots \delta\hat{t}$ idő-intervallumban $\hat{T}(t) = \mathbf{0}$ és $\hat{\gamma}(t) = \mathbf{0}$.

3. KÍSÉRLETI ELLENŐRZÉS

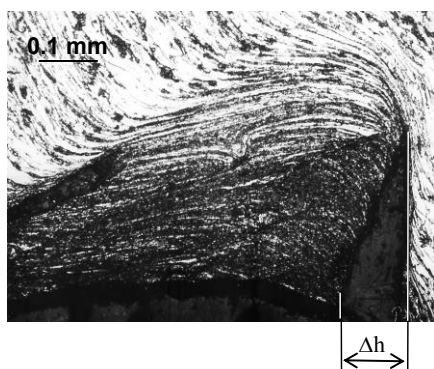
Feltételezésünk az volt, hogy a BUE kialakulása az által, hogy a folyóforgács képződését erősen megzavarja, kaotikus profilú forgácsot idézhet elő. A kaotikus jelleg elméleti sajátosságait máshol már bemutattuk [7], itt a forgácsképződés gyakorlati vonatkozásaival foglalkozunk. Ezért a kísérleti forgácsolás céljára olyan anyagot kerestünk, amelynél azonos technológiával lehet élsisak képződésével és anélkül is forgácsot leválasztani. Ehhez az automataacél

kínálkozott, amelyből egy magyar kohászati üzem ólom és tellúr ötvözéssel új acéltípust állított elő. A két anyag egészen hasonló kémiai összetételű (1. táblázat), és a Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszékén végzett vizsgálatok szerint a forgácsolóerő a sebesség széles tartományában közel azonos. A Pb+Te ötvözés mindössze 3,5%-kal csökkentette a főforgácsolóerőt és 8,6%-kal az előtolóerőt.

1. táblázat
A kísérleti acél adagok kémiai összetétele

Minőség	C %	P %	S %	Pb %	Te %	P %
AS1	0,08	0,098	0,208	-	-	0,098
AS1+Pb+Te	0,08	0,103	0,218	0,15	0,04	0,103

Ezeket az acélokat gyorsacél szerszámmal hengerelt állapotban esztergáltuk. A hagyományos automata-acélnál a várt élsisak keletkezett, míg az ólom és tellúr hatására a szerszám élénél a forgács BUE nélkül alakult ki, sima folyóforgács jött létre.



3. ábra. A leválasztott réteg vastagságának Δh változása

A periodikusan képződő és leszakadó élsisak a leválasztott réteg vastagságát is periodikusan befolyásolja, amelynek mértékét a 3. ábrán Δh jelzi. A kép az esztergálás hirtelen megszakításakor a munkadarabon maradt forgács tövének metszetéről készült.

A h réteg az élsisak felépülése közben fokozatosan, közelítő feltételezéssel lineárisan növekszik, majd egy Δh értéknél leszakad, a leválasztott réteg vastagsága ismét h_0 . Így a $h(t)$ rétegvastagság egy ún. fűrészfog-profil szerint változik, amelynek frekvenciája a forgácsról megállapítható. Az (1) képlet módosul a

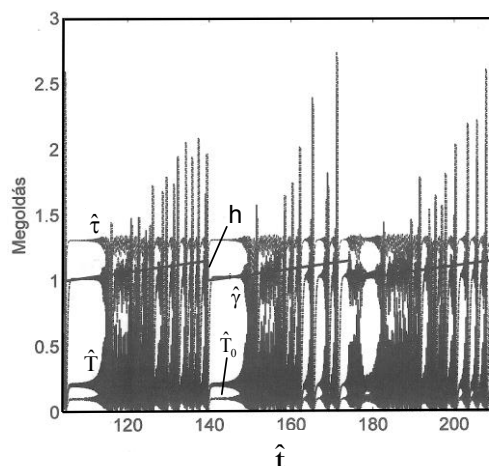
$$h(\hat{t}) = h_0 [1 + Hf_1(\Omega\hat{t})] \quad (7)$$

alakra, ahol $H = \Delta h / h_0$, $\Omega = K\omega$ és ω az élsisak képződésének frekvenciája, és f_1 a fűrészfog időfüggvénye.

Az esztergálásnál a technológiai paraméterek a következők voltak: forgácsolósebesség $v=30$ m/min, előtolás $f=0,3$ mm/ford., azaz $h_0=0,3$ mm, minthogy $\kappa_r=0^\circ$, a szerszám működő homlokszöge

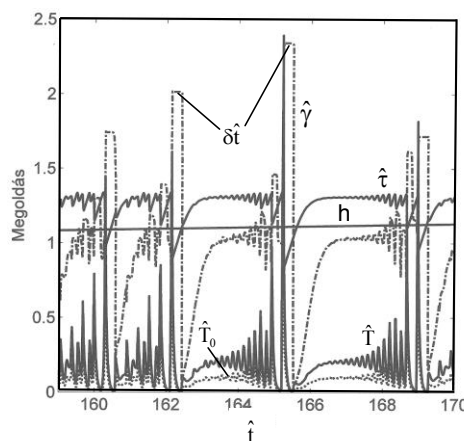
pedig $\gamma=6^\circ$. A forgács geometriai paramétereiből $\phi=25,7^\circ$; $\varepsilon_\phi=2,44$; a forgács sebessége a szerszámon $v_{\text{forg}}=0,23$ m/s. A forgácstónél lemérhető volt a BUE kialakulásának úthossza $L_{\text{cikl}} \cong 2,5$ mm, amelyből a ciklusidő $t_c \cong 0,011$ s, a frekvencia pedig $f \cong 92$ Hz.

A kísérleti anyag lényegében lágycél, amelynek fizikai és mechanikai anyagjellemzőiből a következő paramétereket határoztuk meg: $a=0,3$; $b=0,012$; $n=0,2$; $T_\phi=1,2$; $\delta\hat{t}=0,3$; $\eta=4,1$; $\rho=46$, az időlépték $K=3,1 \cdot 10^{-4}$ s, a BUE képződésének megfelelő paraméterek pedig $H \cong 0,1$ és $\Omega=0,18$.



4. ábra. A forgácsképződés matematikai modelljének megoldása változó leválasztott rétegvastagságnál

Ezekkel az adatokkal a (3)-(6) egyenletrendszer már megoldható, amelyet a MatLab szoftver segítségével végeztünk el. $H=0$ esetén, amely a BUE nélküli forgácsképződésnek felel meg, a várt fixpont megoldást kaptuk, azaz idő függvényében konstans eredményeket. A $H \cong 0,1$ esetében viszont kaotikus lett a megoldás, amelynek három periodikus szakaszát a 4. ábra mutatja.



5. ábra. A 4. ábra egy részletének kinagyítása

Látható itt a (7) függvény szerint „fűrészfog”-jelleggel változó h rétegvastagság is, amely periodikusan növekszik, majd hirtelen lecsökken. Minden növekedési periódusban a folyamat

állapotjellemzőinek egy jellegzetesen ismétlődő kaotikus növekedése figyelhető meg, amely megfelel az esztergálásnál kapott forgács kontúrján a szabálytalan hullámvázsnak. A kaotikus jelleget ennél az időeltolódás, így végtelen szabadságfokú differenciálegyenlet-rendszerénél Csernák Gábor igazolta is [10].

Érdekes adaléka a számításnak, hogy feltárja a forgácsképződés deformációs folyamatának finomabb szerkezetét is. Az 5. ábra egy rövid idő-intervallum kinagyítását szemlélteti, amelynek alapján az az érdekes megállapítás tehető, hogy a modell szerint a BUE kialakulásának minden ciklusa további kis ciklusokból áll, és ezek jellege hasonló a ciklusok jellegéhez. Itt is van egy kezdeti, folyamatosan növekvő amplitúdójú ingadozás, majd a kis ciklus végén egy kiugróan nagy deformáció, megcsúszás következik. Megállapítható volt, hogy ennek a megcsúszásnak az ideje δt , vagyis azonos azzal az időtartammal, ameddig a munkadarab anyaga a modell szerint a δ vastagságú nyírási zónában tartózkodik. Ellenőrzésként a forgács metszetén lemértük a profil-csúcsok távolságát. Ezek átlaga $L_{kc}=0,164$ mm, amely a v_{forg} forgácssebességgel átszámítva $t_{kc}=7,14 \cdot 10^{-4}$ s átlagos kis ciklusidőnek felel meg. A számítási eredményekből egy önkényesen kiválasztott szakasznál a kaotikus kis ciklusok átlagos periódusideje $6,8 \cdot 10^{-4}$ s volt. Ez kb. 1,40 ill. 1,47 kHz frekvenciának felel meg, amely a kis mintavételt is figyelembe véve kielégítő egyezésnek tekinthető. A kaotikus jelleg miatt ezek a frekvenciák természetesen az átlag körül ingadozó értékek halmazát jelentik.

A vizsgálattal tehát arra a megállapításra jutottunk, hogy a BUE által keltett primer frekvencia, amint az előzőekben bemutattuk, 92 Hz, és ez összhangban van a kutatók korábbi megállapításaival [9]. Vannak itt azonban a deformáció finomabb részleteire utaló „felharmonikusok” is, a kerekítve 1;4 kHz rezgésszámú kis ciklusok. Ezek a forgácsolóerő ingadozásában is nyilvánvalóan megjelennek, és könnyen előfordulhat, hogy a magasabb rezgésszám már megközelíti a megmunkáló rendszer valamelyik sajátfrekvenciáját, amely káros rezonancia-közeli állapotot idézhet elő.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az acélok feldolgozásának egyik leggyakoribb technológiájánál, a forgácsolásnál esetenként egy deformációs anomália következtében anyag rakódik a szerszám élére, élszak (built-up edge: BUE) képződik. Ez a periodikusan kialakuló képződmény átveszi a szerszám élének a szerepét, így befolyásolja a leválasztott réteg vastagságát. A forgácsképződésre korábban kidolgozott matematikai modell továbbfejlesztésével az időben változó vastagságú réteg forgácsolását leíró matematika modellt dolgoztunk ki. Az új modell kísérleti ellenőrzését AS1 jelű automataacél két adagjából vett minta azonos forgácsolásával végeztük. Az egyik adag

forgácsolhatóságát kísérleti jelleggel Pb+Te ötvözéssel javítottuk, így az élszakképződés elkerülhető volt. A modell-számítás eredményei összhangban voltak a forgácsolási vizsgálattal. Megállapítható volt, hogy a BUE hatására a forgácsképződés kaotikussá vált, és a BUE leszakadozásának ciklusán belül kialakul egy második kaotikus ciklikusság is kb. egy nagyságrenddel nagyobb frekvenciával.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet illeti Csernák Gábor kollégát a MatLab alkalmazásához nyújtott segítségért és Pap József kollégát, aki a forgácsolóerő méréseket végezte.

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- [1] Rapatz, F., Das Oberflächenaussehen bei der Spanabhebenden Bearbeitung Insbesondere beim Drehen, Archiv für das Eisenhüttenwesen, Vol. 3. 1929-1930. pp.717
- [2] Pálmai Z., A szerszámanyagok kopási folyamatai forgácsolásnál. BKL Kohászat 144. évf. 5. szám (2011) pp.5-9
- [3] Pekelharing, A.J., Built-Up Edge (BUE): Is the Mechanism Understood? Annals of the CIRP. Vol. 23/2 (1974) pp.207-212
- [4] Fang, N., P. Dewhurst, Slip-line modeling of built-up edge formation in machining. Int Journ Mechanical Sciences 47 (2005) pp.1079-1098
- [5] Klocke, F., Manufacturing Processes 1 Cutting, Springer, Aachen, 2011. pp.77
- [6] Pálmai Z., Módszer fémek speciális anyagjellemzőinek közelítő meghatározására nagy, gyors deformáció extrém körülményei között. BKL Kohászat 143. évf. 5. szám (2010) pp.37-41
- [7] Pálmai Z., G. Csernák, Chip formation as an oscillator during the turning process, Journ. of Sound and Vibration 326 (2009) pp.809-820
- [8] Pálmai Z., G. Csernák, The thermomechanical model of built-up-edge formation during turning. VII. Conference on Mechanical Engineering, Budapest, May 25-26. 2010.
- [9] Shteinberg, J.S., Ustranenie vibratsi, vozn ikayushchikh pri rezanii metallov na tokarnom. USSR, Mashgiz, 1947.
- [10] Pálmai Z., Csernák G., Effects of built-up edge induced oscillations on chip formation during turning. Journ. of Sound and Vibration (megjelenés alatt)