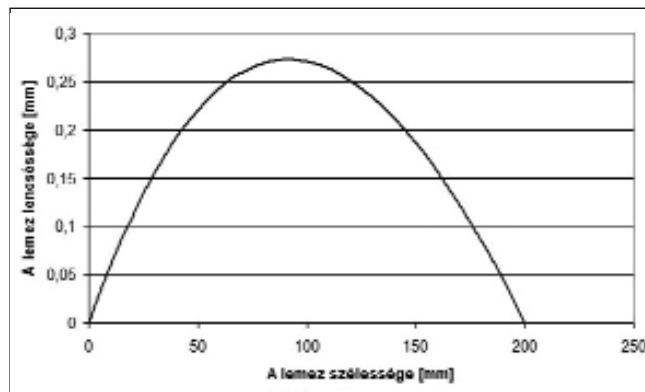


■ 7. ábra. A program által meghatározott görbületek



■ 8. ábra. A program által meghatározott lencséség

ményeit ellentétes előjellel láttam el. Majd az 1-es oldal görbéjének végpontjait a 2-es oldal végpontjaihoz illesztettem. A számításokat Microsoft Excel segítségével végeztem, és a kapott eredményeket diagramban ábrázoltam (7. és 8. ábra).

Összefoglalás

A cikk első részében bemutatam a terhelt hengerrés alakját befolyásoló tényezőket, valamint ezt felhasználva magyarázatot adtam a síkfekvési hibák kialakulására. A következő részben a lencséséget és a síkfekvési holt sávot értelmeztem. Az általam fejlesztett mérési módszer segítségével kidolgoztam egy vizsgálati módszert a hengerelt lemezek lencséségének vizsgálatára, amely alkalmas a hengerlés során keresztirányban meggörbült lemezek lencséségének meghatározására is. A vizsgálat során

készült felvételeket egy speciálisan erre a célra fejlesztett képelemző szoftverrel elemeztem. Tervem, hogy a kifejlesztett egyedi mérőeszközzel megmérjem a befutó lencséséget, majd a hengerhajlítás változtatásával hengerlési kísérletet végezzek, ezután pedig megmérjem a kifutó lemez lencséségét, ezáltal lehetőségem lesz a síkfekvési holt sáv diagramot meghatározni.

Irodalomjegyzék

- [1] *Dr. Voith Márton*: Alakítástechnológiák komplex fejlesztése. Miskolc, 2003. p. 183.
- [2] *Takashima, Y., et al.*: Studies on Strip Crown Control for Hot Strip Rolling – Double Chock Work Bending System (DC-WRB). IHI Engineering Review, Vol. 12, No. 3, Oct. 1979., pp. 28–34.
- [3] *Vladimir B. Ginzburg*: Steel

Rolling Technology – Theory and Practice. Marcel Dekker, 1989. pp. 759–761.

- [4] *Sándor Pálinkás*: Investigation of the shape of roll gap of experimental mill stand. IN-TECH 2010. International Conference, 14–16. September 2010., Prague, Czech Republic, p. 436–439.
- [5] *Sándor Pálinkás – János Tóth*: Investigation of the flatness of rolled aluminium sheet. International Review of Applied Sciences and Engineering, Vol. 2, No. 1, June 2011., pp. 57–62.

A tanulmány/kutatómunka 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.

KRÁLLICS GYÖRGY – SZÜCS MÁTÉ – LÉNÁRD JÁNOS

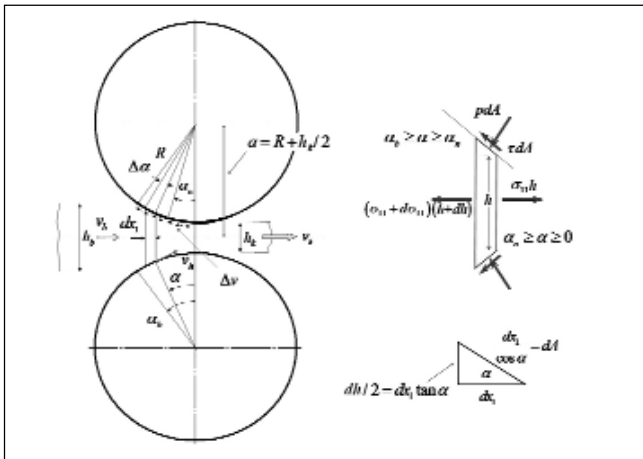
Súrlódási tényező meghatározása lemez hideghengerlésnél*

Lemzhengerlés súrlódási tényezőjének meghatározásával foglalkozunk az adott cikkben mérés és mechanikai modell által kapott eredmények összehasonlításával és a közöttük lévő eltérés minimalizálásával. A hengerlési folyamat elemzésére az átlagfeszültség módszeren alapuló, az anyag keményedését és a súrlódás relatív sebességtől való függését figyelembe vevő Maple-programot dolgoztunk ki. A kísérletekhez alumínium lemezeket és ásványi olaj kenőanyagot használtunk.

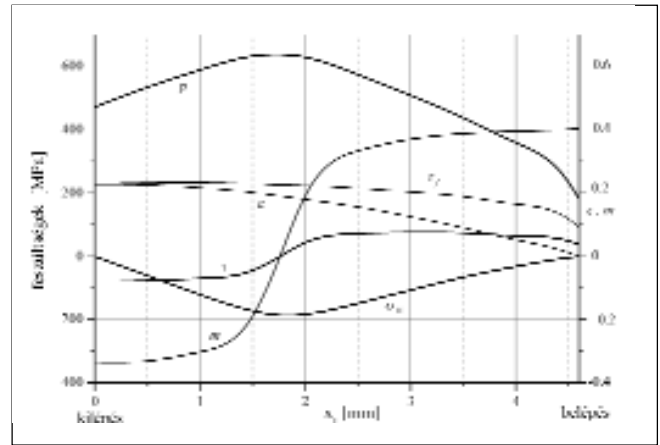
Bevezetés

Lemzhengerlési folyamatok viszonyait alapvetően befolyásolja a súrlódás, ami az alakítandó lemez, a henger és a kenőanyag kölcsönhatásaként jön létre. Ezek a hatások erőteljesen függenek az érintkező felüle-

* Előadásként hangzott el a 2012. február 16–17-én Miskolcon megrendezett XIV. Képlékenyalakítási Konferencián.



■ 1. ábra. Lemezhengerlés sémája



■ 2. ábra. Mechanikai paraméterek változása az alakváltozás zónájában

tek mikrogeometriájától, a felületek állapotától, a kenőanyag viszkozitásától, a kenőanyag film vastagságától, a hőmérséklettől, a sebességi viszonyoktól, a lokális nyomástól. Minden egyes tényezőt figyelembe vevő, általános súrlódási összefüggés nem létezik, de különböző módszerek alkalmazásával, a változók csökkentésével az alkalmazások számára használható összefüggéseket lehet kapni [1], [2].

A súrlódó feszültség vagy a súrlódási tényező meghatározásának egyik módszere, hogy az alakváltozás tartományában a lokális nyomás és csúsztató feszültség mérése történik, amiből különböző egyenletek felhasználásával közvetlenül meghatározható a keresett mennyiség.

A másik módszer szerint a vizsgált alakítási feladat képlékenységtani elemzését végzik el különböző súrlódási törvényszerűségek feltételezésével, amiből a folyamat megvalósításához szükséges erő, nyomaték előresietés stb. meghatározható. Ugyanezen mennyiségek mérésével történő meghatározásához hengerlési kísérleteket alkalmaznak. A számított és a mért mennyiségek eltérését a súrlódási tényezőtől keresztül minimalizálva a keresett súrlódási paraméter számmal meghatározható [3], [4].

A jelen munkában a második módszer alkalmazására került sor alumínium lemezek hideghengerlésekor.

Síklemesz hengerlési folyamatának mechanikai modellje

Sebességi viszonyok elemzése

Egyszerűsített anyagáramlást tételezünk fel, amely szerint a lemez vastagsága mentén nem változik a hengerlés irányú sebesség (v). A kontinuitási feltétel alapján

$$v_b h_b = v h = v_k h_k = v_n h_n \quad (1)$$

A fenti egyenlet betűinek értelmezését az 1. ábra mutatja, kiegészítve azzal, hogy v_n jelöli a neutrális ponthoz tartozó h_n vastagságú keresztmetszetben lévő anyagi pontok sebességét. Ez a sebesség megegyezik a v_h hengersebesség érintő irányú komponensével.

$$v_n = v_h \cos \alpha_n \quad (2)$$

Az alakváltozási zónában van olyan tartomány, ahol a lemez lemarad, és van egy olyan tartomány, ahol előresiet a hengerhez képest. A hen-

$$\xi_{11} = \frac{dv}{dh} \frac{dh}{dx_1} = -2v_h \cos \alpha_n \frac{h_n}{h^2} \tan \alpha, \xi_{22} = -\xi_{11}, \bar{\xi} = \frac{2}{\sqrt{3}} |\xi_{11}| = \frac{4}{\sqrt{3}} v_h \cos \alpha_n \frac{h_n}{h^2} \tan \alpha \quad (7)$$

ger érintője irányában felírva a Δv sebességkülönbséget a következő kifejezés adódik:

$$\Delta v = v_h \left(1 - \frac{\cos \alpha_n h_n}{\cos \alpha h} \right) \quad (3)$$

Az előresietés (S) mértéke a kilépő keresztmetszetben:

$$S = \frac{v_k}{v_h} - 1 = \frac{h_n}{h_k} \cos \alpha_n - 1 \quad (4)$$

A hengerlés α befogási szöge:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h - h_k}{2R} \quad (5)$$

Az alakítás során az alakváltozási zónában a lemez teljesen kitölti a merrenek feltételezett hengerek közötti rést (h), és annak nagyságát a következő egyenlet határozza meg:

$$h = 2R (1 - \cos \alpha) + h_k \quad (6)$$

A sebességmező ismeretében meghatározhatók az alakváltozási sebességek is, $\bar{\xi}$ – egyenértékű alakváltozási sebesség; ξ_{11} , ξ_{22} – alakváltozási sebesség komponensek a hengerlési és az arra merőleges irányban; x_1 – alakváltozási zóna tengelyirányú koordinátája.

Krállics György a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékének egyetemi docense, a Miskolci Egyetem Anyagtudományi Intézetének tudományos munkatársa. Szakmai területe a képlékenyalakítás technológiájának tervezése, modellezése, az ultra-finomszemcsés fémes anyagok intenzív képlékenyalakítással történő előállítása.

Szűcs Máté 2006-ban Minőségbiztosítási szakirányon végzett a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki Karán, majd 2009-ben anyagmérnök diplomát szerzett a Műszaki Anyagtudományi Kar Hőkezelő- és Képlékenyalakító szakirányán. 2010 szeptemberétől napjaink tagozatos PhD-hallgató a Miskolci Egyetem Kerpely Antal Doktori Iskolában. A doktori témája Alumínium ötvözetek aszimmetrikus hengerlésének optimalizálása.

Lénárd János, a Waterloo Egyetem (Kanada) Gépészmérnöki és Mechatronika Tanszékének emeritus professora. Szakmai tevékenységében a hengerlés alakítási folyamatainak és tribológiai jelenségeinek kísérleti és elméleti vizsgálata a meghatározó.

Az egyenértékű alakváltozás mértéke ($\bar{\varepsilon}$) a 0-t időintervallumban történő mozgás során.

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^{\tau} \bar{\varepsilon} dt = \int_{h_0}^h \bar{\varepsilon} \frac{dh}{2v \tan \alpha} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_b}{h} \quad (8)$$

Feszültségi viszonyok elemzése

Az átlagfeszültség módszerét használjuk a feszültségek meghatározására. Az alakváltozási zónában kijelölt dx_1 szélességű testre ható erők egyensúlyát írjuk fel a hengerlés tengelye és az arra merőleges irányban, elhanyagolva a lemezvastagság mentén a nyírófeszültségeket. Mivel a súrlódó feszültség előjelet vált a neutrális pontban, ezért külön egyenletek írják le az erők egyensúlyát az előresietés és a lemaradás tartományában. A hengerlés irányú erők egyensúlya alapján felírható, hogy

$$d(\sigma_{11}h) + 2dx_1(p \tan \alpha \mp \tau) = 0 \quad (9)$$

Ahol σ_{11} jelöli a tengely irányú feszültséget, a τ feszültség előtti „+” és „-” előjelet az előresietés, valamint a lemaradás tartományában kell használni. A súrlódó feszültség jellemzésére a Kudó $\tau = m\tau_f = mk_f/\sqrt{3}$ féle súrlódási törvényt alkalmaztuk, ahol k_f jelöli az alakítási szilárdságot, m a súrlódási tényezőt és τ_f a nyíró folyáshatárt. A differenciálegyenlet ismeretlen mennyiségeinek csökkentésére az egyszerűsített folyási feltételt

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_f$$

és a hengerlés irányára merőleges erők egyensúlyát használtuk fel, σ_{22} a tengelyre merőleges irányú feszültséget jelöli. Ez alapján a hengerlés irányú feszültségek differenciál-egyenlete

$$\frac{d\sigma_{11}}{dx_1} \left(\frac{4}{\sqrt{3}} k_f \tan \alpha \mp 2m \frac{k_f}{\sqrt{3}} (\tan^2 \alpha + 1) \right) \frac{1}{h(x)} = 0 \quad (10)$$

A számítások során feltételeztük, hogy a lemezanyag keményedik, ennek megfelelően az alakítási szilárdság is változik a hengerlés során. Mivel az alakváltozás mértéke esetünkben $\bar{\varepsilon} = 2 \cdot \ln(h_b/h)$, az alakítási szilárdság hidegalakításakor a változó lemezvastagság $h(x)$ és ennek megfelelően a hely függvénye.

Súrlódás esetében a relatív sebességtől (Δv) függő modellt alkalmazzuk, ami szerint m_0 a súrlódási faktor, C az illesztési paraméter, esetünkben a hengersebesség 1/100-ad része.

$$m = m_0 \frac{2}{\pi} \arctan \frac{\Delta v}{C} \quad (11)$$

Ez a modell biztosítja a súrlódási feszültség folyamatos változását a neutrális ponton keresztül, és egyben az előjel váltását is, mivel a relatív sebesség is előjelet vált.

A fentiekben részletezett hatások figyelembevételére miatt a (10) differenciálegyenlet csak numerikusan oldható meg, amit Maple V program segítségével végeztünk el.

A σ_{11} feszültség meghatározása után a hengert terhelő nyomás (p) a függőleges irányú erők egyensúlya alapján

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} k_f - \sigma_{11} \mp m \frac{k_f}{\sqrt{3}} \tan \alpha \quad (12)$$

A nyomás és a súrlódó feszültség eloszlás ismeretében a hengerlés erő és nyomatékigénye egységnyi szélességű lemezre vonatkoztatva az alábbi egyenletekkel határozható meg:

$$F = \int_0^{x_2} p \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha} dx_1 + \int_0^{x_2} \tau \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} dx_1 = \int_0^{x_2} p dx_1 + \int_0^{x_2} \tau \tan \alpha dx_1 \quad (13)$$

$$M = 2 \int_0^{x_2} \tau R^2 d\alpha = 2R \int_0^{x_2} \tau \frac{dx_1}{\cos \alpha} \quad (14)$$

A fenti egyenletnél figyelembe vettük, hogy $d\alpha = dh/(2R \sin \alpha)$ és $dh = 2dx_1 \tan \alpha$. A számítások elvégzésekor a lemez ki- és belépésekor előfeszítést is lehetett alkalmazni, ezzel biztosítva azt, hogy egy- és többlépéses hengerlési folyamatot is lehessen modellezni.

A fentiekben ismertetett számításokat merev-képlékeny lemez feltételezésével végeztük el. A modellezés során kapott, a 4. kísérlethez tartozó jellegzetes görbék láthatók a 2. ábrán.

Hengerlési kísérletek

A hideghengerlési kísérletek [5] egy STANAT gyártmányú duó hengerállványon történtek, amelyet egy 12 kW

teljesítményű váltóáramú motor hajt meg. A négysebességű hajtóműház segítségével 1100 mm/s hengerlési sebességet lehet elérni. A munkahengerek szerszámacéliből készültek, átmérőjük 150 mm, szélességük 203 mm. A hengerfelületek érdesítése homokszórással történt, amely eljárás alkalmazásával feltételezhető, hogy iránytól függetlenül a felületi érdesség értéke, és az $R_a=0,2-2,4 \mu\text{m}$ között változik. A két erőmérőcella a felső munkahenger csapágytökéje fölött, míg a nyomaték mérésére alkalmas mérőegységek a kapcsoló orsóknál vannak felszerelve. A kilépő oldalon két fotodióda van elhelyezve egymástól 50,68 mm-re. A fotodiódák által szolgáltatott adatok alapján a kilépő lemez sebessége, továbbá az előresietés nagysága is meghatározható. A hengerek sebességének ellenőrzése tachométerrel történik. Az adatok regisztrálása egy számítógép, egy DASH 16 A/D analóg digitális jelátalakító és egy National Instrument adatgyűjtő segítségével történik.

A hengerlési kísérletekhez felhasznált próba lemezek vastagsága

1,6 mm, szélessége 25 mm és hosszúsága 300 mm, anyagminősége 6061 alumínium ötvözet (T6). Az alumíniumötvözet 1% Mg-ot, 0,6% Si-ot, 0,3% Cu-et és 0,2% Cr-ot tartalmaz. A hengerlést megelőzően a lemezpróbák átlagos felületi érdessége – a hengerlési és keresztirányban egyaránt – $R_a=0,2 \mu\text{m}$. A lemezek anyagának alakítási szilárdságát előzőleg méréssel határoztuk meg, a folyási görbét az alábbi (15) egyenlettel közelítettük.

$$k_f = 150(1 + 234\bar{\varepsilon})^{0,25} \quad (15)$$

A kísérleti hengerlés során a munkahengerek zsírtalanítása acetonnal történt, minden szúrás megelőzően. A hengerlés előtt a lemezek sorjátlanítva és zsírtalanítva lettek. A hengerlés során alkalmazott ásványi parafinolaj 5 térfogat% alkohol adalékokat tartalmaz. A kenőolajra jellemző kinematikai viszkozitás 40 °C-on 4,4

1. táblázat. Mért és számított erőtani adatok

	Fogyás [%]	m_0	Mért erő [N/mm]	Mért nyomaték [Nm/mm]	Számított erő [N/mm]	Számított nyomaték [Nm/mm]	Erő hiba [%]	Nyomaték hiba [%]
1	19	0,45	2720	10,55	2577	11,30	-5,2	7
2	17	0,58	2750	10,87	2561	10,84	-6,8	-0,3
3	17	0,60	2703	10,35	2560	10,78	-5,2	4,1
4	17	0,42	2613	8,95	2351	9,93	-10	10,8
5	33	0,15	3576	16,73	3244	18,36	-9,2	9,7
6	33	0,20	3594	18,63	3415	19,18	-4,9	2,9
7	31	0,23	3601	18,00	3407	18,73	-5,3	4
8	31	0,27	3696	18,40	3523	19,29	-4,6	4,7
9	43	0,22	4615	25,84	4379	27,50	-5,1	6,4
10	43	0,20	4484	26,19	4301	27,23	-4	3,9
11	44	0,16	4216	25,52	4106	26,32	-2,6	3,1
12	44	0,14	4067	25,38	3998	25,90	-1,6	2,1
13	62	0,19	6151	41,29	5820	42,59	-5,3	3,1
14	60	0,27	7173	44,09	6578	46,89	-8,2	6,3
15	60	0,25	6663	43,03	6314	44,87	-5,2	4,2
16	62	0,22	6120	40,98	5963	42,56	-2,5	3,8

mm²/s, 100 °C-on 1,53 mm²/s, sűrűsége 40 °C-on 850 kg/m³. A lemezek mindkét felületére 10-10 csepp kenőolaj került, amelyeknek a lemezfelületen való szétterítése ecsettel történt.

Súrlódási tényező meghatározása

A mechanikai modellezés során a számított erő és nyomaték értékét a mérthez képest a súrlódási tényező változtatásával 10%-os hibahatár alá csökkentettük. Az eredmények az 1. táblázatban találhatók.

A hiba alatt a következő mennyiséget értettük:

$$F_{hiba} = \frac{F_{számított} - F_{mért}}{F_{mért}} 100, M_{hiba} = \frac{M_{számított} - M_{mért}}{M_{mért}} 100 \quad (16)$$

Az 1. táblázatban szereplő m_0 súrlódási tényező értékét iterációs módszer segítségével a mért és számított erő és nyomaték értékek közötti eltérés minimalizálásával határoztuk meg.

Összefoglalás

6061 alumínium ötvözetből készült lemez próbatestek hideghengerlését végeztük el ásványi paraffinolaj alkalmazásával laboratóriumi hengerállványon, és közben mértük a folyamat erőtani paramétereit. A hengerlés mechanikai modelljével előállított ugyanazon paramétereket a súrlódási tényező változtatásával a mért adatokhoz közelítettük, és meghatároztuk a súrlódási tényező értékét. A kidolgozott módszer alapján 16 mérésből 15 esetben a mért és számított erő, valamint nyomaték

közötti különbség jóval kisebb volt, mint 10%, ami az eljárás megbízhatóságát mutatja.

Irodalom

[1] J. G. Lenard: Tribology in Metal

Rolling. Keynote Presentation, CIRP Annals 49/2, 567–590

[2] A. N. Levanov, V. L. Kolmogorov, S. P. Burkin, B. R. Kartak, J. V. Aspur, J. I. Spasskij: Kontaktnoje trenije v processah obrabotki metallov davleniem. Metallurgija, Moskva, 1976.
 [3] R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford University Press, London 1950.
 [4] A. P. Grudev, J. V. Zilberg, V. T. Tiliik: Trenije i smazki pri obrabotke metallov davlenijem. Metallurgija, Moskva, 1982.
 [5] J. G. Lenard: The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. Journal of Materials Processing Technology 152 (2004) 144–153.

A cikk megjelenését „A felsőoktatás minőségének javítása kiválóságai központok fejlesztésére alapozva a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területein” TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt támogatja.