

# A hajtogatóvizsgálat újraértelmezése

Lehofer Kornél

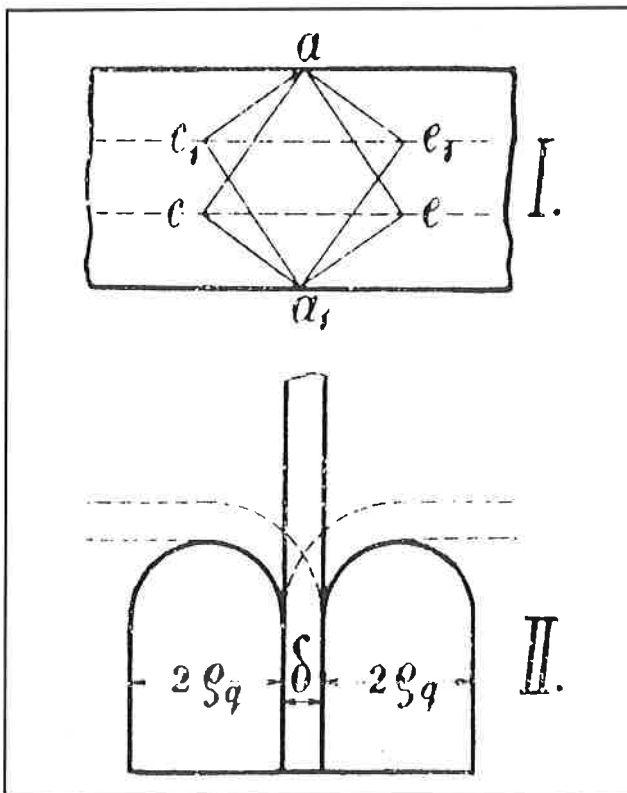
## Abstract

**Reinterpretation of the reverse bend test.** This very simple technological test – which is standardized still today, too (EN ISO 7799, Fig. 2) – was proposed by a Hungarian professor, Sándor Rejtő about 1900 ([1, 2] and Fig. 1). The eq. (2) was also determined by him (where  $N$  is the number of reverse bend,  $D$  is the bending diameter,  $s$  is thickness of the metal strip and  $k$  is a material constant).

According to our reinterpretation: the reverse bend test is a strain controlled [by  $\epsilon_A$  eq. (1)] low cycle fatigue having a load ratio  $R = -1$  and cycle time  $t_p \sim 2$  s (recommended by the standard) and from the eq. (2) by Rejtő [1, 2] is expressible the eq. (3) which is the Coffin–Manson equation [5] fundamentally. Therefore the results of the reverse bend test [4] and the strain controlled push-pull low cycle fatigue test ( $R = -1$ ,  $t_p = 2$  s) [6] concerning to the low carbon ferritic steels can be written down by the same Coffin–Manson equation [Fig. 5 and eq. (4)]. Namely, the information content of the simple reverse bend test is much more than of this very simple technological test used by standard's aim.

## Előzmények

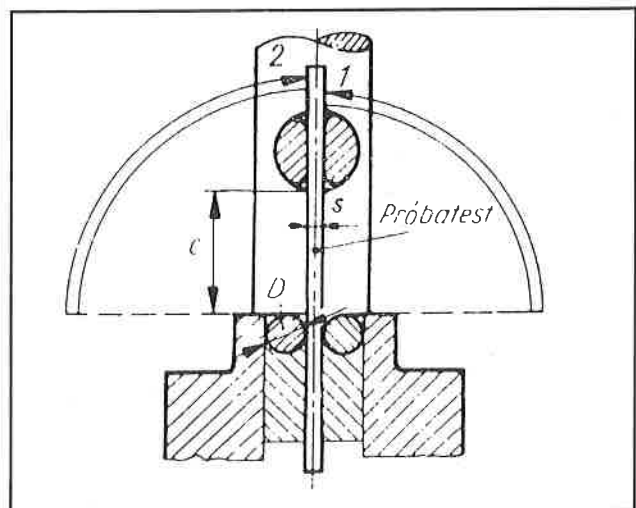
Az egyszerű technológiai hajtogató próbát – mint ismeretes – Rejtő Sándor műegyetemi tanár, a mechanikai technológia tanszék alapítója, vezette be 1900 tájékán a fémek és ötvözetek képlékenységének jellemzésére. A fémszalag vastagságával arányos sugárra ide-oda hajtogatás elvégzésének módját könyvének 45. ábrája (1. ábra) kapcsán ismerteti [1]. A vizsgálókészüléket is ő tervezte és kivitelezését a Csonka János vezette műhelyre bízta.



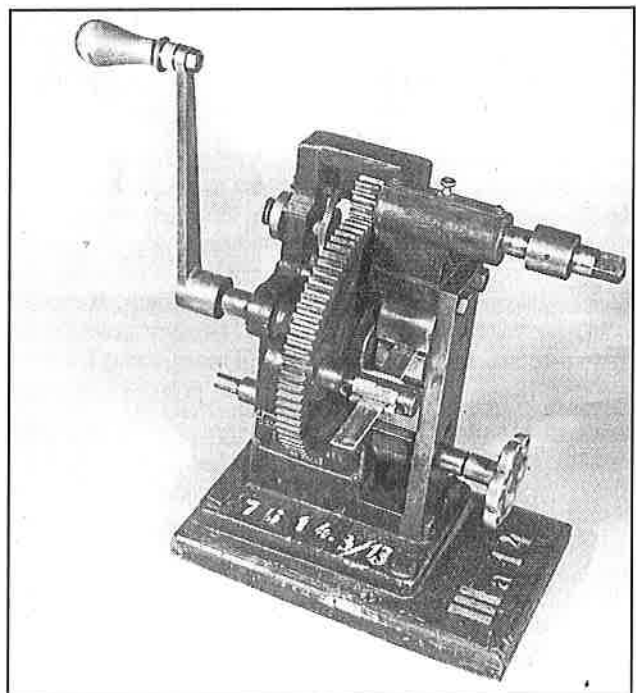
1. ábra. Adott görbületi sugárig hajlítás végrehajtásának módja (II). A húzott öv nagysága váltakozó irányú hajtogatásnál (I).

Rejtő módszereit németnyelvű könyve révén világszerte megismerték [2]. Millner Tivadar – a volfrám izzószál tulajdonságjavító kutatásairól híres akadémikusunk – személyesen is tapasztalta ezt 1929-ben, az USA-ban tett tanulmányútja során a General Electric Co. kutatólaboratóriumában, ahol közölték vele: ismerik Rejtő 1927-ben német nyelven megjelent könyvét, amelyből sok újszerű és értékes ismeretet szereztek. Példaképpen azt is kiemelték: *Rejtő volt az első anyagvizsgáló, aki a fémek képlékenységének mérőszámát az ismételt hajtogatással a leg-egyszerűbb módon megállapította* – olvashatjuk az életművét-életútját ismertető könyvben [3].

A vizsgálatot később szabványosították, és ma is, az MSZ EN ISO 7799:2000 számú szabvány előírásai szerint, alkalmazzák a legfeljebb 3 mm vastag lemezek és szalagok minősítésére.



2. ábra. Lemezajtogató próba az MSZ EN ISO 7799:2000 szerint



3. ábra. Hajtogatókészülék (Amsler gyátmány)

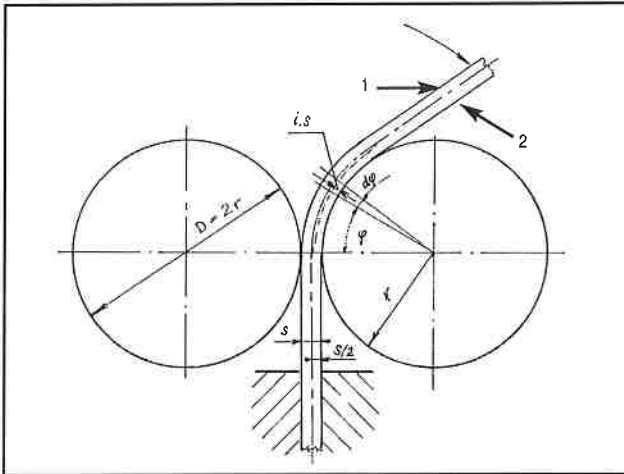
A vizsgálat lényege: a 2. ábra szerinti elrendezésben a satuba fogott, előírt hosszúságú, a vastagságához képest széles lemezcsíkot vagy szalagot, a vastagságához rendelt átmérőjű görgőkre – a középhezvetből kiindulva 90 °-ra és vissza (egy hajlítás/másodperc) – addig kell felváltva jobbra-balra, lökésmentesen és folyamatosan ráhajlítani, amíg az el nem törik. Fel kell jegyezni a törést okozó hajtogatások számát, majd összevetni az anyagra vonatkozó előírással.

Gillemot professzor úr, 1957 őszén, a kontrakciós munkának a technológiai hajtogató próbára alapozott meghatározását tűzte ki diplomatervi feladatommá. A kontrakciós munkát a hajtogatási számból közvetlenül meghatározni – az erőmérés nélküli egyszerű kézi készülékkel (3. ábra) – a felkeményedés görgőátmérőtől és a hajtogatási számtól függő menetének megismerése ellenére sem lehetett, de a hajtogatásról újszerű ismeretekre jutottam [4]. Ma már nyilvánvaló, hogy a hajtogató próba tulajdonképpen nyúlásvezérelt kisciklusú fárasztás. A továbbiakban ezt fejtem ki tudománytörténeti előzmények elemzésével és a korábbi vizsgálati eredményeim felhasználásával.

## A hajtogatás mint kisciklusú fárasztás

A kisciklusú fárasztás szemszögéből a hajtogatóvizsgálat egy hajtogatása fél ciklusnak tekinthető, azaz a törésig számlált  $N$  hajtogatási szám fele a károsodást okozó  $N_f$  ciklusszám, azaz  $N_f = 0,5N$ .

A szalag képlékeny alakváltozása (a 4. ábra jelöléseivel) az  $r$  sugarú ( $D = 2 \cdot r$ ) görgőre hajlítás közben folyamatosan megy végbe az egymást



4. ábra. A görgőre hajlítás menete (vázlat)

követő  $d\varphi$  szögmenetekben. E közben a semleges tengely a szimmetria tengelyhez képest mindig a nyomott szál felé tolódik, (azaz, hajtogatás közben vándorol, és a szimmetria tengely körüli keskeny sáv – ezt szemlélteti az 1/1. ábrarész – mindig húzásra van igénybe véve [1]. A sáv szélességének meghatározását lásd a Függelékben). A görgőre hajlítás végére, miközben a  $\varphi$  szög értéke nulláról  $\pi/2$ -re változik, az eltolódás miatt ismeretlen helyzetű semleges szál  $(r + i \cdot s) \cdot (\pi/2)$  hosszához képest az 1 szélső szál megnyúlik  $L_1 = (r + s) \cdot (\pi/2)$  hosszúra, míg a 2 szélső szál  $L_2 = r \cdot (\pi/2)$  méretre rövidül. Az első 90 °-ra hajlítást követően ( $N = 0,5$ ) a további ellentétes irányú, 180 °-os hajlítás végén ( $N = 1,5$ ) a nyomott 1 szélső szál

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right) = \ln\left(\frac{r}{r+s}\right) = \ln\left(\frac{D}{D+2s}\right),$$

míg a húzott 2 szélső szál

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{L_1}{L_2}\right) = \ln\left(\frac{r+s}{r}\right) = \ln\left(\frac{D+2s}{D}\right)$$

valódi (logaritmikus) alakváltozást szenved. Minden további váltakozó

irányú 180°-os hajlításra a szélső szálak alakváltozása a fentiek szerint váltakozik. De, mivel  $|\varepsilon_1| = \varepsilon_2$ , ezért a nyúlásamplitúdó:

$$\varepsilon_A = \pm \frac{1}{2} \varepsilon_2 = \pm \frac{1}{2} \ln\left(\frac{D+2s}{D}\right) \quad (1)$$

Vagyis, a hajtogató próba olyan nyúlásvezérelt kisciklusú fárasztás, amelynek aszimmetria tényezője:  $R = -1$ , ciklusideje (a szabvány ajánlása szerint):  $t_p \sim 2$  s; a viszonylag nagy nyúlásamplitúdó értékét pedig a fémszalag  $s$  vastagságához a szabványban előírt, a satuba épített görgők  $D$  átmérője határozza meg, amelyekre a szalagot a középhezvethez képest 90 °-ra váltakozva jobbra-balra rá kell hajlítani mindaddig, míg a szalag éppen húzott oldala be nem reped. Ugyanis a berepedést követően a szalag már nem simul rá a görgőre [4].

Ezt a megállapításunkat alátámasztja Rejtő tapasztalati úton az  $N$  hajtogatási számra megállapított összefüggése is [1]:

$$N = \left(\frac{D}{2s} + 1\right)^{2k} \quad (2)$$

ahol  $D$  a görgő átmérője,  $s$  a próbatest vastagsága és  $k$  a vizsgált anyagra jellemző állandó. Ugyanis, a 4. ábra szerinti jelölésekkel, az első 90 °-ra hajlítást ( $N = 0,5$ ) követő ellentétes irányú 180 °-os hajlításkor az 1 szélső szál  $L_1$  hosszra vonatkoztatott alakváltozása:

$$\delta = \frac{L_2 - L_1}{L_1} = \frac{r - (r+s)}{(r+s)} = -\frac{s}{r+s} = -\frac{2s}{D+2s}$$

A nyúlásamplitúdót a  $|\delta|$  felével közelíthetjük, azaz:

$$\delta_A = \frac{s}{D+2s}$$

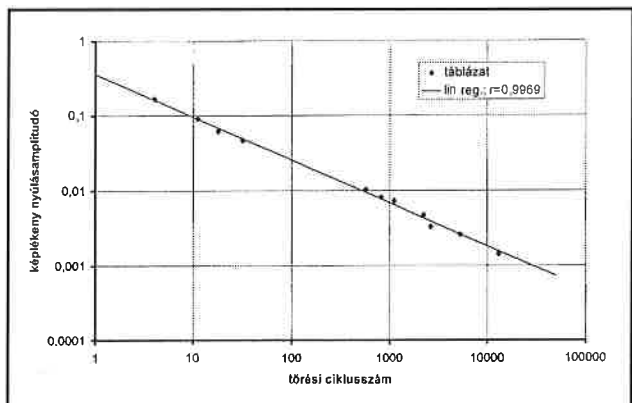
Felismerve, hogy a (2) egyenlet zárójelén belüli kifejezés  $1/2\delta_A$ -val egyenlő, továbbá, hogy  $N = 2N_f$  és kifejezve a (2)-ből a  $\delta_A$  nyúlásamplitúdót, a következő összefüggést kapjuk:

$$\delta_A = C \cdot N_f^{-1/2k} \quad (3)$$

ahol a  $C = 2 \left(\frac{2k+1}{2k}\right)$  és az  $N_f$  kitevője az anyagtól függő állandók.

A (3) összefüggés a nyúlásvezérelt kisciklusú fárasztás leírására ismert Coffin–Manson-egyenlet, amelyet szerzők először 1954-ben javasolták [5], Rejtő pedig már 1928-ban meghalt.

Az elmondottak kísérleti alátámasztására együttesen értékeltem a Coffin–Manson-egyenlettel a C15 minőségjelű, 0,11–0,18 % C-tartalmú, lágy állapotra hőkezelt,  $s = 1$  mm vastag és 27 mm széles acélszalaggal (görgőátmérőként 50–60 próbatesttel) 20 °C-on végzett hajtogatóvizsgálattal nyert adatokat [4] és a KL9 minőségjelű, az előbbivel azonos C-tartalmú, de krómmal és molibdénnel gyengén ötvözött acél nyúlásvezérelt húzó-nyomó, szinuszos, kisciklusú igénybevétellel ( $R = -1$ ,  $t_p = 2$  s) 20 °C-on fárasztott, homokóra alakú próbatesteken mért adatokat [6]. A két acél nemcsak azért értékelhető együtt, mert szívósságuk 20 °C-on – a szakítóvizsgálattal mért törési munka alapján



5. ábra. A hajtogatás és a nyúlásvezérelt húzó-nyomó kisciklusú fárasztás együttes értékelése

– közel azonos (mintegy 850 MJ/m<sup>3</sup>), hanem azért is, mert kísérletekkel bizonyított a jelentősen különböző C-tartalmú szerkezeti acélok együvértékelhetősége [5]. Az együvértékelte adatokat a táblázat tartalmazza, és az 5. ábra szemlélteti (a legkisebb négyzetek módszerével illesztett egyenessel együtt)  $Ig_{\varepsilon_A} - Ig N_i$  koordináta-rendszerben.

Módszer	Képl. nyúlásamplitúdó, $\varepsilon_A$	Igénybevételiszám, $N_i$
Hajtogatás: $D = 5$ mm	0,16820	4
10 mm	0,09120	11
15 mm	0,06260	18
20 mm	0,04760	32
Nyúlásvezérelt húzó-nyomó fárasztás	0,01041	572
	0,00818	819
	0,00731	1114
	0,00477	2268
	0,00325	2683
	0,00264	5358
	0,00144	13243

A táblázat, igénybevételi számban öt nagyságrendet átfogó adataira szorososan,  $r = 0,9969$  korrelációs együtthatóval illeszkedő Coffin–Manson-egyenlet:

$$\varepsilon_A = 0,361 \cdot N_i^{-0,572} \quad (4)$$

## Összefoglalás

Bizonyítottuk, hogy az egyszerűen és gyorsan elvégezhető hajtogatóvizsgálat információ-tartalma lényegesen több mint amire a ma is érvényes szabvány alkalmazhatónak tartja.

A Coffin–Manson-egyenlet szerinti értékelés lehetővé teszi

– az azonos minőségű, de különböző vastagságú lemezekben és görgőátmérőkön mért hajtogatási számok összehasonlítás célú átszámítását; és

– az anyagok nyúlásvezérelt kisciklusú igénybevétellel szembeni ellenállásának a meghatározását.

## Függelék

A semleges szál a hajtogatás közben mindig a nyomott oldalhoz közelebb, az 1/l. részabrában jelölt  $c_1, e_1$  vagy  $c_e$  vonalra helyeződik át. A vonalakkal határolt, mindig húzásra igénybe vett sáv  $h$  szélessége:  $h = s(1-2i)$ ; Az  $i$  tényezőt pedig az  $N = 0,5$  helyzetből  $N = 1$  helyzetbe hajlításkor elszenvedett valódi nyúlás és az  $\varepsilon_A$  egyenlőségéből határozhatjuk meg, azaz

$$\ln\left(\frac{r+i.s}{r}\right) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{r+s}{r}\right)$$

Az egyenlőséget  $i$ -re rendezve és behelyettesítve, a hajtogatás közben húzásra igénybe vett és a szimmetria tengelyhez képest szimmetrikusan elhelyezkedő sáv szélességére az alábbi összefüggést kapjuk:

$$h = s - 2 \left[ (r(r+s))^{1/2} - r \right]$$

Például: a C15 minőségjelű,  $s = 1$  mm vastag acélszalagban az  $r = 5$  mm sugarú görgőkre hajtogatás közben a húzott sáv szélessége:  $h = 0,0455$  mm.

Az összefüggésekből az is kiolvasható, hogy az  $r$  sugarú görgőre hajlított  $s$  vastagságú szalagban a semleges szál sugara:  $\rho_N = (r+i.s) = [r(r+s)]^{1/2}$ , azaz a hajlított szalag belső és külső görbületi sugarának mértani középértéke.

## Hivatkozások

1. *Rejtő Sándor*: Az elméleti mechanikai technológia alapelvei és a fékek technológiája, II. kötet, Kilián, Budapest, 1918.
2. *A. Rejtő*: Einige Prinzipien der theoretischen mechanischen Technologie der Metalle, Berlin, VDI Selbstverl. 1927.
3. *Dischka Győző, Zorkóczy Béla*: Rejtő Sándor (1853–1928), Műszaki Nagyjaink V. kötet, szerk.: Péntes István, GTE kiadása, Budapest, 1981, pp. 259–297.
4. *Lehofer Kornél*: Új tapasztalatok a hajtogatóvizsgálattal kapcsolatban, Gép, 1959 (XI. évf.) 11. pp. 440–444.
5. *Coffin, L. F. Jr.*: Fatigue at high temperature – prediction and interpretation. James Clayton lecture at the University of Sheffield, 1<sup>st</sup> April 1974. The Institution of Mechanical Engineers Proceedings 1974, Volume 188 9/74.
6. *Rózshgyei Péter*: Szerkezeti acélok kisciklusú fárasztóvizsgálata növelt hőmérsékleten, Gép, 1994 (XLVI. évf.) 12., pp. 22–28.

## BESZÁMOLÓK

### A műanyagszakma országos találkozója

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, a Gépipari Tudományos Egyesület Műanyag Szakosztálya, a Magyar Műanyagipari Szövetség, az Erősítettműanyag-gyártók Szövetsége, a Műanyagipari Mérnökök Egyesülete közösen rendezte meg – az Oktatási Minisztérium és a Gazdasági és Közlekedési Minisztérium védnökségével – a polimertechnológia oktatásában és kutatásában érdekelt egyetemi és főiskolai tanszékek valamint a műanyagipari cégek képviselőinek első országos találkozóját 2003. január 29-én a BME dísztermében.

A rendezvény jól szolgálta kilüszölt célját, nevezetesen, hogy bemutassa az oktatás és az ipar együttműködésnek lehetőségeit és eddigi eredményeit, illetve, hogy az iparág nemzetgazdasági súlyát és fejlődési trendjét (az EU-csatlakozásra tekintettel is) figyelembe véve elősegítse – a kölcsönös előnyök alapján – a szervezettebb együttműködést, nevezetesen:

– a műanyagipari cégek fokozottabb szerepvállalását a minőségi elítkezésben és tömegoktatásban, azaz az igényeiknek mind létszámban, mind minőségben megfelelő szakemberek képzésében, és

– a tanszékek fokozottabb szerepvállalását a műanyagipari cégek kutatás-fejlesztési feladatainak megoldásában.

A rendezvény arra is kiváló alkalom volt, hogy a hazánkban elsőként minősített egyetemi tanszéknek, a BME Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszéknek ünnepélyesen átadják az ISO 9001 szerinti minőségirányítási

tanúsítványt, melyet a tanszék vezetője, dr. Czigány Tibor vett át dr. Mang Béla, az OM helyettes államtitkárától és dr. Czitan Gábor, a TÜV Rheinland InterCert Kft. vezérigazgatójától.

A rendezvényt a résztvevők hasznosnak ítélték, és időről időre való megrendezését határozták el. Az elhangzottak, valamint az oktatási intézmények terveit, az együttműködés lehetőségeit, formáit tartalmazó adatbázis a [forum.pt.bme.hu](http://forum.pt.bme.hu) honlapon az érdeklődők számára elérhető.

Továbbá, hírt adunk arról is, hogy **Polimer Kompozit Tudományos Tanács (PKTT)** működik, 2001. december 1-je óta, a BME rektorának támogatásával a Műegyetemen. A Tanácsot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építész-, Gépész-, Közlekedés- és Vegyészmérnöki Karának hat oktatója alapította azzal a céllal, hogy tudományos közösséggé formálják a BME különböző karain és tanszékein e témakört művelő szakembereket. Az alapítók: dr. Pukánszky Béla, dr. Czigány Tibor, dr. Zrínyi Miklós, dr. P. Kollár László, dr. Marosi György és dr. Borbás Lajos összefoglaló beszámolókat közöltek a tanszékek kutatási területeiről és eddigi eredményeiről a Műegyetem angol nyelvű periodikájában, a Research News 2002/1. számában.

– ferko –