

A KLASSZIKUS LEMEZALAKÍTHATÓSÁGI VIZSGÁLATOK NAGYSZILÁRDSÁGÚ LEMEZEK MINŐSÍTÉSÉNÉL

Tisza Miklós¹ – Gál Gaszton² – Kiss Antal³ –
Kovács Péter Zoltán⁴ – Lukács Zsolt⁵

¹ egyetemi tanár, ^{2,3} c. egyetemi docens, ^{4,5} egyetemi adjunktus

Összefoglalás

A cikk a klasszikus lemezalakíthatósági vizsgálatok érvényességének elemzésével foglalkozik, szakirodalmi és kísérleti eredmények alapján, különös tekintettel a járműiparban alkalmazott hagyományos és a nagyszilárdságú alakítható acél lemezanyagok mechanikai jellemzőinek, a lemezek anizotrop viselkedésének vizsgálatára. A szerzők külön figyelmet fordítanak a lemezanyagok alakíthatóságát illetően, a lokális és a makroszkopikus tulajdonságok kapcsolatrendszerére. Javaslatokat fogalmaznak meg a korszerű járműipari, nagyszilárdságú lemezanyagok minősítésénél is alkalmazható alakíthatósági vizsgálatok és kiértékelések tovább fejlesztésére.

Kulcsszavak: lemezek alakíthatósági vizsgálatai, nagyszilárdságú acélok

Abstract

In this paper, the validity limits of classical formability tests is analysed based on the literature and the results of experimental investigations with special regard to the conventional and high strength steels applied in the automotive industry. Concerning the formability of sheet materials, a special attention is paid for the relationship of local and macroscopic properties. Some proposals are elaborated for the further development of formability investigations and sheet material qualification concerning the high strength sheet materials that are more and more widely applied in the automotive industry.

Keywords: formability investigations, high strength steels

1. Lemezalakíthatósági vizsgálatok áttekintése

A XXI. században, a járműipar területén tovább növekedett a járművek tömegének csökkentése iránti igény, megtartva azok terhelhetőségi jellemzőit. Ennek egyik irányzataként egyre nagyobb jelentőséggel bírnak a járműgyártásban, a növelt szilárdságú, alakítható acél és alumínium lemezek. A Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetében (ME ATI) évek óta folynak kutatások e területen is. Jelenleg a TÁMOP-4.2.2. A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekt keretein belül a Képlékenyalakítás témakörben vizsgáljuk a szóba jöhető lemezek alakíthatóságát [1].

Az alakíthatósági vizsgálatok többféleképpen rendszerezhetők. Ebben a cikkben először röviden áttekintjük a különféle – gyakran klasszikus lemezalakíthatósági gyűjtőnévvel összefoglalt vizsgálati eljárásokat (beleértve az egytengelyű szakítóvizsgálattal, illetve a különféle technológiai vizsgálatokkal megvalósított vizsgálatokat is), majd elemezzük a

finomlemezek alakíthatóságának vizsgálatára kidolgozott újszerű módszerek közül az ún. lokális alakváltozási egyenletlenség meghatározásra kidolgozott módszert, végezetül pedig a napjainkban ezen a területen leginkább elfogadott alakítási határdiagramokat.

2. Egytengelyű szakítóvizsgálattal végezhető klasszikus lemezalakíthatósági vizsgálatok

Az egytengelyű szakítóvizsgálattal végezhető, klasszikus lemezalakíthatósági vizsgálatok közé tartozik a hagyományos szakítóvizsgálattal (MSZ EN 10002-1) meghatározható alakíthatósági jellemzők vizsgálata és a hidegen hengerelt finomlemezek szabványában (MSZ EN 10130) ismertetett n , r vizsgálat, amellyel a lemezanyagok alakváltozási keményedését jellemző n keményedési kitevőt, valamint a lemez alapanyagok anizotrópiáját jellemző alakíthatósági paraméterek meghatározását. A következőkben röviden áttekintjük az említett módszerek lényegét.

2.1. A szakítóvizsgálattal meghatározható alakváltozási jellemzők

A lemezalakításban jellemzően az MSZ EN 10002-1 szabvány szerint meghatározott, alábbi paramétereket vesszük figyelembe: százalékos szakadási nyúlás (A), százalékos keresztmetszet-csökkenés (Z -kontrakció), az n -keményedési kitevő. Az A és Z értelmezése és meghatározása az MSZ EN 10002-1 szabványban leírtak szerint végezhető, a keményedési kitevő meghatározására pedig az MSZ EN 10130 ad útmutatást, amely szerint a keményedési kitevőt (n) a 10 és a 20% közötti alakváltozási tartományon belül határozzák meg. Ezt a meghatározást a homogén alakváltozás tartományában végzik el, ezért ha a termék egyenletes nyúlása nem éri el a 20%-ot, akkor a 15-20%-os felső határ alkalmazható.

Az r képlékeny alakváltozási viszonyszám az egytengelyű húzófeszültséggel terhelt próbatest szélességi és a vastagsági valódi, vagy logaritmusos alakváltozásainak a hányadosaként definiált *Lankford* - féle szám, amelyet az

$$r = \frac{\ln \varphi_b}{\ln \varphi_s} \quad (1)$$

összefüggéssel számíthatunk, ahol φ_b a szélesség irányú valódi alakváltozás, φ_s pedig a vastagság irányú valódi alakváltozás.

A képlékeny alakváltozási viszonyszám meghatározását részletesen ugyancsak az MSZ EN 10130 tartalmazza. A vizsgálati módszer lényegében szakítóvizsgálat végzése, $\varepsilon = 20\%$ -os előírt alakváltozási mértékig (itt az ε a húzás irányában értelmezett mérnöki, fajlagos nyúlás), valamint a képlékeny alakváltozási viszonyszám meghatározása az adott próbatest hosszúságirányú és szélességirányú változásainak mérései alapján.

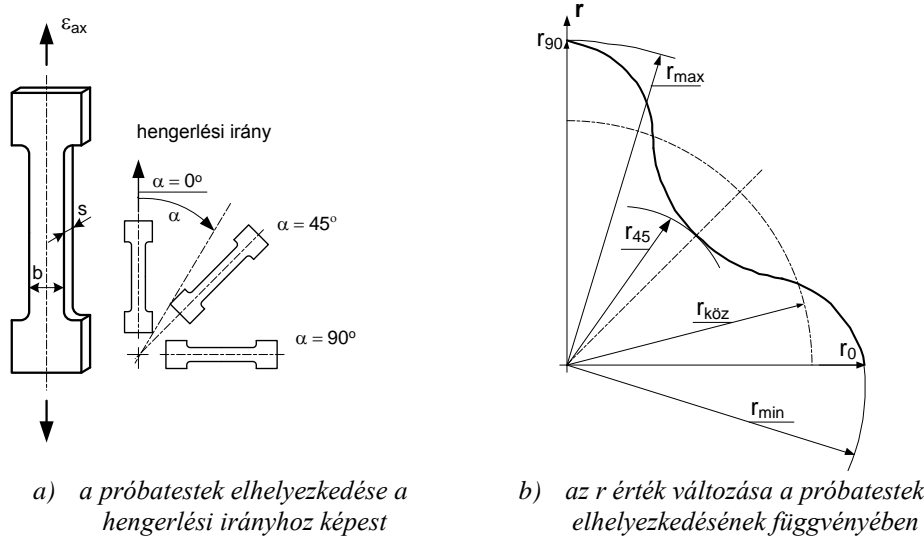
Ezt az eljárást a homogén alakváltozás tartományában kell végrehajtani, ezért ha a vizsgált termék egyenletes nyúlása (ε_m) kisebb 20%-nál, akkor az $\varepsilon = 15\text{-}20\%$ -os alakváltozási értékeket kell alkalmazni.

2.2. Az alakíthatósági jellemzők anizotrópiája

A szakítóvizsgálattal meghatározott jellemzők közös tulajdonsága, hogy az értékük a próbatest helyzetének függvényében változik. A helyzetet a lemez síkjában, a hengerlési irány és a próbatest hossz tengelye által bezárt szöggel (α) jellemzik, ahol $\alpha = 0^\circ$ a hengerlési irány-

nyal párhuzamos, az $\alpha = 90^\circ$ a hengerlésre merőleges irány, míg az $\alpha = 45^\circ$ a hengerlési iránnyal 45° -öt bezáró irányokat jelöli [1].

Az r képlékeny alakváltozási viszonzyszám (a normál anizotrópia tényező) irányfüggését szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra. Az r érték anizotrópia térképe

Az anizotrópiát számításainkban a Hill 48 folyási feltétel összefüggéseivel tudjuk figyelembe venni. A Hill 48 szerint [1] az r képlékeny alakváltozási viszonzyszám irányfüggése a következő összefüggéssel adható meg:

$$r(\alpha) = \frac{\frac{H}{F} + \left(\frac{2N}{F} - 1 - \frac{G}{F} - \frac{4H}{F} \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha + \frac{G}{F} \cos^2 \alpha}, \quad (2)$$

ahol az F , G , H és N az ún. anizotrópia paraméterek (meghatározásukat ld. később). Az alakítási szilárdság változását pedig az alábbi kifejezéssel számolhatjuk:

$$k_f^2(\alpha) = \frac{k_{f,90}^2 \left(1 + \frac{H}{F} \right)}{\sin^2 \alpha + \left(\frac{G}{F} \right) \cos^2 \alpha + \frac{H}{F} + \left(\frac{2N}{F} - 1 - \frac{G}{F} - \frac{4H}{F} \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

Az itt szereplő anizotrópia paramétereket (legkisebb hibával) a következő összefüggésekkel lehet meghatározni, három, különböző irányból kimunkált próbatesten mért r és egy k_f értékből (az indexek a próbatestek hengerlési iránnyal bezárt elhelyezkedésére utalnak):

$$\frac{H}{F} = r_{90}, \quad \frac{G}{F} = \frac{r_{90}}{r_0}, \quad \frac{N}{F} = \left(r_{45} + 0,5 \right) \left(1 + \frac{r_{90}}{r_0} \right) \quad \text{és} \quad F = \frac{1}{k_{f,90}^2 (1 + r_{90})} \quad (4)$$

(Megjegyzés: az előző összefüggések lágyacélok, alumínium ötvözetek és sárgaréz lemezek esetén a mért értékekkel jó egyezést mutatnak, a hiba < 4%. Újabban a nemvas fémekre, különösen az *alumíniumra a módosított Hill-féle* összefüggést ajánlják alkalmazni [3], [4], [5]).

2.2.1. A normális és a síkbeli anizotrópia

Az r képlékeny alakváltozási viszonyszám közepes értéke, amelyet ma **közepes normál anizotrópiának** neveznek, Hill-1948-as összefüggése szerint, a (4) összefüggésből számítható. Jelölésére az \bar{r} terjedt el. Megjegyezzük azonban, hogy a többi anyagjellemző (k_f , Z , n stb.) esetén is tapasztalható anizotrópia, de az anizotrópia fogalmi értelmezése és elnevezése a szakirodalomban erre az anyagjellemzőre terjedt el és vált széles körben elfogadottá.

Matematikailag korrekten módon a közepes normál anizotrópia értéke az

$$\bar{r} = r_{\text{köz}} = \frac{1}{\pi/2} \int_0^{\pi/2} r(\alpha) d\alpha \quad (5)$$

összefüggés szerint számítható. Ennek pontos megoldása:

$$\bar{r} = r_{\text{köz}} = \frac{H}{F\sqrt{G/F}} + \frac{2N/F - 1 - G/F - 4H/F}{(2\sqrt{G/F} + 1)^2}. \quad (6)$$

Attól függően, hogy gyakorlatilag hány irányban mérünk, több közelítő megoldása is ismert. Például a gyakorlatban elterjedt, 3 irányú mérés esetén a vékonyodási hajlam közepes értéke, a **közepes normál anizotrópia**:

$$\bar{r} = r_{\text{köz}} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}. \quad (7)$$

Az említett MSZ EN 10130-as szabvány ugyanezzel az összefüggéssel súlyozott átlagként értelmezi a különböző irányban mért értékeket, mind az r , mind az n tekintetében. (Megemlítjük, hogy ezt a nemzetközi irodalomban r_m -mel is jelölik.)

A **síkbeli anizotrópia** (Δr), az r képlékeny alakváltozási viszonyszám relatív eltérését adja meg egy viszonyítási értékhez. A szakirodalomban korábban, a közepes értékhez viszonyítottak, ma inkább a középső r értéknek (r_{45}) a két szélsőérték (r_0 , r_{90}) átlagától való eltérését tekintik síkbeli anizotrópiának [6]. Ebben az értelmezésben a síkbeli anizotrópia:

$$\Delta r = r_{45} - \frac{r_0 + r_{90}}{2} = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2}. \quad (8)$$

Nagy \bar{r} érték kismértékű vékonyodási hajlamra utal, míg a Δr nagy értéke erőteljes fülledést okoz mélyhúzáskor. A **jól mélyhúzzható** (elvékonyodásra kevésbé hajlamos) **anyagra** ezért a **nagy** \bar{r} érték és a **kis** Δr a jellemző, azaz az r -re nézve olyan anizotrópia a kedvező, amelynél $\bar{r} > 1$ és a síkbeli anizotrópia $\Delta r \approx 0$.

2.3. A Lillet diagram

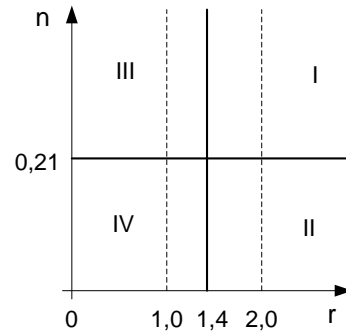
A klasszikus lemezalakíthatósági vizsgálatok alapján lemezek összehasonlító értékelésére kidolgozott Lillet-diagram (2. ábra) az r képlékeny alakváltozási viszonyszám és az n keményedési kitevő függvényében ábrázolja a lemezanyagok alakíthatóságát.

A Lillet-diagram alapján az egyes alakíthatósági tartományokat a 2. ábra jelöléseivel összhangban, az alábbiakkal jellemezhetjük:

- I. kiváló minőségű, komplex alakításra alkalmas lemezek (jól nyújtható és jól mélyhúzható lemezek),
- II. elsősorban mélyhúzásra alkalmas lemezek (kevesbé vékonyodnak),
- III. elsősorban nyújtásra szánt lemezek (jól nyúlnak),
- IV. gyengébb minőségű, hidegalakításra kevésbé alkalmas lemezek.

Mivel az anyagjellemzők irányfüggők, a határértékeket úgy kell megállapítani, hogy a lemez a legkedvezőtlenebb irányban is jól viselje el az alakítást.

Ennek megfelelően javasolták korábban [7] az $n > 0,21$ értéket és az $r_{90} > 1,4$ (de biztonságból $r_{90} > 2$) értéket határként tekinteni. Ez utóbbi esetben ugyanis a legrosszabb irányban sem lesz az r értéke (és ezáltal az $\bar{r} = r_{köz}$ sem) kisebb, mint 1, ezért az anyag egyik irányban sem lesz hajlamos az elvékonyodásra. Újabbban az $\bar{r} = 1,5$ és az $\bar{n} = 0,21$ súlyozott középértékkel is jellemzik a Lillet-diagram határvonalait [8].

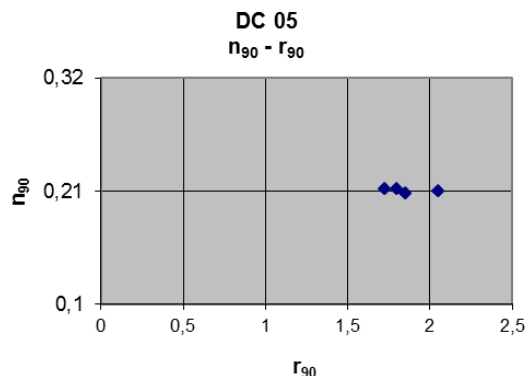


2. ábra. A Lillet-diagram

2.3.1. A hagyományos Lillet-diagram

Szemléltetésképpen tekintsük egy hidegen hengerelt, hidegalakításra szánt, jól alakítható DC 05 minőségű lemez Lillet-diagramját (3. ábra). Az n értéket az MSZ EN 10130 szabvány szerint, a hengerlési irányra merőleges helyzetű ($\alpha = 90^\circ$) próbatest adataival számoltuk. Az r értéket szintén az említett szabvány szerint határoztuk meg, a merőleges helyzetű próbán. A diagramban különböző vastagságú ($s = 0,8; 1; 1,2; 1,56$ mm) lemezek adatai szerepelnek.

Az ábrából látható, hogy ez a lemez a *jól* – *kiválóan* alakítható tartomány határán helyezkedik el.



3. ábra. A DC 05 lemez Lillet diagramja

2.3.2. Módosított Lillet-diagram ($Lillet_{ATT}$)

A Lillet-diagram szerkesztésében is fontos szerepet játszó keményedési kitevőt a szakítóvizsgálati eredményekből kétféleképpen lehet meghatározni:

- a) A vonatkozó MSZ EN 10002 szabvány szerint, az egyenletes nyúlás tartományában, az F_{max} előtti egyenletes nyúlás tartományában felvett 5 mérési adatból (lásd a 2.1 fejezetnél). Ez elég jó közelítést eredményez a valódi feszültségre, főleg annak logaritmusos, egyenes alakjára. A Lillet diagramban való alkalmazásra azonban csak közelítőleg alkalmas!

- b) A másik megoldás azon alapszik, hogy a valódi feszültség közelítésére, a képlékeny-alakításban elterjedten alkalmazott Nádai – féle összefüggés keményedési kitevője (n) megegyezik a lemez szakítóvizsgálata során fellépő maximális erőhöz (F_m) tartozó valódi nyúlás (φ_m) értékével [1] azaz

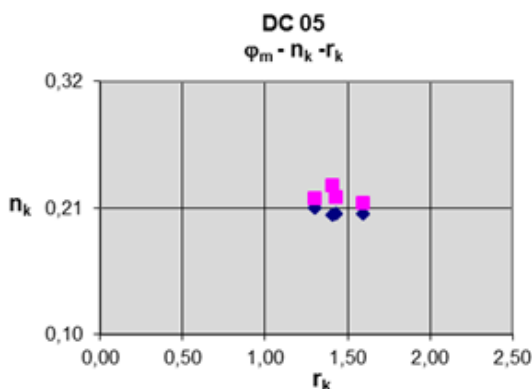
$$n = \varphi_m \cdot \quad (9)$$

A φ_m pedig gyakorlatilag az egyenletes nyúlás határának is tekinthető, mert ezt túllépve megkezdődik a helyi, kontrakciós alakváltozás!

A két módszerrel számított n értékek értelemszerűen nem egyeznek meg, amint ez az egyes alakítható lemezek mérési adataiból is kitűnik [13] .

A második módszert intézetünkben (ATI) már évek óta alkalmazzuk, mert az alakítás során megengedett határállapotnak az egyenletes nyúlás határát, a kontrakció kezdetét tekintjük. A módosított diagramban (4. ábra) lila színnel jelöltük a DC 05 anyagnak az (9)-egyenlettel meghatározott keményedési kitevő (n) helyzetét, míg késsel a hagyományosan, az MSZ EN 10130 szerint számított helyzetét.

Az alakítható lemezekre vonatkozó, jelenlegi szabvány (MSZ EN 10130) egyes esetekben a merőleges helyzetű próbák adataival jellemzi a lemezeket, más esetekben a három irányban mért értékek súlyozott átlagát írja elő. Ezért a módosított diagramban ezeket tüntettük fel n_k, r_k -val jelölve.



4. ábra. A DC 05 lemez módosított Lillet_{ATI} diagramja

3. A lokális alakváltozási egyenetlenség

A járműipari gyártási tapasztalatok alapján már a 90-es évek elején igény merült fel további vizsgálati módszerek alkalmazására is az alakíthatóság megbízható megítélésében. Az addig ismert és az előzőkben bemutatott jellemzők szerint megfelelőnek minősített lemezekből készített termékeknel a selejt százalék tekintetében nagy szórást tapasztaltak különböző beszállítók lemezanyagai esetében. Vizsgálataik szerint ennek oka a lemezek lokális egyenetlenségében keresendő [1] . A lokális egyenetlenség a lemez egyes szemcséinek eltérő viselkedésére vezethető vissza. Ennek kimutatására a hagyományos szakítóvizsgálati eredmények nem alkalmasak, mert azok a szemcsékhez képest lényegesen nagyobb, $L_0 = 50-100$ mm hosszú jeltávú területről szolgáltatnak adatokat.

Az alakítási egyenetlenség a szokásos lemezzakító vizsgálatnál, de másfajta kiértékeléssel jól nyomon követhető. A próba felületére előzetesen hálózatot kell felvinni. A próbát – az egyszerűsített r méréshez hasonlóan – $\varepsilon_{ax}=15-17\%$ (mérnöki nyúlás) mértékben meg kell nyújtani. Az alakított próbatest egyes hálópontjaiban meg kell határozni a helyi, lokális valódi (logaritmusos) redukált (összehasonlító) alakváltozást. Ez, például d_0 átmérőjű kö-

rökből álló hálózat esetén, a torzult ellipszis méreteiből (a, b) a következőképpen határozható meg:

$$\varphi_a = \ln(a/d_0), \quad \varphi_b = \ln(b/d_0) \quad \text{és} \quad \bar{\varphi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_a^2 + \varphi_a \varphi_b + \varphi_b^2} \quad (10)$$

A szakítópróba vizsgált felületén meg kell keresni és meg kell határozni a legnagyobb mértékű (φ_{\max}), és a legkisebb mértékű (φ_{\min}) helyi (lokális) alakváltozásokat.

Az átlagos valódi (logaritmusos) nyúlás $\varphi_{ax} = \ln(1 + \varepsilon_{ax})$ figyelembevételével, a lokális alakváltozási egyenetlenség mértéke a következőképpen számítható:

$$\Lambda = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{\varphi_{ax}} 100 \quad (\%) \quad (11)$$

Ennek felhasználásával már jobban lehet a különböző beszállítók lemezeit rangsorolni. A vizsgált esetben kettő esetében $\Lambda < 8\%$ volt és kevesebb, mint 2 % selejtet okozott, egy harmadiknál a $\Lambda \cong 14\%$ -ra adódott és 6 % selejt keletkezett.

3.1. Új vizsgálati módszer a lokális alakítási egyenetlenség meghatározására

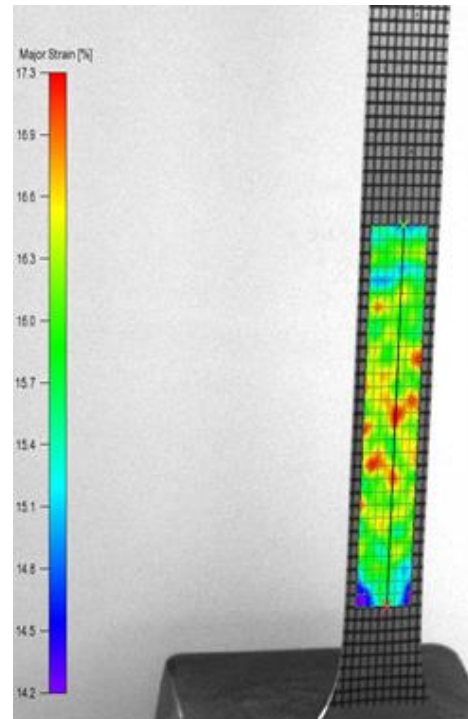
A szakítópróbatesten bekövetkező helyi deformációk, valódi nyúlások meghatározása az optikai mérőrendszerek és képkéértékelő szoftverek elterjedésével ma már gyorsan és megbízhatóan elvégezhető. Vizsgálatainknál mi a VIALUX-AutoGrid optikai mérő- és kiértékelő rendszert alkalmazzuk. Ennél a módszernél négyzetrácsos hálót viszünk fel a próbatest felületére. A terhelés során folyamatosan figyeljük és rögzítjük a hálózat torzulását, amelyből az alakváltozásokat az optikai rendszerhez tartozó szoftveres kiértékeléssel végezzük [9]. A VIALUX rendszerrel gyorsan és szemléletesen feltárhatók a helyi, alakváltozási egyenetlenségek (Λ).

Ezáltal a lokális alakváltozási egyenetlenség rutinszerűen alkalmazható mérőszám lehet, az alakítási határgörbék (FLC-k) meghatározására szolgáló vizsgálatok „mellékterméke”-ként. Szemléletesképpen nézzük meg a korábban említett, jól alakítható DC 05-ös acéllemez lokális egyenetlenség vizsgálatának tapasztalatait.

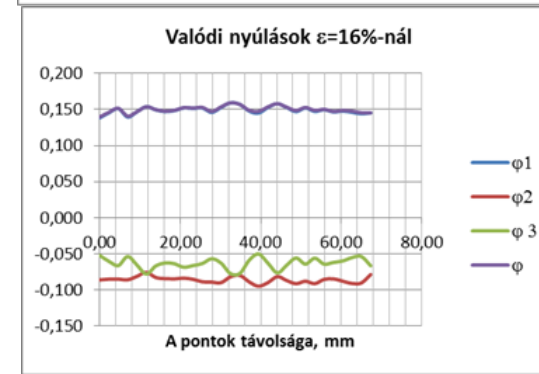
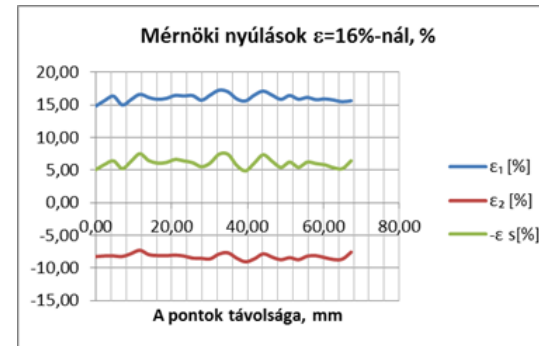
3.2. A lokális alakváltozási egyenetlenség (Λ) egy jól alakítható acéllemeznél

A VIALUX rendszerrel lefotózott, DC05 minőségű acéllemez szakító próbáit, különböző terheléseknél az 5. ábrán mutatjuk be.

A fotókon az ε_{ax} mérnöki nyúlások eloszlása látható, különböző terhelési állapotokban. Az ε_{ax} átlag = 16%-nál $\varphi_{\max} = 0,159$ és $\varphi_{\min} = 0,14$. Több kritikus pont is látszik, például az alsó harmadban és középen. A maximális (F_{\max}) erőnél már 20-27% között szór a hosszirányú nyúlás, kritikus a középső környezet. A kontrakció, a szakadás végül a vizsgált terület közepén indult meg. A szakadás előtti pillanatban jelentősen nagy a nyúlás szórása a próbatest hossza mentén. A próbatesten bejelölt függőleges vonal mentén észlelt helyi nyúlásokat az 5. ábrán mutatjuk be. Az 5. ábra b) részletén a különböző főnyúlások láthatók, ε_{ax} átlag = 16%-nál.



a) A helyi fajlagos, axiális irányú nyúlások (ϵ_{ax}) eloszlása a próba $\epsilon_{ax, \text{átlag}} = 16\%$ -os nyúlásánál



b) A mérnöki és a valódi nyúlások a hossz mentén

5. ábra. A helyi nyúlások eloszlása a próba $\epsilon_{ax, \text{átlag}} = 16\%$ -os nyúlásánál, a DC 05 anyagminőség, $s=0,8$ mm-es lemez próbatestjén

A szélesség (φ_2) és a vastagság irányú valódi nyúlás (φ_3), az anizotrópia miatt jól láthatóan nem egyezik meg. (Az ábrákon a jellemzők indexei a vizsgálati irányokra utalnak: **1** az axiális irány, **2** a szélesség iránya, **3** illetve **s** pedig a vastagság irányára utal.)

A mérési adatok szerint [13] ε_{ax} átlag = 16%-nál: $\varphi_{max} = 0,159$, $\varphi_{min} = 0,14$, az átlagos valódi nyúlás φ_{ax} átlag = $\ln(1+0,16) = 0,15$. A lokális egyenetlenség ebben az esetben:

$$\Lambda = \frac{0,159 - 0,14}{0,15} 100 = 12,7\% \quad . \quad (12)$$

A szakadás kialakulásának a környezetében, a lokális nyúlások növekedését az [1] tanulmányban elemeztük részletesen.

4. A jelenlegi szabványok alkalmazhatósága nagyszilárdságú alakítható lemezek minősítésénél

Intézetünkben a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekt részeként vizsgáltuk különböző nagyszilárdságú dual-phase minőségű acélanyagok alakíthatósági jellemzőit. A vizsgált anyagminőségek: DP 600, DP 800 és DP 1000 jelű lemezek.

A vizsgálatok során problémák mutatkoztak a szakítóvizsgálatból nyerhető egyes alakíthatósági jellemzők megállapításánál, a vonatkozó MSZ EN 10130 szabvány alkalmazásakor, mert a vizsgált nagy szilárdságú acélok alakváltozási képessége értelemszerűen kisebb, ezért gyakran előfordult, hogy a kiértékeléskor a csökkentett $\varepsilon = 15-20\%$ -os felső nyúlási határt sem lehetett figyelembe venni.

Ezért ezen esetekben el kellett térnünk ettől a felső határtól. A tapasztalataink alapján az alábbi ajánlásokat fogalmazzuk meg.

5. Az alakíthatósági vizsgálatok és kiértékelések tovább fejlesztése

Az előzőekben bemutatottak, továbbá az elvégzett vizsgálatok és elemzések alapján a korszerű járműipari lemezanyagok minősítésénél, a szakítóvizsgálatokon nyugvó alakíthatósági mérőszámok, minősítések területén megfontolandó a következők figyelembe vétele.

- Ha az **n** megállapításához előírt ε tartomány esetében, nem teljesül az MSZ EN10030 szerinti 15-20% felső nyúlási határ, akkor a (0,95...0,5) ε_m tartományban felvett 5 pont alapján határozzuk meg az **n** értékét (ez az eset a nagyszilárdságú lemezeknél fordulhat elő). Itt az ε_m az egyenletes nyúlás határát jelöli a mérnöki rendszerben.
- Ha az **r** esetében nem teljesül az MSZ EN10130 szerinti 15-20% felső nyúlási határ, akkor az ε_m -nél határozzuk meg az **r**-t (ez az eset is a nagyszilárdságú lemezeknél fordulhat elő).
- A Lillet diagramban szemléltetéskor mindkét értelmezés szerinti **n**-t is ábrázoljuk az **r** függvényében: a jelenleg szabványos, MSZ EN 10130 szerint számított **n**-t és az alakíthatóságot pontosabban jelző **n** = φ_m -t is.
- Javasoljuk a minősítéseknél a lokális egyenetlenségi mérőszám (Λ) alkalmazását is. A jól alakíthatónak, kevés selejtet okozó minőségi korlátnak – egyelőre – a $\Lambda < 8$ értéket ajánljuk.
- Az alakváltozási egyenetlenségeket jellemző Λ mérőszámot $\varepsilon_m < 20\%$ esetén, $\varepsilon_{ax} = 0,8 * \varepsilon_m$ értékű fajlagos nyúlásnál határozzuk meg.

6. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV- 2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

7. Irodalom

- [1] Tisza M., Gál G., Kiss A., Kovács P., Lukács Zs.: Nagyszilárdságú lemezanyagok alakíthatósága, Tanulmány, Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék, 2013. július. Készült: a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 *Járműipari anyagfejlesztések projekt keretében*.
- [2] Osipov: Analiz nadeznosti pokazatelej Stampuemosti avtolistovoj stali. Kuznecno-stampovocsnoe proizvodstvo. 1995. No. 5. p. 15-17.
- [3] Hill, R.: Math. Proc. Cambridge Phil. Soc. 85. 1979. p. 179.
- [4] D. Banabic: Mathematical model of the Forming limit diagrams using the new Hill's yield criterion, 19th IDDRG Biennial Congress, Eger, 10-14. June 1996., p. 407-714.
- [5] Hill, R.: A user-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals, Int. J. Mech. Sci., Vol. 35 (1993), No. 1, pp. 19-25.
- [6] Ziaja Gy.: A finomlemezek technológiai vizsgálatának korszerű módszerei és eszközei. Anyagvizsgálók lapja, 1991/1. p. 17-21.
- [7] Tóth J.: Hidegen hengerelt lemezek korszerű alakíthatósági jellemzőinek (r, n és T) vizsgálata. Bányászati és Kohászati Lapok 109. évf. 4. sz. 1976. p. 145-148.
- [8] Tóth T.: Hidegen hengerelt lágyacél lemezek szövetszerkezete, alakíthatósága, mechanikai tulajdonságai homogenitásának javítása, Gépgyártástechnológia, 36. évf. 1996., 1. sz., p. 18-28.
- [9] Tisza M., Kiss A., Kovács P.: Autókarosszéria gyártásához alkalmazott lemezek újszerű alakíthatósági vizsgálata VIALUX-autoGrid optikai mérő-kiértékelő rendszerrel, XXIII. microCAD International Scientific Conference, 19-20 March 2009, University of Miskolc.
- [10] Kiss A., Kovács P. Z., Tisza M.: Lemezanyagok korszerű vizsgálati irányzatai különös tekintettel az autóipari felhasználásra, Képlékenyalakítási Konferencia, Miskolc, 2012. február 12-13.
- [11] Verő J., Káldor M.: A vasötvözetek fémtena. Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1971.
- [12] Tóth T.: Mechanikai anyagjellemzők és vizsgálatuk módszerei, kézirat, ME DFK, Dunaújváros, 1997.
- [13] Tisza M., Gál G., Kiss A., Kovács P., Lukács Zs.: Nagyszilárdságú lemezanyagok alakíthatósága, Kutatási jelentés, Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék, 2014. február, Készült: a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 *Járműipari anyagfejlesztések projekt keretében*.