

A finomlemezek technológiai vizsgálatainak korszerű módszerei és eszközei

Dr. Ziaja György*

A fémes szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságait mind a belőlük készíthető termékek felhasználhatóságának, mind az anyag feldolgozhatóságának szempontjából meg kell határozni. Az anyagot ilyen értelemben mindkét oldalról jellemző paramétereket is két csoportba lehet osztályozni. Az anyagjellemzők egyik csoportja – ide tartozik a szabványos mérőszámok többsége – arra jó, hogy az anyagokat ezek alapján valamilyen megfontolás szerint sorrendbe lehessen állítani (mondván: ez jobb – ez gyengébb stb). Ilyen mechanikai anyagjellemző például az egy adott hőmérsékleten mért fajlagos ütmunka, mely egy nagyon fontos mérőszám, de ennek ellenére nincs az a méretezési- vagy technológiai egyenlet, melybe ez a számérték behelyettesíthető lenne. Vannak ezek szerint olyan anyagjellemzők is, – és ezek jelentik a másik csoportot – melyek ezzel ellentétben olyan adatokat szolgáltatnak, melyek, úgy mond egyenletbe helyettesíthetők. Nyilvánvaló, hogy ezeknek nagyobb a jelentősége, és a fémes anyagok vizsgálatával foglalkozóknak előbb-utóbb minden „sorbarakó” vizsgálatot az „egyenletbe helyettesíthetővel” fel kell váltani.

A fémes szerkezeti anyagok szakítóvizsgálattal mért jellemzői közül a feszültség jellegűek, mint a rugalmassági- és folyási határ, a rugalmassági modulus és kivételes esetekben a szakító szilárdság ilyen „egyenletbe helyettesíthető” mérőszám. A szakadási nyúlás soha, a kontrakció csak kivételesen ritka esetekben sorolható ide. Ez utóbbiak az anyagok képlékeny alakváltozó képességét, vagy másképpen megfogalmazva a képlékeny alakítással feldolgozhatóságát volnának hivatottak demonstrálni. Mivel az ilyen sorbarakós anyagjellemzőkkel a technológiai műveletet tervezni nem lehet, ezért az idők folyamán számos technológiai pró-

bát találtak ki. Sajnos ezek többsége sem nyújt elegendő objektív és számszerű, a technológiai folyamatok tervezésre használható információt.

Különösen így van ez a lemezek, főleg a finomlemezek esetén. Jelenleg az ismert lemezminősítő technológiai próbák száma a százas nagyságrendben van. Ezek között vannak szabályos és ajánlott eljárások, mint pl. az Erichsen próba, vagy a csészehúzó vizsgálat. Az előzővel meghatározott számszerű adat tipikusan „sorbarakó” jellegű, az utóbbi eredményei korlátozottan alkalmazhatók technológiai tervezésre is.

Lemeznek nevezzük azokat az előgyártmányokat, amelyekre az a jellemző, hogy a három méretük közül kettő sokkal nagyobb, mint a harmadik. A lemezek képlékeny alakítással, alkatrésszé történő feldolgozása rendszerint sík feszültségi állapotban történik. A lemezek mechanikai-technológiai tulajdonságaira jellemző, hogy ezek esetenként szinte az egykristályokat megközelítő mértékben irányfüggőek. Ennek az az oka, hogy a fémlamezek rendszerint meleg-, egyes esetekben hideghengereléssel készülnek. A hengerelésnél alkalmazott egyirányú és ismétlődő hő- és erőhatások eredményeként olyan zárvány elrendeződés továbbá alakítási- és lágyítási textúra keletkezik, mely a lemezanyagok fennemlített anizotrópiáját okozza.

A lemezanyag hengerelése és hőkezelése során kialakuló anizotrópia a felhasználók szempontjából lehet egyaránt nagyon kedvező, de nagyon kedvezőtlen is. Ezek a sajátosságok szükségessé teszik az anyagnak a külső erőhatásokkal szemben ellenállását leíró anyagtörvények megfogalmazását. Ezek az anyagegyenletek nyilvánvalóan különböznek a mindannapi mérnöki gyakorlatban feltételezett eszményi izotróp kontinuumtól.

Különösen az utóbbi időben terjedő számítógéppel segített, nem egyszer

a folyamatok szimulációján alapuló termék- és technológia tervező eljárások követelik meg az anyag tényleges viselkedését adekvát módon leíró anyagtörvények, a folyamatot szimuláló matematikai-kontinuumechanikai modelleket kiegészítő, az anyagot jellemző konstitutív egyenletek ismeretét. Mindezek mellett azt is meg kell fogalmazni, hogy ezek az egyenletek meddig érvényesek, hol vannak és hogyan számszerűsíthetők az alakítási folyamatok határállapotai. A tapasztalatok ugyanis azt mutatják, hogy a határállapotok maguknak az alakítási folyamatoknak a függvényei. E szerint az anyagnak egyetlen deformáció – történettel, például szakító vizsgálattal való minősítése teljesen értelmetlen próbálkozás, legfeljebb a „sorbarakást” segíti.

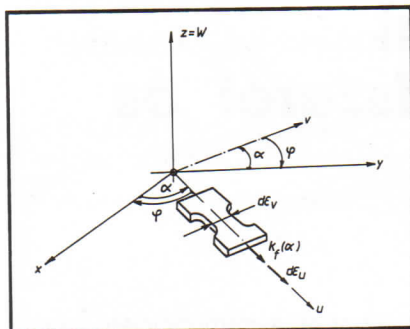
A finomlemezek vizsgálati stratégiáit ezek szerint úgy kell megtervezni, hogy

- a mért adatok alapján megfogalmazhatók legyenek a kérdéses (lemez-) anyag konstitutív paraméterei
- az alakítási folyamat határállapotait számszerűen rögzíteni lehessen a folyamat közben beálló károsodási jelenségek sorrendjében.
- a méréseknél lehetőleg alkalmazhatónak kell lennie a konvencionális mérési módszereknek is, hogy a szokványos – szabványos adatokat is megkaphassuk.

A konstitutív paraméterek mérése

A képlékenységtani alapokon álló számítási eljárásokhoz elvileg az ún. folyási felület kimérésére van szükség. Az izotróp anyagok esetén ehhez elegendő a folyási görbe ismerete. Anizotróp anyagok esetén meg kell keresni azt a formulát, mellyel az anizotróp anyagok viselkedése leírható.

*Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológia és Anyagszerkezettani Intézet.



1. ábra

A legnagyobb mennyiségben felhasznált lemezanyagok, a mélyhúzóható acéllemez esetében a Hill-féle ún. „rég” folyási felület egyenlet [1] a szokásos. Ez a rendkívül elterjedt formula sárgarézre sehog, alumíniumra csak durva közelítéssel használható, ezekre más közelítést, például az „új” Hill féle [2] folyási felületet lehet alkalmazni. Ha a jelen dolgozat keretében az acéllemezekenél maradunk, és elfogadjuk, hogy a lemezeket a feldogozásuk során a lemez síkjában működő, vagy azzal egyenértékű feszültségek terhelik, akkor az alábbi egyenlet F , G , H és N -el jelölt, ún. Hill-féle anizotrópia paramétereit kell kimérni:

$$2f = F\sigma_y^2 + G\sigma_x^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2N\tau_{xy}^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

Az egyenletben x a lemez hengerelési iránya, y a keresztirány, σ , τ a képlékeny állapotot okozó feszültségek. A folyási felület fenti alakjának ismeretében a deformáció növekmények és a feszültségek közötti kapcsolatot leíró anyagtörvények generálhatók, a

$$d\epsilon_{ij} = d\lambda(\partial f / \partial \sigma_{ij}) \quad (2)$$

összefüggés alapján. Az F , G , H és N paraméterek $1/\text{feszültség-négyzet}$ dimenziójú mennyiségek, melyeknek az értéke az alakítási keményedés miatt az alakítás során változik. Kimutatható, hogy a lemezanyag elvékonyodásra hajlamát mérő Lankford szám, és a fenti, Hill paraméterek között az 1. ábra jelöléseinek megfelelően az alábbi összefüggés van:

$$R_u = R(\alpha) = d\epsilon_u / d\epsilon_w \quad (2)$$

és

$$R(\alpha) = \{ H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \} / \{ F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha \} \quad (3)$$

A hengereléssel bezárt α szög helyébe 0 , 45 és 90 fokot helyettesítve kapjuk, hogy:

$$R_0 = R_x = d\epsilon_y / d\epsilon_z = H/G \quad (3a)$$

$$R_{45} = d\epsilon_v / d\epsilon_z = N/(H + G) - 1/2 \quad (3b)$$

$$R_{90} = R_y = d\epsilon_x / d\epsilon_z = H/F \quad (3c)$$

$$(d\epsilon_z = d\epsilon_w)$$

Az R értékek mérésére a (2) egyenlet ad utasítást. Az anizotrópia leírására az elmélet szerint 4 paraméter kell. Az R_0 , R_{45} , R_{90} szükséges, de nem elégséges, kell egy negyedik adat is. Ezért mérni kell a lemezanyag folyási görbét is legalább egy irányban. Mivel az R méréshez egy szakító próbatesten alakváltozást kell mérni az egyenletes nyúlás tartományában, és ezek az adatok a keményedési görbe meghatározásához is szükségesek, ezért a két mérést össze lehet vonni. A Hill-elméletből adódik, hogy a hengerelési irányban egy tetszőleges α szöget bezáró u irányban (1. ábra) mért $\sigma_{f\alpha}$ egyrészt

$$\sigma_{fu} = \sigma_{f\alpha} = F_u/A = (F_u/A_0) \exp(\epsilon_u) \quad (4)$$

ahol A_0 a próbatest keresztmetszete, másrészt a Hill elméletből az is következik, hogy:

$$\sigma_{f\alpha} = \{ H + F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha + [2N - F - G - 4H] \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \}^{1/2} \quad (5)$$

Feltesszük továbbá, hogy a keményedési görbe a Hollomon-féle egyszerű hatványfüggvény, azaz

$$\sigma_{f\alpha} = K(\epsilon_u)^n \quad (6)$$

továbbá érvényes a térfogat állandóság ($\epsilon_u + \epsilon_v + \epsilon_w = 0$) törvénye. Belátható, hogy a próbatestet terhelő F_u erő, és a próbatest két alakváltozás összetevőjének egyidejű mérése a fentiek alapján lehetőséget ad nem csak a keresett paraméterek meghatározására, hanem annak az ellenőrzésére is, hogy a vizsgált anyag tényleg követi-e a feltételezett anyagtörvényt. Például, ha mérjük az R értéket három irányban és a σ_f értékeit a hengerelési irányban, van 4 egyenletünk a 4 Hill paraméter számítására, annyi pontban, ahány alakváltozás értékre meghatároztuk az R értékeket. Ezek ismeretében kiszámíthatjuk R vagy σ_f értékeit bármely irányban, sőt felrajzolhatók az $R(\alpha)$ és $\sigma_f(\alpha)$ görbék is. Ha tetszőleges, más irányokban mért R vagy σ_f a szokásos mérési hibákon belül egybeesik a számítottakkal, akkor a vizsgált anyag a feltételezett anyagtörvényt követi.

A méréshez tehát egy olyan eszközre van szükség amely az elmozdulásokat és az erőt egyidejűleg méri. Az anyagvizsgálógép-gyárak korszerű termékei az erőmérő cella jelét, valamint egy a próbatestre szerelhető,

két elmozdulás jeladót tartalmazó műszer jeleit egy adatfeldolgozó egységbe továbbítják. Ezek általában opcionális tartozékok. A feldolgozott adatok egyrészt digitálisan megjeleníthetők, másrészt valamilyen analóg rajzeszközzel diagramok formájában kirajzolhatók.

A mérést ma már több országban szabványosították. Hazánkban is van egy -, ha nem is a legmodernebb szemléletet tükröző - érvényes műszaki irányelv. A szabványos mérés célja elsődlegesen nem az anyagtörvény kimérése. Ha ugyanis az R értéket, mint a lemez elvékonyodási hajlamának mérőszámát tekintjük, akkor lehetőségünk van az egyes anyagok illetően összehasonlításra és a „sorbarakására”. A sorbarakáshoz két mérőszámot használunk. Az egyik az R értékek átlaga, a másik az átlagtól eltérés mértéke. Az előző az anyag normális, az utóbbi a síkbeli anizotrópiájának mérőszáma. Az R értékek átlaga elvileg

$$R = (\sqrt{\pi}) \int_0^\pi R(\alpha) d\alpha$$

Gyakorlatilag a három irányú mérésekből az átlag:

$$R = (R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4 \quad (7)$$

Az átlagtól való eltérés:

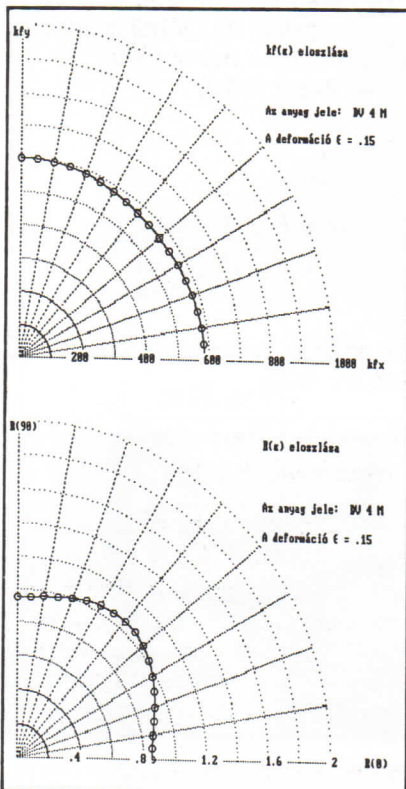
$$\delta R = R_{45} - (R_0 + R_{90})/2 \quad (8)$$

A lemeztechnológusok számára az olyan anyag az ideális, mely nem szeret a feldolgozás során elvékonyodni, azaz normálisan úgy anizotróp, hogy $R > 1$, másrészt viszont ha az anyag síkban izotróp, azaz $\delta R = 0$.

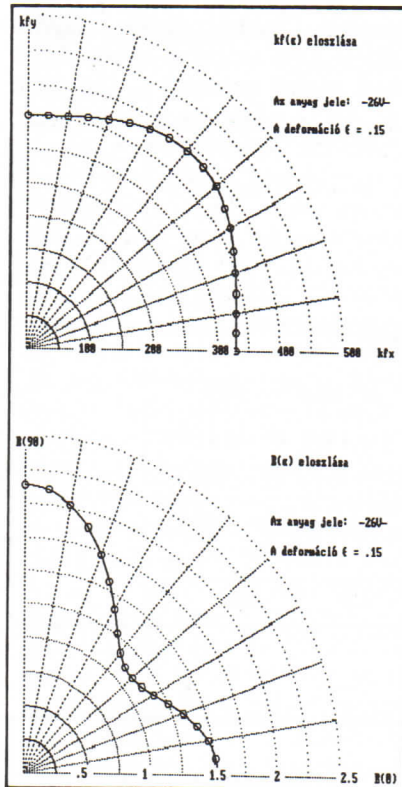
A Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológia és Anyagszerkeztetési Intézetében hosszú évek óta foglalkozunk a lemezanyagok képlékeny alakításához szükséges számítógépes folyamatlemez- és tervező eljárások fejlesztésével, és az ezekhez nélkülözhetetlen konstitutív paraméterek és anyagjellemzők mérésével. Jelenleg max. 4 mm vastag lemezek vizsgálatára vagyunk felkészülve. A fenti R - n méréshez egy számítógép vezérelt MTS gyártmányú szakítógéppünk, és az ehhez tartozó R - n mérő berendezésünk van. Az R értékek és a keményedési gör-

bék adatainak feldolgozására egy LEMMIN nevű programot fejlesztettünk ki. A program bekéri az adatokat, melyek alapján kiszámítja az adott alakváltozáshoz tartozó Hill paramétereket, megjeleníti az R értékek és az adott deformációhoz tartozó aktuális folyási határok irányfüggését és táblázatosan az összes számítható adatot. Illusztrációként tekintünk a 2. és 3. ábrákra. A 2. ábrán egy Dunai Vasműben gyártott növelt szilárdságú 4 mm vastag, melegen hengerelt, duális fázisú, közel izotróp HSLA acéllemez, Hill elmélettel számított és mért Lankford számait rajzolta meg a program. A 3. ábrán egy 0,8 mm vastag hidegen hengerelt és lágyított mélyhúzó lemez hasonló diagramjai láthatók.

2. ábra



A legfontosabb konstitutív paraméter a folyási görbe. Ez abban különbözik az előzőekben ismertetett keményedési görbétől, hogy ez nem egyszerűen egy adott irányban mért valódi feszültség – valódi nyúlás görbe, hanem az összehasonlító feszültség-összehasonlító alakváltozás összetartozó értékeit reprezentáló diagram, amely az egyeneses nyúlásnál jóval nagyobb alakváltozásokra is érvényes. Meghatározása egyszerű húzókísérlettel nem lehetséges. Célyszerűen a Watts – Ford [3] módszer



3. ábra

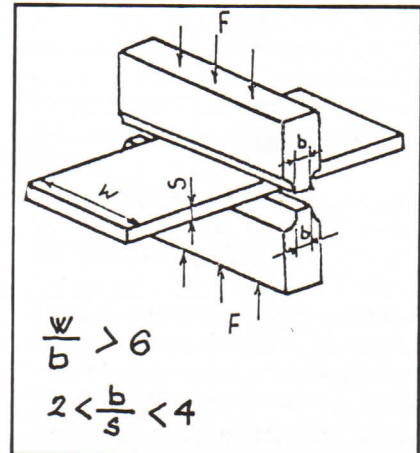
rel mérhető. Ez a lemez síkjára merőleges, a lemezben síkalakváltozási állapotot létrehozó nyomókísérlet. A kísérlet vázlata, és azok a geometriai feltételek, melyeket be kell tartani, a 4. ábrán látható. A kiértékeléshez szükség van az R értékekre, mert a nyomóerő és a szerszámfelület hányadosa, illetve a lemez méretváltozása továbbá a k_f összehasonlító feszültséget illetve Φ alakváltozás kapcsolatait leíró egyenletekben R_0 és R_{90} is szerepel. E speciális nyomókísérlet geometriai feltételeinek betartásához egy cserélhető betétkészlettel rendelkező szerszámmra, a kiértékeléshez pedig egy adott célú kiértékelő programra van szükség. A BME – MTAI-ban kifejlesztett szerszámkészlet fényképe az 5. ábrán látható. A kiértékeléshez a KF nevű programot készítettük el. Példaként a 6. ábrán a már említett 4 mm vastag HSLA acél folyásgörbéje látható. Az ábrán megjelenített számok a folyásgörbe

$$k_f = C_1 + C_2 \cdot \Phi^n + C_3 \cdot \exp(C_4 \Phi) \quad (9)$$

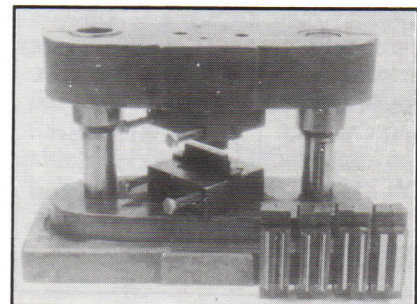
egyenletének paraméterei.

Az alakítási határállapotok mérése.

A lemezek képlékeny hidegalakítása során lejátszódó fizikai folyamatok



4. ábra

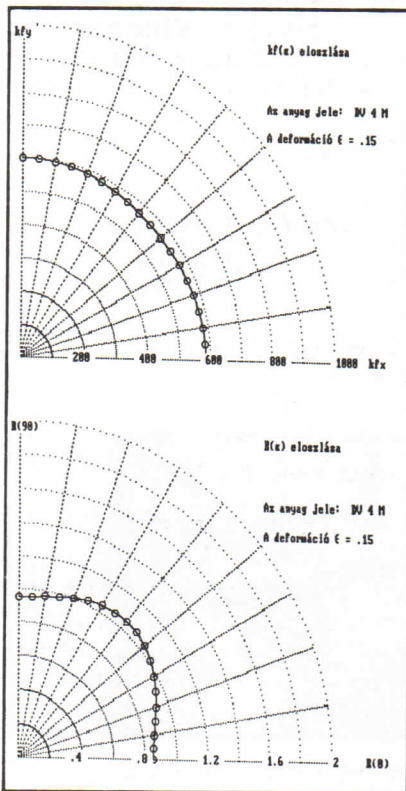


5. ábra

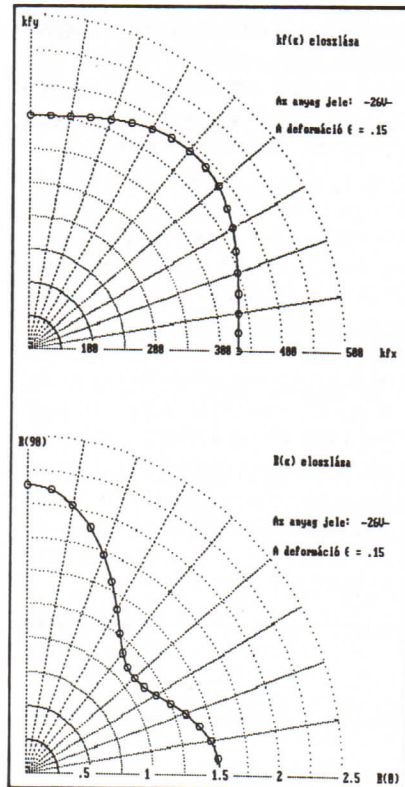
eredményeként olyan károsodási jelenségek következnek be, amelyek mind a lemez további alakítását, mind a lemezből készült termék gyakorlati felhasználását teszik lehetetlenné. A károsodási folyamat előrehaladását a lemez kiválasztott pontjában mérhető deformációtörténettel lehet jellemezni. Ha a kiválasztott pontban, a lemez síkjában mérhető főalakváltozások ϵ_1 és ϵ_2 , a deformációtörténetet az $\alpha = d\epsilon_2/d\epsilon_1$ differenciálegyenlet írja le. (Monoton terhelés, vagyis $\alpha = \text{const}$ esetén például az egytengelyű húzásra $\alpha = -1/2$; a síkalakváltozásra $\alpha = 0$; a két-tengelyű, biaxiális húzásra $\alpha = 1$). A károsodási folyamatok megjelenése egy összetartozó $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ponttal regisztrálható az $\epsilon_2 - \epsilon_1$ síkban. A lemezből történő alkatrészgyártás során a gyártmány minden pontjában más – és más a deformációtörténet. A károsodási jelenségek bekövetkezése ugyancsak a deformációtörténettől függ. A különböző deformációtörténetek esetén megfigyelt,

bék adatainak feldolgozására egy LEMMIN nevű programot fejlesztettünk ki. A program bekéri az adatokat, melyek alapján kiszámítja az adott alakváltozáshoz tartozó Hill paramétereket, megjeleníti az R értékek és az adott deformációhoz tartozó aktuális folyási határok irányfüggését és táblázatosan az összes számítható adatot. Illusztrációként tekintünk a 2. és 3. ábrákra. A 2. ábrán egy Dunai Vasműben gyártott növelt szilárdságú 4 mm vastag, melegen hengerelt, duális fázisú, közel izotróp HSLA acéllemez, Hill elmélettel számított és mért Lankford számait rajzolta meg a program. A 3. ábrán egy 0,8 mm vastag hidegen hengerelt és lágyított mélyhúzó lemez hasonló diagramjai láthatók.

2. ábra



A legfontosabb konstitutív paraméter a folyási görbe. Ez abban különbözik az előzőekben ismertetett keményedési görbétől, hogy ez nem egyszerűen egy adott irányban mért valódi feszültség – valódi nyúlás görbe, hanem az összehasonlító feszültség-összehasonlító alakváltozás összetartozó értékeit reprezentáló diagram, amely az egyeneses nyúlásnál jóval nagyobb alakváltozásokra is érvényes. Meghatározása egyszerű húzókísérlettel nem lehetséges. Célyszerűen a Watts – Ford [3] módszer



3. ábra

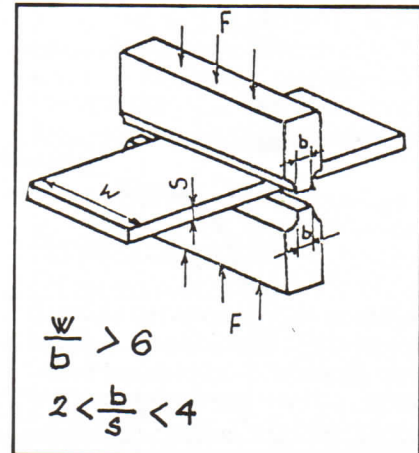
rel mérhető. Ez a lemez síkjára merőleges, a lemezben síkalakváltozási állapotot létrehozó nyomókísérlet. A kísérlet vázlata, és azok a geometriai feltételek, melyeket be kell tartani, a 4. ábrán látható. A kiértékeléshez szükség van az R értékekre, mert a nyomóerő és a szerszámfelület hányadosa, illetve a lemez méretváltozása továbbá a k_f összehasonlító feszültséget illetve Φ alakváltozás kapcsolatát leíró egyenletekben R_0 és R_{90} is szerepel. E speciális nyomókísérlet geometriai feltételeinek betartásához egy cserélhető betétkészlettel rendelkező szerszámmal, a kiértékeléshez pedig egy adott célú kiértékelő programra van szükség. A BME – MTAI-ban kifejlesztett szerszámkészlet fényképe az 5. ábrán látható. A kiértékeléshez a KF nevű programot készítettük el. Példaként a 6. ábrán a már említett 4 mm vastag HSLA acél folyásgörbéje látható. Az ábrán megjelenített számok a folyásgörbe

$$k_f = C_1 + C_2 \cdot \Phi^n + C_3 \cdot \exp(C_4 \Phi) \quad (9)$$

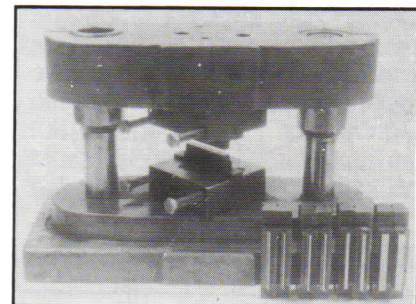
egyenletének paraméterei.

Az alakítási határállapotok mérése.

A lemezek képlékeny hidegalakítása során lejátszódó fizikai folyamatok



4. ábra

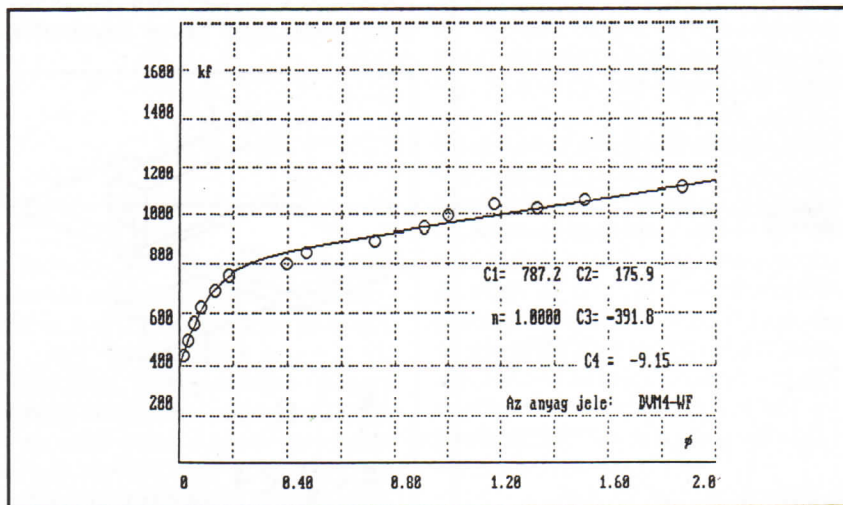


5. ábra

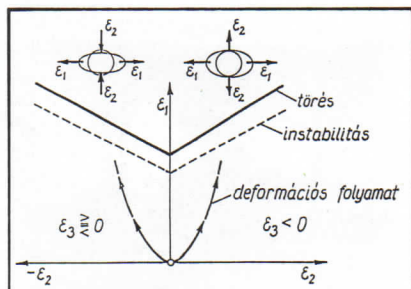
eredményeként olyan károsodási jelenségek következnek be, amelyek mind a lemez további alakítását, mind a lemezből készült termék gyakorlati felhasználását teszik lehetetlenné. A károsodási folyamat előrehaladását a lemez kiválasztott pontjában mérhető deformációtörténettel lehet jellemezni. Ha a kiválasztott pontban, a lemez síkjában mérhető főalakváltozások ϵ_1 és ϵ_2 , a deformációtörténetet az $\alpha = d\epsilon_2/d\epsilon_1$ differenciálegyenlet írja le. (Monoton terhelés, vagyis $\alpha = \text{const}$ esetén például az egytengelyű húzásra $\alpha = -1/2$; a síkalakváltozásra $\alpha = 0$; a két-tengelyű, biaxiális húzásra $\alpha = 1$). A károsodási folyamatok megjelenése egy összetartozó $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ponttal regisztrálható az $\epsilon_2 - \epsilon_1$ síkban. A lemezből történő alkatrészgyártás során a gyártmány minden pontjában más – és más a deformációtörténet. A károsodási jelenségek bekövetkezése ugyancsak a deformációtörténettől függ. A különböző deformációtörténetek esetén megfigyelt,

azonos károsodási jelenségekre jellemző, összetartozó főalakváltozásokat egy folytonos görbével össze-

lehetővé. Természetesen nagyon sokféle ilyen módszer létezik. Ezek közül azokat emeltem ki, melyek a



6. ábra

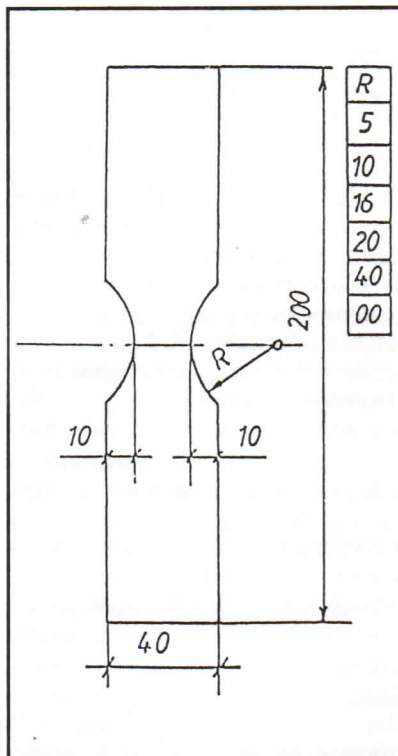


7. ábra

kötve az alakítási határgörbéhez, vagy első felrajzolóikról Keeler-Goodwin diagramoknak nevezett ábrákat kapjuk. Az alakítási határgörbét a diffúz instabilitásra, a lokalizált instabilitásra és a törésre lehet megszerkeszteni. A határgörbe elve a 7. ábrán látható.

Az instabilitási pontokra vonatkozó határgörbét a fentiekben ismertett konstitutív paraméterek és egyenletek ismeretében számítani is lehet (például [4-8]). Ennek nem mond ellent a határgörbék kísérleti felvételének igénye és szükség-szerűsége. A határgörbék léte és a károsodási pontok történetfüggése egyben azt a felismerést is jelenti, hogy a lemezek alakíthatósága egy-két adattal, például a szakadási nyúlással vagy az Erichsen számmal nem jellemezhető, ráadásul ezen utóbbi mennyiségek nem is egyenletbe helyettesíthetőek.

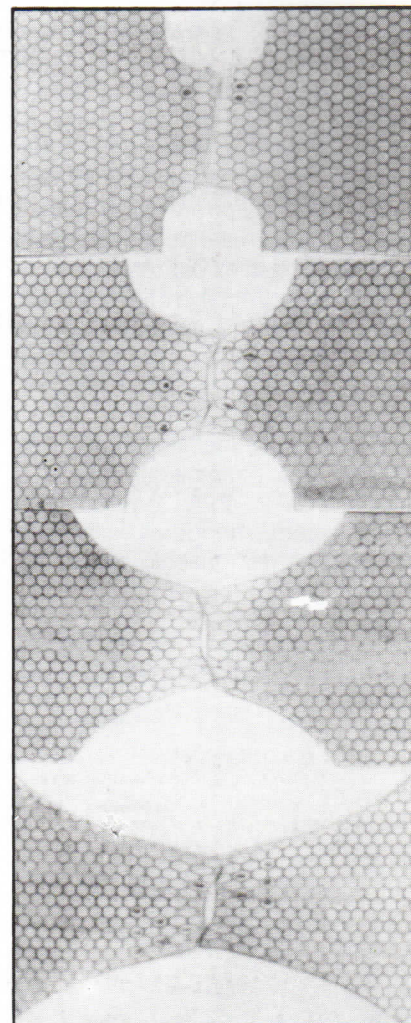
A lemezanyagok alakíthatóságának megítélésére tehát olyan vizsgálati eljárásokra van szükség, amelyek a határgörbe kísérleti felvételét teszik



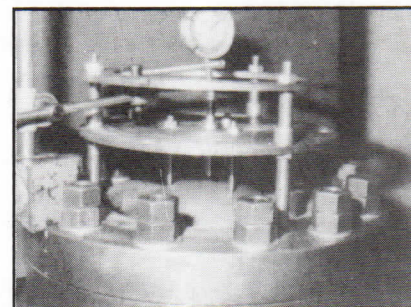
8. ábra

BME MTAI-ban a gyakorlatban jól beváltak.

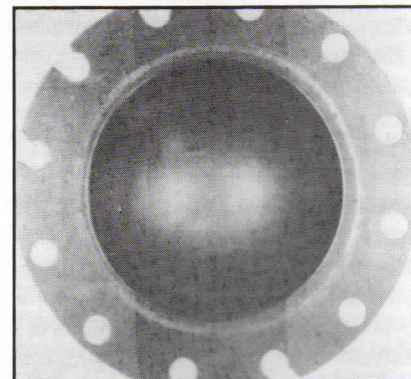
A vizsgálatok közös alapja, hogy a vizsgálandó lemez felületére egy hálózatot kell felvinni. Erre a célra a BME-MTAI-ban egy VASKUT szabadalom alapján készült RASPRINT nyomdagép szolgál. A gyakorlatban a 2,5 mm átmérőjű körökből álló hálózat vált be. Az egyes eljárások abban közösek, hogy különböző deforációs utakat (történeteket) valósíta-



9. ábra



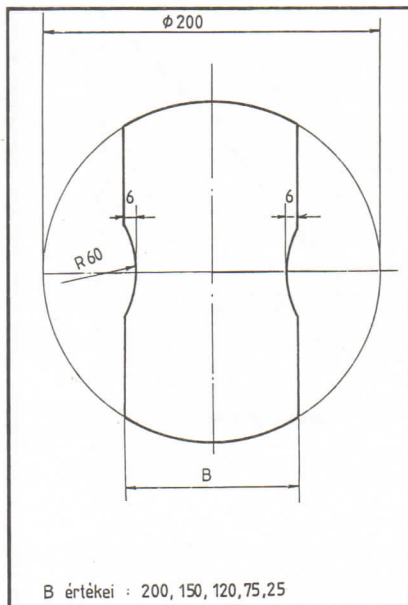
10. ábra



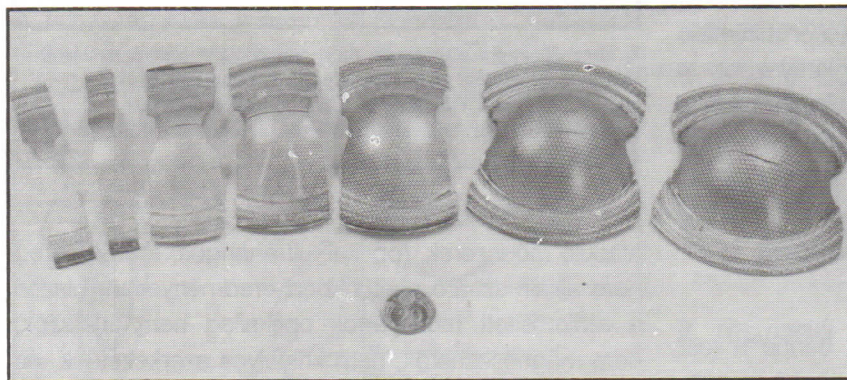
11. ábra



12. ábra



13. ábra



14. ábra

nak meg, melyeket a kör alakú jelek optikai megfigyelésével, és a kör ellipszissé torzulásának számszerűsítésével lehet jellemezni. Az eljárások a különböző deformációs utak létrehozásának módjában, és az értelmezési tartományban térnek el egymástól. Az eljárásokban többnyire az a

közös, hogy a mechanikai terhelést azonos módon valósítják meg, és a deformáció történetek különbözőségét különböző alakú próbatestek alkalmazásával érik el.

A legegyszerűbb módszer a bemetszett szakítópróba alkalmazása. A bevált próbatest alakok a 8. ábrán láthatók. Egy felhálózott és elszakított próbatest fényképe látható a 9. ábrán. Az instabilitási és törési deformációk meghatározásához a deformált ellipszisek b nagy és a kisátmérőjét mérőmikroszkópon kell lemérni, és ezekből számíthatók az $\epsilon_1 = \ln(b/d)$ és $\epsilon_2 = \ln(a/d)$ főalakváltozások. A módszer hátránya, hogy csak a $-1/2 \leq \alpha \leq 0$ tartományban használható. A határgörbe jobboldalára ($0 < \alpha \leq 1$) eső történetek előállítása speciális készülékezést igényel. Az $\alpha = 1$ -nek megfelelő kéten-gyű húzást a hidraulikus buborék-próbával lehet előállítani. A készülék elve a BME-MTAI-ban megépített különlegesen nagy méretű, tehát a vastagabb lemezek vizsgálatára is alkalmas berendezés fényképe a 10. ábrán, míg egy repedésig alakított lemezpróbatess a 11. ábrán látható. A $-1/2 \leq \alpha \leq 1$ tartományt átfogni a Nakazima - próba [9] alkalmazásával lehet. A készülék fényképe a 12., az alkalmazott próbatestek rajza a 13. ábrán láthatók. Egy jellegzetes, deformált próbatestet mutat a 14. ábra. A próba lényegében a nyújtó-hajlítást illetve nyújtó-húzást szimulálja attól függően, hogy az átmérőjéhez viszonyítva milyen széles a próba-

test. A kísérleti eszköz lényegében egy félgömb alakú húzóbéllyegből, és a megfelelő húzóbordákkal ellátott húzógyűrű-ráncgátló együttesből áll. A készülék sajtológépen vagy univerzális szakítógépen egyaránt alkalmazható. A repedés megjelenését szimuláló elméleti modellel számított

határgörbe jó egyezést mutatott a Nakazima próbával elvégzett ellenőrző mérésekkel. A méréseknél egy a BME-MTAI-ban készült olyan továbbfejlesztett Nakazima készüléket használtunk, amely a lemez síkjára merőleges nyomás szuperponálására is alkalmas. Kísérleti eredményeink egyben igazolták a lemezanyagokra vonatkozó azon elvet, miszerint a feszültségi állapotoknak a nyomás irányába való eltolásával a fémes anyagok alakíthatósága növelhető.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fentiekben bemutatott azokat az elméleti és kísérleti módszereket, melyekkel a lemezanyagokat olyan módon lehet minősíteni, hogy a vizsgálatokból nyerhető mérőszámok a technológiai tervezőrendszerekbe közvetlenül, számszerűen behelyettesíthetők, de alkalmasak az egyes anyagok egymással való összehasonlítására is. Egyben bemutattuk azokat a vizsgálati módszereket és eszközöket, melyek az ilyen feladatok megoldására a Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Intézetében rendelkezésre állnak.

911 017 006

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] HILL, R.: The Mathematical Theory of Plasticity. Ch. XII. The Oxford Univ. Press. 1950. p. 317-340.
- [2] HILL, R.: Math. Proc. Cambridge Phil. Soc. 85 (1979) p. 179.
- [3] WATTS, A. B.-FORD, H.: Proc. Inst. Mech. Eng. 169 (1955) p. 1141-1150.
- [4] SWIFT, H. W.: Int. Journ. Mech. Phys. Solids 1 (1952) p. 1-18.
- [5] HILL, R.: Int. Journ. Mech. Phys. Solids 1 (1952) p. 19-30.
- [6] MARCINIAK, Z.-KUCZYNSKI K.: Int. J. Mech. Sci. 9. (1967) p. 609-620.
- [7] ZIAJA GY.: Felületükön nyomott lemezek alakítási határállapotjának meghatározása. in: III. Képlékenyalakítási Szeminárium. Győr. 1985. jún. 12-14. p. 653-670.
- [8] CSUMADIN, A. SZ.-JERSOV, V. I.-ZIAJA GY.: Kuznyecsno Stampovocnoe Proizvodstvo 1990. 9. p. 21-24.
- [9] NAKAZIMA K.-KIKUMA T.-HASUKO K.: Yamata Techn. Rep. No. 264. (1968) p. 517-530.
- [10] BARATA DA ROCHA A.-JALINIER, J. M.: The development of strain gradients in sheet metal forming processes. In: Plastic Instability. Proc. Int. Symp. on Plastic Instability. Paris, 9-13. sept. 1985. p. 35-57.