

**ÓBUDAI EGYETEM**

**Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar**

Anyagtudományi- és Gyártástechnológiai Intézet

**Mélyhúzás lemezanyagai és minősítési módszereik**

Oktatási segédlet.

Összeállította: dr. Horváth László  
főiskolai docens

2009.

## TARTALOMJEGYZÉK

	Oldal
1. Bevezetés .....	3
2. Technológiai vizsgálatok .....	5
2.1. Erichsen - féle mélyítő próba.....	5
2.2. Csészehúzó vizsgálat.....	6
3. Lemezanyag minősítése a szakítóvizsgálattal meghatározott alakváltozási mérőszámok felhasználásával .....	8
3.1. Normális irányú anizotrópia .....	10
3.2. A normális irányú anizotrópia és a mélyhúzhatóság kapcsolata .....	11
3.3. Átlagos normál irányú anizotrópia ( $\bar{r}$ ), vagy Lankford szám .....	12
3.4. Síkbeli anizotrópia ( $\Delta r$ ) .....	13
4. Normálirányú anizotrópia meghatározása a szakítódiagram több pontjának felhasználásával	15
5. Lemezanyag keményedési kitevőjének meghatározása .....	20
6. Lillet diagram.....	23

## 1. Bevezetés

Mélyhúzás közben a ráncgátló alatti perem feszültség- és alakváltozás állapotából következik, hogy a lemez igénybevétele és alakváltozása jelentős mértékű.

A mélyhúzással gyártott alkatrész felhasználási területe meghatározza a lemezanyag tulajdonságait. Az anyagminőség kiválasztásánál az előbbieken kívül figyelembe kell venni a mélyhúzási technológia által támasztott alakíthatósági, gazdaságossági követelményeket is.

Az alakíthatóságot az anyag:

- kémiai tulajdonságai,
- mechanikai tulajdonságai és az
- alkalmazott technológia

együttesen határozza meg.

Mélyhúzással:

- acélból,
- szinesfémekből,
- könnyűfémekből

gyártott finomlemezt, szalagot, illetve az ezekből kivágott terítéket dolgozzák fel.

A lemezek mélyhúzhatóságáról:

- a kémiai összetétel,
- a felületminőség,
- a mechanikai tulajdonságok

csak közvetett úton tájékoztatnak.

A hidegalakításra alkalmas lemeztermékeket és azok tulajdonságait a termékszabványok ismertetik, amelyek összefoglalva a szabványgyűjteményekben található (Könnűfémek: 22. kötet, Szinesfémek: 44. kötet). A szabványok rögzítik a lemez- és szalag-félgártmányok összetételét, méretválasztékát, technológiai sajátosságait (feldolgozhatóságát) és a gyártási hibák megengedett fajtáit és mennyiségét.

A lemeztechnológiákhoz gyakran használt ötvözetlen lágú - vagy szerkezeti acélból melegen, illetve hidegen hengerelt finomlemez anyagminőségeit és általános műszaki előírásait az MSZEN 10130- 2007 szabvány rögzíti.

A lágúacél finomlemezek vegyi összetételét az 1.1 táblázat, mechanikai tulajdonságokat az 1.2 táblázat tartalmazza.

A lemezek mélyhúzással, nyújtvahúzással végzett feldolgozhatóságának közvetlen megítélésére egyrészt a **technológiai vizsgálatok**:

- Erichsen - féle mélyítő próba (MSZ 5704)
- Csészehúzó vizsgálat (MSZ 5731)

másrészt a **sakítóvizsgálat mérési eredményeiből meghatározott mérőszámok** alkalmasak.

1.1 táblázat

Acélminőség		Vegyi összetétel % (maximum)				
jele	száma	C	P	S	Mn	Ti
DC01	1.0330	0,12	0,045	0,045	0,6	
DC03	1.0347	0,1	0,035	0,035	0,45	
DC04	1.0348	0,08	0,03	0,03	0,4	
DC05	1.0312	0,06	0,025	0,025	0,35	
DC06	1.0873	0,02	0,02	0,02	0,25	0,3

1.2 táblázat

Acélminőség		Száll. állapot	Re	Rm	A80	A50	Ar. rövid	HV		r0	r90	n90
jele	száma		MPa	MPa	%	%	%	min	max	min	min	min
DC01	1.0330	A	---	270-390	28	30	32	---	105	---	---	---
		LC	max.280	270-410	28	30	32	---	115	---	---	---
		C290	200-380	290-430	18	20	24	95	125	---	---	---
		C340	min.250	340-490	---	---	---	105	155	---	---	---
		C390	min.310	390-540	---	---	---	117	172	---	---	---
		C440	min.360	440-590	---	---	---	135	185	---	---	---
		C490	min.420	490-640	---	---	---	155	200	---	---	---
		C590	min.520	590-740	---	---	---	185	225	---	---	---
		C690	min.630	min.690	---	---	---	215	---	---	---	---
DC03	1.0347	A	---	270-390	34	36	37	---	100	1,1	1,3	---
		LC	max.240	270-410	34	36	37	---	110	---	---	---
		C290	210-355	290-430	22	24	26	95	117	---	---	---
		C340	min.250	340-490	---	---	---	105	130	---	---	---
		C390	min.310	390-540	---	---	---	117	155	---	---	---
		C440	min.360	440-590	---	---	---	135	172	---	---	---
		C490	min.420	490-640	---	---	---	155	185	---	---	---
		C590	min.520	590-740	---	---	---	185	---	---	---	---
		C690	min.630	min.690	---	---	---	215	---	---	---	---
DC04	1.0348	A	---	270-350	38	40	40	---	95	1,3	1,6	1,8
		LC	max.210	270-350	38	40	40	---	105	---	---	---
		C290	220-325	290-390	24	26	28	95	117	---	---	---
		C340	min.240	340-440	---	---	---	105	130	---	---	---
		C390	min.350	390-490	---	---	---	117	155	---	---	---
		C440	min.400	440-540	---	---	---	135	172	---	---	---
		C490	min.460	490-590	---	---	---	155	185	---	---	---
		C590	min.560	590-690	---	---	---	185	215	---	---	---
		C690	min.630	min.690	---	---	---	215	---	---	---	---
DC05	1.0312	LC	max.180	270-330	40	42	42	---	100	1,6	1,9	0,2
DC06	1.0873	LC	max.180	270-350	38	40	40	---	---	---	1,8	0,22

**Szállítási állapot jele:**

A – lágyított,

LC – dresszírozott,

Cxxx – hidegen utánhengerelt, ahol "xxx" a megnövekedett szakítószilárdság alsó határértéke MPa-ban.

Minimális szakadási nyúlás:

A80 –  $L_o = 80\text{mm}$ ,  $b_o = 20\text{mm}$ A50 –  $L_o = 50\text{mm}$ ,  $b_o = 12,5\text{mm}$ Arányosan rövid:  $L_o = 5,65 \cdot \sqrt{S_o}$ , ahol:  $S_o$  – a próbatest keresztmetszete

HV – Vickers keménység,

$r_0$  – a hengerlési iránnyal  $0^\circ$ -ot bezáró irányból kivett szakító próbatesten mért normálirányú anizotrópia,

$r_{90}$  – a hengerlési iránnyal  $90^\circ$ -ot bezáró irányból kivett szakító próbatesten mért normálirányú anizotrópia,

$n_{90}$  – a hengerlési iránnyal  $90^\circ$ -ot bezáró irányból kivett szakító próbatesten mért keményedési kitevő

A lemezek felületi minősége tekintetében meghatározó a lemezgyártásnál alkalmazott hengerlési eljárás és az utókezelés módja. E szerint megkülönböztetünk melegen hengerelt (szabványos jele: F mivel feketék az így előállított lemezek), melegen hengerelt és pácolt (P) és hidegen hengerelt változatokat.

A felületi minőség szempontjából három kategóriába sorolhatók a lemezek. A legjobb minőségű az "MA" jelű, amelyet fényes, fémesen tiszta felület jellemez. Kisebb hibák és enyhe karcok megengedettek.

Az "MB" jelűnél, 3-as kategóriákban kisebb érdesség, pórusosság, karc, futtatási elszineződés is előfordulhat. A 4-es minőségi osztályban reverteleg is lehet a lemez mindkét oldalán.

## 2. Technológiai vizsgálatok

### 2.1 Erichsen - féle mélyítő próba

A vizsgálattal a lemez szakadásig elviselt nyúlása (nyújthatósága) állapítható meg kéttengelyű húzóigénybevétel mellett. A vizsgálat elvi vázlata az 2.1 ábrán látható.

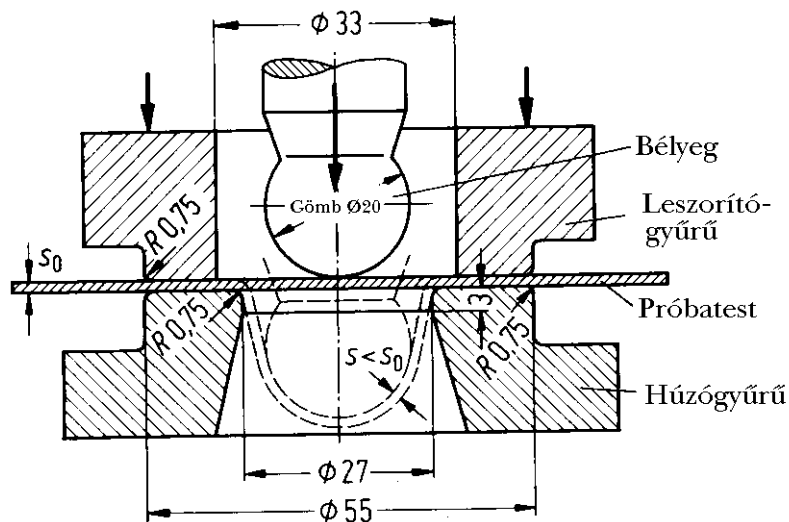
A próbatest mérete:  $70 \times 70$  [mm].

A próbatest vastagsága:  $s = 0,2 \dots 2,0$  [mm].

A bélyeg sebessége:  $5 - 10$  [mm/min].

A próbatestet a ráncgátló elcsúszásmentesen szorítja a matricához. A bélyeg és a lemez között kenést alkalmazva, az első repedés megjelenéséig kell a bélyeggel a mélyítést végezni.

Az Erichsen - féle mélyítési szám (IE) az első repedés megjelenéséig mérhető bélyegmozdulás mm-ben.



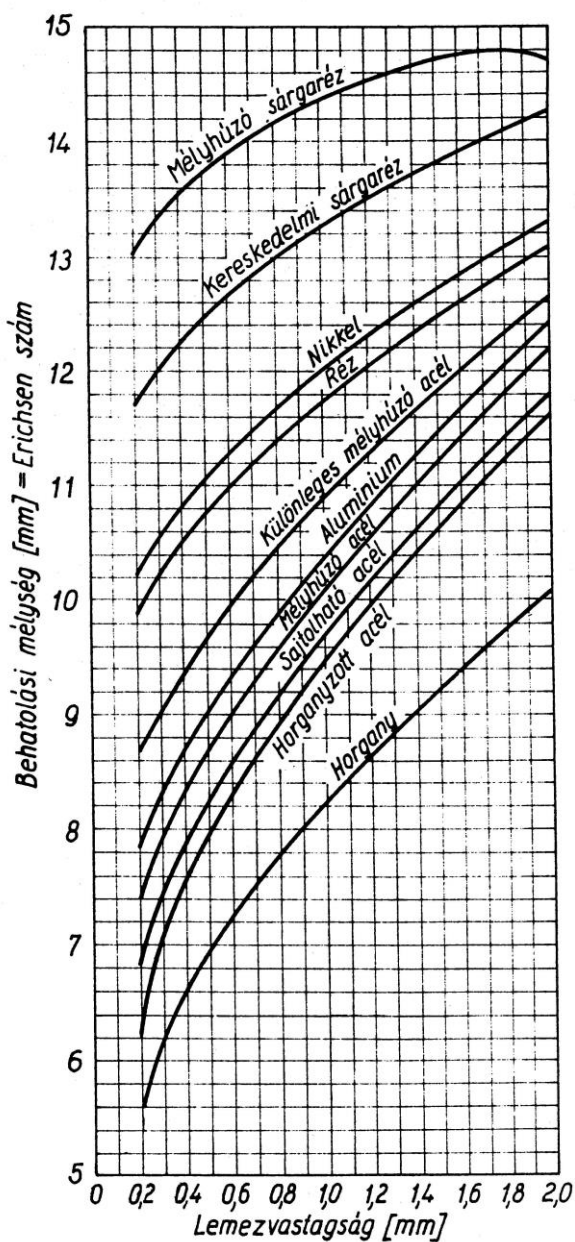
2.1. ábra.

Néhány lágyacél lemez minimálisan megkövetelt IE értékeit tartalmazza az 2.1. táblázat.

2.1 táblázat

Névleges lemezvastagság $s_0$ [mm]	Az acélminőség		
	S	M	K és Ö
0,5	8,8	9,5	9,8
0,8	9,4	10,1	10,4
1,0	9,8	10,5	10,8
1,5	10,5	11,2	11,5
2,0	11,1	11,8	12,1

Különböző anyagminőségek tájékoztató Erichsen számait a lemezvastagság függvényében szemlélteti a 2.2 ábra.



2.2. ábra.

Az Erichsen vizsgálat előnyei:

- az alakváltozott rész felületének minősége jellemző a lemez anyagának szemcsenagyságára (durva szemcsézet esetén a felület narancshéjra emlékeztet).
- a repedés alakja, illetve a repedés környezetében kialakuló kontrakciós vonal jellemző a lemez anizotróp tulajdonságaira.

A vizsgálat hátrányai:

- a vizsgálat végrehajtás és a kiértékelés szubjektív hibái miatt csak nagy szórással jellemzi a lemezanyagot.
- a vizsgálatnál kialakuló feszültség- és alakváltozás állapot eltér a mélyhúzásétól, ezért a mérőszám elsősorban a nyújthatóságot jellemzi, a mélyhúzhatóságot csak közvetetten.

## 2.2 Csészehúzó vizsgálat

A csészehúzó vizsgálat a mélyhúzási folyamatot modellezi, tulajdonképpen kísérleti húzásnak tekinthető. A csészehúzó vizsgálat elvében eltér az Erichsen-féle mélyítővizsgálattól. A Erichsen - vizsgálat és a csészehúzó vizsgálat mérési eredményei között nincs kapcsolat, ezért nem helyettesítik egymást.

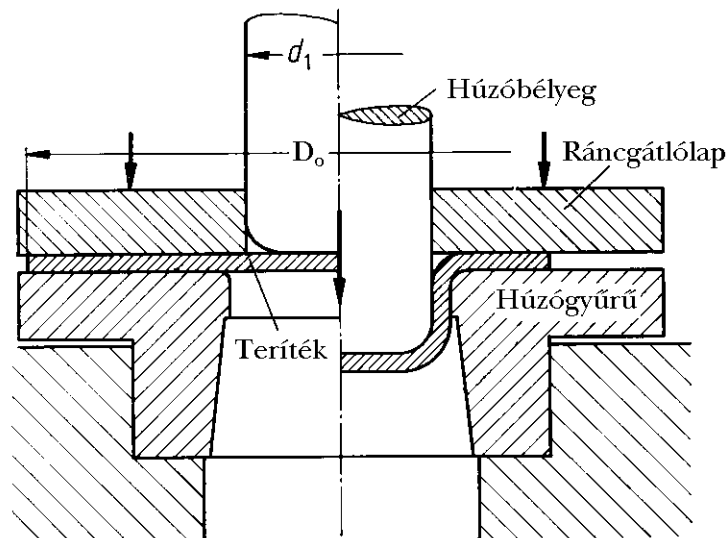
A tapasztalati megfigyelés szerint az a lemezanyag amelynek az IE mérőszáma nagyobb kedvezőbben, tehát kisebb "m" húzási viszonyal húzható. Ebből adódik, hogy az IE

értékek közvetetten jellemzik a mélyhúzhatóságot, vagyis a mérőszám alapján a lemezanyagok mélyhúzhatóság szerinti rangsorolása elvégezhető.

**A vizsgálat elve:** a vizsgálandó lemezből a mintavételi szabvány előírásainak megfelelő helyről kivágott, fokozatosan növekvő  $D_0$  átmérőjű tárcsákat, adott lekerekítés, azonos átmérőjű húzóbélyeggel csészévé húznak. A még szakadás nélkül csészévé húzható tárcsaátmérőt tekintik a mélyhúzhatóság jellemzőjének és  $IG$  - vel jelölik. A kihúzott csészén meghatározható a vizsgált anyag fülesedési hajlama is.

A vizsgálat elvi vázlatát a 2.3 ábra szemlélteti. A húzóbélyeg átmérője:  $d = 33$  [mm].

A szerszámkészlethez három darab húzóbélyeg tartozik egységesen 33 [mm]-es átmérővel, de különböző ( $R_L = 5$  [mm],  $R_A = 12$  [mm],  $R_G = 16,5$  [mm]) lekerekítési sugárral.



Húzási fokozat:  $m_o = d_1 / D_0$

2.3. ábra.

A vizsgálható lemez 0,5 ... 3,0 mm vastagságú lehet.

A szerszámhoz húzógyűrű sorozat tartozik a vizsgálandó lemezvastagságoknak megfelelően. Tehát a lemezvastagság tartomány minden egyes szabványos lemezvastagságához tartozik egy húzógyűrű, amellyel optimális húzórés mellett végezhető el a húzás.

A vizsgálat során  $D_0 = 58$  [mm] terítékátmérőtől indulva 2 [mm]-es lépcsőzéssel  $D_0 = 74$  mm-ig növekvő terítékeket mélyhúznak, kísérletileg meghatározott optimális ráncgátlónyomást és megfelelő kenést alkalmazva.

A vizsgálat eredménye: a még károsodás nélkül kihúzható csésze terítékátmérője, amelyet  $IG_L$ ,  $IG_A$ ,  $IG_G$  -el jelölünk a bélyeg lekerekítési sugarától függően.

A növekvő tárcsaátmérőt húzva azonos átmérőjű húzóbélyeggel, a húzási viszonyszám értéke egyre kisebb lesz. Természetesen egy lemez mélyhúzhatósága annál jobbnak tekinthető – azonos húzási körülmények között – minél kisebb húzási viszonytal húzható ki.

A  $D_0 = 58$  [mm]-es teríték húzásakor a húzási viszony (az egyszerűség érdekében itt a húzási viszonyt nem a csésze meridiánmetszetéhez tartozó középtátmérővel, hanem a bélyegátmérővel határozzuk meg):

$$m_{o(1)} = \frac{33}{58} = 0,57$$

a  $D_O = 60$  [mm]-es teríték húzásakor:

$$m_{o(2)} = \frac{33}{60} = 0,55$$

a  $D_O = 62$  [mm]-es teríték húzásakor:

$$m_{o(3)} = \frac{33}{62} = 0,532$$

végül a  $D_O = 74$  [mm]-es teríték húzásakor:

$$m_{o(n)} = \frac{33}{74} = 0,45$$

Az  $m_{o(i)}$  csökkenő értékeihez egyre jobb mélyhúzhatóság tartozik.

A csészehúzó vizsgálat a lemezanyag mélyhúzhatóságát azzal a  $D_O$  terítékátmérővel (és  $R_b$  lekerekítési sugárral) jellemzi amelyik még károsodás nélkül csészévé húzható.

A lemez mélyhúzhatósága annál kedvezőbb minél nagyobb terítékátmérő (max:  $D_O = 74$  mm) húzható ki minél kisebb lekerekítési sugarú ( $R_{\min} = R_L = 5$  mm) bélyeggel. Például az  $IG_A = 68$  azt jelenti, hogy a 12 mm lekerekítési sugarú húzóbélyeggel a  $D_O = 68$  mm átmérőjű tárcsa még sérülés nélkül kihúzható, a  $D_O = 70$  mm átmérőjű viszont már nem.

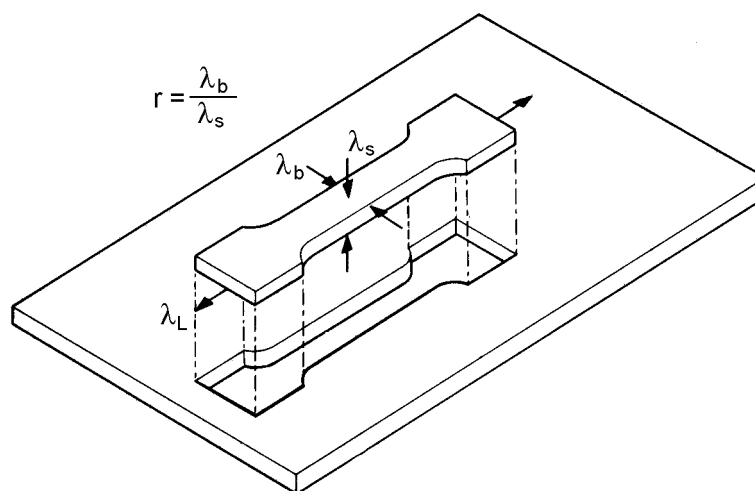
Az  $IG_L = 68$  mélyhúzhatósági számmal rendelkező lemez mélyhúzhatósága jobb, mert a  $D_O = 68$  mm átmérőjű tárcsa  $R_L = 5$  mm lekerekítési sugarú bélyeggel is hiba nélkül kihúzható.



### 3. Lemezanyagok minősítése a szakítóvizsgálattal meghatározott alakváltozási mérőszámok felhasználásával

A lemez alkalmassága a mélyhúzással vagy nyújtóhúzással való feldolgozásra pontosan jellemezhető, –ami ennél is fontosabb, hogy számszerűsíthető– a normális irányú anizotrópia ( $r$ ) mérőszámával.

Meghatározása a lemezből kivett szakító próbatest (3.1 ábra.) kiinduló méreteivel, illetve az egyenletes nyúlástartomány valamely pontjáig képlékenyen alakváltozott próbatest méreteivel történik.



3.1. ábra.

Lemez és szalagok szakítóvizsgálatához a próbatest kiinduló alakját a 3.2/a, az egyenletes nyúlástartományban a kiinduló  $L_0$  jeltávolság  $\Delta L$  növekményét a 3.2/b, a  $\Delta L$  megnyúláshoz tartozó próbatest méreteket a 3.2/c ábra szemlélteti.

Az egyenletes nyúlástartományában a próbatest jeltávolságon belüli méreteire érvényesek a következő relációk:  $s < s_0$ ,  $b < b_0$ ,  $L > L_0$

A 3.2 ábra jelölései:

$L_0$  - a kezdeti jeltávolság,

$L_C$  - a vizsgálati hossz,

$b_0$  - a kezdeti szélessége,

$s_0$  - a kezdeti lemezvastagság,

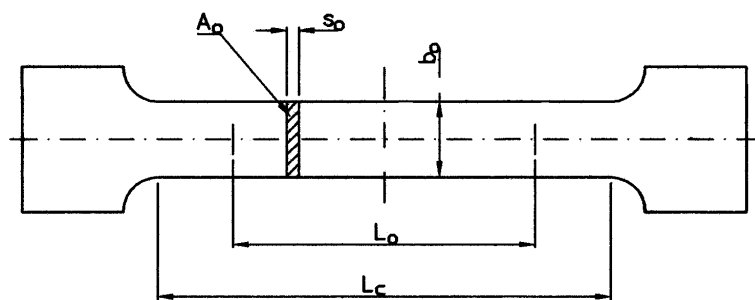
$A_0$  - a kiinduló keresztmetszet ( $A_0 = b_0 \cdot s_0$ ),

$L$  - a próbatest jeltávolsága a  $\Delta L$  megnyúlásnál ( $L = L_0 + \Delta L$ ),

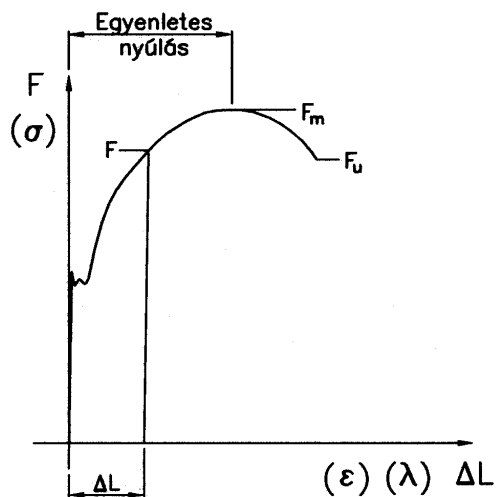
$b$  - a  $\Delta L$  megnyúláshoz tartozó próbatest szélesség,

$s$  - a  $\Delta L$  megnyúláshoz tartozó lemezvastagság,

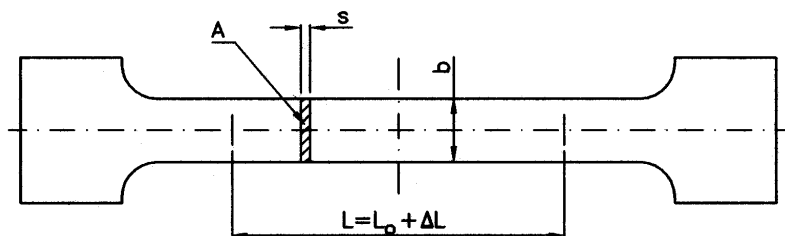
$A$  - a  $\Delta L$  megnyúláshoz tartozó próbatest keresztmetszet ( $A = b \cdot s$ )



a,



b,



$L > L_0$     $b < b_0$     $s < s_0$     $A < A_0$

c,

3.2. ábra.

A vizsgálathoz felhasználható szakítópróbatest javasolt méreteit a 3.1 táblázat tartalmazza.

3.1. táblázat.

A próbatest szélessége b [mm]	A próbatest szélességi tűrése [mm]		A próbatest kezdeti jeltávolsága $L_0$ [mm]	A vizsgálati szakasz hossza $L_c$ [mm]	A lemez vastagság tűrése a [mm]
	normál	szigorított			
12,5	±1	±0,09	50±0,5	75±5	±0,04
20	±1	±0,1	80±0,8	120±10	±0,05

### 3.1 Normális irányú anizotrópia

A **normális irányú anizotrópia**: a  $\Delta L$  megnyúlást szenvedett szakító próbatest szélességi és vastagsági irányában létrejött valódi nyúlások hányadosa:

$$r = \frac{\lambda_b}{\lambda_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_o}}{\ln \frac{s}{s_o}}$$

ahol:  $\lambda_b$  - a próbatest szélességi irányában létrejövő valódi nyúlás a  $\Delta L$  megnyúlásnál,  
 $\lambda_s$  - a próbatest vastagsági irányában létrejövő valódi nyúlás a  $\Delta L$  megnyúlásnál,

A szakítóvizsgálat során az "s" lemezvastagság helyett –méréstechnikai okokból– célszerűbb a próbatest "b" szélességét mérni és az "s" értékét a jeltávolságon belüli térfogatrészre felírt térfogatállandóságból meghatározni:

$$b_o \cdot s_o \cdot L_o = b \cdot s \cdot L$$

amelyből:

$$\frac{s}{s_o} = \frac{b_o \cdot L_o}{b \cdot L}$$

Az utóbbi összefüggést felhasználva a normális irányú anizotrópia tehát:

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_o}}{\ln \frac{b_o \cdot L_o}{b \cdot L}}$$

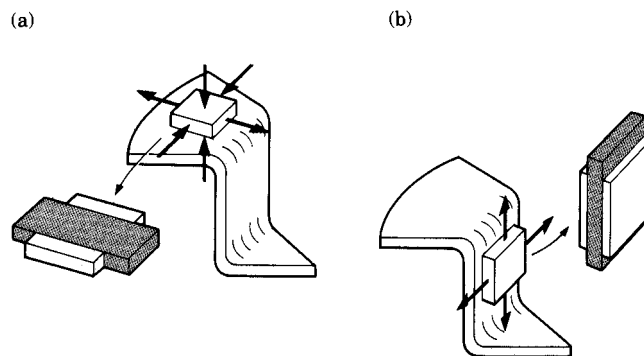
alakban is kifejezhető.

A gyakorlatban a szakítóvizsgálat során a kb. 20% maradó megnyúlásnál ( $L \approx 1,2 \cdot L_o$ ) a szakítási folyamatot megállítjuk, az "L" és "b" értékeket megmérjük és ezekkel határozzuk meg a fenti összefüggéssel az "r" normális irányú anizotrópiát.

### 3.2 A normális irányú anizotrópia és a mélyhúzhatóság kapcsolata

A lemez jó mélyhúzhatóságához az szükséges, hogy vastagság irányban ("s" irány) kevésbé, szélesség irányban ("b" irány) könnyen változtassa méretét a szakító próbatest az egyenletes nyúlás tartományban.

Az állítás a mélyhúzás közben alakváltozó, félig kihúzott csésze jellegzetes helyein (ráncgátló alatti perem és a már kihúzott csészefal) alakváltozási állapotával igazolható (3.3. ábra).



3.3. ábra.

A peremben kijelölt térfogatelem alakváltozását szemlélteti az 3.3/a ábra, amely szerint radiális irányban jelentős mértékű nyúlás, kerület irányban rövidülés jön létre, ugyanakkor a lemeztvastagság irányban alig van méretváltozás.

A kihúzott csészepalástban (3.3/b ábra) kijelölt térfogatelem elsősorban a húzóbéllyeg mozgásirányában nyúlik, kerület irányban a mérete változatlan, lemeztvastagság irányban rövidülés jön létre.

A térfogatelemek helyére képzeljük el a peremben egy radiális irányban, a csészefalban egy húzás irányban elhelyezett szakító próbatestet. A peremben a kerület irányú rövidülés a próbatest "b" irányú méretváltozásának felel meg. Tehát ha a próbatest "b" irányban könnyen változtatja a méretét, akkor a perem kerület irányú rövidülése viszonylag kis húzóerővel létrehozható. Ugyanakkor ha a lemeztvastagság irányú változásra ("s" irány) a próbatest nem hajlamos, akkor a lemez a be nem húzott peremrészben nem vékonyodik el.

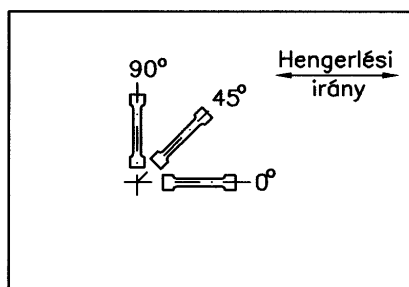
Továbbá, ha a lemeztvastagság nem, vagy csak alig csökken a szakítóvizsgálat során, akkor a mélyhúzás körülményei között az alakítóerőt az alakítás helyére (a be nem húzott peremrészbe) továbbító palást falvastagsága, így a csészefal keresztmetszete sem csökken jelentős mértékben, s ez a csészefal leszakadás elleni biztonságát növeli.

A kis széntartalmú lágyacéllemez első közelítésben akkor rendelkezik jó mélyhúzóhatósággal, ha normális irányú anizotrópiája  $r > 1$ , vagy másképpen:

$$\frac{s_o}{s} \leq \frac{b_o}{b}$$

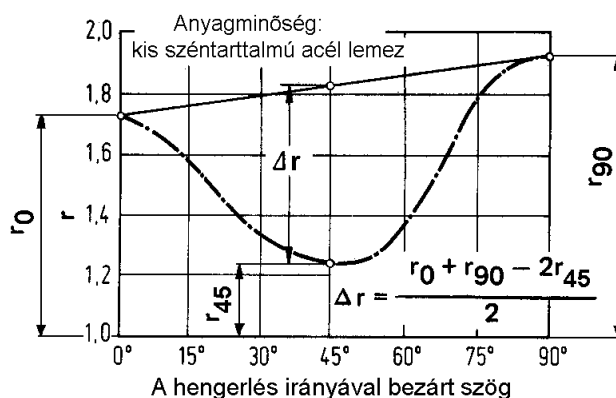
Azért első közelítésben mert a hengerléssel előállított lemez normál irányú anizotrópiája irányfüggő. Ugyanazon lemeztáblából a hengerlési iránnyal megegyező ( $0^\circ$ ),  $45^\circ$ -ot és  $90^\circ$ -ot bezáró irányból kivett szakítópróbatesteken egymástól eltérő értékű  $r_0$ ,  $r_{45}$  és  $r_{90}$  normál anizotrópia értékeket határozzunk meg.

A próbatestek hengerlési irányhoz viszonyított kivételi irányait a 3.4 ábra szemlélteti.



3.4. ábra.

Kis széntartalmú csillapított lágyacéllemez normálirányú anizotrópiájának változását a hengerlési iránnyal bezárt szög függvényében a 3.5 ábra szemlélteti.



3.5. ábra.

### 3.3 Átlagos normál irányú anizotrópia ( $\bar{r}$ ), vagy Lankford szám

A normál irányú anizotrópiánál megbízhatóbban jellemzi a mélyhúzhatóságot a Lankford szám, amely:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2 \cdot r_{45}}{4}$$

összefüggéssel számítható.

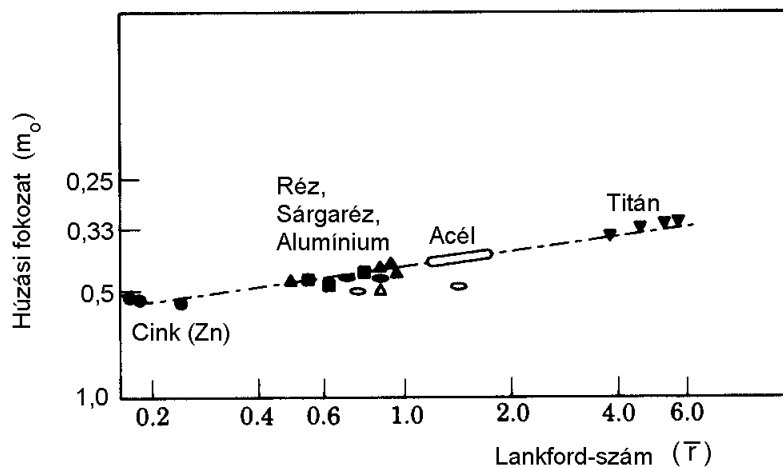
Tájékoztató adatokat közöl különböző anyagminőségű lemezek Lankford-számáról (átlagos normálirányú anizotrópiájáról), keményedési- és sebességkitevőkről a 3.2 táblázat.

Lágyacél lemezek jó mélyhúzhatóságához az  $r > 1,1$  feltétel teljesülése szükséges, ami biztonsággal akkor valósul meg, ha valamennyi irányban ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) mért normálirányú anizotrópia értéke egy felett van.

3.2 táblázat

A lemez anyagminősége	Lankford-szám $\bar{r}$	Keményedési kitevő $n$	Sebesség kitevő $m$
Horgany ötvözet	0,4 – 0,6	0,05 – 0,15	0,05 – 0,08
Melegen hengerelt acéllemez	0,8 - 1,0	0,23 – 0,28	0,01 – 0,015
Hidegen hengerelt, csillapítatlan acéllemez	1,0 - 1,4	0,2 – 0,25	0,01 – 0,015
Hidegen hengerelt, alumíniummal csillapított acéllemez	1,4 - 1,8	0,22 – 0,26	0,015
HSLA acél	0,9 – 1,2	0,1 – 0,18	0,005 – 0,01
Ferrites korrózióálló acél	1,0 - 1,2	0,16 - 0,23	0,01 – 0,015
Ausztenites korrózióálló acél	0,9 - 1,0	0,4 – 0,55	0,01 – 0,015
Alumínium és ötvözetek	0,6 - 0,8	0,2 – 0,3	-0,005 - +0,005
Réz	0,6 – 0,9	0,35 – 0,5	0,005
Sárgaréz (70 – 30)	0,8 – 0,9	0,45 – 0,6	0,0 – 0,005
$\alpha$ titán ötvözet	3 - 5	0,05	0,01 – 0,02

A Lankford-szám és az ( $m_0$ ) húzási fokozat kapcsolatát a 3.6. ábra szemlélteti.



3.6. ábra.

A diagram szerint a lemez Lankford-számának növekedésével  $m_0$  értéke csökken, tehát azonos kiinduló  $D_0$  tárcsaátmérőből kisebb  $d_1$  középátmérőjű csésze húzható az első húzás során.

### 3.4 Síkbeli anizotrópia ( $\Delta r$ )

A síkbeli anizotrópia mérőszáma a normálirányú anizotrópia mérőszámainak felhasználásával az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0 + r_{90} - 2 \cdot r_{45})$$

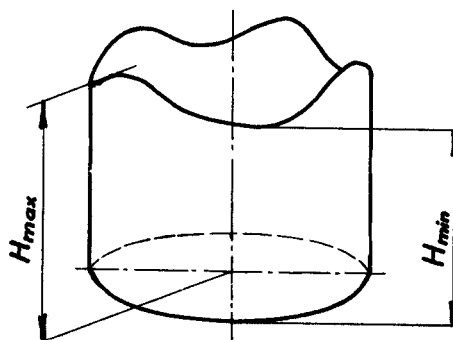
A lemez fülesedési hajlama szoros kapcsolatban van a síkbeli anizotrópiával.

A fülesedett csésze elvi vázlatát szemlélteti a 3.7 ábra.

A fülesedés mértékének számszerű jellemzése a 3.7 ábra jelöléseivel a:

$$f = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{min}}$$

összefüggéssel történhet.



3.7. ábra.

$\Delta r \approx 0$  esetén "f" értéke kicsi, vagyis a fülesedés elhanyagolható mértékű. Kedvezőtlen esetben  $f \approx 0,1 \dots 0,15$  értéket is elérheti.

A teljesen izotróp anyagot elméletileg az  $\bar{r} = 1$  Lankford-szám és  $\Delta r = 0$  síkbeli anizotrópia mérőszám jellemzi.

Az előbbiekből következik, hogy a mélyhúzással feldolgozandó lemezanyagok mélyhúzhatóságának megítélésakor, a Lankford-szám mellett fontos a síkbeli anizotrópia ismerete is.

A mélyhúzó lemezeket korszerű, folyamatos hengerlést végző hengerművekben, gyakorlatilag csak egy irányban alakítják (hengerlik).

Ennek következménye, hogy a pollikrisztallin szemcsézetű fém csúszósíkjai az állandó azonos irányú alakítás miatt közel a hengerlés irányába állnak be. Lágyítás után az újrakristályosodott szövetben ez az egyirányú beállítottság nem tűnik el nyomtalanul, sőt a továbbhengerlés műveletei során halmozódik.

Ennek az lesz az eredménye, hogy a lemez mechanikai tulajdonságai az utolsó hengerlési művelet után végzett újrakristályosító hőkezelést követően nem lesznek függetlenek a hengerlési iránnyal bezárt szögtől.

Forgásszimmetrikus csészék mélyhúzásakor a mélyhúzás körszimmetrikus igénybevételt jelent, ugyanakkor a lemez mechanikai tulajdonságai irányfüggőek. Ennek következménye a fülesedés.

A fülesedett anyagrészt a kihúzott csészéről le kell vágni, ami külön műveletet igényel és anyagveszteséggel jár, ezért káros jelenség.

Fülesedésre nem hajlamos lemezt a folyamatos hengerléssel, az úgynevezett szalagszerű technikával nem lehet gyártani. Ehhez külön lemezenként, több irányban végzett váltakozó irányú hengerlésre volna szükség, amely kevésbé termelékeny, ezért drága technológia.

A lemez mélyhúzhatóságának megítélésakor nem hagyható figyelmen kívül az anyagának szemcsenyagysága és salakosságának mértéke, illetve eloszlása sem. A durva szemcseszerkezetű ( $d > 90 \mu\text{m}$ , ahol "d" az átlagos szemcseátmérő) anyag rosszul mélyhúzható, könnyen szakad. A túl finom szemcseszerkezet ( $d < 20 \mu\text{m}$ ) feleslegesen nagy alakítási szilárdságú, ezért túl nagy húzóerővel alakítható.

A salakeloszlás sűrűsége és eloszlása nem lépheti át az 1-es fokozatot.

Néhány lemezanyagra a Lankford-szám, a keményedési kitevő és a sebesség-kitevő tájékoztató értékeit szemlélteti a 3.4.1 táblázat.

3.4.1 táblázat

Anyagminőség	Lankford szám $\bar{r}$	Keményedési kitevő n	Sebesség kitevő m
Alacsony karbontartalmú acél (csillapítatlan)	1.0 - 1.4	0.20 - 0.25	0.010 - 0.015
Alacsony karbontartalmú acél (csillapított)	1.4 - 1.8	0.22 - 0.26	0.015
HSLA acél	0.9 - 1.2	0.10 - 0.18	0.005 - 0.010
Ferrites korrózióálló acél	1.0 - 1.2	0.16 - 0.23	0.010 - 0.015
Ausztenites korrózióálló acél	0.9 - 1.0	0.40 - 0.55	0.010 - 0.015
Réz	0.6 - 0.9	0.35 - 0.50	0.005
Sárgaréz	0.8 - 0.9	0.45 - 0.60	0.000 - 0.005
Alumínium ötvözet	0.6 - 0.8	0.20 - 0.30	-0.005 - 0.005
Horgany ötvözet	0.4 - 0.6	0.05 - 0.15	0.050 - 0.080
$\alpha$ titán ötvözet	3.0 - 5.0	0.05	0.010 - 0.020

Megjegyzés: HSLA acélok (**H**igh **S**trength **L**ow **A**lloy). Alacsony ötvözésű nagyszilárdságú acélok. A kis karbontartalmat a karbidképzők (V, Zr, Ti, Mn, Cr, Mo, W) megkötik, így a szövetszerkezet kvázi vaskarbid mentes (perlitmentes). Az ilyen összetételű acélt szabályozott alacsony hőmérsékleten hengerelve, a szemcseszerkezet aprószemcsés lesz. Az esetleges minimális karbid mennyiség finom diszperz eloszlásban van jelen a szövetben.

#### 4. Normálirányú anizotrópia meghatározása a szakítódiagram több pontjának felhasználásával

A normálirányú anizotrópia meghatározását a 3.1 pont ismereteti, amely a szakítópróbatest egyenletes nyúlástartományában létrehozott kb. 20% maradó megnyúlásnál mért próbatest méretek felhasználásával történhet, a már megismert alapösszefüggéssel:

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_o}}{\ln \frac{b_o \cdot L}{b \cdot L_o}}$$

Megbízhatóbb "r" értéket kapunk, ha nem egyetlen "L" és "b" értékpár felhasználásával végezzük a meghatározását, hanem a szakítópróbatest egyenletes nyúlástartományában több ponthoz tartozóan megmérjük az összetartozó "L" és "b" értékeket, s ezekből számítjuk "r" értékét.

A több pont figyelembevételén alapuló módszer az alábbi gondolatmenet felhasználásával felírt összefüggéseket használja.

A fenti alapösszefüggést átalakítva az alábbi alakra rendezzük:

$$r = - \frac{\ln \frac{b_o}{b}}{\ln \frac{b_o}{b} + \ln \frac{L_o}{L}} = - \frac{\ln \frac{b_o}{b}}{\ln \frac{b_o}{b} - \ln \frac{L}{L_o}} = \frac{\ln \frac{b_o}{b}}{\ln \frac{L}{L_o} - \ln \frac{b_o}{b}} = \frac{1}{\frac{\ln \frac{L}{L_o}}{\ln \frac{b_o}{b}} - 1}$$

Mindkét oldal reciprokát képezve és rendezve:

$$\ln \frac{b_o}{b} = \frac{r}{1+r} \cdot \ln \frac{L}{L_o}$$

alakhoz jutunk.

Bevezetve az

$$M = \frac{r}{1+r}$$

jelölést és "L" értékét

$$L = L_o + \Delta L$$

alakban felírva, majd helyettesítve

$$\ln \frac{b_o}{b} = M \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_o} \right)$$

alakhoz jutunk, amelyből rendezés után

$$\frac{b_o}{b} = \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_o} \right)^M$$

összefüggést kapjuk, amelyet

$$y = (1+x)^M$$



alaknak tekintve, ahol:

$$y = \frac{b_o}{b}$$

és

$$x = \frac{\Delta L}{L_o}$$

Sorbafejtés után az első két tagot megtartva:

$$y \approx 1 + M \cdot x$$

Az "y" és "x" értékeket visszahelyettesítve, kapjuk:

$$\frac{b_o}{b} = 1 + M \cdot \frac{\Delta L}{L_o}$$

Az egyes próbatesteken mért  $b_o/b$  és  $\Delta L/L_o$  értékeket a  $b_o/b - \Delta L/L_o$  koordináta rendszerben ábrázolva egy pontsort kapunk (4.1 ábra).

A pontsorra a legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztve, annak "M" iránytangense meghatározható. A 4.1 ábra folytonos vonallal ábrázolva az illesztett egyenest is feltünteteti, amely a függőleges tengelyt az  $b_o/b = 1$  pontban metszi.

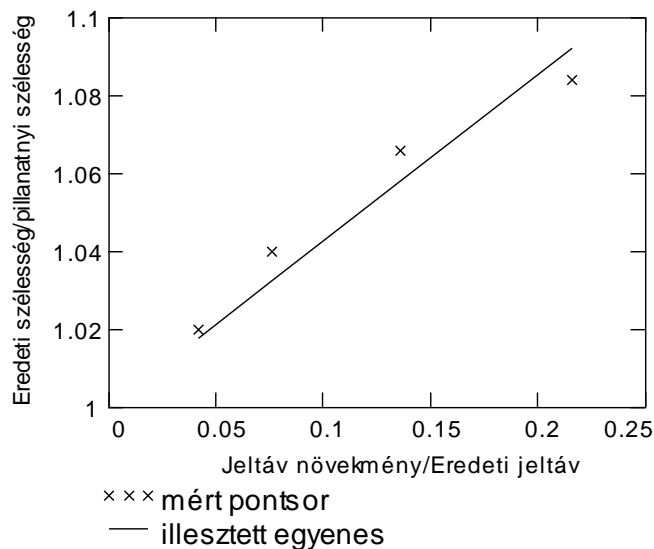
Az "M" ismeretében az

$$M = \frac{r}{1 + r}$$

összefüggést "r"-re rendezve:

$$r = \frac{M}{1 - M}$$

kapjuk a normál irányú anizotrópia értékét.



4.1.ábra.

Az összefüggések elvi tisztázása után rátérünk a mérési adatok jelöléstechnikájára és a feldolgozáshoz felhasznált összefüggések összefoglalására.

Tekintve, hogy a vizsgált lemezből 0°-os, 45°-os és 90°-os irányból kell próbatesteket kivenni, a próbatestek sorszámát jelölje a "j" indexváltozó, amelynek értelmezési tartománya j = 1, 2, 3.

A 0°-os irányból kivett próbatestet j = 1, a 45°-os irányból kivett próbatestet j = 2 és a 90°-os irányból kivett próbatestet j = 3-as érték jelölje.

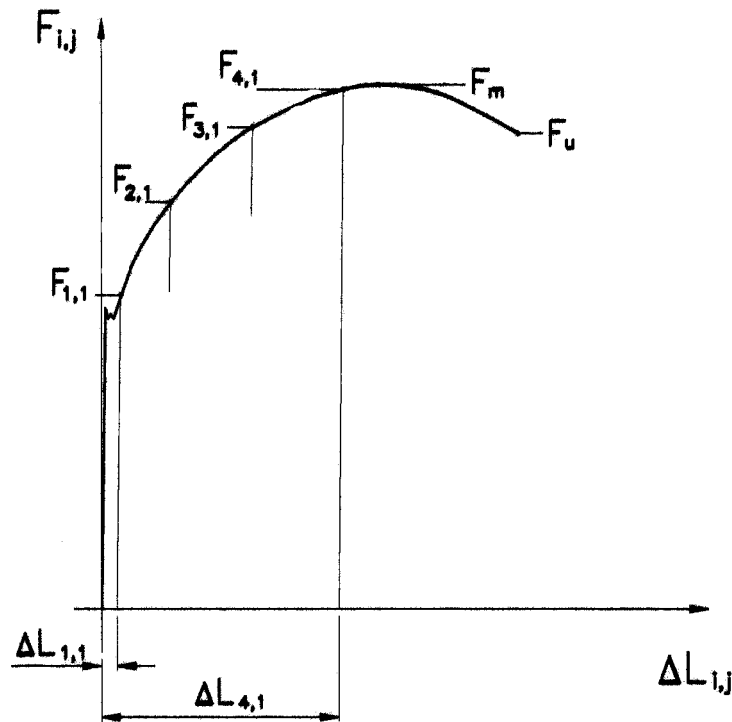
Az egyenletes nyúlástartományban végzett mérések sorszámát az "i" indexváltozó jelölje. A felvett pontok száma legalább négy legyen. Ekkor i = 1, 2, 3, 4 értékeket veheti fel.

A 4.2 ábra a 0°-os irányból kivett szakítópróbatétel elvi szakítódigramját szemlélteti és feltünteti az egyenletes nyúlástartomány négy pontját amelyekhez tartozó próbatest méreteket rögzítettük.

Ezzel a jelöléstechnikával a bemenő adatokat egy-egy mátrixba foglalhatjuk össze, ahol a mátrix első oszlopa a 0°-os irányból kivett próbatétel mért i = 1 ... 4 - ig terjedő mért adatokat tartalmazza. A második oszlop a 45°-os, a harmadik oszlop pedig a 90°-os irányból kivett próbatesteken mért értékek oszlopvektorai.

A nyúlásnövekmények mátrixa:

$$\Delta L = \begin{bmatrix} \Delta L_{1,1} & \Delta L_{1,2} & \Delta L_{1,3} \\ \Delta L_{2,1} & \Delta L_{2,2} & \Delta L_{2,3} \\ \Delta L_{3,1} & \Delta L_{3,2} & \Delta L_{3,3} \\ \Delta L_{4,1} & \Delta L_{4,2} & \Delta L_{4,3} \end{bmatrix} \quad [\text{mm}]$$



4.2. ábra.

A pillanatnyi próbatest szélességek mátrixa:

$$b = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & b_{2,3} \\ b_{3,1} & b_{3,2} & b_{3,3} \\ b_{4,1} & b_{4,2} & b_{4,3} \end{bmatrix} \quad [\text{mm}]$$

Jelölje  $X_{i,j}$  a nyúlásnövekmények és az eredeti jeltávolság hányadosát:

$$X = \frac{\Delta L_{i,j}}{L_0}$$

valamint  $Y_{i,j}$  az eredeti próbatest szélesség és a pillanatnyi próbatest szélesség viszonyát:

$$Y = \frac{b_0}{b_{i,j}}$$

A  $j$ -ik próbatest összetartozó  $Y_{i,j}$  és  $X_{i,j}$  pontjaira a legkisebb négyzetek módszerével illesztett:

$$Y_{i,j} = 1 + M_j \cdot X_{i,j}$$

alakú egyenes  $M_j$  iránytangensének meghatározását az alábbi összefüggéssel végezzük:

$$M_j = \frac{\sum_i X_{i,j} \cdot Y_{i,j} - \sum_i X_{i,j}}{\sum_i (X_{i,j})^2}$$

A normális irányú anizotrópiát  $0^\circ$ -os,  $45^\circ$ -os és  $90^\circ$ -os irányban az alábbi összefüggéssel számítjuk:

$$r_j = \frac{M_j}{1 - M_j}$$

A lemezanyag Lankford-számát a:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2 \cdot r_{45}}{4} = \frac{r_1 + r_3 + 2 \cdot r_2}{4}$$

a síkbeli anizotrópiáját:

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0 + r_{90} - 2 \cdot r_{45}) = \frac{1}{2} \cdot (r_1 + r_3 - 2 \cdot r_2)$$

összefüggésekkel határozzuk meg.

## 5. Lemezanyag keményedési kitevőjének meghatározása

A normális irányú anizotrópia meghatározásához végzett szakítóvizsgálat regisztrátumának felhasználásával a lemezanyag keményedési kitevője is számítható.

Az egyenletes nyúlástartomány (4.2 ábra) pontjaira érvényes a

$$F_{i,j} = k_{f,i,j} \cdot A_{i,j}$$

összefüggés, ahol:

$F_{i,j}$  – a j-ik próbatest i-ik terhelési pontjához tartozó húzóerő,

$k_{f,i,j}$  – a j-ik próbatest i-ik terhelési pontjához tartozó alakítási szilárdság,

$A_{i,j}$  – a j-ik próbatest i-ik terhelési pontjához tartozó keresztmetszet ( $A_{i,j} = b_{i,j} \cdot s_{i,j}$ )

$A_{i,j}$  értéke kifejezhető a jeltávolságon belüli térfogatrészre felírt térfogatállandóság felhasználásával:

$$L_o \cdot b_o \cdot s_o = L_{i,j} \cdot b_{i,j} \cdot s_{i,j} = L_{i,j} \cdot A_{i,j}$$

amelyből:

$$A_{i,j} = \frac{L_o \cdot b_o \cdot s_o}{L_{i,j}}$$

Az alakítási szilárdságot az egyszerű hatványfüggvénnyel felírva:

$$k_{f,i,j} = c_j \cdot \lambda_{\ddot{o},i,j}^{n_j}$$

ahol:

$\lambda_{\ddot{o},i,j}$  – a j-ik próbatest i-ik terhelési pontjához tartozó összehasonlító alakváltozás,

$n_j$  – a j-ik próbatesttel meghatározott keményedési kitevő,

$c_j$  – a j-ik próbatesttel meghatározott keményedési együttható.

Az összehasonlító alakváltozás előállításához elégséges a próbatest két főirányához tartozó valódi nyúlás értékeket meghatározni (pl. "L" és "b" irányút).

A j-ik próbatest valódi nyúlása az i-ik pontban, "L" irányban:

$$\lambda_{L,i,j} = \ln \frac{L_{i,j}}{L_o}$$

ahol:

$$L_{i,j} = L_o + \Delta L_{i,j}$$

A j-ik próbatest valódi nyúlása az i-ik pontban, "b" irányban:

$$\lambda_{b,i,j} = \ln \frac{b_{i,j}}{b_o}$$

A j-ik próbatest összehasonlító alakváltozása az i-ik pontban:

$$\lambda_{\ddot{o},i,j} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\lambda_{L,i,j}^2 + \lambda_{b,i,j}^2 + \lambda_{L,i,j} \cdot \lambda_{b,i,j}}$$

A  $c_j$  és  $n_j$  meghatározásához elég a szakítódiagram két pontjára felírni az  $F_{i,j}$  értékét. A két pont kiválasztásánál lehetőleg egymástól távoli pontokat célszerű kijelölni, például az  $i = 1$  és  $i = 4$  sorszámút.

A két pontja írható:

$$F_{1,j} = c_j \cdot \lambda_{\ddot{o},1,j}^n \cdot A_{1,j} = c_j \cdot \lambda_{\ddot{o},1,j}^n \cdot \frac{L_o \cdot b_o \cdot s_o}{L_{1,j}}$$

$$F_{4,j} = c_j \cdot \lambda_{\ddot{o},4,j}^n \cdot A_{4,j} = c_j \cdot \lambda_{\ddot{o},4,j}^n \cdot \frac{L_o \cdot b_o \cdot s_o}{L_{4,j}}$$

A második egyenletet az elsővel elosztva:

$$\frac{F_{4,j}}{F_{1,j}} = \frac{\lambda_{\ddot{o},4,j}^n}{\lambda_{\ddot{o},1,j}^n} \cdot \frac{L_{1,j}}{L_{4,j}}$$

rendezés után  $n_j$ -re kapjuk:

$$n_j = \frac{\ln\left(\frac{F_{4,j}}{F_{1,j}} \cdot \frac{L_{4,j}}{L_{1,j}}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_{\ddot{o},4,j}}{\lambda_{\ddot{o},1,j}}\right)}$$

Az egyes pontokhoz tartozó  $\Delta L_{i,j}$  és  $b_{i,j}$  értékek megmérése előtt a szakítási folyamatot meg kell állítani és a leterhelés előtt a pillanatnyi terhelőerőt fel kell jegyezni. A terhelőerők mátrixa a számításhoz rendelkezésre áll:

$$F = \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & F_{1,3} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & F_{2,3} \\ F_{3,1} & F_{3,2} & F_{3,3} \\ F_{4,1} & F_{4,2} & F_{4,3} \end{bmatrix}$$

amelyből a megfelelő terhelőerő a számításhoz kivehető (pl. az  $F_{4,j}$  a j-ik próbatest szakítódiagramján az  $i = 4$ -ik sorszámú ponthoz tartozó terhelőerőt jelöli).

A  $c_j$  meghatározásához bármelyik (az előbbi kettő közül) szakítódiagram pontra felírt erőegyenlet felhasználható. Például az  $i = 1$ -es sorszámú pontra felírt összefüggésből:

$$c_j = \frac{F_{1,j}}{\lambda_{\ddot{o},1,j} \cdot n_j} \cdot \frac{L_{1,j}}{L_o \cdot b_o \cdot s_o}$$

A lemez átlagos keményedési kitevőjét és átlagos keményedési együtthatóját a három irányban meghatározott értékek súlyozott átlagaként számítjuk.

Az átlagos keményedési kitevő:

$$n_{\text{átl}} = \frac{n_1 + 2 \cdot n_2 + n_3}{4}$$

Az átlagos keményedési együttható:

$$c_{\text{átl}} = \frac{c_1 + 2 \cdot c_2 + c_3}{4}$$

## 6. Lemezanyagok minősítése $\bar{r}$ és $n$ felhasználásával. Lillet diagram

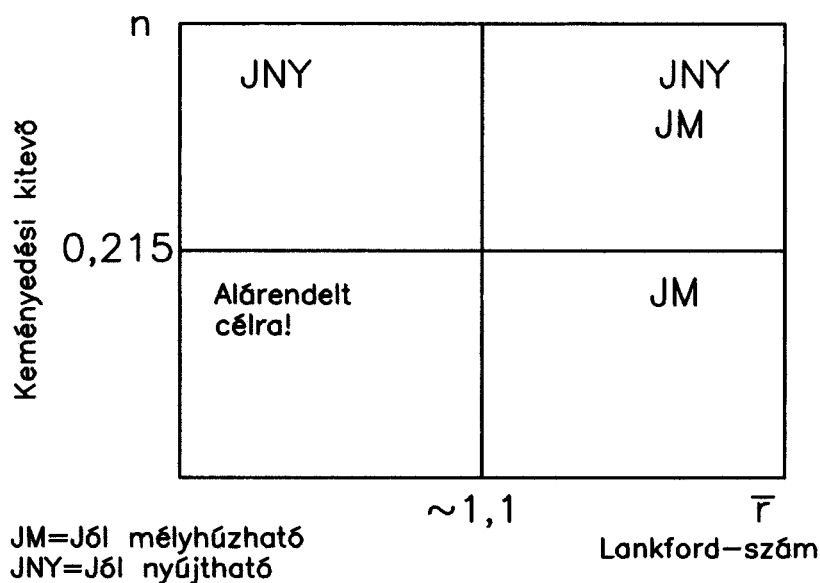
A Lillet diagram a lemezanyagok feldolgozhatóságát a lemez Lankford száma és a keményedési kitevője alapján itéli meg. A diagram az 6.1 ábrán látható.

Jelölései:

JM – jól mélyhúzható,

JNY – jól nyújtható,

K – kereskedelmi minőségű, alárendelt célra felhasználható lemezanyagot jelöl.



6.1. ábra.

Az ábra szerint az  $r > 1,1$  Lankford – számú lemezanyagok jó mélyhúzhatósággal rendelkeznek, mint ahogyan az előbbiekből következik.

A lemezalkatrészek gyártása során gyakran (pl. gépkocsi karosszéria alkatrészek sajtolása) az alakváltozás nem a mélyhúzásra jellemző feszültségállapotban megy végbe, hanem sokkal inkább a **nyújtva-húzásra** jellemző feszültségállapotban.

A nyújtva-húzással olyan lemezanyagok dolgozhatók fel előnyösen amelyeknél a keményedési együttható egy bizonyos érték felett van (a Lillet diagram szerint akkor, ha  $n > 0,215$ ). Első közelítésben ez ellentmondásosnak tűnhet, hiszen a jó nyújthatósághoz a kis keményedő képességű, vagyis a kis keményedési kitevőjű anyagot gondolnánk alkalmasnak. Az ilyen tulajdonságú lemezanyag azért alkalmatlan a nyújtva húzással való feldolgozhatóságra, mert hajlamos a képlékeny instabilitás kialakulására, amelynek a megjelenése a további alakítási folyamatot veszélyezteti. A képlékeny instabilitás kialakulása leegyszerűsítve a helyi kontrakció kialakulásának kezdetét és a további alakváltozásnak egy viszonylag szűk térfogatrészre való korlátozódását jelenti (pl. lemeztárgyság helyi elvékonyodása).

A nagy keményedő képességű lemezanyag az ilyen helyi alakváltozás kialakulásának nem kedvez, mert a helyi kontrakció megjelenésekor az alakváltozásban résztvevő térfogatrész gyorsan felkeményedik, kizárva a helyi alakváltozás folytatódását. Ezzel biztosítja az alakváltozás egyenletes eloszlását az alakított teljes lemeztérfogatban.