

NAGYFESZÜLTSGŰ KÁBELEK KIFEJLESZTÉSE SORÁN VÉGZETT MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

THAMM FRIGYES* és GÁTI RÓBERT**

Nagyfeszültségű kábelek vezetője és szigetelőcsöve közötti palástnyomás előnyösen befolyásolja a kábel átütési szilárdságát. A palástnyomás ismerete a gyártásellenőrzés szempontjából fontos, de értéke számításal a megkívánt pontossággal nem határozható meg. Kísérleti meghatározására a szerzők kidolgozták a lenyomó-lehúzó vizsgálatot. Az abból áll, hogy a kábel egy levágott szakaszáról a szigetelőcsövet először egy darabon lenyomják, majd ezt követően teljesen lehúzzák a vezetőről, miközben folyamatosan regisztrálják a lenyomó- ill lehúzó erőt. A dolgot ismerteti a vizsgálat elméletét, levezeti a palástnyomás meghatározásához szükséges képletet és megvizsgálja ingadozó palástnyomás hatását a lenyomó-, ill a lehúzó erő és az elmozdulás közötti összefüggésre. Az elméleti úton kiadódó lenyomó-, lehúzó diagramokat összehasonlítja kísérletileg felvettekkel is.

1. Bevezetés

Nagyfeszültségű erősáramú kábelek többnyire tömör hengeres alumínium vezetőből és az azt körülvevő nagynyomású polietilén szigetelőcsőből állnak. A szigetelőcsövet extrudálással viszik fel a vezetőre. Az extrudálás utáni lehűlés során a szigetelőcső rázsugorodik a vezetőre, a kettő között palástnyomás ébred, amelynek értéke a lehűlési sebességtől, valamint a polietilénben a lehűlés során fellépő anyagszerkezeti módosulásoktól (kristályosodás) függ és számításal a megkívánt pontossággal nem követhető.

Mint már régebben ismeretes [1], [2] a kábelszigetelésben jelentkező minden üreg és hézag erősen rontja a kábel átütési szilárdságát, és ugyanez vonatkozik a kábel és a vezető közötti esetleges hézagokra is. Minthogy a hézagot a vezető és a szigetelőcső közötti palástnyomás tünteti el, fontos a kábelek minőségellenőrzése számára a palástnyomás ismerete, amint erre KARDOS [3] már régebben rámutatott.

A palástnyomás meghatározására vonatkozó korábbi kísérletek a következő nehézségbe ütköztek.

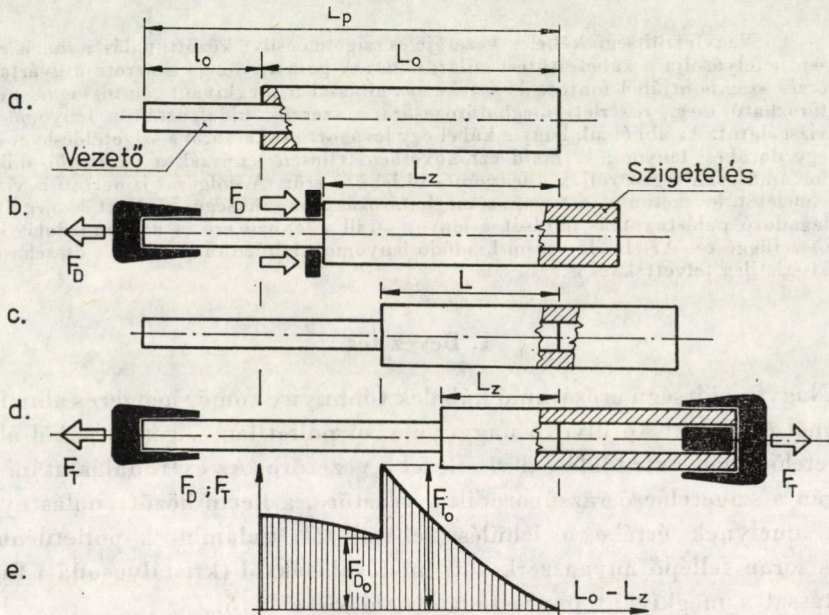
a) A szigetelőcső anyagának rugalmassági modulusa $E = 100$ MPa körül van. A szigetelőcső külső felszíne az extrudálási technológia miatt nem eléggé egyenletes. A szigetelőcső átmérváltozásának mérése a vezető eltávolításakor ezért nem végezhető el a megkívánt pontossággal.

* Dr. Thamm Frigyes, 1026 Budapest, Széplak u. 1.

** Dr. Gáti Róbert, 1125 Budapest, Zalai u. 1/c.

b) A szigetelőcsőnek a vezetőről való lehúzásakor mért erőből a palástnyomás közelítőleg meghatározható ugyan, de csak a — meglehetősen bizonytalan, ingadozó — súrlódási tényező ismeretében.

A fenti nehézségek elkerülésére dolgozták ki a Budapesti Műszaki Egyetem Műszaki Mechanikai Tanszékén a Magyar Kábel Művek felkérésére a szerzők a lenyomó-lehúzó vizsgálatot, amellyel meghatározható a kábel vezető-ere és szigetelőcsőve közötti palástnyomás a súrlódási tényező ismerete nélkül. A vizsgálat egyben lehetőséget ad a súrlódási tényező átlagértékének meghatározására is.



1. ábra

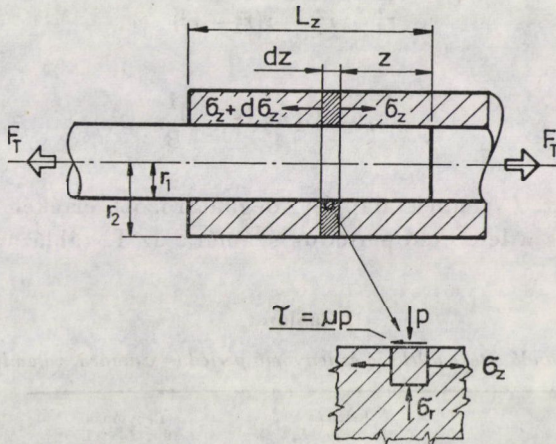
2. A mérési módszer elve

A vizsgálathoz a kábelből L_p hosszúságú szakaszt vágnak le és ennek L_0 hosszúságú részéről eltávolítják a szigetelőcsövet (1a ábra). Az így kapott próbatestet szakítógépbe megfelelően befogva, az 1b ábrának megfelelően adott szakaszon lenyomják a szigetelőcsövet, miközben felveszik az elmozdulásnyomóerő diagramot. Utána a próbatestet a lehúzott szigetelőcső-szakaszon befogva a szigetelőcsövet lehúzzák a vezetőről (1d ábra), miközben ismét regisztrálják a húzóerőt. A mérés során felvett erő-elmozdulás diagram jelleget az 1e ábra mutatja. A próbatestnek nyomásból húzásba való átfogásakor a lenyomás végén észlelt F_{D_0} erő a nála nagyobb F_{T_0} húzóerőre módosul, amit

a szigetelőcsőben előjelet váltó tengelyirányú feszültség által előidézett eltérő keresztkontrakció okoz. A palástnyomás értéke F_{D_0} és F_{T_0} ismeretében a próbatest geometriai méreteiből meghatározható.

3. A kiértékelő összefüggés levezetése

A próbatestet lehúzás közben a 2. ábra mutatja. Az F_T erő okozta keresztkontrakció miatt a vezető és a szigetelőcső közötti palástnyomás az eredetileg



2. ábra

p_0 értékről $p = p_0 + p^*$ re változik. A dz hosszulemre felírt tengelyirányú erőösszetevők egyensúlyából alábbi összefüggés adódik:

$$-d\sigma_z = 2 \frac{r_1}{r_2^2 - r_1^2} \mu(p_0 + p^*) dz. \quad (1)$$

Itt μ a súrlódási tényező a cső és a vezető között.

A kábel gyártástechnológiájából következőleg az eredeti p_0 palástnyomáshoz tartozó σ_{z_0} feszültségösszetevő elhanyagolható. A vezető a szigetelőcsőhöz képest gyakorlatilag tökéletesen merev, ezért a szigetelőcső belső átmérője a σ_z hatására nem változhatik. Ebből a feltételből, valamint a vastagfalú csőre vonatkozó ismert összefüggéseket [4] is figyelembe véve, σ_z -re az alábbi összefüggés adódik

$$\sigma_z = p^* \left[\frac{1}{\nu} \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + 1 \right], \quad (2)$$

ahol $\nu = 0,5$ a szigetelődcső anyagának Poisson-tényezője. (2)-ből p^* -ot kifejezve és (1)-be helyettesítve az alábbi differenciálegyenletre jutunk

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + B\sigma_z = -A, \quad (3)$$

ahol

$$A = \frac{2r_1}{r_2^2 - r_1^2} \mu p_0,$$

és

$$B = \frac{2r_1 \mu \nu}{r_2^2 + r_1^2 + \nu(r_2^2 - r_1^2)}.$$

Ennek megoldása

$$\sigma_z = C_1 e^{-Bz} - \frac{A}{B}. \quad (4)$$

A kerületi feltételt, C_1 ennek alapján meghatározott értékét és a megoldás alakját a lehúzó és a lenyomó periódus számára az I. táblázatban állítottuk össze.

I. táblázat

A C_1 integrációs állandó értéke a lehúzó és lenyomó periódus számára, valamint σ_z kifejezése

	Lehúzás $L < L_z < L_s$	Lenyomás $0 < L_z < L$
Kerületi feltétel	$z = L \rightarrow \sigma_z = 0$	$z = 0 \rightarrow \sigma_z = 0$
C_1	$A/B e^{BL}$	A/B
σ_z	$A/B [e^{B(L-z)} - 1]$	$A/B [e^{-Bz} - 1]$

A lehúzó periódus kezdetén

$$F_{T0} = (r_2^2 - r_1^2) \pi (\sigma_z)_{z=0} = \frac{A}{B} [e^{BL} - 1] (r_2^2 - r_1^2) \pi, \quad (5a)$$

a lenyomó periódus végén

$$F_{D0} = -(r_2^2 - r_1^2) \pi (\sigma_z)_{z=0} = \frac{A}{B} [1 - e^{-BL}] (r_2^2 - r_1^2) \pi. \quad (5b)$$

Mivel p_0 értéke az (5a) és (5b) képletben azonos, a két egyenletet egymással elosztva és rendezve

$$e^{BL} = \frac{F_{T0}}{F_{D0}} \quad (6)$$

adódik, amit (5a)-ba vagy (5b)-be helyettesítve és bevezetve a $\beta = r_2/r_1$, $\lambda = L/r_1$, $\sigma_{0h} = F_{T0}/(r_1^2\pi)$ és $\sigma_{0ny} = F_{D0}/(r_1^2\pi)$ jelöléseket

$$p_0 = \frac{\nu}{[\nu(\beta^2 - 1) + \beta^2 + 1] \left[\frac{1}{\sigma_{0ny}} - \frac{1}{\sigma_{0h}} \right]}, \quad (7)$$

valamint (6)-ból hasonlóképpen

$$\mu = \frac{\nu(\beta^2 - 1) + \beta^2 + 1}{2\lambda\nu} \ln \frac{\sigma_{0h}}{\sigma_{0ny}} \quad (8)$$

adódik.

4. A levezetett összefüggés kísérleti ellenőrzése

A (7) képlet feltételezi, hogy p_0 értéke a próbatest hossza mentén állandó. Hogy ez a feltétel tényleges kábelszakaszoknál mennyiben teljesül, azt abból lehet megítélni, hogy az elméletileg levezetett húzóerő-elmozdulás ill. nyomóerő-elmozdulás diagram mennyire egyezik a kísérletileg felvett diagramokkal. Ebből a célból az (5a) és (5b) képletbe L helyébe a változó L_z -t helyettesítjük be és az (5a) egyenletből kiadódó F_T húzóerőt $L < L_z < L_0$ szakaszon, az (5b) egyenletből kiadódó F_D nyomóerőt $0 < L_z < L$ szakaszon diagramba rajzoljuk. A 3. ábra A és D része egy-egy ilyen számított lenyomó-lehúzó diagramot mutat a II. táblázatban összefoglalt kiinduló adatok alapján. Az adatokat mindkét esetben ténylegesen legyártott kábeltípusoknak megfelelően vettük fel.

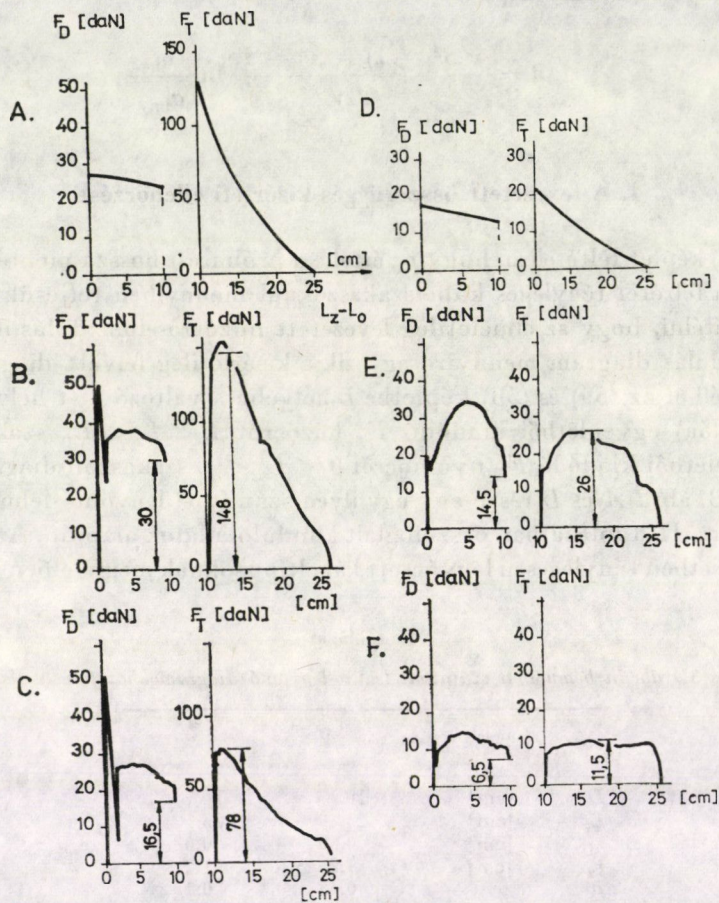
II. táblázat

A 3A és 3D ábrán bemutatott számított lehúzó-nyomó diagramokhoz felvett alapadatok

Ábra jele	3A	3D
L [cm]	10	10
L_0 [cm]	25	25
r_1 [cm]	0,69	0,68
r_2 [cm]	1,2	1,2
μ	0,45	0,15
p_0 [bar]	1,868	1,669
B [1/cm]	0,1136	0,0353

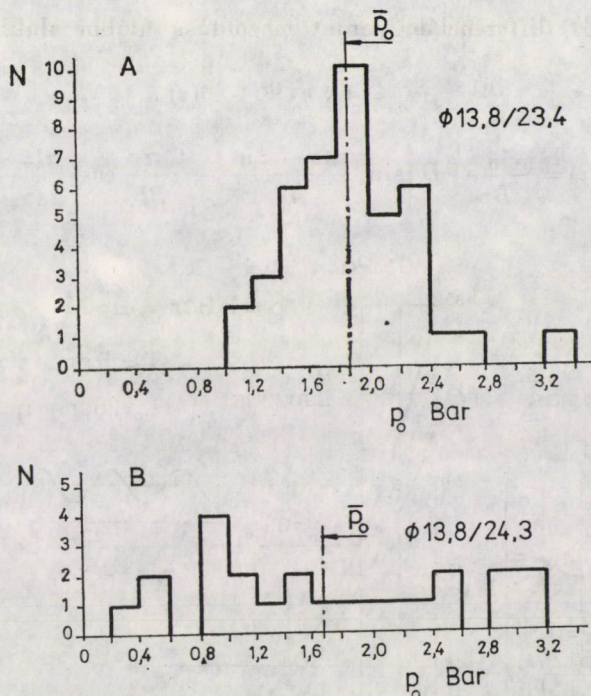
A 3. ábra B és C része az A -résznek megfelelő kábeleken kísérletileg felvett lenyomó-lehúzó diagramokat mutat. A mért görbék a számított görbékkel jól egyeznek. A 3. ábra E és F része a D -rész számított görbéjének felel meg. Itt a mért diagramok a számítottól még jellegben is erősen eltérnek, ami a palástnyomás erősen egyenlőtlen voltára utal.

Mindkét kábeltípusból nagyobb számú próbatesten végeztük el a palástnyomás meghatározását. A palástnyomás-értékek gyakorisági eloszlását a 4. ábra mutatja, ennek *A*-része a 3. ábra *A*, *B*, *C* részeinek, *B*-része a 3. ábra *D*, *F*, *E* részeinek felel meg. Előbbinél jól felismerhető a normáeloszlás, míg utóbbi eloszlása nem mutat szabályszerűséget, a palástnyomás-értékek sok-



3. ábra

kal erősebben szórnak. A 3. ábra *A*, *B*, *C* részei 1974. évi gyártásból, az ábra *D*, *F*, *E* részei 1969. évi gyártásból származnak. A 3. és 4. ábrák összehasonlítása jól mutatja a két gyártás közötti időben elért fejlődést az egyenletesebb gyártási technológia irányában.



4. ábra

5. Periodikusan változó palástnyomás elméleti vizsgálata

Mivel egyes, az elméletileg levezetettől eltérő lenyomó-lehúzó diagramból arra kellett következtetni (7. ábra), hogy a palástnyomás a próbatest hossza mentén periodikusan változik, ezt az esetet elméletileg is megvizsgáltuk. Ehhez a (3) képlet A állandója helyett az alábbi függvényt vettük fel

$$A(z) = A_0 + A_1 \sin \frac{\pi}{l_h} (z + z_0). \quad (9)$$

Itt A_1, A_2, l_h és z_0 állandók. Bevezetve még a

$$D = \frac{A_1}{B} \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{Bl_h}\right)^2},$$

$$\Phi = \frac{A_0}{B} + D \left\{ \sin \frac{\pi(L + z_0)}{l_h} - \frac{\pi}{Bl_h} \cos \frac{\pi(L + z_0)}{l_h} \right\},$$

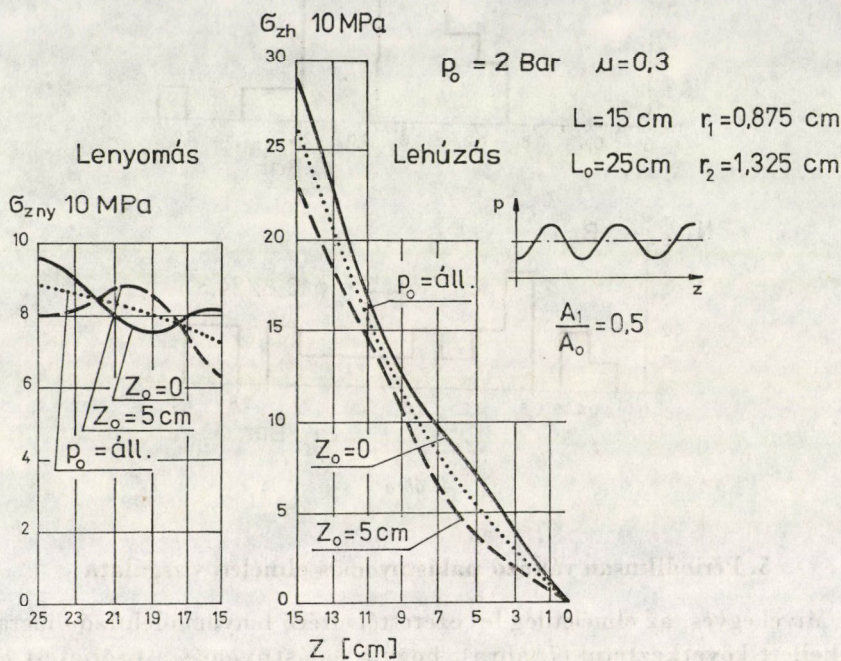
$$\Psi = \frac{A_0}{B} + D \left\{ \sin \frac{\pi z_0}{l_h} - \frac{\pi}{Bl_h} \cos \frac{\pi z_0}{l_h} \right\}$$

állandókat, a (3) differenciálegyenlet megoldása alábbi alakban írható fel

$$\sigma_z = C_1^* e^{-Bz} - \Lambda(z), \quad (10a)$$

ahol

$$\Lambda(z) = \frac{A_0}{B} + D \left\{ \sin \frac{\pi(z + z_0)}{l_h} - \frac{\pi}{Bl_h} \cos \frac{\pi(z + z_0)}{l_h} \right\}. \quad (10b)$$



5. ábra

A kerületi feltételt húzás és nyomás számára, C_1 értékét és a teljes megoldást a két szakasz esetén a III. táblázatban foglaltuk össze.

III. táblázat

$A C_1^*$ integrációs állandó értéke a lehúzó és lenyomó periódus számára, valamint σ_z kifejezése periodikusan változó palástnyomás esetében

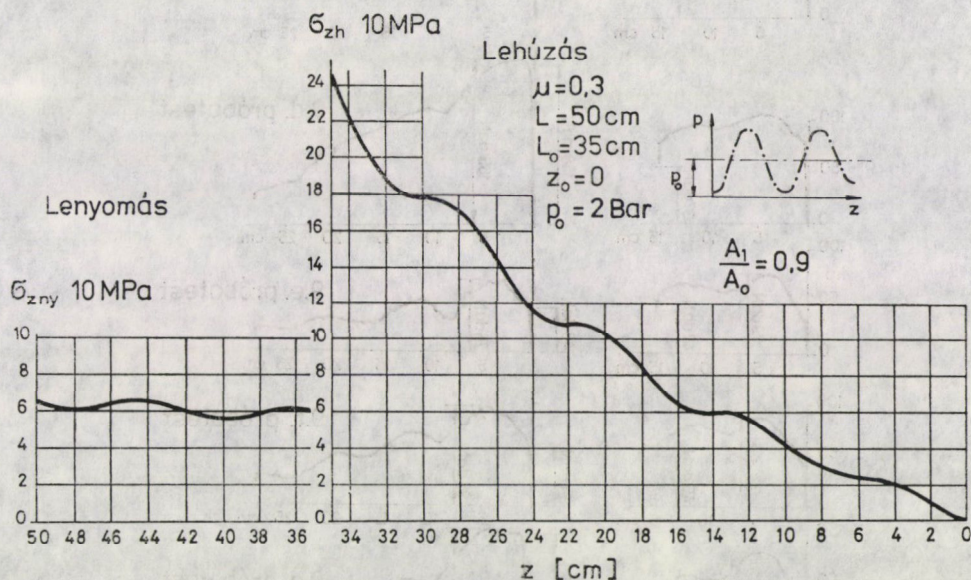
	Lehúzás $L < L_z < L_0$	Nyomás $0 < L_z < L$
Kerületi feltétel	$z = L \rightarrow \sigma_z = 0$	$z = 0 \rightarrow \sigma_z = 0$
C_1^*	Φe^{BL}	Ψ
z	$\Phi e^{B(L-z)} - \Lambda(z)$	$\Psi e^{-Bz} - \Lambda(z)$

Az erő a lehúzó periódus kezdetén és a lenyomó periódus végén:

$$F_{T0} = [\Phi e^{BL} - \Psi](r_2^2 - r_1^2) \pi, \quad (11a)$$

$$F_{D0} = [\Phi - \Psi e^{-BL}](r_2^2 - r_1^2) \pi. \quad (11b)$$

A súrlódási tényezőre ezúttal is érvényes a (8) összefüggés.



6. ábra

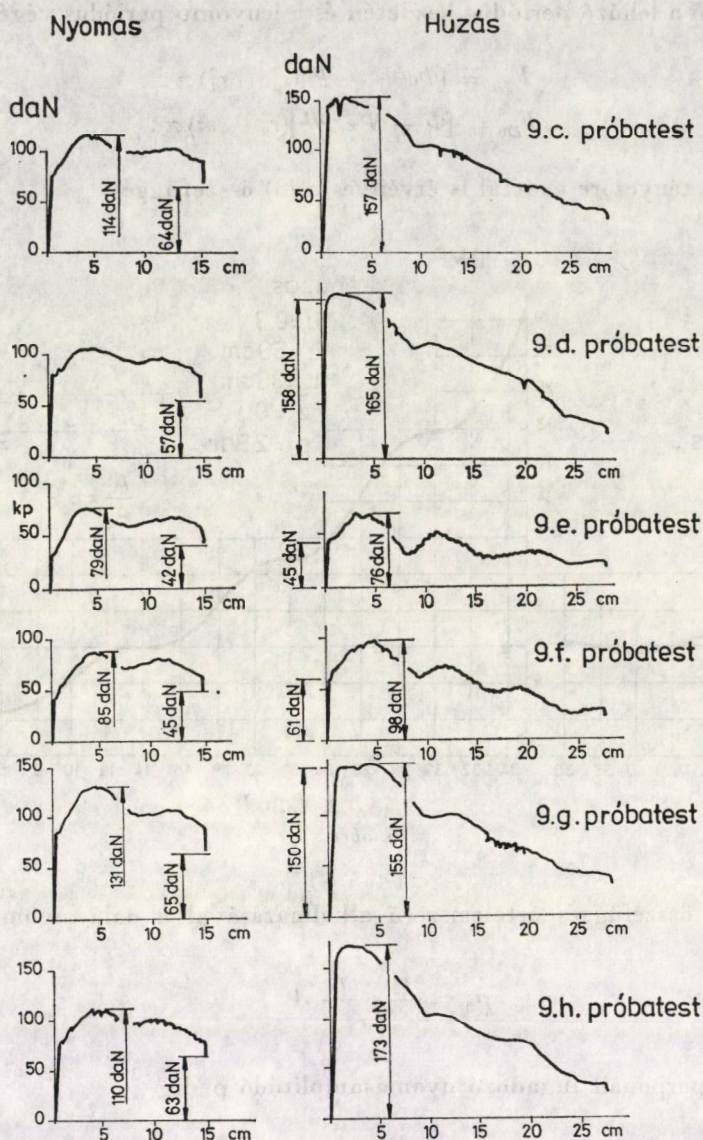
A (3) összefüggés értelemszerű alkalmazásával a palástnyomás középértéke

$$p_0 = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2\mu r_1} A_0,$$

az erre szuperponált ingadozó nyomásamplitúdó pedig

$$p_1 = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2\mu r_1} A_1.$$

A σ_z feszültségösszetevő változását a lenyomó és lehúzó periódus során két különböző mérési sorozatnak megfelelő számértékek esetén az 5. és 6. ábrában foglaltuk össze. Néhány kísérletileg felvett diagramot a 7. ábra mutat, a 6. ábrának megfelelő méretadatok esetében. A 6. ábrából azt olvashatjuk ki, hogy a lehúzó-lenyomó diagram a palástnyomás egyenlőtlenségeit lecsökkentve „kisimítva” képezi le. Ha tehát a 7. ábrán erős hullámvonalakat látunk, ennek



7. ábra

a palástnyomás ingadozásán kívül még más okának is kell lennie. Valóban, azokon a próbatesteken, amelyek diagramjait a 7. ábra mutatja, a kihúzott vezető felületén szakaszosan felragadt műanyagfoltokat találtunk, melyek a palástnyomás ingadozásán kívül a súrlódási tényező ingadozását is okozták.

Ugyanakkor a (8) képlettel számítható súrlódási tényező értéke használható kritériumot szolgáltat arra vonatkozóan, hogy egy mért diagram

adataiból a palástnyomás értéke a (7) képlet segítségével számítható-e. Ha ugyanis a szigetelőcső csak foltokban fekszik fel a vezetőn, a levezetett összefüggések érvényüket veszítik és a (8) összefüggés a ténylegesnél kisebb súrlódási tényezőt ad. Polietilén súrlódási tényezője fémen $\mu = 0,21$ körül van. Az a kísérlet, melynél ennél kisebb súrlódási tényező adódik, nyilván nem értékelhető ki a (7) képlet segítségével és egyben arra utal, hogy nem tökéletes a felfekvés a vezető és a szigetelőcső között.

A lenyomó-lehúzó vizsgálatot kábelgyártásunk már sorozatvizsgálatként alkalmazza, amihez a Műszaki Mechanika Tanszék különleges befogófejet is tervezett [5]. A vizsgálati módszert a gyártási technológia egyik legjobban bevált ellenőrzési módszerének tekintik.

IRODALOM

1. YAMAUCHI H.—OHADA H.—FUWA M.: Void Distribution in Crosslinked Polyethylene Insulated Cables Made by Conventional and New Processes. Conference Paper C-72-504-9 IEEE. Power Engineering Society Summer Meeting. San Francisco 1972
2. KARDOS GY.: Polietilén szigetelés és alumínium vezető hőtágulás viszonyszámának hatása a polietilén szigetelés üregmentességére. *Műanyag és Gumi*. 10 (1973), 357—359
3. KARDOS GY.: Polietilén kábelszigetelések hasznos zsugorodása. *Műanyag és Gumi*. 5 (1968), 448—452
4. MUTNYÁNYSZKY Á.: Szilárdságtan. Tankönyvkiadó, Budapest 1956
5. THAMM F.: Egy új vizsgálati módszer nagyfeszültségű kábelek számára. *Műanyag és Gumi*. 13 (1976), 87—90

Mechanical tests conducted in the course of high-voltage cable development. The mantle pressure between the conductor and the insulation conduit of high-voltage cables will favorably influence their dielectric strength. Although mantle pressure data are rather important from the aspects of production control, they cannot be determined with sufficient accuracy by calculation. For experimental determination purposes authors designed a push-pull test in which first the insulation tube is pushed off a cutoff section of the cable, then completely pulled off the conductor, while the compression and tensile forces are continuously recorded. The paper explains the test theory, derives the formula required for the determination of the mantle pressure, and examines the effect of a fluctuating mantle pressure on the correlation between the pressure and/or pull-off force on one hand, and the displacement on the other. The theoretical push-pull diagrams are compared with the experimental results.

Im Laufe der Entwicklung von Hochspannungskabeln vorgenommene mechanische Untersuchungen. Der zwischen dem Leiter und dem Isolationsrohr auftretende Manteldruck wirkt sich günstig auf die Durchschlagfestigkeit des Kabels aus. Die Kenntnis des Wertes des Manteldruckes ist in bezug auf die Fertigungskontrolle von größter Bedeutung, kann aber rechnerisch nicht mit der erforderlichen Genauigkeit ermittelt werden. Zur experimentellen Bestimmung erarbeiteten die Verfasser das Preß- und Abzugverfahren. Dies erfolgt, indem man auf einem Teil des abgeschnittenen Stückes des Kabels das Isolationsrohr erst zusammenpreßt, dann vom Leiter vollständig herabzieht, wobei die Preß- bzw. Abzugskraft laufend registriert werden. Der Aufsatz behandelt die Theorie der Untersuchung, liefert die zur Bestimmung des Manteldruckes erforderliche Formel und untersucht die Wirkung des schwankenden Manteldruckes auf den Zusammenhang zwischen Preß- bzw. Abzugskraft und Verschiebung. Die theoretisch ermittelten Preß-Abzug-Diagramme werden mit den auf Versuchswege beobachteten verglichen.

Механическое исследование проводов высокого напряжения. Смятение между проводом высокого напряжения и изоляционной трубой выгодно действует на пробивную прочность провода. Знание величины смятения важно с точки зрения учета выработки, но вычислить ее с требуемой точностью невозможно. Для определения величины смятения авторы выработали сжимающе-стяжной экспериментальный метод. Эксперимент выполняется следующим образом: на отрезке провода изоляционную трубу на некотором участке сжимают, а затем полностью стягивают с провода, причем постоянно регистрируют сжимающую и стягивающую силу. В статье излагается теория исследования, выводится формула, необходимая для определения смятения и исследуется действие переменного смятения на связь между сжимающе-стяжной силой и сдвигом. Диаграммы сжима-стяжения, полученные теоретическим путем сравниваются с экспериментальными результатами.