

# Hidrosztatikus nyomás alatt végzett alakíthatósági vizsgálatok

Dr. Eleőd András<sup>1</sup> – Dr. Ziaja György<sup>2</sup> – Dr. Stefániay Vilmos<sup>3</sup> – Sajó István<sup>4</sup>

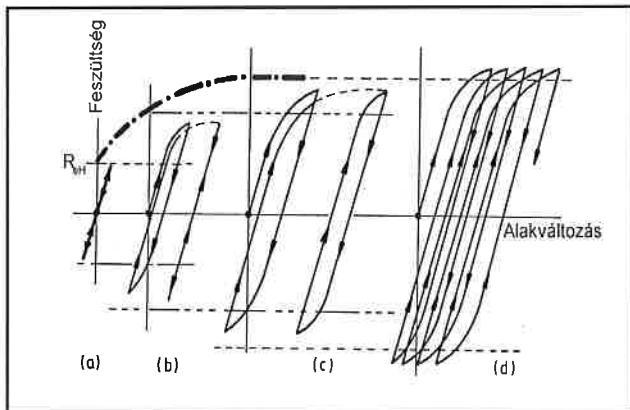
## Bevezetés

A numerikus szimuláció módszere, csakúgy mint a műszaki kutató-fejlesztőmunka minden más területén, a tribológia számára is új lehetőségeket jelentett. A numerikus szimuláció alkalmazásával lehetőség nyílt a valóságos érdességi profillal rendelkező szilárd testek között lejátszódó súrlódási folyamatok, ezen belül elsősorban az alakváltozási és a részecskeleválást előidéző folyamatok modellezésére.

A numerikus szimuláció eredményességét és valóságű voltát egyrészt az alkalmazott geometriai modell alakhűsége, másrészt a numerikus modell anyagtvényei biztosítják. A geometriai modell alakhűsége a felületi topográfia digitalizálásával már megoldottnak tekinthető [1], [2]. Sokkal nagyobb viszont a bizonytalanság a numerikus modellhez szükséges anyagtvényekkel kapcsolatban, mivel közismert, hogy a hagyományos anyagvizsgálati módszerekkel meghatározott anyagtvények jó esetben is csak a felület alapanyagának jellemzésére használhatók, de a súrlódási igénybevételnek közvetlenül kitétt, ún. felületközeleli réteg(ek), valamint a felületi bevonatok jellemzésére már egyáltalán nem.

Korábbi számításaink [3] azt mutatták, hogy ha a felület a súrlódási igénybevétel hatására lokális képlékeny alakváltozást is szenved, akkor ez az alakváltozás csaknem minden esetben olyan mértékű, hogy a felület hagyományos anyagvizsgálatokkal meghatározott alakváltozó képessége kimerül. Ezáltal a felület legjobban igénybevett érdességcsúcsainak környezetében, az alakváltozó képesség kimerülése miatt bekövetkező képlékeny törés eredményeként, részecskék válhatnak le a felületről. Ezek a számítási eredmények viszont ellentmondanak a gyakorlati tapasztalatoknak, mivel egy súrlódó felület kísérletekkel igazolt kopásállósága sokkal nagyobb, mint amit a számítási eredmények alapján feltételezhettünk.

Hasonló következtetésre juthatunk akkor is, ha a súrlódó felületek ciklikus igénybevételét leíró, ún. shake down elméletet vizsgáljuk.



1. ábra. A felületközeleli réteg alakváltozási ciklusai a súrlódási igénybevétel hatására, száraz súrlódás esetén: (a) tisztán rugalmas alakváltozás, (b) felkeményedés utáni ismétlődő rugalmas alakváltozás, (c) ismétlődő ciklikus képlékeny alakváltozás, (d) halmozódó károsodás (ratchetting)

<sup>1</sup> egyetemi tanár, BME Járműelemek és Hajtások Tanszék

<sup>2</sup> egyetemi tanár, BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Tanszék

<sup>3</sup> ny. tudományos munkatárs, BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Tanszék

<sup>4</sup> tudományos munkatárs, MTA Kémiai Kutatóközpont, Kémiai Intézet

Az 1. ábrán látható alakváltozási görbék csak abban az esetben írhatják le az érdességcsúcsok súrlódás közbeni alakváltozását, ha feltételezzük, hogy a kezdeti felkeményedés után a felületközeleli réteg ideálisan képlékennyé válik. Ezt a jelenséget a szakirodalom általánosan TTS-ként (Tribological Transformation of the Surfaces) említi [5]. A szabályos rács szerkezetű, polikristályos anyagok esetén ez a jelenség csak az állapot tényezők (hőmérséklet, nyomás, alakváltozási sebesség) megváltozásának következményeként képzelhető el. A súrlódás következtében fellépő hőmérséklet-emelkedésnek az anyag szerkezeti változására gyakorolt hatása több kutató szerint is elhanyagolható [6]. Az alakváltozási sebesség növekedése egyes anyagok esetében az alakítási szilárdságot csökkenti, más anyagok esetében viszont növeli.

A nyomófeszültségi állapot kedvező hatása a képlékeny alakváltozó képesség kialakulására és fenntartására régóta alkalmazott tapasztalati tény. Kármán Tódor 1911-ben végzett vizsgálatai óta ismert, hogy a szobahőmérsékleten rideg anyagok (pl. márvány, homokkő, gránit), hidrosztatikus nyomás alatt alakítva képlékennyé válnak, de az így kapott folyásgörbéjük jóval a rideg állapotban mérhető törőfeszültségük feletti feszültségértéknél kezdődik [7]. Ezzel ellentétben, a képlékeny fémek folyásgörbéje jellegében csak kis mértékben tér el a hidrosztatikus nyomás nélkül kapott folyásgörbétől, az alakíthatósági határuk viszont kitolódik és a hidrosztatikus nyomófeszültségi állapot hatására csaknem ideálisan képlékeny állapotba kerülnek [8].

A feszültségi állapot hidrosztatikus komponensének jelentőségére már Johnson [9] is utalt, amikor a felületi réteg ideális képlékenységet a lokális érintkezések körül kialakuló, ún. kvázi-hidrosztatikus feszültségi állapot jelenlétével indokolta.

Tekintettel arra, hogy a lokális érintkezések körüli kvázi-hidrosztatikus feszültségi állapot kialakulása már a korábbi számítások során is kimutatható volt [10], figyelmünk alapvetően az anyagok hidrosztatikus nyomás alatti viselkedésének vizsgálatára irányult.

## A vizsgálatok leírása

Vizsgálatainknak kettős célja volt, meghatározni egyrészt az anyagtvényt leíró folyásgörbe alakját, másrészt az adott anyagok alakíthatóságának határértékét, az alakító igénybevételre szuperponált hidrosztatikus nyomáskomponens mellett. A folyásgörbét magasság/átmérő = 1,5 geometriai arányú hengeres próbatest zömítővizsgálatával vetjük fel, a kettős sík állapotban mérhető első törési főnyúlást a Ziaja-féle bemetszett próbatesttel [11] vizsgáltuk (2/c. ábra). Vizsgálatainkhoz ötvözetlen szénacélt, ausztenites acélt és szobahőmérsékleten teljesen rideg, AISi26Ni6 gyorsfűtött, porkohászati (RS/PM) hipereutektoidos ötvözetet (MicroAlu) [12] használtunk (1. táblázat).

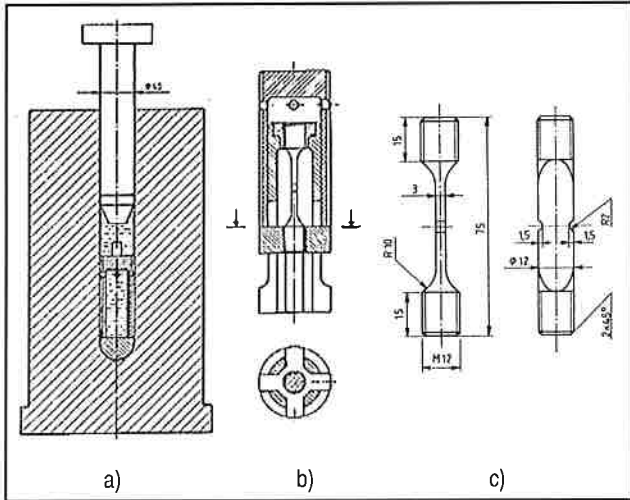
1. táblázat. A vizsgált anyagok összetétele

Összetétel, % Anyag	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mg	Cu	S	P	Fe	Al
C 35	0,35	0,5	0,2					<0,045	<0,035	maradék	
Ausztenites acél	<0,03	<2	<1	18	10			<0,03	<0,04	maradék	
MicroAlu			26,4		6,0	0,04	<0,01			0,41	maradék

A hidrosztatikus nyomás alatti anyagvizsgálatokhoz izosztatikus nyomáskamrát használtunk, ami négyoszlopos, hidraulikus sajtológépre volt felszerelve. A nyomáskamra belső átmérője 40 mm, a sajtológép által kifejtendő legnagyobb nyomóerő 1000 kN, ami a nyomáskamrában

796 MPa névleges hidrosztatikus nyomást eredményezne. A nyúlásmérő bélyegekkkel végzett mérések eredményei alapján a sűrűdés a sajtolóerő 4,5...5%-át emészt fel, így a szerszámban ébredő legnagyobb hidrosztatikus nyomás értéke ~750...760 MPa-nak vehető.

A hidrosztatikus nyomás alatt végzett zömítővizsgálat vázlata a 2/a. ábrán látható. A 2/b. ábra a nyomást húzó igénybevétellel átalakító patronát ábrázolja, amit összeszerelt állapotban lehet a nyomáskamrába betenni. A 2/c. ábrán a kettős síkállapotot modellező szakítópróbatest látható.



2. ábra. (a) izosztatikus nyomáskamra, (b) a szakítóvizsgálathoz használt patron, (c) a bemetszett szakító próbatest

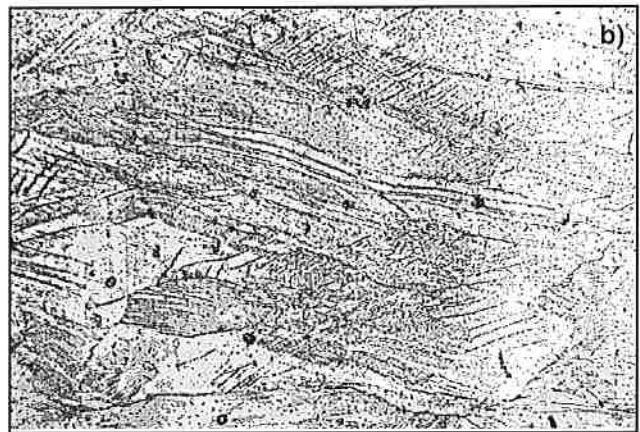
A mérés elve mindkét esetben azonos volt. Az olajoszlop rugalmas összenyomódása a maximális sajtolóerő (1000 kN) eléréséig ~14 mm volt. Az olajoszlop rugalmas összenyomásával állítottuk elő a szükséges hidrosztatikus nyomást és a tüske elmozdulásának utolsó néhány tizedmilliméterét használtuk fel az anyagvizsgálatokhoz. A szerszámból cseppenként kivéve az olajat, elérhető volt, hogy a sajtolótüske az elmozdulásának csak az utolsó mm-ében érje el az alakítandó munkadarabot. A 88 cm<sup>3</sup> átlagos olajtérfogatot, az 1 mm-es magasságcsökkenést és az olaj 1,4·10<sup>3</sup> MPa kompresszibilitási tényezőjét figyelembe véve, az alakítás során a hidrosztatikus nyomás változása mindössze ~20 MPa volt.

## Az eredmények értékelése

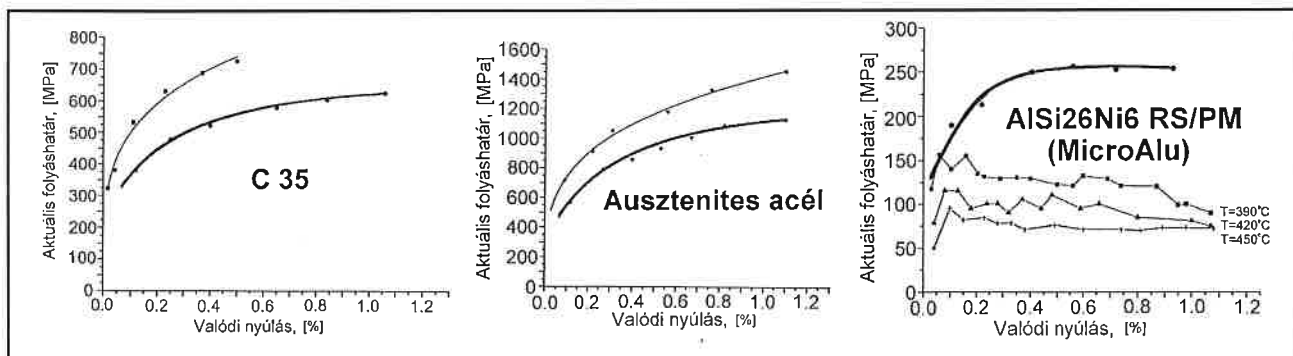
A zömítővizsgálatok eredményeinek kiértékelésénél, az egyes alakváltozásokhoz tartozó aktuális folyáshatár értékeit, a szerszám és a próbatest közötti sűrűdés elhanyagolásával, a  $k_f = F/A$  összefüggéssel számítottuk. Az összefüggésben  $F$  az alakítóerőt,  $A$  az alakváltozott próbatest keresztmetszetét jelenti. A hidrosztatikus nyomástérben végzett

vizsgálatoknál az alakítóerőt két mérés különbségéből lehetett csak megállapítani. Először meg kellett mérni a hidrosztatikus nyomás előállításához és az alakításhoz szükséges együttes erőt, majd a próbatestet a nyomáskamrából kivéve, változatlan olajtérfogattal, a hidrosztatikus nyomás létrehozásához szükséges erőt. A tüske és a nyomáskamra relatív elmozdulásának függvényében felvett két görbét egymásból kivonva, megkaptuk az alakítás erőszükségletét. A mért folyásgörbék a 3. ábrán láthatók:

Az ötvözetlen szénacél és a nagy ötvözőtartalmú ausztenites acél esetében a hidrosztatikus nyomás hatására az aktuális folyáshatár kissé mértékben csökkent, a folyásgörbék alakja viszont az alakítás mértékének növelésével ellaposodik, azaz ez az ideális képlekeny állapot felé való közeledésre utal.



4. ábra. (a) Hidrosztatikus nyomás nélkül alakított próbatest, (b) hidrosztatikus nyomás alatt alakított próbatest. Az alakváltozás mértéke 100%, nagyítás 500X, marószerszám királyvíz.



3. ábra. A zömítővizsgálattal felvett folyásgörbék.

(Az ábrákon a vastag vonallal rajzolt görbék a hidrosztatikus nyomás mellett kapott folyásgörbék.)

# VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

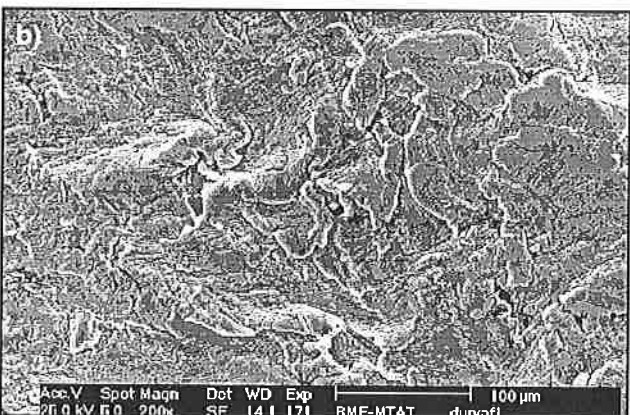
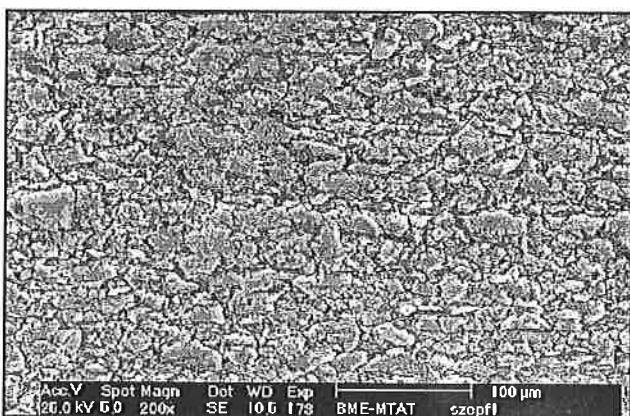
A korrózióálló acél esetében a zömített próbatesteken metallográfiai és röntgendiffrakciós vizsgálatokat is végeztünk. Mindkét vizsgálat eredményeiből arra következtethetünk, hogy az ausztenites acélnál a hidrosztatikus nyomás hatására az alakváltozás jellege megváltozik, az alakváltozás inkább ikresedéssel, mint a szemcsék alakváltozásával játszódik le. A hidrosztatikus nyomás jelenléte lassította az ausztenites acélok hidegalakításánál lejátszódó részleges fázisátalakulást és az ezzel járó intenzív felkeményedést (lásd a 4. ábrát és a 2. táblázatot).

**2. táblázat.** A röntgendiffrakciós vizsgálatok és a mikrokeménységmérések eredményei

(Cu K $\alpha$  sugárzás, 45 kV, 30 mA, grafit monokromátor, proporcionális számláló)

A röntgendiffrakciós vizsgálatok eredményei	$\alpha$ -fázis	Félérték szélesség (FWHM)		Mikrokeménység	
		felület-közepes köbös rács	tér-közepes köbös rács	csúszásmentes zónában	csúszóvonalak mentén
Az alakítás jellege					
Hidrosztatikus nyomás nélkül	10%	0,25	0,38	340 HV	430 HV
Hidrosztatikus nyomás alatt	7%	0,28	0,35	353 HV	430 HV

A gyorsított porkohászati alumíniumötvözet szobahőmérsékleten teljesen rideg, egyáltalán nem alakítható. A megalakítás során (390-450 °C) viszont ideálisan képlékeny állapotba kerül (3. ábra). A hidrosztatikus nyomás hatására, a megalakítási szilárdsághoz képest lényegesen nagyobb alakítási szilárdságnál, de hasonlóképpen ideálisan jól alakíthatóvá válik. A hidrosztatikus nyomás jelenléte a porkohászati alumíniumötvözet szabad zömítő alakításánál, szemben a szobahőmérsékleten tapasztalt teljesen rideg viselkedéssel, nagymértékű képlékeny alakváltozást eredményezett. Az alakítás a szemcsehatárok mentén ment végbe, az eredetileg gömbszerű, 5...30  $\mu$ m-es porszemcsék csak



**5. ábra.** MicroAlu próbatestek oldalfelülete hidrosztatikus nyomás alatti zömítés után (a) és megalakítás után (b)

az előgyártmány konszolidációja során deformálódtak. Az alakítás előtt és a hidrosztatikus nyomás alatt végzett hidegalakítás után megvizsgálva a félbevágott próbatestek csiszolatát, a szemcseszerkezetben semmiféle változást nem lehetett észrevenni. Ezzel ellentétben viszont a próbatestek szabadon alakváltozott, külső hengeres felületének állapota erősen különbözik egymástól (5/a. és 5/b. ábra).

A vizsgált ötvözetlen szénacél és az ausztenites acél megnövekedett alakváltozó képességét a Ziaja-McClintock-összefüggésből [11] számított egyenértékű törési nyúlás ( $\bar{\epsilon}_f$ ) síkbeli komponenseivel ( $\epsilon_{1f}$ ,  $\epsilon_{2f}$ ) lerajzolt alakváltozási határgörbékkel (6. ábra) jellemeztük:

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{\sqrt{3} \cdot K}{\frac{2}{1-n} \operatorname{sh} \left[ \frac{3(1-n)}{2} \frac{1+\alpha}{\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}} \right] + \frac{1-\alpha}{\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{1f} = \frac{\sqrt{3} \bar{\epsilon}_f}{2\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}}; \quad \epsilon_{2f} = \alpha \cdot \epsilon_{1f} \quad (2)$$

Az összefüggésekben:

$\alpha = d\epsilon_2 / d\epsilon_1 \approx \epsilon_2 / \epsilon_1$  - deformációtörténet, amelynek értelmezési tartománya:  $-1/2 \leq \alpha \leq 1$ ;

$n$  - a folyásgörbe Holomon-függvényének hatványkitevője;

$\epsilon_{10}$  - a kettős síkállapotban mért első törési főnyúlás;

$$K = \frac{2}{3} \epsilon_{10} \left[ \frac{2}{1-n} \operatorname{sh} \left( \frac{3}{2} (1-n) \right) + 1 \right] - \text{integrálási állandó.}$$

A bemetszett, vékony próbatesttel meghatározott első törési főnyúlás ( $\epsilon_{10}$ ) értékeit, valamint a folyásgörbék hatványkitevőjét a 3. táblázat tartalmazza:

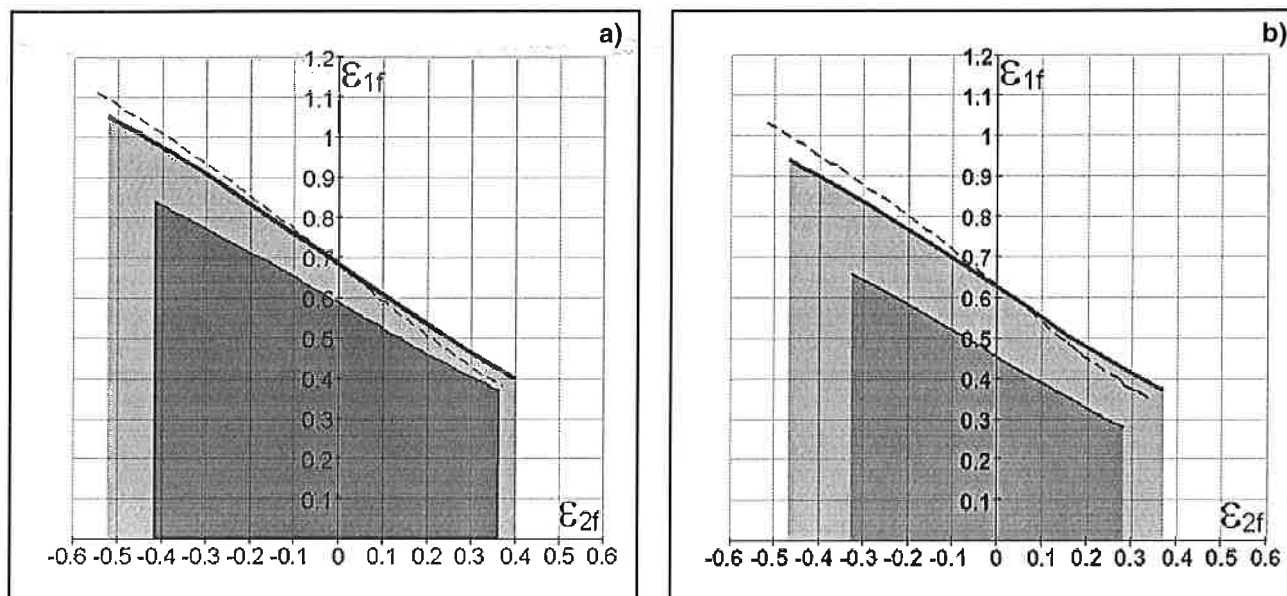
**3. táblázat.** Az első törési főnyúlás szakítókérséreltel meghatározott értékei és a folyásgörbék hatványkitevői

Vizsgált anyag	Hidrosztatikus nyomás nélkül		Hidrosztatikus nyomás alatt	
	$\epsilon_{10}$	$n$	$\epsilon_{10}$	$n$
C 35	0,577	0,44	0,674	0,18
Ausztenites acél	0,457	0,388	0,628	0,238

Az (1) és (2) összefüggésekkel és a 3. táblázat értékeivel, a deformációtörténet értelmezési tartományához tartozó, számított alakváltozási határgörbékét a 6. ábra szemlélteti. Az ábrákon a vékony vonallal határolt sötétebb terület jelenti a repedésmentes alakváltozási területet hidrosztatikus nyomás nélküli esetben, a vastag vonallal határolt világosabb terület pedig a hidrosztatikus nyomás hatására megnövekedett alakváltozási tartományt ábrázolja. Az ábrákon szaggatott vonallal feltüntetettük az ideális képlékenységhöz ( $n = 0$ ) tartozó elméleti alakváltozási határgörbét is.

## Összefoglalás

A kidolgozott vizsgálati eljárás, véleményünk szerint, eredményesen használható a felületközeli réteg anyagtörvényének meghatározására. A jelentős hidrosztatikus nyomáskomponenssel rendelkező feszültségi állapotban tapasztalt kvázi-ideális képlékenységgel a sűrűlő felületek felületközeli rétegének korábban kísérleti úton már kimutatott alkalmazkodóképessége jól értelmezhető. A jelenség új alapot teremthet a rideg anyagok, illetve a bevonatok sűrűlődsége közben lejátszódó folyamatok magyarázatára is.



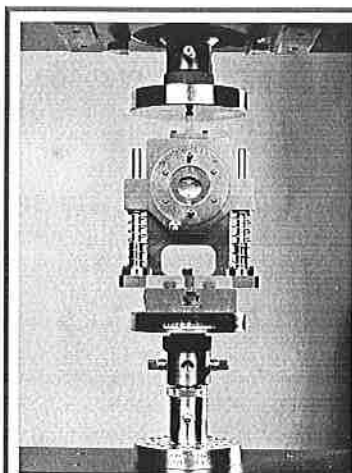
6. ábra. Alakváltozási határgörbék: (a) ötvözetlen szénacél; (b) ausztenites acél

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az Országos Tudományos és Kutatási Alapnak (OTKA T 029963, T 025208) és az Oktatási Minisztériumnak (FKFP 0257/1997) a cikkben ismertetett kutatások támogatásáért.

## Irodalom

- [1] Eleőd, A. – Pálkás, T. – Devecz, J.: Érintkező felületek analizésének kísérleti és numerikus módszerei. Bánki Donát Műszaki Főiskola Jubileumi Tudományos Ülésszak, 1999, Proceedings, p: 339-343.
- [2] Váradi, K. – Néder, Z.: Three-Dimensional Contact Analysis of Real Rough Surfaces, 10<sup>th</sup> International Colloquium, Tribology – Solving Friction and Wear Problems, Esslingen, Germany, 9-11 January 1995, p: 253-259.
- [3] Eleőd, A.: Numerical Modeling of the Mechanical Process of Particle Detachment by Finite Element Method. Accepted Paper for ASME Journal of Tribology, ASME Paper ref: 931(1998)C/JW.
- [4] Wong, S.K. – Kapoor, A. – Williams, J.A.: Shake down limits on coated and engineered surfaces. Wear 203-204 (1997) p: 162-170.
- [5] Eleőd, A. - Oucherif, F. – Devecz, J. – Berthier, Y.: Conception of numerical and experimental tools for study the Tribological Transformation of Surface (TTS). „Lubrication at the frontier: The role of the interface and surface layers in the film and boundary regime”. 25<sup>th</sup> Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 8-11 September 1998. Volume of abstracts.
- [6] Váradi, K. – Néder, Z. – Friedrich, K. – Flöck, J.: Finite Element Modelling of the Thermal Conditions during Sliding of a CF/PEEK-Composite Against a Steel Asperity. 11<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, Industrial and Automotive Lubrication, Ostfildern, Germany, 13-15 January (1998), p: 971-987.
- [7] Th. Kármán : Festigkeitswerte unter allseitigem Druck. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Nr. 42, Band 55, 21. Oktober 1911, p : 1750-1759.
- [8] Pugh, H.L.D.: Mechanical behavior of materials under pressure. Elsevier, Amsterdam-London-New York, 1970., p: 262-263.
- [9] Johnson, K.L.: Contact mechanics and the wear of metals. Wear 190 (1995), p: 162-170.
- [10] Eleőd, A.: Energetische Voraussetzungen der Verschleißteilchenbildung (Entstehung dritter Körper) bei metallischen Reibkörpern. 10<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, Tribology - Solving Friction and Wear Problems. Technische Akademie Esslingen, January 9th-11th, 1996., p955-964.
- [11] Ziaja, Gy.: Alakíthatósági kutatások. Anyagvizsgálók Lapja, 1996/6. p: 73-80.
- [12] Stefániai, V. - Ziaja, Gy. – Fleé, A.: Properties of Al-Si-(X) RS/PM aluminium alloys, Proc. of First Conf. on Mech. Eng., Budapest, May 28-29, 1998. Vol.1. p: 242-246.



Nyírókészülék kompozitok rétegekőzi szilárdságának vizsgálatához



Az **INSTRON** korszerű, számítógépes vezérlő- és mérőrendszerekkel ellátott univerzális vizsgálógépeihez a különleges vizsgálati feladatok céljára

- ▣ a mintabefogók,
- ▣ a terhelő készülékek,
- ▣ az alakváltozás-mérők és
- ▣ az értékelő szoftverek

széles választékát kínálja a hazai forgalmazó

## TESTOR Bt.

Budapest XII., Meredek u. 33. • 1538 Budapest, Pf. 528  
Tel.: 319-1-319 • Fax: 319-2-284 • www.testor.hu • info@testor.hu