

## ÜVEGEK MARADÓ FESZÜLTSGÉNEK JELLEMZÉSE MŰSZEREZETT KARCVIZSGÁLATTAL

Marosné Berkes Mária<sup>1</sup>, Koncsik Zsuzsanna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>egyetemi docens, <sup>2</sup>egyetemi tanársegéd

Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék, 3515, Miskolc-Egyetemváros,  
[maria.maros@uni-miskolc.hu](mailto:maria.maros@uni-miskolc.hu); [metkzs@uni-miskolc.hu](mailto:metkzs@uni-miskolc.hu)

### Összefoglalás

A cikkben üvegek felületközeli rétegében kialakult gyártási maradó feszültségek kimutatására és jellemzésére alkalmas vizsgálati eljárás elvét és kísérleti megvalósítását mutatjuk be. A módszer alapelve, hogy karcvizsgálat során a károsodott tartomány nagysága arányos a felületközeli rétegekben lévő maradó feszültségek nagyságával így a karcnyomok számítógépes képelemzésével a maradó feszültségek jellemzésére szolgáló paraméterek meghatározhatók. A cikk ismerteti az eljárás elvét, módszerét továbbá eszközeit és bemutatja az eltérő feszültségállapotú üvegek megkülönböztetésére alkalmas paramétereket.

**Kulcsszavak:** üveg, felületi réteg, maradó feszültség, karcvizsgálat, képelemzés

### Abstract

The paper introduces the principle and experimental realization of a test procedure applied for revealing and characterizing surface residual stresses in glass products. The basic principle of the method consists in, that during scratching the damaged area is proportional to the magnitude of the residual stresses developed in the surface layer of the material. Thus, determination of features suitable for characterizing the residual stress state is possible by computational image analysis of the scratch traces. The paper introduces the principle and methodology of the procedure, as well as presents the most suitable characteristics for differentiating between the different residual stress states of the glasses.

**Keywords:** glass, surface layer, residual stresses, scratch test, image analysis

## 1. Bevezetés

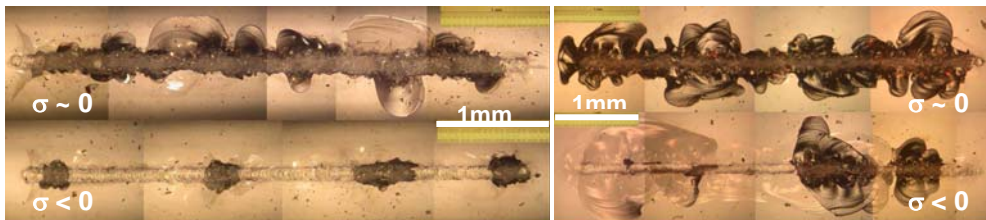
Üvegtermékek megbízhatóságának megítélése szempontjából fontos a felületi rétegekben kialakuló gyártási maradó feszültségek ismerete, mérésük a gyártási és minőségellenőrzési folyamatok szerves része. Munkánk célkitűzése, hogy az üvegek felületi rétegeiben kialakuló maradó feszültségi állapot jellemzésére olyan módszert fejlesszünk ki, amelyik alkalmas átlátszó és nem átlátszó üvegek, különböző üvegminőségű és eltérő geometriájú (sík, cső, stb.) termékek maradó feszültségi állapotának minőségi és mennyiségi elemzésére, továbbá egyszerű, olcsó és integrálható az üveggyártás minőségellenőrzési folyamatába.

Az legelső kísérletek egyszerű mechanikai vizsgálatokra – mikro-keménység mérés (HVM) és Vickers lenyomatos törési szívósság ( $K_{Ic}$ ) vizsgálatok – épültek [1]. Ezt követően a különböző maradó feszültségi állapotú próbatestek eltérő törési viselkedését műszerezett karcvizsgálat segítségével elemeztük, amelynek tapasztalatairól az alábbiakban számolunk be.

## 2. A maradó feszültségi állapot jellemzése karcvizsgálattal

Karcvizsgálat során egy szabványos Rockwell gyémánt kúppal állandó, vagy növekvő terhelőerővel, előírt hosszúságú karcot készítünk a minta felületén. A felületi károsodás morfológiája sokféle információt nyújt az anyag viselkedésére, károsodásának jellemzőire vonatkozóan. A karcvizsgálatot elsősorban a bevonatolt anyagi rendszerek jellemzésére használjuk, például az adhéziós kötőerő, a csúszó súrlódás vagy a felületi kopás vizsgálatára. A karcnyomok megjelenési formáját számos külső és belső tényező befolyásolja [2]. Az egyik fontos befolyásoló tényező a felületi rétegekben gyártáskor kialakuló maradó feszültségi állapot, így a módszer alkalmazásával ennek hatásáról is információt nyerhetünk [3].

Első lépésként különböző maradó feszültségi állapotú üvegfelületeken azonos körülmények között készített karcnyomokat hasonlítottunk össze. Az 1. ábra jelentős különbséget mutat a kétféle állapotú, azaz a közel feszültségmentes ( $\sigma \sim 0$ ) és a nyomó ( $\sigma < 0$ ) maradó feszültséget tartalmazó próbatestek között.



**1. ábra.** Karcnyomok különböző minőségű és állapotú (balra átlátszó, jobbra átlátszatlan, ill. felül feszültségmentes, alul nyomó maradó feszültséges) üvegfelületeken

A karcnyomok közti különbségek a számítógépes képelemzés módszerével számszerűen jellemezhetők [4]. A maradó feszültségek hatását először a károsodott területek nagyságával jellemeztük, a károsodott és az ép területek árnyalat különbségét hasznosító, vagyis intenzitás alapú szegmentálásra (IAS) épülő képelemzéssel [5]. Egy következő lépcsőben a képelemzés számítógépes kiértékelő módszerét továbbfejlesztve újabb károsodási paramétereket definiáltunk és határoztunk meg, továbbá a károsodott terület kiszámítására újabb módszert fejlesztettünk ki a karcnyomok kontúr görbéjének (KKG) meghatározásával [6]. A cikk a kétféle kiértékelő módszer alkalmazásának tapasztalatait és az eddig elért eredményeket összegzi röviden.

### 3. Kísérleti munka

#### 3.1. Vizsgálati anyagok és körülmények

##### I. módszer: Intenzitás alapú szegmentálás (IAS)

Próbatestek: 12 mm átmérőjű, 50 mm hosszú és 1 mm-es falvastagságú, kis alkáli tartalmú, átlátszó csövek, 3-3 db feszültségmentes és a felületi rétegében nyomó maradó feszültséget tartalmazó minta, illetve nagyobb alkáli tartalmú, 30×40×3mm méretű, átlátszatlan síklapok, 1-1 db, hasonló feszültségállapotban. Felületminőség: csöveknél gyártás szerinti, lapoknál polírozott. Vizsgálati feltételek: terhelés:  $F=40$  N, előtolási sebesség  $v_a=5$  mm/min, karchosszúság:  $l = 5$  mm. Mérések száma: mintánként 6 db karc.

##### II. módszer: Karc-kontúr görbe meghatározása (KKG)

Próbatestek: 12 mm átmérőjű, 80 mm hosszú és 1 mm-es falvastagságú, átlátszó, un. „lágú” üvegsövek. Felületminőség: gyártás szerinti. Vizsgálati feltételek: terhelés:  $F=40$  N, előtolási sebesség  $v_a=5$  mm/min, karchosszúság:  $l = 6$  mm.

A vizsgálati mintacsoportokat (lásd 1. táblázat) a feszültségállapot helyett a különféle gyártási sorozatú (eltérő anyag-összetételű, gyártási állapotú, mintavételi helyű) üvegek adják, ugyanis a feszültségek típusa nem minden próbatestnél volt ismert, nagyságáról pedig egyáltalán nem volt információnk.

1. táblázat A KKG kísérletsorozat vizsgálati körülményei és eredményei

Csoport	Anyag	Gyártási állapot	Feszültség állapot	Vizsgált db	Karcok száma
G1	M1	gyári végtermék	nyomó maradó	5	26
G2	M1	gyári végtermék	nyomó maradó	4	22
G3	M1	temperált	feszültségmentes	4	24
G4	M1	félkész termék	ismeretlen	5	28
G5	M1	temperált	feszültségmentes	5	26
G6	M2	temperált	feszültségmente	5	29
G7	M2	ismeretlen	ismeretlen	5	30

#### 3.2. A vizsgálati módszerek sajátosságai, eredmények

##### Az IAS módszer

Az 1. ábrán látható karcnyomok területét, azaz a károsodás mértékét a Miskolci Egyetem Anyagtudományi Intézetében kifejlesztett CPROB nevű számítógépes képelemző program [4] segítségével határoztuk meg. Az alkalmazott módszer lépései a következők voltak: a karcnyomok nagyfelbontású optikai mikroszkópi képének un. „szürkeskálás képpé alakítása”, a károsodott és ép területek elkülönítése, szegmentálása a világosságkód alapján, a karcnyom szélességének ( $w_x$ ) karchosszúság menti eloszlásának mérése (képkockánként), majd végül a karcolás

okozta sérülés mértékének jellemzése az alábbiak szerint definiált  $W$  károsodási paraméterrel:

$$W = \frac{1}{L} \int_0^l w_x dx . \quad (1)$$

A kiértékelés menetének részletes ismertetését korábbi munkáink [1, 5] tartalmazzák. A vizsgálatból levonható következtetések az alábbiak:

- A  $W$  károsodási paraméter alkalmas a károsodott karcterület számszerű jellemzésére, de a különböző feszültségállapotú csoportok közötti megbízható differenciálásra a mérések rendkívül nagy szórása miatt az adott vizsgálati metódus nem megfelelő. A variancia együtthatók magas értéke a módszer bizonytalanságán, és a vizsgált anyagok inhomogenitásán kívül, elsősorban a próba előkészítés – pl. hűtési sebesség szabályozása – problémáinak tulajdonítható.
- A 2. táblázat eredményei ugyanakkor a különböző maradó feszültségi állapotú minták esetén a  $W$  károsodási paraméter egyértelműen érzékelhető különbségére utalnak, miszerint a nyomó maradó feszültségek – összhangban 1. ábrával – csökkentik a karcolással szembeni érzékenységet.
- Az eljárás alkalmas átlátszatlan, továbbá hengeres minták elemzésére is.

2. táblázat. A karcvizsgálatok IAS módszerrel feldolgozott eredményei

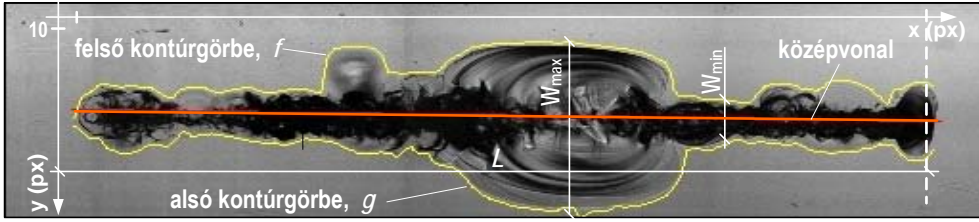
Üveg- minőség	Minta geometria	Feszültség- állapot	$W_{\text{átl.}}$ , pixel/mm	$\frac{W_{\text{átl.,mentes}}}{W_{\text{átl.,nyomó}}}$	Szórás	Var. e.h., %
Átlátszó, kis alkáli tartalmú	cső	nyomó	47,34	4,05	31,43	66
		mentes	191,84		25,65	13
Nem átlátszó, nagy alkáli tart.	síklap	nyomó	273,92	1,49	146,16	53
		mentes	408,71		70,06	17

A továbbiakban statisztikai minták értékelésével kerestük a választ arra, hogy az 1. táblázatban megadott mintacsoportok osztályozhatók-e az eltérő feszültségállapot szerint a karcnyomok mikroszkópi felvételein kiértékelhető bármely paraméter alapján? Ha igen, akkor mely paraméterek a legalkalmasabbak a szétválasztásra?

#### A KKG módszer

A második eljárás újdonságát és jobb megbízhatóságát az alábbi négy elem adja:

(1) A Debreceni Egyetem Informatikai Kara által újonnan kifejlesztett képfeldolgozási algoritmus segítségével a károsodott és ép területek szétválasztását újszerű elven, a karcnyom kontúrjának (2. ábra) megkeresésével, nagyobb pontossággal végezhetjük [6, 7]. A módszer elvét és informatikai megoldásának részleteit a [8 és 9] munkák közlik.



2. ábra. A karcnyom a KKG módszerrel meghatározott kontúrgörbével

(2) A képfeldolgozás bizonytalansága a zajszűrés tökéletesítésével, és a karckép sajátosságait figyelembe vevő egyedi algoritmusokkal jelentősen csökkent.

(3) A korábbi  $W$  károsodási paramétertől eltérő újabb paramétereket is definiáltunk (lásd 3. táblázat). Ezek egy része a károsodás mértékével arányos, ilyen pl. a karcnyom hosszegységre vonatkoztatott fajlagos területe ( $T/L$ ), vagy a karc legnagyobb és legkisebb szélessége ( $W_{max}$ , ill.  $W_{min}$ ). A paraméterek másik része az eltérő anyagminőségekre érzékeny, ilyen pl. a kitörések kagylószerű jellegére utaló  $R_{max}$  és  $R_{min}$  görbületek, vagy a kontúrgörbe „csipkézettségi” mutatója ( $\Delta y_a$ ).

3. táblázat. A KKG módszerrel meghatározott károsodási és statisztikai mutatók

No	Információ	Jelölés	Értelmezés
1.	A károsodás mértéke, (az anyag belső feszültségállapota)	$T$	A karcnyom (kontúrgörbén belüli) területe
2.		$L$	A karcgörbe középvonalának hossza
3.		$T/L$	A karcnyom hosszegységre eső, fajlagos területe
4.		$W_{min}$	A karcnyom legkisebb szélessége
5.		$W_{max}$	A karcnyom legnagyobb szélessége
6.		$R_{min}$	A kontúrgörbe belső érintőkörének legkisebb sugara
7.		$R_{max}$	A kontúrgörbe belső érintőkörének legnagyobb sugara
8.	A karc morfológiája, (anyagminőség, károsodási mód)	$P_f$	A felső kontúrgörbe, $f(x)$ lokális csúcsainak száma
9.		$P_g$	Az alsó kontúrgörbe $g(x)$ lokális csúcsainak száma
10.		$\Delta y_a$	Csipkézettség: $\frac{1}{n} \sum_{x=1}^{n-1} ( f(x) - f(x-1)  +  g(x) - g(x-1) )$
11.		$\Delta y_m$	$\Delta y_m = \max \left[ \begin{array}{l} \max_{0 < x < n-1} ( f(x-1) - f(x)  +  f(x) - f(x+1) ), \\ \max_{0 < x < n-1} ( g(x-1) - g(x)  +  g(x) - g(x+1) ) \end{array} \right]$
12.		$\max_x$	Két lokális $W_{max}$ közötti legnagyobb $x$ irányú távolság
13.	Statisztikai jellemzők (pontoság, megbízhatóság)	$H_f$	A felső kontúrgörbe érintőkörének közelítési hibája
14.		$H_a$	Az alsó kontúrgörbe érintőkörének közelítési hibája
15.		$H/T$	$H/T = 1/T(H_a + H_f)$
16.		$H/L$	$H/L = 1/L(H_a + H_f)$
17.		$H_3$	A karcnyom és a közelítő fedőkörök területkülönbsége

(4) A több minta átlagának egyidejű összehasonlítására egy-szempon­tú vari­anciaanalízist, ANOVA elemzést végeztünk [8], amely a független mintás t-próba általánosítása. A statisztikai elemzések eredményei az alábbiakban összegezhetők:

- Az egyes (G1-G7) csoportokra nézve 95%-os megbízhatósági, azaz  $\alpha = 0,05$  szignifikancia szinten a  $T$ ,  $T/L$ ,  $W_{max}$  és  $\Delta y_a$  mennyiségek függetle­nek, tehát alkalmasak az osztályozhatóság statisztikai elemzésére.
- Ezen paramétereknél találhatóak az 1. táblázat csoportjaiból képzett olyan homogén halmazok (ld. 4. 5. és 6. táblázatok) amelyek középértékei szig­nifikánsan eltérnek, tehát valamely szempontból megkülönböztethetők.

**4. táblázat.** Homogén halmazok a  $T$  paraméter szerint, ( $\alpha = 0,05$ )

Csop.	Fesz. állapot	Anyag	Halmaz			
			1	2	3	4
G7	ismeretlen	M2	14104,53			
G2	nyomó	M1	14339,27			
G1	nyomó	M1	15430,19	15430,19		
G4	ismeretlen	M1	15445,36	15445,36		
G3	fesz. mentes	M1		16082,21		
G5	fesz. mentes	M1			17952,04	
G6	fesz. mentes	M2				19685,83
Duncan Significancia			0,065	0,357	1,000	1,000

**5. táblázat.** Homogén halmazok a  $W_{max}$  paraméter szerint, ( $\alpha = 0,05$ )

Csop.	Fesz. állapot	Anyag	Halmaz		
			1	2	3
G2	nyomó	M1	53,14		
G7	ismeretlen	M2	53,83	53,83	
G4	ismeretlen	M1	59,79	59,79	
G1	nyomó	M1	60,27	60,27	
G3	fesz. mentes	M1	60,46	60,46	
G5	fesz. mentes	M1		61,12	
G6	fesz. mentes	M2			67,90
Duncan Significancia			0,055	0,056	1,000

**6. táblázat.** Homogén halmazok a  $\Delta y_a$  paraméter szerint, ( $\alpha = 0,05$ )

Csop	Fesz. állapot	Anyag	Halmaz				
			1	2	3	4	5
G4	ismeretlen	M1	1,2689				
G3	fesz. mentes	M1	1,2829	1,2829			
G2	nyomó	M1		1,3468	1,3468		
G7	ismeretlen	M2			1,3810	1,3810	
G1	nyomó	M1			1,3885	1,3885	
G5	fesz. mentes	M1				1,4531	
G6	fesz. mentes	M2					1,5883
Duncan Significancia			0,706	0,086	0,293	0,067	1,000

A  $T$ ,  $W_{max}$  és  $\Delta y_a$  szerint elkülöníthető homogén halmazokat összevetve az üvegek feszültségi állapotával és anyagminőségével az alábbi megállapítások tehetők:

- A várakozásoknak megfelelően a  $T$  paraméter a legmegfelelőbb arra, hogy a mintákat a maradó feszültségek nagysága szerint osztályozzuk. A 4. táblázatban egyértelműen elkülönülnek a nyomófeszültséges és feszültségmentes minták halmazai, mivel az 1 és 2 halmazok átfedése nem nevezhető számottevőnek.
- A vizsgálati csoportok  $W_{max}$  paraméter szerinti halmazokba sorolása hasonló módon elkülöníti a különböző feszültségtípusokat, de a mindössze három halmaz nem képes kellően differenciálni a két állapot között az 1 és 2 halmazok nagy átfedése miatt.
- A  $\Delta y_a$  paraméternél nem válnak szét a különböző maradó feszültségű csoportok. Ez összhangban van azzal, hogy a „csipkézettség” nem a károsodás mértékét tükrözi, hanem inkább az üvegek típusától függő károsodási morfológiára utal elsősorban.

## 4. Összefoglalás

Üvegfelületek maradó feszültségeinek jellemzésére kidolgoztunk egy olyan mérési és kiértékelő eljárást, amelynek elvi alapja, hogy a karcvizsgálat során létrejövő károsodás mértéke függ a maradó feszültségek típusától és nagyságától. A károsodás mértékének, illetve a karc morfológiájának jellemzésére különféle paramétereket definiáltunk és határoztunk meg sikeresen.

Mérési eredmények statisztika értékelésével igazoltuk, hogy a  $T$  károsodott terület nagysága a legalkalmasabb arra, hogy csoportosítsuk az üvegtermékeket a maradó feszültség típusa, és szintje szerint is. A  $\Delta y_a$  csipkézettségi mutató segítségével pedig az eltérő viselkedésű – karcmorfológiájú – anyagok között is különbséget tudunk tenni.

A módszer a fenti feladatokra elméletileg kidolgozott. A technikai eszközök és a továbbfejlesztett KKG kiértékelő program alkalmas a különféle minőségű, geometriájú, átlátszó és átlátszatlan üvegtermékek ipari körülmények között is megvalósítható vizsgálatára. Ennek feltétele az eljárás megismétlése és validálása ismert típusú és nagyságú maradó feszültséget tartalmazó üvegtermékek sorozatmérésével. A karcnyomok fényképezésének automatizálásával az eljárás megbízhatósága és gyorsasága tovább növelhető.

## 5. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország fejlesztési terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## 6. Irodalomjegyzék

- [1] J. Kállay, B.M. Maros, P. Barkóczy, N. Kaulics: *Üvegek gyártási maradó feszültségének vizsgálata*, in Proc. of microCAD`2006 Int. Comp. Sci. Conf./Mat. Proc. Techn/, Miskolc, Hungary, pp. 61-68.
- [2] Steinmann, P.A., Tardy, Y., Hintermann W.E.: *Adhesion testing by the Scratch Test Method: the Influence of Intrinsic and Extrinsic Parameters on the Critical Load*. Thin Solid Films, 154 (1987) p. 333-349
- [3] Marosné Berkes M., Kocsisné Baán, M.: *Nemfémes anyagok vizsgálatának egyes kérdései*, Anyagok Világa, ISSN: 1586-0140, III. évf. 1. szám 2002. szept. p. 23. <http://www.materialworld.uni-miskolc.hu>
- [4] Gácsi Z. (szerk.): *Sztereológia és képelemzés*, Well-Press Kiadó, Miskolc (2001)
- [5] Maros, B. M., Kállay, J., Barkóczy P.: *Izzólámpák üvegalkatrészeinek karcvizsgálatának kiértékelése számítógépi képelemzéssel*, in Proc of. 6<sup>th</sup> Conference of Hungarian Association for Image Processing and Pattern Recognition, Jan. 25-27, 2007, Debrecen, Hungary, pp. 79-85.
- [6] Szeghalmy Sz., Barkóczy P., Maros, B. M. Fazekas, A. Póliska Cs.: *A new technique for characterization of residual stresses in glass surfaces: scratch test completed with image analysis*, Materials Science Forum, Vol. 589, (2008), pp. 275-280
- [7] Maros, B. M., Fazekas A., Barkóczy, P. Szeghalmy, Sz., Koncsik, Zs.: *Qualifying glass surfaces by scratch test with integrated image processing*, Proc. of Fracture of Advanced Ceramics, 2008, Stara Lesna, Sept. 7-10, Slovakia, Key Engineering Materials Vol. 413. online at <http://www.scientific.net>, Trans Tech Publications, Switzerland, 2009. pp. 267-274.
- [8] Szeghalmy, Sz.: *Automatikus üvegvizsgálat*, TDK, dolgozat, (Témavezető: Fazekas, A.) DE, Informatikai Kar, 2008, november, p. 26.
- [9] Szeghalmy, Sz., Koncsik, Zs., Maros, B. M., Fazekas, A., Barkóczy, P.: *Üvegfelületek elemzése képelemző módszerrel kiegészített karcvizsgálattal*, KÉPAF 2009. Jan. 28-30. Budapest, Konf. Kiadvány CD-n, p. 9.