

PEVNOST A ODOLNOST PROTI NÁHLÝM ZMĚNÁM TEPLOTY NĚKTERÝCH HROMADNĚ VYRÁBĚNÝCH SKEL

I. Pevnost v ohybu a v nárazu

VLADIMÍR NOVOTNÝ, MILAN VÍCH, PETR KUBIŠTA

Státní výzkumný ústav sklářský, 501 92 Hradec Králové, Škroupova 957

Došlo 3. 10. 1977

U pěti typických hromadně vyráběných československých skel s $\alpha_{20-300^\circ\text{C}} = 3,2 \cdot 10^{-6} - 8,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ byla stanovena pevnost v ohybu a v nárazu, a to na tyčinkách průměru 4 mm. Pevnost v ohybu byla měřena způsobem tříbodového zatěžování a pevnost v nárazu na Charpyho kladivu. Byl též určen vliv poškrábání povrchu a chlazení na výslednou pevnost. Výsledky byly statisticky a graficky zpracovány. Průměrná pevnost sledovaných skel se vlivem jejich rozdílných fyzikálních vlastností pohybuje při ohybu od cca 130 do 200 MPa a při nárazu od cca 210 do 270 MPa. Poškrábáním povrchu se pevnost sníží v průměru o 66 %, popř. 65 %. Vychlazené vzorky mají vyšší pevnost než nevychlazené. Pevnost skla v nárazu je větší než pevnost v ohybu. U nepoškrábaných vzorků byla zjištěna průměrná hodnota poměru pevnosti v nárazu k pevnosti v ohybu 1,45 a u poškrábaných 1,52.

ÚVOD

Pevnosti skla a jeho odolnosti proti náhlým změnám teploty je v současné době věnována zvýšená pozornost. Souvisí to s rozšiřováním použití skla v různých oborech lidské činnosti a zvyšováním požadavků na jeho vlastnosti. Pevnost a odolnost skla proti náhlým změnám teploty je při tom v mnoha případech limitujícím činitelem, na němž závisí použitelnost skleněných předmětů.

V této práci jsme se zaměřili na stanovení uvedených vlastností u pěti typických hromadně vyráběných československých skel. K měření jsme zvolili nejčastěji doporučované, popř. normované metody. Jako zkušební vzorky jsme v souladu s tím použili tyčinky kruhového průřezu. Tyčinky kruhového průřezu a konstantního průměru jsou obvykle používány při stanovení vlastností skla jako materiálu, neboť umožňují vyloučit vliv hran, rohů, tvaru výrobku a opracování jeho povrchu [1], [2]. Měření jsme provedli jednak na vzorcích s původním povrchem, jednak na vzorcích úmyslně poškrábaných.

Článek je vzhledem k svému rozsahu a pro větší přehlednost rozdělen do dvou částí. V této první části jsou obsaženy výsledky stanovení pevnosti zkoumaných skel v ohybu a v nárazu.

Určování pevnosti skel namáháním ohybem popř. nárazem je nejobvyklejší. Pevnost v tlaku nebo tahu se měří méně často.

Pevnost v ohybu je definována jako napětí, při němž praskl zkoušený vzorek, namáhaný ohybem. Vyjadřuje se v Pa, popř. v MPa.

Pevnost v nárazu je definována několika způsoby [1], [2]. Zvolili jsme její vyjádření pomocí pevnosti v ohybu rázem, neboli dynamické pevnosti v ohybu [1], [4], která se určí z práce spotřebované k přeražení vzorku. Vyjadřuje se v Pa, popř. MPa.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Vzorky

Měření jsme prováděli na kruhových tyčinkách průměru $4 \pm 0,2$ mm a délky 60 ± 1 mm.

Tyčinky byly zhotoveny utavením střeptů výrobků v platinovém kelímku v elektrické peci a vertikálním tažením na poloprovozním zařízení SVÚS Hradec Králové. Po nařezání na požadovanou délku byly vzorky vychlazený. Jejich měrný dráhový rozdíl polarizovaného světla byl < 10 nm/cm. Měrný dráhový rozdíl nevychlazených vzorků byl cca 140–160 nm/cm.

Tyčinky byly zhotoveny z těchto skel:

1. tabulové tažené systémem Fourcault,
2. bezbarvé obalové,
3. hnědé obalové,
4. hlinitoboritokřemičité Neutral pro farmaceutické účely,
5. laboratorní boritokřemičité Simax.

Tabulka I

Chemické složení zkoušených skel [hmot. %]

Složka	Typ skla				
	tažené tabulové	bezbarvé obalové	hnědé obalové	Neutral	Simax
SiO ₂	72,6	71,5	72,8	71,4	81,1
B ₂ O ₃	—	—	—	7,7	12,1
Al ₂ O ₃	1,1	0,5	2,1	7,0	2,1
Fe ₂ O ₃	0,07	0,08	0,2	0,05	0,07
BaO	—	—	—	2,5	0,1
CaO	7,2	7,7	6,6	1,6	0,5
MgO	4,0	4,7	4,1	—	0,1
Na ₂ O	14,8	15,0	13,6	8,8	3,6
K ₂ O	0,3	0,3	0,6	1,1	0,3

Tabulka II

Fyzikální vlastnosti zkoušených skel

Veličina	Rozměr	Typ skla				
		tažené tabulové	bezbarvé obalové	hnědé obalové	Neutral	Simax
střední lineární součinitel délkové tepl. roztažnosti	[°C ⁻¹]	$8,90 \cdot 10^{-6}$	$8,81 \cdot 10^{-6}$	$8,80 \cdot 10^{-6}$	$6,26 \cdot 10^{-6}$	$3,20 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{20-300}^{\circ\text{C}}$ minimum diferenční dila- tometrické křivky	[°C]	535	530	530	575	540
Youngův modul pružnosti E	[MPa]	$7,25 \cdot 10^4$	$7,23 \cdot 10^4$	$7,40 \cdot 10^4$	$7,60 \cdot 10^4$	$6,29 \cdot 10^4$
Poissonovo číslo μ	—	0,220	0,219	0,219	0,200	0,220
hustota	[g · cm ⁻³]	2,49	2,49	2,49	2,48	2,23

Chemické složení skel je v tabulce I, některé fyzikální vlastnosti v tabulce II. Hodnoty uvedené v tabulce II byly stanoveny v SVÚS Hradec Králové měřeními běžnými metodami. K měření Youngova modulu byla použita rezonanční metoda [1].

Se vzorky bylo zacházeno běžným způsobem, tj. nebylo zabráňováno náhodnému dotyku neostrých předmětů s povrchem skla. Před zkoušením pak byly všechny vzorky pečlivě prohlédnuty okem, jednak v denním světle, jednak v polariskopu, aby se zabránilo případnému ovlivnění výsledků viditelným porušením povrchu nebo nehomogenitami.

Vzorky, na nichž jsme určovali vliv poškození povrchu, jsme ručně poškrábali v radiálním směru brusným plátnem sypaným SiC zrnitosti č. 240. Na tyčinkách bylo okem viditelné rýhy.

Metodika měření pevnosti

Pevnost v ohybu

Ke stanovení pevnosti skla v ohybu jsme použili metodu třibodového zatěžování. Pevnost v ohybu je v případě tyčinek kruhového průřezu definována vztahem [1], [2], [3]

$$\sigma_{Po} = \frac{8 \cdot P \cdot l}{\pi D^3}, \quad (1)$$

kde σ_{Po} je pevnost v ohybu,
 P zatížení, při němž nastane lom,
 l vzdálenost mezi podpěrami,
 D průměr tyčinek.

V našem případě byla vzdálenost mezi podpěrami 50 mm.

Pevnost v ohybu jsme stanovovali na dvou typech přístrojů:

a) Zkušební stroj pro stanovení pevnosti tkanin, Kovostav, n. p., Ústí nad Orlicí.

Přístroj jsme upravili tak, aby na něm bylo možné zkoušet pevnost v ohybu. Přesnost přístroje je $\pm 1\%$.

b) Přístroj na měření pevnosti v ohybu, tahu a tlaku, Universalprüfmaschine 1387, firmy Zwick Prüfmaschinen, Ulm.

Rychlost zatěžování byla u všech měření přibližně stejná, aby naměřené výsledky byly vzájemně porovnatelné. Z toho důvodu byla rychlost posunu čelisti s břity nastavena vždy tak, aby rychlost zatěžování v okolí zátěže, působící prasknutí, byla v rozmezí 350—500 MPa/min.

Převážnou část měření pevnosti v ohybu jsme prováděli na přístroji typu a). Na přístroji typu b) jsme získali shodné výsledky, jak vyplývá z tabulky VIII.

Pevnost v nárazu

Pevnost v nárazu jsme vyjadřovali jako tzv. dynamickou pevnost v ohybu, která je dána vzorcem [1], [4]

$$\sigma_{Pr} = \sqrt{\frac{18 \cdot E \cdot A}{F \cdot l}}, \quad (2)$$

kde σ_{Pr} je dynamická pevnost v ohybu,
 E Youngův modul pružnosti,
 A práce vykonaná při nárazu,
 F plocha průřezu vzorku,
 l vzdálenost podpěr.

Odvození tohoto vzorce uvádí Preston [4].

Pevnost v nárazu jsme stanovovali na upraveném Charpyho kladivu PSW 1,5, firmy VEB Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig.

Hmotnost kladiva je 0,3155 kg, poloměr kyvu kladiva 250 mm a výchozí úhel vychýlení byl volen 20°, popř. 10°. Spotřebovaná práce se pohybovala v rozmezí cca 2—47 mJ.

Vzdálenost podpěr byla 40 mm.

Délka vzorků i vzdálenosti mezi podpěrami u obou metod — 50 mm, popř. 40 mm — jsou v souladu s připravovanou unifikací zkušebních metod pro měření pevnosti skel v rámci RVHP.

Výsledky měření

Jak bylo v úvodu uvedeno, prováděli jsme zkoušky na tyčinkách z pěti skel. Při zkouškách jsme zkoumali tyto vlivy na výslednou pevnost:

- poškrábání,
- chlazení,
- vzájemné poškození vzorků běžnou manipulací, od jejich zhotovení do měření.

Tabulka III

Pevnost v ohybu nepoškrábaných a poškrábaných vzorků

Typ skla	Pevnost v ohybu σ_{P0} [MPa]			v [%]	n
	$\bar{x}$	s_x	I_x		
Tabulové tažené:					
nepoškrábané	164	40	82	24	40
poškrábané	44	7	13	16	30
Obalové sklo bezbarvé:					
nepoškrábané	155	25	52	16	25
poškrábané	49	6	13	12	25
Obalové sklo hnědé:					
nepoškrábané	134	31	63	23	25
poškrábané	52	5	11	10	25
Neutral:					
nepoškrábaný	163	37	75	23	40
poškrábaný	60	8	16	13	25
Simax:					
nepoškrábaný	198	34	70	17	25
poškrábaný	65	9	19	14	25

Naměřené hodnoty pevnosti jednotlivých vzorků jsme statisticky zpracovávali. Výpočty jsme prováděli s předpokladem normálního rozložení, i když, jak vyplývá z přiložených histogramů četnosti, tento předpoklad nebyl vždy splněn.

Tabulka IV

Pevnost v nárazu nepoškrábaných a poškrábaných vzorků

Typ skla	Pevnost v nárazu σ_{Pr} [MPa]			v [%]	n
	$\bar{x}$	s_x	I_x		
Tabulové tažené: nepoškrábané	242	33	68	14	30
	82	14	29	17	30
Obalové sklo bezbarvé: nepoškrábané	210	30	63	14	25
	76	2	5	3	25
Obalové sklo hnědé: nepoškrábané	209	37	75	18	25
	80	9	17	11	25
Neutral: nepoškrábaný	270	36	74	13	30
	87	14	30	16	25
Simax: nepoškrábaný	238	62	129	26	25
	78	12	26	15	25

Tabulka V

Porovnání pevnosti chlazených a nechlazených vzorků nepoškrábaných [MPa]

Typ skla	Tabulové tažené				Neutral			
	Pevnost v ohybu		Pevnost v nárazu		Pevnost v ohybu		Pevnost v nárazu	
	chlaz.	nechlaz.	chlaz.	nechlaz.	chlaz.	nechlaz.	chlaz.	nechlaz.
$\bar{x}$	164	136	242	235	163	149	270	243
s_x	40	41	33	66	37	31	36	47
I_x	82	85	68	135	75	64	74	97
v	24	30	14	28	23	21	13	19
n	40	30	30	30	40	30	30	30

Tabulka VI

Porovnání pevnosti chlazených a nechlazených vzorků poškrábaných [MPa]

Typ skla	Tabulové tažení			
	Pevnost v ohybu		Pevnost v nárazu	
	chlazené	nechlazené	chlazené	nechlazené
$\bar{x}$	44	53	82	86
s_x	7	6	14	15
I_x	13	12	29	30
v	16	11	17	17
n	30	30	30	30

Tabulka VII

Pevnost vzorků poškozených běžnou manipulací a „nepoškozených“ [MPa]

Typ skla	Neutral	
	Pevnost v ohybu	
	poškozené běžnou manipulací	„nepoškozené“
$\bar{x}$	163	262
s_x	37	83
I_x	75	169
v	23	32
n	40	30

„nepoškozené“ vzorky byly ihned po vytažení vzájemně proloženy papírem

Tabulka VIII

Pevnost v ohybu vzorků z tabulového skla stanovená na dvou typech přístrojů [MPa]

Typ skla	Tabulové tažení	
	stanovené na přístroji typu a)	stanovené na přístroji typu b)
$\bar{x}$	164	171
s_x	40	37
I_x	82	73
v	24	22
n	40	105

Výsledky měření udávají tabulky III—VIII. Význam symbolů v uvedených tabulkách:

$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ = aritmetický průměr naměřených hodnot,

n = počet jednotlivých měření x_i ,

$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$ = směrodatná odchylka jednoho měření,

$I_x = t_{0,05} \cdot s_x$ = poloviční šíře intervalu spolehlivosti jednoho měření pro pravděpodobnost 95 %
($t_{0,05}$ = kritická hodnota Studentova rozdělení pro 5 % hladinu významnosti),

$v = \frac{s_x \cdot 100}{\bar{x}}$ = koeficient variace jednoho měření.

Tabulka IX

Vztah mezi pevností poškrábaných a nepoškrábaných vzorků

Typ skla	σ_{P0} poškr./ σ_{P0}	σ_{Pr} poškr./ σ_{Pr}
Tabulové tažené	0,27	0,34
Obalové sklo bezbarvé	0,32	0,36
Obalové sklo hnědé	0,39	0,38
Neutral	0,37	0,32
Simax	0,33	0,33
$\bar{x}$	0,34	0,35
s_x	0,05	0,02
I_x	0,13	0,07

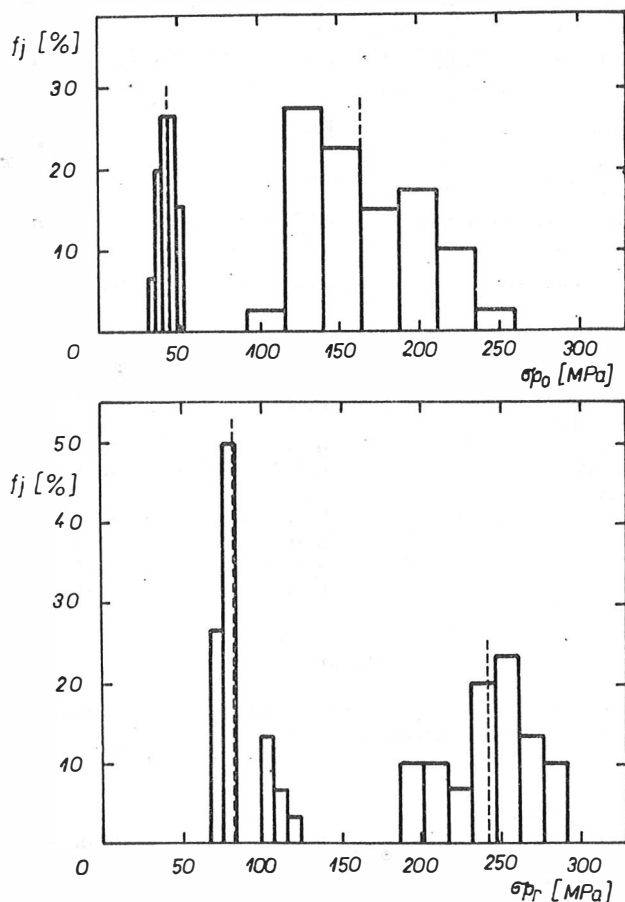
Tabulka X

Vztah mezi pevností v nárazu a v ohybu nepoškrábaných a poškrábaných vzorků

Typ skla	σ_{Pr}/σ_{P0}	
	nepoškrábané	poškrábané
Tabulové tažené	1,48	1,86
Obalové sklo bezbarvé	1,35	1,55
Obalové sklo hnědé	1,56	1,54
Neutral	1,66	1,45
Simax	1,20	1,20
$\bar{x}_5$	1,45	1,52
s_x	0,18	0,24
I_x	0,50	0,66
$\bar{x}_{10}$	1,49	
s_{x10}	0,20	
I_{x10}	0,46	

Tabulka IX. udává vztah mezi pevností poškrábaných a nepoškrábaných vzorků. V tabulce X. je uveden vztah mezi pevností v nárazu a v ohybu u nepoškrábaných a poškrábaných vzorků.

Rozdělení nalezených hodnot pevnosti je znázorněno pomocí histogramů četnosti na obrazech 1—8.

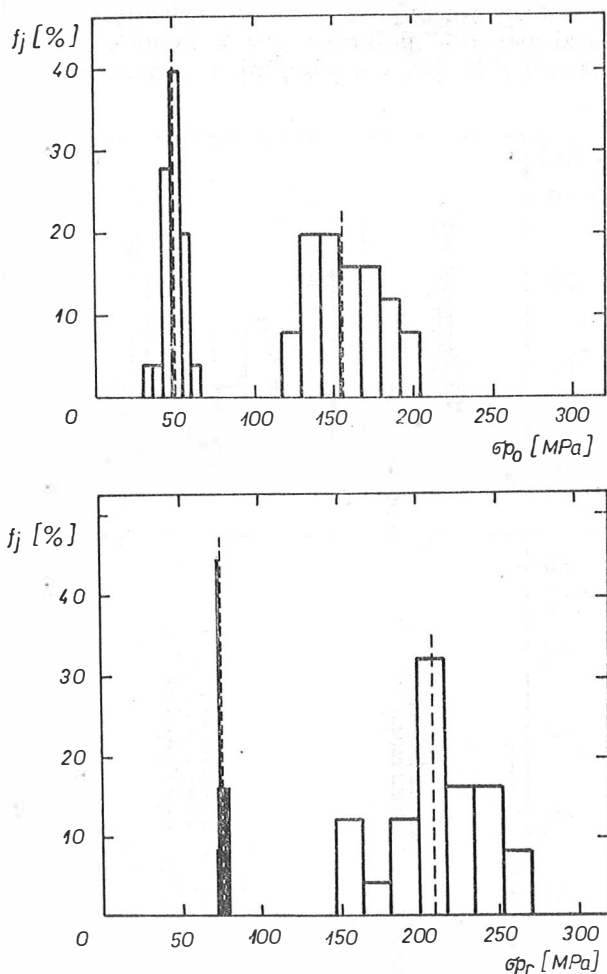


Obr. 1. Pevnost v ohybu a v nárazu vzorků z tabulového skla s poškrábaným a nepoškrábaným povrchem. Histogramy pevnosti poškrábaných vzorků jsou na obr. 1—6 vždy vlevo (v oblasti nižší pevnosti); σ_{Po} — pevnost v ohybu, σ_{Pr} — pevnost v nárazu, f_j — relativní četnost.

DISKUSE

Z naměřených a vypočtených hodnot vyplynula řada poznatků. Průměrná pevnost v ohybu nepoškrábaných vzorků se pohybuje v rozmezí cca 130 až 200 MPa (viz tabulka III a obrázky 1—5), přičemž největší pevnost má sklo Simax a nejmenší obalové sklo. U poškrábaných vzorků již rozdíl mezi pevností jednotlivých vzorků není tak výrazný. Koeficient variace je

u nepoškrábaných vzorků vždy vyšší (16—24 %) než u poškrábaných (10—16 %). Naměřené hodnoty pevnosti jsou srovnatelné s pevností, kterou udává Thomas [5] a Reports by Technical Committees of the Society [6].

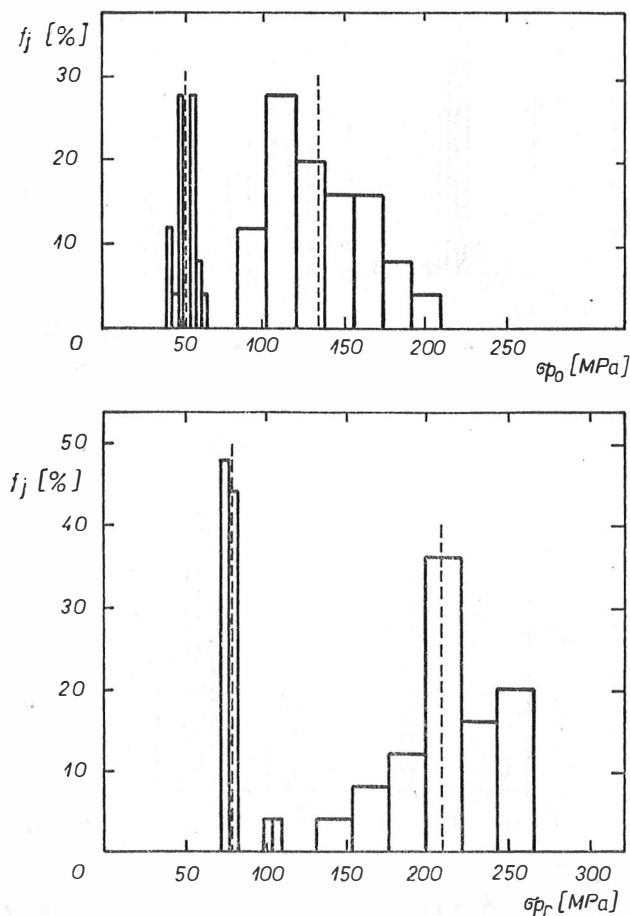


Obr. 2. Pevnost v ohybu a v nárazu vzorků z bezbarvého obalového skla s poškrábaným a nepoškrábaným povrchem; σ_{p0} — pevnost v ohybu, σ_{pr} — pevnost v nárazu, f_j — relativní četnost.

Při zkoušce pevnosti v nárazu nepoškrábaných a poškrábaných vzorků jsme získali vyšší hodnoty než při zkouškách pevnosti v ohybu (tabulka IV a obrázky 1—5). Největší pevnost jsme však naměřili u skla Neutral a nejmenší opět u obalových skel. Koeficient variace značně kolísá. Při měření pevnosti v nárazu se pohybovala spotřebovaná práce v rozmezí cca 2—47 mJ. McMillan a Tesh [7] uvádějí prakticky shodné výsledky.

Vliv poškození povrchu na pevnost skla je ukázán v tabulkách VII a IX

a na obrázku 7. Tabulka VII udává pevnost vzorků poškozených běžnou manipulací a vzorků, které ihned po vytažení byly vzájemně proloženy papírem. Mezi průměrnými hodnotami pevnosti je podstatný rozdíl, který ukazuje, že stav povrchu se i běžným používáním zhoršuje, což se projevuje snížením mechanické pevnosti skla (v našem případě o 38 %). Tabulka IX udává vztah mezi pevností poškrábaných a nepoškrábaných vzorků. Poškrábáním se pevnost skla, jak v ohybu, tak v nárazu, snížila přibližně o dvě třetiny.

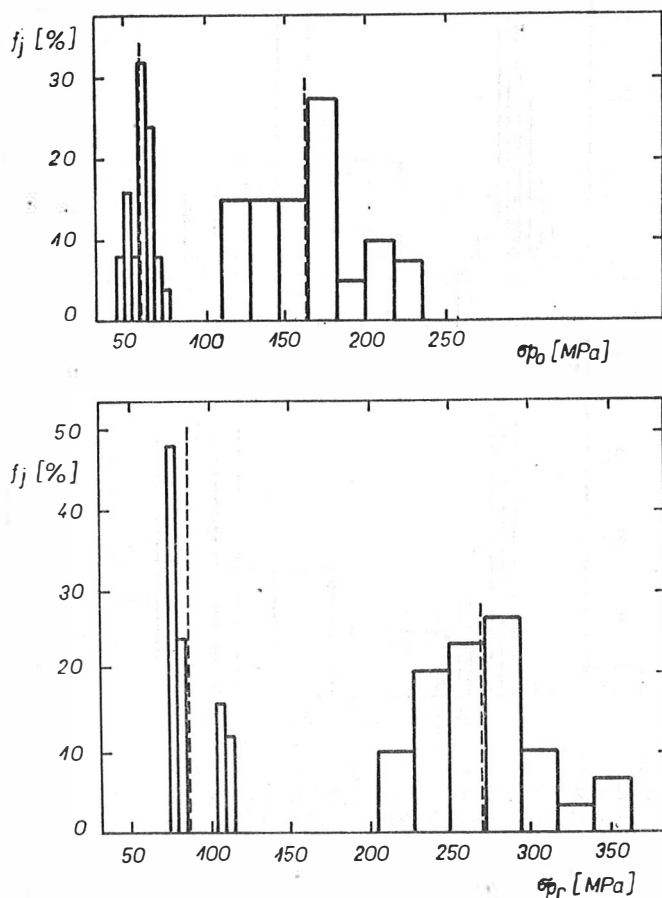


Obr. 3. Pevnost v ohybu a v nárazu vzorků z hnědého obalového skla s poškrábaným a nepoškrábaným povrchem; σ_{p0} — pevnost v ohybu, σ_{pr} — pevnost v nárazu, f_j — relativní četnost.

Malý rozptyl poměrů pevností ukazuje na přibližně stejný stupeň poškození vzorků. Snížení pevnosti skel s poškozeným povrchem je v souladu s obecně známou skutečností, že pevnost skla závisí především na jakosti povrchu, popř. na jeho poškození [8].

Porovnání pevnosti chlazených a nechlazených vzorků nepoškrábaných

a poškrábaných udávají tabulky V a VI a obrázky 1 a 6. Významnost rozdílů mezi průměrnou pevností jednotlivých skel jsme posoudili *t*-testem [9]. Za hladinu významnosti jsme zvolili 5 % a z výsledků vyplynulo, že rozdíl mezi průměrnou pevností chlazených a nechlazených vzorků ze skla tabulového a Neutral je pro oba druhy pevnosti, až na dvě výjimky, statisticky významný. Nevýznamný je rozdíl mezi hodnotami pevnosti v nárazu pro vzorky z tabulového skla nepoškrábané (242 MPa, 235 MPa) a poškrábané (82 MPa, 86 MPa).



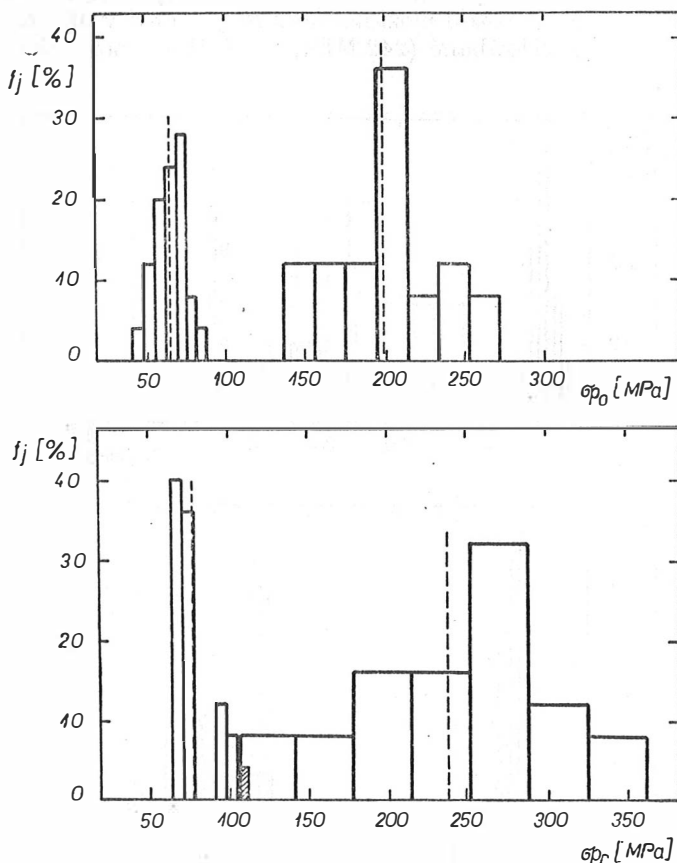
Obr. 4. Pevnost v ohybu a v nárazu vzorků ze skla Neutral s poškrábaným a nepoškrábaným povrchem; σ_{Po} — pevnost skla v ohybu, σ_{Pr} — pevnost v nárazu, f_j — relativní četnost.

Pevnost nepoškrábaných vzorků nechlazených je nižší než stejných vzorků chlazených.

U poškrábaných vzorků nelze učinit jednoznačné závěry, neboť výsledky, mimo jiné, mohly být ovlivněny ne zcela stejnou intenzitou poškrábání jednotlivých skupin vzorků.

Převážnou část měření pevnosti v ohybu jsme prováděli na přístroji

typu a). Tabulka VIII udává pevnosti vzorků z tabulového skla stanovené na obou typech přístrojů. T-testem, při hladině významnosti 5 %, jsme zjistili, že rozdíl mezi průměrnou pevností je statisticky nevýznamný, tzn. že výsledky měření na obou přístrojích jsou shodné.



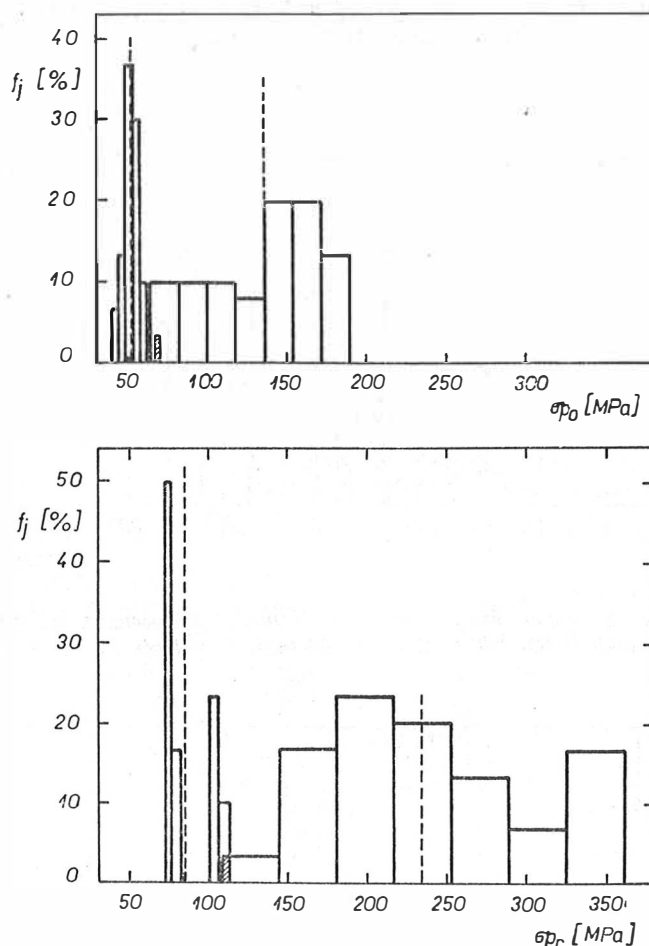
Obr. 5. Pevnost v ohybu a v nárazu vzorků ze skla Simax s poškrábaným a nepoškrábaným povrchem; σ_{Po} — pevnost v ohybu, σ_{Pr} — pevnost v nárazu, f_j — relativní četnost.

Vztah mezi pevností v nárazu a v ohybu u nepoškrábaných a poškrábaných vzorků je uveden v tabulce X. Z tabulky vyplývá, že tento poměr je u nepoškrábaných i poškrábaných vzorků přibližně stejný (1,45, popř. 1,52), přičemž u poškrábaných vzorků je větší rozptyl výsledků. Celkový průměr je 1,49. Tato hodnota je vcelku v dobrém souladu s údaji v literatuře.

Preston [10] udává pro poměr σ_{Pr}/σ_{Po} hodnoty 1,42, popř. 1,20. Haward [11] uvádí průměrnou hodnotu tohoto poměru 1,59.

Tato vyšší pevnost skla v nárazu je vysvětlována krátkodobým účinkem namáhání, tj. zmenšenou únavou. Ověření tohoto „časového“ faktoru uvádějí Haward [11] a Holland a Turner [12]. Vliv únavy na pevnost skla dále popisují Sugarman [8] a Mould a Southwick [13].

Baker a Preston [14] zjistili, že se vzrůstem doby zatížení v rozsahu od milisekund do hodin klesne pevnost skla o cca 40 %. V našem případě klesla pevnost v průměru o cca 30 %, což je v souladu s tím, že rozsah použitých časů byl menší. (Průměrná doba zatěžování při pevnosti v ohybu byla cca 23 s a při pevnosti v nárazu cca 10^{-3} až 10^{-4} s.)



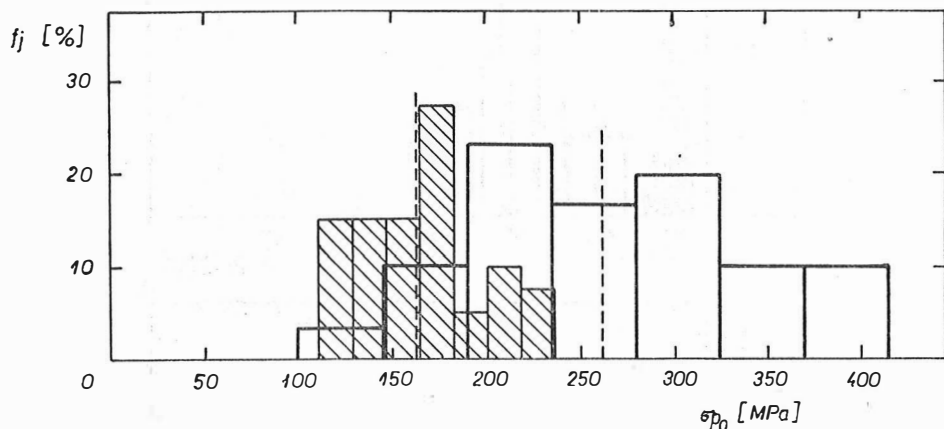
Obr. 6. Pevnost v ohybu a v nárazu nechlazených vzorků z tabulového skla s poškrábaným a nepoškrábaným povrchem; σ_{p0} — pevnost v ohybu, σ_{pT} — pevnost v nárazu, f_j — relativní četnost.

Z histogramů četnosti experimentálně nalezených hodnot (obrázky 1—8) vyplývá, že rozložení není ve všech případech normální. Je pravděpodobné, že důvodem je skutečnost, že zkoušky byly prováděny na malém počtu vzorků (cca 30 kusů), přičemž výsledky ukazovaly velký rozptyl. Tuto skutečnost potvrzuje obrázek 8, který ukazuje rozdělení hodnot pevnosti v ohybu vzorků z tabulového skla stanovené na 105 vzorcích (viz tabulka VIII).

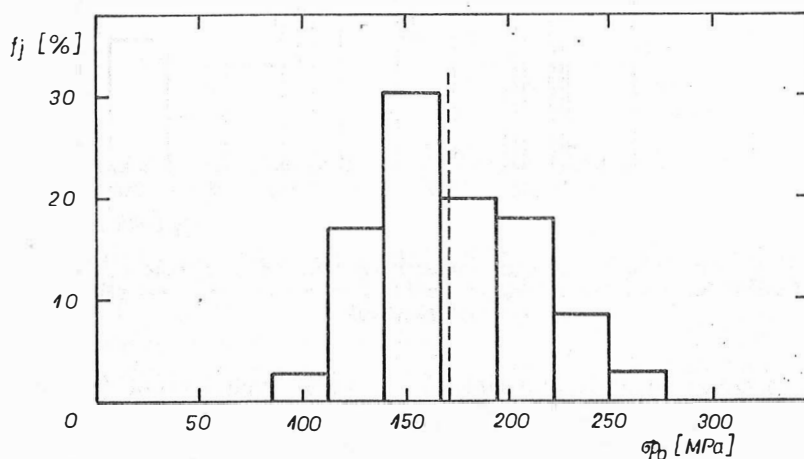
V tomto případě je rozdělení normální, což jsme si ověřili testem Kolmogorova—Smirnova [15].

Obrázky 1—6 ukazují, že pevnost nepoškrábaných vzorků jak v nárazu, tak v ohybu je vždy vyšší než pevnost poškrábaných vzorků; vykazuje však mnohem větší rozptyl naměřených hodnot.

Obrázek 7 ukazuje pevnost v ohybu vzorků ze skla Neutral poškozených běžnou manipulací a „nepoškozených“ (viz tabulka VII). Z výsledků vyplývá, že se zvyšující se pevností skla zvyšuje se i rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 7. Pevnost v ohybu vzorků ze skla Neutral poškozených běžnou manipulací (šrafováno) a „nepoškozených“; σ_{p0} — pevnost v ohybu, f_j — relativní četnost.



Obr. 8. Pevnost v ohybu vzorků z tabulového skla stanovená na přístroji typu b); σ_{p0} — pevnost v ohybu, f_j — relativní četnost.

ZÁVĚR

1. Průměrná pevnost nepoškrábaných vzorků pěti typických hromadně vyráběných československých skel s α_{20-300} od $3,2 \cdot 10^{-6}$ do $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, stanovená na tyčinkách průměru cca 4 mm, se vlivem rozdílných fyzikálních vlastností skel pohybuje při ohybu od cca 130 do 200 MPa a při nárazu od cca 210 do 270 MPa. Poškrábáním povrchu se pevnost těchto skel sníží v průměru o dvě třetiny.

Směrodatné odchylky i koeficienty variace jsou ve většině případů u nepoškrábaných vzorků větší než u poškrábaných.

2. Mezi průměrnou pevností nepoškrábaných chlazených a nechlazených vzorků ze skla tabulového a Neutral je rozdíl. Vychlazené vzorky mají vyšší pevnost než nevychlazené.

3. Pevnost skel v nárazu je větší než pevnost v ohybu. Průměrná hodnota poměru pevnosti v nárazu k pevnosti v ohybu u nepoškrábaných vzorků je 1,45, u poškrábaných 1,52. Snížení pevnosti při namáhání ohybem souvisí se zvýšením únavy skla oproti rázovým zkouškám, kde je sklo namáháno po mnohem kratší dobu.

Literatura

- [1] Volf M. B. v knize: *Chemická odolnost, hustota a mechanické vlastnosti skel*, 1. vydání, str. 109, 126, 170. SNTL, Praha 1967.
- [2] Novotný V. v knize: *Zpevňování skla*, 1. vydání, str. 101. SNTL, Praha 1972.
- [3] Cornelissen J., Zijstra A. L. v knize: *Symposium sur la résistance mécanique du verre et les moyens de l'améliorer*, Florence, 25—29 septembre 1961, str. 337. Union scientifique continentale du verre, secrétariat, 24, Rue Dourlet, Charleroi (Belgique).
- [4] Preston F. W.: *J. Am. Ceram. Soc.* 14, 428 (1931).
- [5] Thomas W. F. v knize: *Symposium on the strength of glass and glassware*. Society of Glass Technology 1974.
- [6] Reports by the Technical Committees of the Society: *Glass Technol.* 10, 1 (1969).
- [7] McMillan P. W., Tesh J. R.: *J. Mat. Sci.* 10, 621 (1975).
- [8] Sugarman B.: *J. Mater. Sci.* 2, 275 (1967).
- [9] ČSN 01 0250 *Statistické metody v průmyslové praxi*, 1972.
- [10] Preston F. W.: *J. Am. Ceram. Soc.* 14, 432 (1931).
- [11] Haward R. N.: *J. Soc. Glass. Technol.* 28, 5 (1944).
- [12] Holand A. J., Turner W. E. S.: *J. Soc. Glass Tech.* 24, 46 (1940).
- [13] Mould R. E., Southwick, R. D.: *J. Amer. Ceram. Soc.* 42, 542, 582 (1959).
- [14] Baker T. C., Preston F. W.: *J. Appl. Phys.* 17, 170 (1946).
- [15] Reisenauer R. v knize: *Metody matematické statistiky*, 1. vydání, str. 88. SNTL, Praha 1965.

ПРОЧНОСТЬ И ТЕРМИЧЕСКАЯ УСРОЙЧИВОСТЬ НЕКОТОРЫХ СТЕКОЛ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

I. Прочность при изгибе и ударе

Владимир Новотны, Милан Вих, Петр Кубишта

Государственный научно-исследовательский институт стекла, Градец Кралове

Целью предлагаемой работы является с одной стороны определение прочности при изгибе и ударе пяти видов стекла массового производства с исходной поверхностью, исследование влияния повреждения поверхности, охлаждения, а с другой стороны

установление отношения между прочностью при изгибе и прочностью при ударе. Измерения проводились на палочках с диаметром $4 \pm 0,2$ мм и длиной 60 ± 1 мм. Палочки изготавливались из следующих видов стекла:

1. листовое стекло, вытянутое системой Fourcault,
2. бесцветное тарное стекло,
3. коричневое тарное стекло,
4. алюмоборосиликатное стекло Neutral, предназначенное для фармацевтических целей,
5. лабораторное боросиликатное стекло Simax.

Химический состав и физические свойства приведенных видов стекла находятся в таблице I и II.

С пробами работали обычным способом, т.е. без исключения случайного соприкосновения неострых предметов с поверхностью стекла. На пробах, предназначенных для исследования влияния царапин на поверхности, проводили сильные царапины в радиальном направлении абразивным полотном с SiC размером зерна № 240.

Прочность при изгибе установили методом трехточечной нагрузки с расстоянием жербеек 50 мм и скоростью нагрузки в пределах 350—500 МПа/мин. Прочность при ударе устанавливали с помощью молотка Шарпи и приводили ее в виде динамической прочности при изгибе согласно формуле (2). Расстояние жербеек составляло 40 мм и затраченная работа находилась в пределах 2—47 мдж.

Средние величины прочности при изгибе и ударе проб без царапин и проб с ними приводятся в таблицах № III, или IV. Влияние царапин на прочность стекла приводится далее в таблице IX. В таблице № VII сопоставляется прочность при изгибе проб, поцарапанных при обычной манипуляции, и проб, между которые сразу после вытяжки поместили бумажную прокладку.

Из результатов следует, что средняя прочность проб без царапин при изгибе находится в пределах приблизительно от 130 до 200 МПа, а прочность при ударе от 210 до 270 МПа. В результате царапин на поверхности приведенных видов стекла понижается в среднем на 66 %, или 65 %. Стандартные отклонения и коэффициенты вариации в большинстве случаев у непоцарапанных проб больше, чем у поцарапанных проб.

Сопоставление прочности охлажденных и неохлажденных проб без царапин и с ними приводится в таблицах № V и VI. Из результатов следует, что охлажденные пробы без царапин имеют более высокую прочность по сравнению с неохлажденными пробами. Относительно поцарапанных проб нельзя проводить однозначные выводы.

Прочность при изгибе проб листового стекла, установленная в двух типах приборов, приводится в таблице VIII.

Отношение между прочностью при ударе и при изгибе у непоцарапанных и поцарапанных проб приводится в таблице № X. Из таблицы видно, что прочность стекла при ударе больше, чем прочность при изгибе. Средняя величина отношения прочности при ударе к прочности при изгибе у непоцарапанных проб составляет 1,45, у поцарапанных 1,52. Понижение прочности при изгибе напряжением связано с повышением усталости стекла относительно испытаний на удар, когда стекло подвергается напряжению в гораздо короткий отрезок времени.

Рис. 1. Прочность при изгибе и ударе проб из листового стекла с поцарапанной и непоцарапанной поверхностью. Гистограммы прочности поцарапанных проб приводятся на рис. 1—6 всегда влево (в области более низкой прочности); $\sigma_{\text{гб}}$ — прочность при изгибе, $\sigma_{\text{уд}}$ — прочность при ударе, f_1 — относительная четность.

Рис. 2. Прочность при изгибе и при ударе проб из бесцветного тарного стекла с поцарапанной и непоцарапанной поверхностью; $\sigma_{\text{гб}}$ — прочность при изгибе, $\sigma_{\text{уд}}$ — прочность при ударе, f_1 — относительная четность.

Рис. 3. Прочность при изгибе и ударе проб из коричневого тарного стекла с поцарапанной и непоцарапанной поверхностью; $\sigma_{\text{гб}}$ — прочность при изгибе, $\sigma_{\text{уд}}$ — прочность при ударе, f_1 — относительная четность.

Рис. 4. Прочность при изгибе и ударе проб из стекла Neutral с поцарапанной и непоцарапанной поверхностью; $\sigma_{\text{гб}}$ — прочность при изгибе, $\sigma_{\text{уд}}$ — прочность при ударе, f_1 — относительная четность.

Рис. 5. Прочность при изгибе и ударе проб из стекла Simax с поцарапанной и непоцарапанной поверхностью; $\sigma_{\text{гб}}$ — прочность при изгибе, $\sigma_{\text{уд}}$ — прочность при ударе, f_1 — относительная четность.

Рис. 6. Прочность при изгибе и ударе неохлажденных проб из листового стекла с поцарапанной и непоцарапанной поверхностью; $\sigma_{\text{гб}}$ — прочность при изгибе, $\sigma_{\text{уд}}$ — прочность при ударе, f_1 — относительная четность.

Рис. 7. Прочность при изгибе и ударе проб из стекла Neutral поцарапанных обычной манипуляцией (защитировано) и „неповрежденных“; σ_{ro} — прочность при изгибе, f_1 — относительная четность.

Рис. 8. Прочность при изгибе проб из листового стекла, установленная с помощью прибора б); σ_{ro} — прочность при изгибе, f_1 — относительная четность.

STRENGTH AND RESISTANCE TO ABRUPT CHANGES IN TEMPERATURE OF SOME MASS-PRODUCED TYPES OF GLASS

I. Tensile Strength and Impact Strength

Vladimír Novotný, Milan Vích, Petr Kubišta

State Glass Research Institute, Hradec Králové

The present study had the aim to determine bending strength and impact strength of five mass-produced types of glass with original surfaces, the effect of surface damaging and annealing on strength, and the relationship between bending and impact strengths. The measurements were carried out on dia. 4 ± 0.2 mm glass rods 60 ± 1 mm in length. The rods were prepared from the following types of glass: 1. Drawn sheet glass of the Fourcault type, 2. colourless container glass, 3. brown container glass, 4. aluminoborosilicate glass Neutral for pharmaceutical applications, 5. laboratory borosilicate glass Simax.

The chemical compositions and physical properties of the glasses are specified in Tables I and II.

The specimens were handled in the normal manner, i.e. no special care was taken to avoid accidental contact with non-sharp objects. The samples on which the effect of surface damaging was to be determined were scratched thoroughly in the radial direction with abrasive cloth of No. 240 grain size.

Bending strength was determined by the method of three-point loading at a distance of 50 mm between the supports and a loading rate of 350 to 500 MPa/min. Impact strength was measured by the Charpy hammer and expressed as the so-called dynamic bending strength according to formula (2). The distance of supports was 40 mm and the energy consumed was in the range from 2 to 47 mJ.

The mean bending and impact strength values for unscratched and scratched specimens are listed in Tables III and IV respectively. The effect of scratching on glass strength is further illustrated by Table IX. Table VII compares the strength of specimens scratched by normal handling with that of specimens protected by wrapping in paper directly after manufacture.

The results indicate that the mean bending strength of unscratched specimens is in the ranges of 130 to 200 MPa and impact strength in the ranges of 210 to 270 MPa respectively. Surface scratching reduces the strength of these glasses on the average by 66 % and 65 % respectively. Standard deviations and variation coefficients are in most cases higher with the unscratched specimens than with the scratched ones.

A comparison of the strengths of annealed and non-annealed scratched and unscratched specimens is provided by Tables V and VI. The results show that unscratched annealed specimens exhibit higher strength than the non-annealed ones. No explicit conclusions can be reached in the case of scratched specimens.

The bending strength of sheet glass specimens determined on two types of testers is listed in Table VIII.

The relationship between impact strength and bending strength of unscratched and scratched specimens is shown in Table X. The table implies that impact strength of the glasses is higher than the bending strength. The mean value of impact strength to bending strength ratio for unscratched and scratched specimens is 1.45 and 1.52 respectively. The reduced bending strength is related to increased fatigue effect when compared to the impact tests where the glass is stressed for much shorter periods of time.

- Fig. 1. Bending and impact strengths of sheet glass specimens with scratched and unscratched surfaces. Strength histograms of scratched specimens are shown on the left-hand sides of diagrams 1 to 6 (in the lower-strength region); σ_{P0} — bending strength, σ_{Pr} — impact strength, f_j — relative frequency.
- Fig. 2. Bending and impact strengths of colourless container glass specimens with scratched and unscratched surfaces; σ_{P0} — bending strength, σ_{Pr} — impact strength, f_j — relative frequency.
- Fig. 3. Bending and impact strengths of brown container glass specimens with scratched and unscratched surfaces; σ_{P0} — bending strength, σ_{Pr} — impact strength, f_j — relative frequency.
- Fig. 4. Bending and impact strengths of Neutral glass specimens with scratched and unscratched surfaces; σ_{P0} — bending strength, σ_{Pr} — impact strength, f_j — relative frequency.
- Fig. 5. Bending and impact strengths of Simax glass specimens with scratched and unscratched surfaces; σ_{P0} — bending strength, σ_{Pr} — impact strength, f_j — relative frequency.
- Fig. 6. Bending and impact strengths of non-annealed sheet glass specimens with scratched and unscratched specimens. σ_{P0} — bending strength, σ_{Pr} — impact strength, f_j — relative frequency.
- Fig. 7. Bending and impact strengths of Neutral glass specimens handled in the normal way and the „undamaged“ ones σ_{P0} — bending strength, σ_{Pr} — impact strength, f_j — relative frequency.
- Fig. 8. Bending strength of sheet-type glass specimens determined on type b) tester. σ_{P0} — bending strength, f_j — relative frequency.
-