

TOMASZ ZDUNIEWICZ\*

# Wytrzymałość szkła hartowanego termicznie w aspekcie badania metodą czteropunktowego zginania oraz metodą uderzenia zginającego

Wymagania zakładowej kontroli produkcji nakładają na producentów szkła hartowanego stosowanie badań do kontroli i oceny wyrobu gotowego. Do tej pory, by określić wytrzymałość mechaniczną tych wyrobów stosowano metodę zginania czteropunktowego, dzięki której uzyskiwano wynik w postaci wartości liczbowej wyrażony w  $N/mm^2$ . Metoda ta charakteryzuje się pracochłonnością oraz związana jest z wysokim kosztem zakupu prasy do zginania. Dlatego też Laboratorium Badawcze ISCMOIB Oddziału Szkła w Krakowie opracowało metodę alternatywną, pozostającą w korelacji z metodą zginania czteropunktowego. W wyniku obliczeń, doświadczeń i prób została opracowana metoda badania wytrzymałości mechanicznej szkła na uderzenie zginające przy użyciu stalowych kul, która w sposób szybki i przy niewielkim nakładzie kosztów pozwala na sprawdzenie wyrobów gotowych z hartowanego szkła float.

## 1. Metody badań wytrzymałości mechanicznej szkła

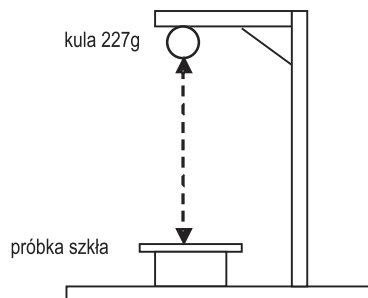
### 1.1. Badanie wytrzymałości mechanicznej szkła na uderzenie kulą 227 g

Przez wiele lat w Polsce badanie wytrzymałości mechanicznej szkła hartowanego polegało na jego uderzeniu swobodnie spadającą kulą o masie 227 g z określonej wysokości. Badanie to wykonywane było wg PN-B-13083 na próbkach o wymiarach 300 x 300 mm lub na wyrobach gotowych. Produkowany wówczas asortyment szkieł ograniczał się głównie do wyrobów o grubości 3, 4, 6 mm, rzadziej o grubości 8 mm i wyższej, stąd też prawidłowo zahartowane szyby poddane takiemu udarowemu badaniu nie powinny ulegać rozbiciu z wysokości:

- 2 m dla szyb o grubości nominalnej  $\leq 4$  mm,
- 2,5 m dla szyb o grubości nominalnej 5 mm,

\*Mgr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła w Krakowie.

- 3 m dla szyb o grubości nominalnej 6 mm,
- 3,5 m dla szyb o grubości nominalnej  $> 6$  mm.

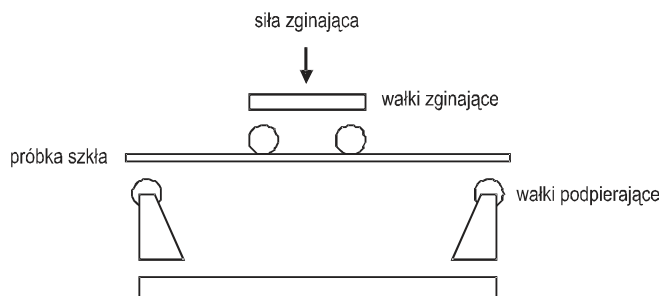


Ryc. 1. Schemat badania wytrzymałości mechanicznej szkła na uderzenie swobodnie spadającą kulą o masie 227 g z zadanych wysokości: 2; 2,5; 3,0 i 3,5 m

W badaniu tym kryterium prawidłowej wytrzymałości mechanicznej szkła była jego odporność na uderzenie kulą 227 g, przejawiająca się brakiem rozbitcia.

## 1.2. Badanie wytrzymałości mechanicznej szkła na zginanie czteropunktowe

W Polsce w ostatnich latach, na skutek ujednoczenia badań w krajach członkowskich Unii Europejskiej, badanie z użyciem kuli 227 g zastąpione zostało użyciem prasy do zginania szkła, prowadzonym wg normy PN-EN 1288-3: 2002: „Szkło w budownictwie – Określanie wytrzymałości szkła na zginanie – Część 3: Badanie na próbkach podpartych na dwóch podporach”. Badanie to przeprowadza się na próbkach o wymiarach 1100 x 360 mm. W odróżnieniu od badania kulą o masie 227 g, medium niszczącym jest narastająca ze stałą prędkością siła, przyłożona za pośrednictwem pary wałków w centralnej części próbki. Badanie prowadzi się aż do zniszczenia próbki, uzyskując na drodze dalszych obliczeń, liczbową wartość wytrzymałości szkła na zginanie wyrażoną w  $N/mm^2$ .



Ryc. 2. Schemat badania wytrzymałości mechanicznej szkła na zginanie czteropunktowe

Badanie prowadzone z użyciem prasy do zginania szkła w przeciwieństwie do badania kulą 227 g jest dokładniejsze, dostarcza bowiem wyniku liczbowego, ale z uwagi na zastosowanie złożonej aparatury i czasochłonność operacji – jest droższe i bardziej rozciągnięte w czasie.

Z naszych udokumentowanych zapisów wynika, że od chwili rozpoczęcia badań wytrzymałości szkła na czteropunktowe zginanie, aż po obecny czas wykonaliśmy 1463 próby zginania na próbkach o grubości od 3 do 15 mm. Badania te przeprowadzaliśmy na wyrobach ze szkła: hartowanego, hartowanego emaliowanego, hartowanego ornamentowego i wzmocnionego termicznie. Zestawienie zamieszczone w tabeli 1 przedstawia średnią wartość wytrzymałości na zginanie czteropunktowe wobec minimalnej wymaganej wartości wytrzymałości, przyporządkowaną do określonej grubości i rodzaju próbek.



Ryc. 3. Stanowisko do badania wytrzymałości szkła na zginanie czteropunktowe

Tabela 1

Średnia wartość wytrzymałości szkła na zginanie czteropunktowe dla różnych grubości i rodzajów szkła

Grubość próbki [mm]	Rodzaj szkła					
	liczba prób zginania	hartowane		liczba prób zginania	hartowane emaliowane	
		średnia	wymagana		średnia	wymagana
3	37	180	120	72	148	75
4	447	189		190	144	
5	186	176		10	101	
6	169	174		10	111	
8	77	189		*		
10	46	172		*		
12	22	164		*		
15	40	185		*		

\* Brak badań przeprowadzanych na danym asortymencie szkła.

Źródło: Opracowanie własne.

Chcąc wykazać, o ile średnia wytrzymałość na zginanie czteropunktowe z przeprowadzonych badań (dla danego rodzaju szkła) jest większa od wytrzymałości wymaganej – uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2.

T a b e l a 2

*Krotność średniej wytrzymałości szkła na zginanie czteropunktowe w stosunku do wytrzymałości wymaganej*

Grubość próbki [mm]	Średnia wytrzymałość na zginanie czteropunktowe [N/mm <sup>2</sup> ]	Wymagana wytrzymałość na zginanie czteropunktowe [N/mm <sup>2</sup> ]	Krotność średniej wytrzymałości na zginanie czteropunktowe w stosunku do wytrzymałości wymaganej
Dla hartowanego szkła float			
3	180	120	1,5 x większa
4	189		1,6 x większa
5	176		1,5 x większa
6	174		1,5 x większa
8	189		1,6 x większa
10	172		1,4 x większa
12	164		1,4 x większa
15	185		1,5 x większa
Dla hartowanego emaliowanego szkła float			
3	148	75	2,0 x większa
4	144		1,9 x większa
5	101		1,3 x większa
6	111		1,5 x większa

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Jak widać, obowiązująca obecnie metoda badania wytrzymałości na zginanie czteropunktowe dostarcza wyników liczbowych, które mogą stanowić bazę do analizy statystycznej.

O ile w przypadku przeprowadzania prób laboratoryjnych czas uzyskania tych wyników nie jest tak bardzo ważny, to w przypadku obowiązkowej zakładowej kontroli produkcji (ZKP), prowadzonej podczas normalnego cyklu produkcyjnego, nabiera on istotnego znaczenia. Producenci szkła hartowanego w ramach prowadzonej przez siebie ZKP zobowiązani są do sprawdzania wyrobów gotowych w oparciu o zapisy procedur badawczych, jak również pod kątem wymagań stosownych norm.

W przypadku produkcji szkła hartowanego ZKP powinna być zgodna z załącznikiem „A” do normy: PN-EN 12150-2: 2006: „Szkło w budownictwie – Termicznie hartowane bezpieczne szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe – Część 2: Ocena zgodności wyrobu z normą”.

W załączniku „A” do wyżej wymienionej normy w ujęciu tabelarycznym zestawiono wymagania dotyczące między innymi kontroli wyrobu (po hartowaniu lub wzmocnieniu termicznym). W punkcie dotyczącym kontroli wyrobu norma ta dopuszcza stosowanie metody alternatywnej do badania wytrzymałości szkła na zginanie w oparciu o instrukcję producenta, pod warunkiem wykazania korelacji z metodą badania wytrzymałości na zginanie wg normy PN-EN 1288-3 i PN-EN 12150-1.

Zapis ten jest bardzo istotny z punktu widzenia producentów, ponieważ daje możliwość wyboru innej metody badawczej. Dlatego też, wychodząc naprzeciw oczekiwaniom producentów, Laboratorium Badawcze Instytutu Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych, Oddziału Szkła w Krakowie opracowało alternatywną metodę badania wytrzymałości mechanicznej szkła, tak aby mogła być ona wykorzystana zamiast czasochłonnej i kosztownej, stosowanej powszechnie, metody badania wytrzymałości szkła na zginanie czteropunktowe.

W wyniku przemyśleń i konsultacji stwierdzono, że najlepszą (szybką i taną) metodą badania wytrzymałości mechanicznej szkła będzie metoda uderzeniowo-zginająca, polegająca na uderzeniu próbek szkła swobodnie spadającą stalową kulą z określonej wysokości.

### 1.3. Badanie wytrzymałości mechanicznej metodą uderzeniowo-zginającą

#### 1.3.1. Podstawy teoretyczne – wyznaczanie zalecanych wysokości spadku

W technologii szkła z dużym przybliżeniem można przyjąć, że wytrzymałość szkła na uderzenie zginające  $a_n$  jest funkcją liniową wytrzymałości szkła na zginanie  $\sigma_{zg}$ , a więc:

$$a_n = K\sigma_{zg} \quad (1)$$

gdzie:

$K$  – współczynnik proporcjonalności, którego wartość średnią można przyjąć na poziomie 0,28 [mm<sup>2</sup>/cm], [4-7 i 8 – tab. 1].

Wytrzymałość szkła na uderzenie zginające definiowana jest jako praca zniszczenia „A” w kGcm, próbki odniesiona do jednostki przekroju próbki „S” w cm<sup>2</sup>, a więc:

$$a_n = \frac{A}{S} \quad (2)$$

Przyjmując pewne uproszczenia, można określić zależność między wytrzymałością na uderzenie zginające a wytrzymałością na zginanie jako:

$$a_n = 0,28 \cdot \sigma_{zg} \quad (3)$$

Dla znalezienia korelacji między wytrzymałością na zginanie czteropunktowe szkła hartowanego, zgodnie z normami PN-EN 12150-1: 2000 [1] i PN-EN 1288-3: 2002 [3] a próbą wytrzymałości na uderzenie kulą, wystarczy w tym wzorze wstawić wartość wymaganą w normie PN-EN 12150-1, aby otrzymać minimalną wytrzymałość na uderzenie kulą, a przy znanej masie kuli stalowej określić wysokość spadku kuli, przy której szyba nie może ulec rozbiciu (zniszczeniu), by spełnić wymagania normy.

Przyjmując, że hartowane szkło float ma wytrzymałość na zginanie  $120 \text{ N/mm}^2$ , czyli  $12 \text{ kG/mm}^2$ , a hartowane emaliowane szkło float  $75 \text{ N/mm}^2$ , czyli  $7,5 \text{ kG/mm}^2$  (patrz punkt 9.4 normy PN-EN 12150-1: 2000 [1]), można określić minimalną wytrzymałość na uderzenie zginające:

- dla hartowanego szkła float:

$$a_n = 0,28 \cdot \sigma_{zg} = 0,28 \cdot 12 = 3,36 \text{ [kGcm/cm}^2\text{]} \quad (4)$$

- dla hartowanego emaliowanego szkła float:

$$a_n = 0,28 \cdot \sigma_{zg} = 0,28 \cdot 7,5 = 2,1 \text{ [kGcm/cm}^2\text{]} \quad (5)$$

Zakładając, że próbka do badań wytrzymałości szkła na uderzenie zginające ma szerokość „B” 36 cm i grubość „h”, to minimalna praca „A” potrzebna do zniszczenia próbki, której wytrzymałość na zginanie jest wyższa niż wymagana odpowiednią normą wyniesie:

- dla hartowanego szkła float:

$$A = 3,36 \cdot 36 \cdot h = 120,96 \cdot h \text{ [kGcm]} \quad (6)$$

- dla hartowanego emaliowanego szkła float:

$$A = 2,1 \cdot 36 \cdot h = 75,6 \cdot h \text{ [kGcm]} \quad (7)$$

Przyjmując, że próbki w toku próby będą uderzane stalową kulą o masie 0,8 kg lub kulą o masie 4,11 kg, uzyska się minimalne wysokości spadku „ $H_{\min}$ ”, przy których próbka nie powinna ulec zniszczeniu, jeżeli jej wytrzymałość na zginanie jest wyższa niż przewidziano to w odpowiedniej normie.

W przypadku badania próbek kulą o masie 0,8 kg:

- dla hartowanego szkła float:

$$H_{\min} = \frac{120,96 \cdot h}{0,8} = 151,2 \cdot h \text{ [cm]} \quad (8)$$

- dla hartowanego emaliowanego szkła float:

$$H_{\min} = \frac{75,6 \cdot h}{0,8} = 94,5 \cdot h \text{ [cm]} \quad (9)$$

W przypadku badania próbek kulą o masie 4,11 kg:

- dla hartowanego szkła float:

$$H_{\min} = \frac{120,96 \cdot h}{4,11} = 29,43 \cdot h \text{ [cm]} \quad (10)$$

- dla hartowanego emaliowanego szkła float:

$$H_{\min} = \frac{75,6 \cdot h}{4,11} = 18,39 \cdot h \text{ [cm]} \quad (11)$$

Podstawiając do tych wzorów odpowiednie grubości szkła wyrażone w cm uzyskano minimalne wysokości spadków „H<sub>min</sub>”, które zaokrąglono „do góry” do tzw. zalecanych wysokości spadku kuli „H”. Dane te przedstawiono w tabelach 3 i 4.

T a b e l a 3

Zalecane wysokości spadku „H” kul o masie 0,8 kg i 4,11 kg  
dla hartowanego szkła float

Lp.	Minimalna wytrzymaność na uderzenie zginające „a <sub>n</sub> ”	Szerokość próbki „B”	Grubość próbki „h”	Praca potrzebna na zniszczenie próbki „A”	Masa kuli	Minimalna wysokość spadku „H <sub>min</sub> ”	Zalecana wysokość spadku „H”
	[kGcm/cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kGcm]	[kg]	[cm]	[cm]
Zalecana wysokość „H” spadku kuli o masie 0,8 kg							
1	3,36	36	0,3	36,3	0,8	45,4	46
2	3,36	36	0,4	48,4	0,8	60,5	61
3	3,36	36	0,5	60,5	0,8	75,6	76
4	3,36	36	0,6	72,6	0,8	90,7	91
5	3,36	36	0,8	96,8	0,8	121,0	121
6	3,36	36	1,0	121,0	0,8	151,2	152
7	3,36	36	1,2	145,2	0,8	181,4	182
8	3,36	36	1,5	181,4	0,8	226,8	227
9	3,36	36	1,9	229,8	0,8	287,3	288
Zalecana wysokość „H” spadku kuli o masie 4,11 kg							
10	3,36	36	0,5	60,5	4,11	14,7	15
11	3,36	36	0,6	72,6	4,11	17,7	18
12	3,36	36	0,8	96,8	4,11	23,5	24
13	3,36	36	1,0	121,0	4,11	29,4	30
14	3,36	36	1,2	145,2	4,11	35,3	36
15	3,36	36	1,5	181,4	4,11	44,1	45
16	3,36	36	1,9	229,8	4,11	55,9	56

Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

Tabela 4

Zalecane wysokości spadku „H”, kul o masie 0,8 kg i 4,11 kg  
dla hartowanego emaliowanego szkła float

Lp.	Minimalna wytrzymałość na uderzenie zginające „ $\alpha_n$ ” [kGcm/cm <sup>2</sup> ]	Szerokość próbki „B” [cm]	Grubość próbki „h” [cm]	Praca potrzebna na zniszczenie próbki „A” [kGcm]	Masa kuli [kg]	Minimalna wysokość spadku „H <sub>min</sub> ” [cm]	Zalecana wysokość spadku „H” [cm]
Zalecana wysokość „H” spadku kuli o masie 0,8 kg							
1	2,1	36	0,3	22,7	0,8	28,4	29
2	2,1	36	0,4	30,2	0,8	37,8	38
3	2,1	36	0,5	37,8	0,8	47,3	48
4	2,1	36	0,6	45,4	0,8	56,7	57
5	2,1	36	0,8	60,5	0,8	75,6	76
6	2,1	36	1,0	75,6	0,8	94,5	95
7	2,1	36	1,2	90,7	0,8	113,4	114
8	2,1	36	1,5	113,4	0,8	141,8	142
9	2,1	36	1,9	143,6	0,8	179,6	180
Zalecana wysokość „H” spadku kuli o masie 4,11 kg							
10	2,1	36	0,5	37,8	4,11	9,2	10
11	2,1	36	0,6	45,4	4,11	11,0	11
12	2,1	36	0,8	60,5	4,11	14,7	15
13	2,1	36	1,0	75,6	4,11	18,4	19
14	2,1	36	1,2	90,7	4,11	22,1	23
15	2,1	36	1,5	113,4	4,11	27,6	28
16	2,1	36	1,9	143,6	4,11	34,9	35

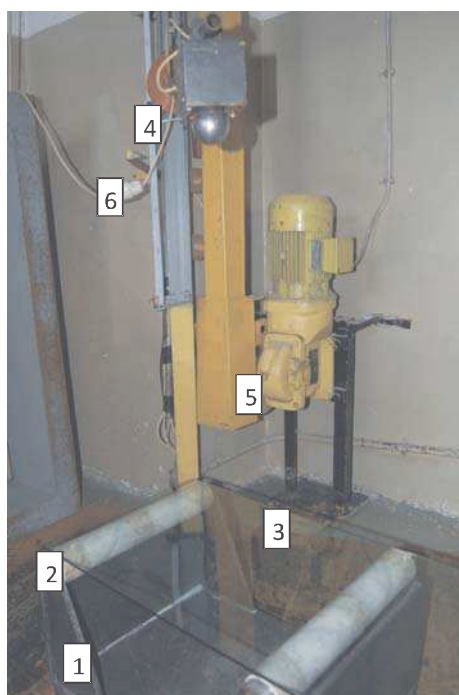
Źródło: Opracowanie własne.

### 1.3.2. Zorganizowanie stanowiska do badania wytrzymałości mechanicznej szkła na uderzenie zginające

W celu sprawdzenia obliczeń matematycznych i zastosowania ich w praktyce wykonano stanowisko do określania wytrzymałości szkła na uderzenie zginające. Obejmowało ono podporę wyposażoną w obrotowe stalowe wałki, stanowiące podparcie dla próbek umieszczanych poziomo i uderzanych swobodnie spadającą kulą o masie 0,8 kg lub 4,11 kg z zalecanych wysokości spadku „H”. Ogólny widok stanowiska do badania uderzenia zginającego przedstawia rycina 4, na której odpowiednie cyfry oznaczają:



- 1 – podpora stalowa,
- 2 – obrotowe wałki ze stali pokryte cienką warstwą miękkiego tworzywa,
- 3 – próbka szkła o wymiarach 500 x 360 mm,
- 4 – element uderzający – kula stalowa (o masie 0,8 kg lub 4,11 kg),
- 5 – wyciąg elektromechaniczny do podnoszenia kuli, sprzężony z przymiarem wstęgowym – 6 – mierzącym wysokość od powierzchni próbki badanej do krawędzi kuli.



Ryc. 4. Stanowisko do badania wytrzymałości szkła na uderzenie zginające

## 2. Przebieg badania

Badanie wykonano na próbkach hartowanego szkła float i emaliowanego hartowanego szkła float o wymiarach 500 x 360 mm o różnej grubości, jednak mieszczącej się w zakresie od 3 do 15 mm. Przed przystąpieniem do badań zmierzono grubość każdej próbki. Z hartowanego szkła float do badań przeznaczono po 35 szyb z każdej kategorii grubości, tj.: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 mm (razem 280 szyb). Próbki te uderzano kulą o masie 0,8 kg z zalecanej wysokości spadku „H”, zgodnej z wierszami 1–8 w tabeli 3. Natomiast z hartowanego emaliowanego szkła float przeznaczono po 35 szyb z kategorii grubości: 4, 5, 6 mm (razem 105 szyb). Próbki te uderzano kulą o masie 0,8 kg z zalecanej wysokości spadku „H”, zgodnej z wierszami 2–4 tabeli nr 4.

### 3. Wyniki badania wytrzymałości mechanicznej szkieł na uderzenie zginające

W wyniku tych uderzeń żadna spośród 385 próbek szkła nie pękła, co w praktyce potwierdza prawidłowość wniosków uzyskanych na drodze obliczeń i poprawność zalecanych wysokości spadku kuli o masie 0,8 kg. Niemniej jednak podjęto się próby wyznaczenia wysokości, przy których próbki te ulegną zniszczeniu, by sprawdzić, z jakim zapasem wytrzymują ustalone na drodze obliczeń wymagania.

W tym celu wykonano ponownie badania, w toku których stopniowo podnoszono wyjściową zalecaną wysokość spadku kuli (o 5 cm w przypadku cienkich szyb i o 10–20 cm w przypadku grubszych szyb), doprowadzając do rozbicia wszystkich próbek.

Dla grubości szkła 3, 4, 5 mm zastosowano kulę o masie 0,8 kg, a dla grubości 5, 6, 8, 10, 12, 15 mm używano kuli o masie 4,11 kg. Wyniki szczegółowe przeprowadzonych badań wytrzymałości hartowanego szkła float na uderzenie zginające przedstawiono na diagramach 1–9, a hartowanego emaliowanego szkła float na diagramach 10–12, zbiorcze wyniki – odpowiednio w tabelach 5 i 6.

#### Hartowane szkło float

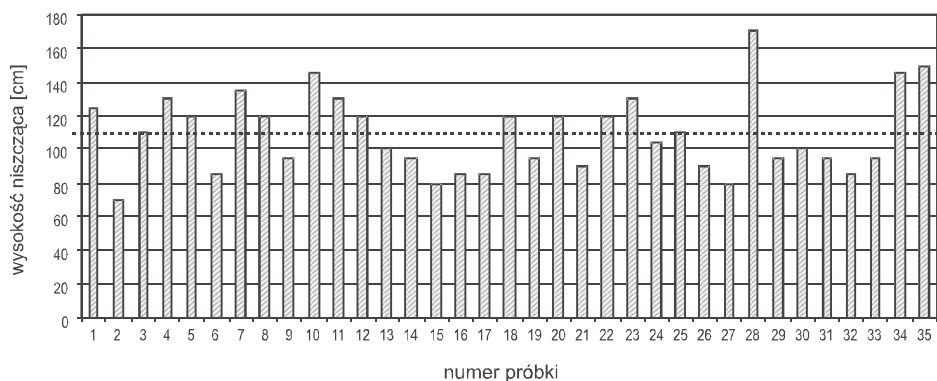


Diagram 1. 35 sztuk próbek o grubości 3 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 0,8 kg; średnia wysokość spadku – 109 cm

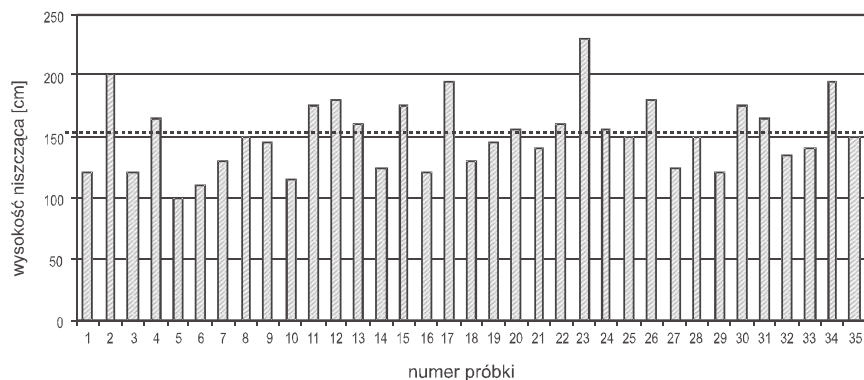


Diagram 2. 35 sztuk próbek o grubości 4 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 0,8 kg; średnia wysokość spadku – 151 cm

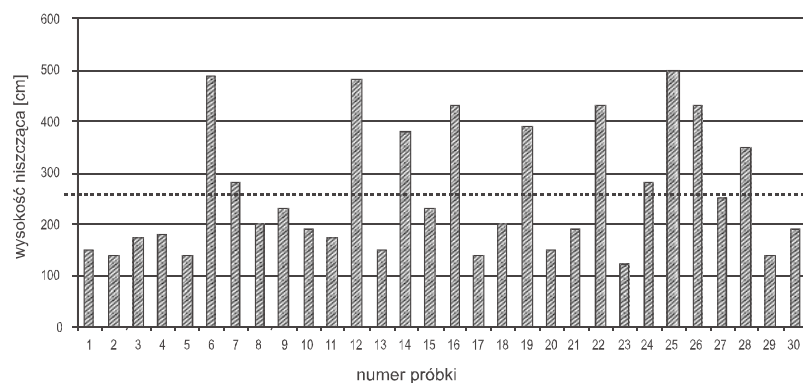


Diagram 3. 30 sztuk próbek o grubości 5 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 0,8 kg; średnia wysokość spadku – 259 cm

Z uwagi na występowanie znacznych wysokości niszczących na tym etapie pracy podjęto decyzje o kontynuowaniu dalszych badań z użyciem kuli o masie 4,11 kg.

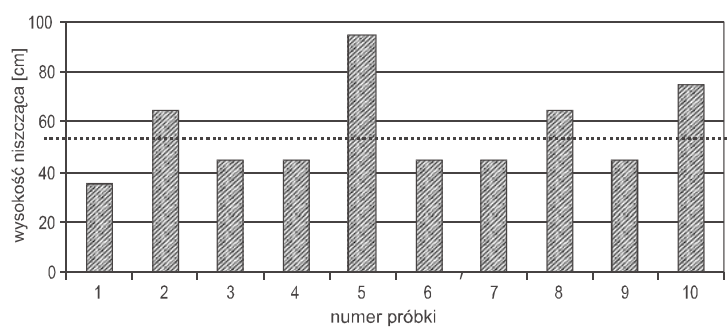


Diagram 4. 10 sztuk próbek o grubości 5 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 4,11 kg; średnia wysokość spadku – 56 cm

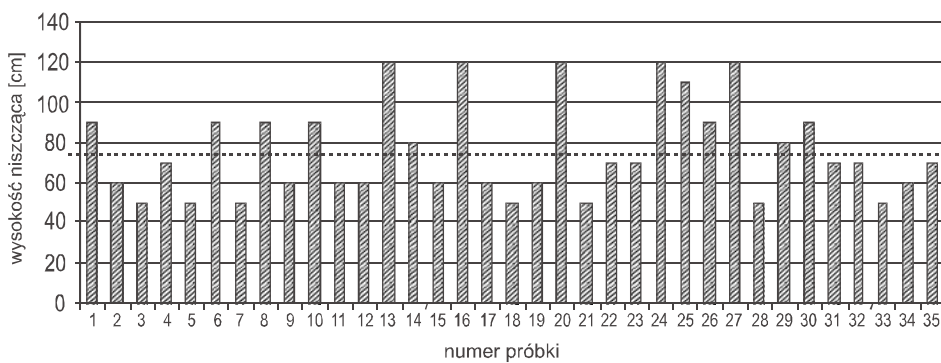


Diagram 5. 35 sztuk próbek o grubości 6 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 4,11 kg; średnia wysokość spadku – 76 cm

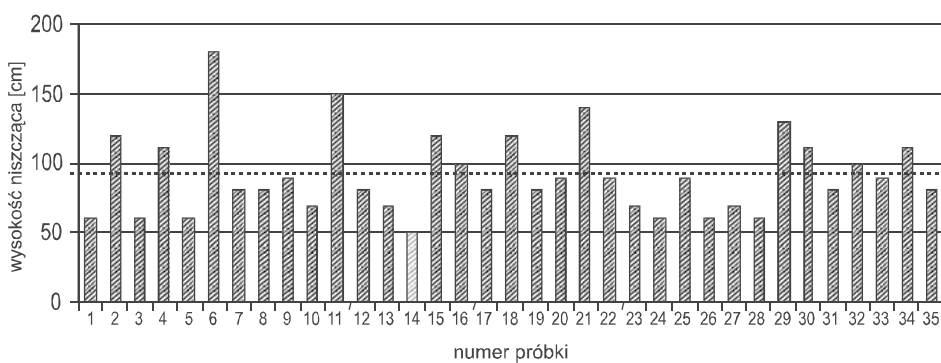


Diagram 6. 35 sztuk próbek o grubości 8 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 4,11 kg; średnia wysokość spadku – 91 cm

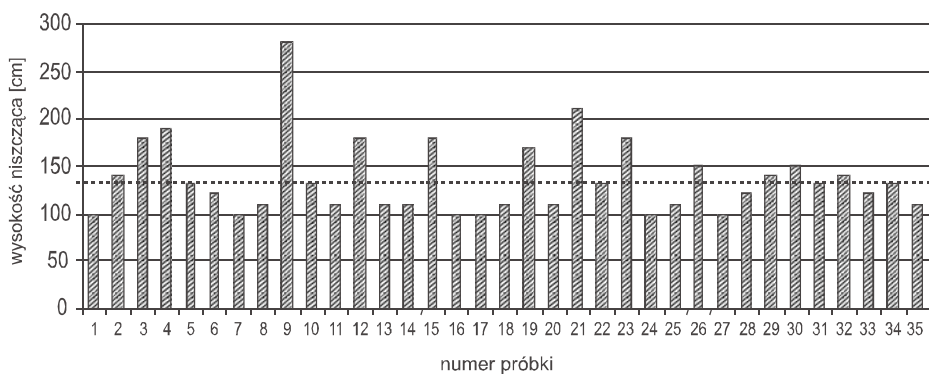


Diagram 7. 35 sztuk próbek o grubości 10 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 4,11 kg; średnia wysokość spadku – 137 cm

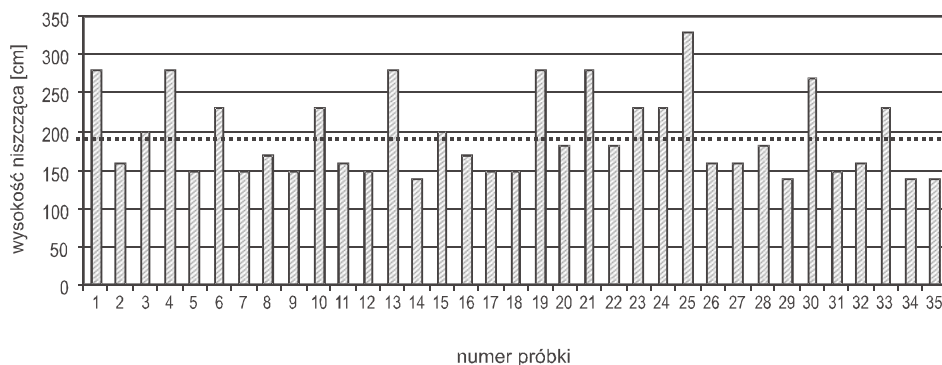


Diagram 8. 35 sztuk próbek o grubości 12 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kul o masie 4,11 kg; średnia wysokość spadku – 195 cm

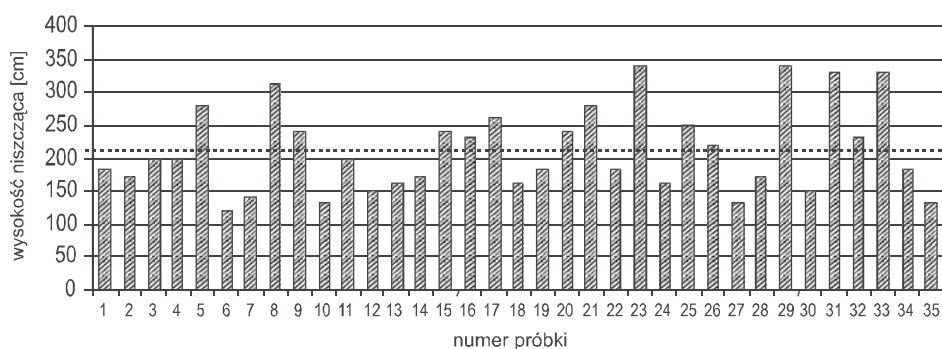


Diagram 9. 35 sztuk próbek o grubości 15 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kul o masie 4,11 kg; średnia wysokość spadku – 211 cm

Tabela 5

Zestawienie wyników badania wytrzymałości na uderzenie zginające hartowanego szkła float

Grubość próbek [mm]	Masa kuli [kg]	Zalecana wysokość spadku (uderzenia) H [cm]	Wartość	Wysokość niszcząca [cm]	Obliczona wytrzymałość na uderzenie zginające [kGcm/cm <sup>2</sup> ]
3	0,8	46	minimalna	70	5,2
			średnia	109	8,1
			maksymalna	170	12,6
4	0,8	61	minimalna	100	5,6
			średnia	151	8,4
			maksymalna	230	12,8
5	0,8	76	minimalna	120	5,3
			średnia	259	11,5
			maksymalna	500	22,2

cd. tab. 5

Grubość próbek [mm]	Masa kuli [kg]	Zalecana wysokość spadku (uderzenia) H [cm]	Wartość	Wysokość niszcząca [cm]	Obliczona wytrzymałość na uderzenie zginające [kGcm/cm <sup>2</sup> ]
5	4,11	15	minimalna	35	8,0
			średnia	56	12,8
			maksymalna	95	21,7
6	4,11	18	minimalna	50	9,5
			średnia	76	14,4
			maksymalna	120	22,8
8	4,11	24	minimalna	50	7,1
			średnia	91	13,0
			maksymalna	180	25,7
10	4,11	30	minimalna	100	11,4
			średnia	137	15,6
			maksymalna	280	32,0
12	4,11	36	minimalna	140	13,3
			średnia	195	18,6
			maksymalna	330	31,4
15	4,11	45	minimalna	120	9,1
			średnia	211	16,1
			maksymalna	340	25,9

Źródło: Opracowanie własne.

### Hartowane emaliowane szkło float

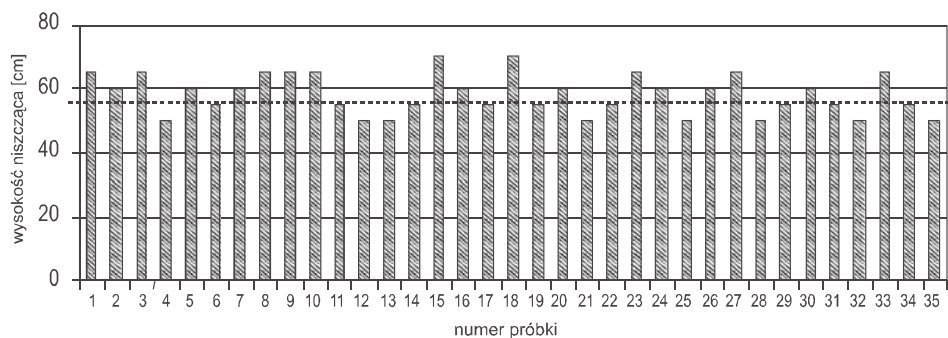


Diagram 10. 35 sztuk próbek o grubości 4 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 0,8 kg; średnia wysokość spadku – 58 cm

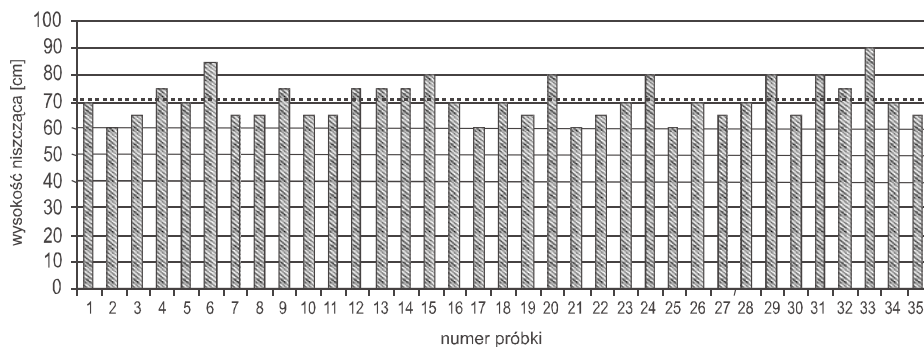


Diagram 11. 35 sztuk próbek o grubości 5 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 0,8 kg; średnia wysokość spadku – 71 cm

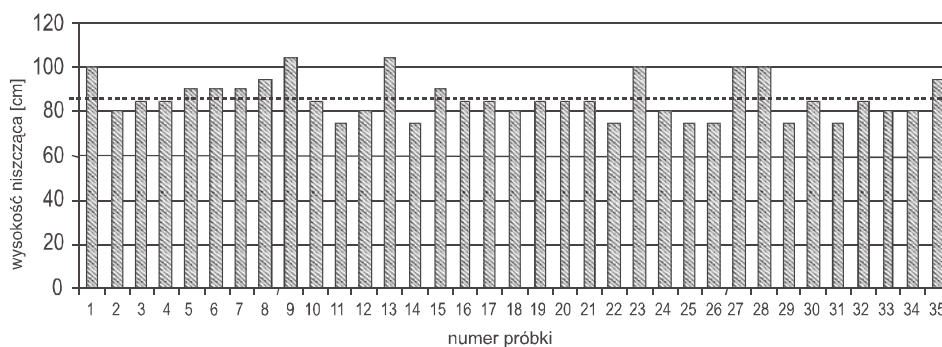


Diagram 12. 35 sztuk próbek o grubości 6 mm i odpowiadające im wysokości niszczące dla kuli o masie 0,8 kg; średnia wysokość spadku – 86 cm

T a b e l a 6

Zestawienie wyników badania wytrzymałości na uderzenie zginające hartowanego emaliowanego szkła float

Grubość próbek [mm]	Masa kuli [kg]	Zalecana wysokość spadku (uderzenia) H [cm]	Wartość	Wysokość niszcząca [cm]	Obliczona wytrzymałość na uderzenie zginające [kGcm/cm <sup>2</sup> ]
4	0,8	38	minimalna	50	2,8
			średnia	58	3,2
			maksymalna	70	3,9
5	0,8	48	minimalna	60	2,7
			średnia	71	3,1
			maksymalna	90	4,0
6	0,8	57	minimalna	75	2,8
			średnia	86	3,2
			maksymalna	105	3,9

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

## 4. Omówienie wyników z badania wytrzymałości mechanicznej szkła na uderzenie zginające

Analiza danych przedstawionych na diagramach 1–12 i w tabelach 5 i 6 pozwala stwierdzić, że wszystkie badane próbki szkła hartowanego przeszły z wynikiem pozytywnym próbę uderzenia kulą z zadanej minimalnej wysokości spadku „ $H_{\min}$ ”, odpowiadającej wymaganiom normowym dotyczącym wytrzymałości mechanicznej szkła hartowanego float ( $120 \text{ N/mm}^2$ , czyli  $12 \text{ kG/mm}^2$ ) i hartowanego szkła emaliowanego float ( $75 \text{ N/mm}^2$ , czyli  $7,5 \text{ kG/mm}^2$ ). W wyniku uderzeń stalową kulą o masie  $0,8 \text{ kg}$  prowadzonych z obliczonych zalecanych wysokości spadku „ $H$ ” (tab. 3 i 4) badane próbki szkła hartowanego float o grubości: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 mm nie uległy rozbiciu, tak jak i próbki z hartowanego emaliowanego szkła float o grubości: 4, 5, 6 mm. Dane otrzymane przy badaniu szkła na uderzenie zginające (tab. 5 i 6) wykazują, że wszystkie próbki szkła hartowanego miały znacznie wyższą wytrzymałość (od  $5,2$  do  $32,0 \text{ kGcm/cm}^2$  – dla hartowanego szkła float i od  $2,7$  do  $4,0 \text{ kGcm/cm}^2$  – dla hartowanego emaliowanego szkła float) niż wymagania normowe – odpowiednio  $3,36$  i  $2,1 \text{ kGcm/cm}^2$ . Minimalna wartość niszczącej wysokości spadku kuli jest wyraźnie wyższa od zalecanej wysokości spadku kuli przy próbach kontrolnych. Podobne spostrzeżenia dotyczą także średniej wartości wysokości niszczącej, która jest od  $2,4$ - do  $5,4$ -krotnie wyższa od zalecanej dla hartowanego szkła float i  $1,5$ -krotnie wyższa od zalecanej dla emaliowanego hartowanego szkła float. Ilustrują to dane zamieszczone w tabeli 7.

Tabela 7

*Krotność średniej wysokości niszczącej przy uderzeniu zginającym, w stosunku do zalecanej wysokości spadku kuli „ $H$ ”*

Grubość próbki	Zalecana wysokość spadku „ $H$ ” z tabeli 3	Średnia wysokość niszcząca	Krotność średniej wysokości niszczącej w stosunku do zalecanej wysokości spadku
Dla hartowanego szkła float o grubości 3–5 mm uderzanego kulą o masie $0,8 \text{ kg}$			
3 mm	46 cm	109 cm	2,4 x większa
4 mm	61 cm	151 cm	2,5 x większa
5 mm	76 cm	259 cm	3,4 x większa
Dla hartowanego szkła float o grubości 5–15 mm uderzanego kulą o masie $4,11 \text{ kg}$			
5 mm	15 cm	56 cm	3,7 x większa
6 mm	18 cm	76 cm	4,2 x większa
8 mm	24 cm	91 cm	3,8 x większa
10 mm	30 cm	137 cm	4,6 x większa
12 mm	36 cm	195 cm	5,4 x większa
15 mm	45 cm	211 cm	4,7 x większa



cd. tab. 7

Grubość próbki	Zalecana wysokość spadku „H” z tabeli 4	Średnia wysokość niszcząca	Krotność średniej wysokości niszczącej w stosunku do zalecanej wysokości spadku
Dla hartowanego emaliowanego szkła float o grubości 4–6 mm uderzanego kulą o masie 0,8 kg			
4 mm	38 cm	58 cm	1,5 x większa
5 mm	48 cm	71 cm	1,5 x większa
6 mm	57 cm	86 cm	1,5 x większa

Źródło: Opracowanie własne.

Z analizy danych przedstawionych na diagramach 1–12 można stwierdzić, że wyniki prób uderzeń kulą o masie 0,8 kg i 4,11 kg dają w przypadku szkła hartowanego float dość znaczny rozrzut wysokości niszczących. Nieco inaczej jest w przypadku szkła hartowanego emaliowanego, gdzie ten rozrzut jest znacznie mniejszy.

Wykonane badania wytrzymałości szkła na uderzenie zginające przy rozbiciu wszystkich próbek wykazują prawidłowość dokonanych założeń i przeprowadzonych obliczeń, a tym samym pozwalają stwierdzić, iż zachodzi korelacja pomiędzy metodą badania wytrzymałości na uderzenie zginające (kulą) do metody czteropunktowego zginania prowadzonej wg PN-EN 1288-3 z wymaganiami ujętymi w PN-EN 12150.

## Literatura

- [1] PN-EN 12150-1:2000: „Szkło w budownictwie – Termicznie hartowane szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe – Część 1: Definicje i opis”.
- [2] PN-EN 12150-2:2006: „Szkło w budownictwie – Termicznie hartowane bezpieczne szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe – Część 2: Ocena wyrobu z normą”.
- [3] PN-EN 1288-3:2002: „Szkło w budownictwie. Określanie wytrzymałości szkła na zginanie – Część 3: Badanie na próbkach podpartych na dwóch podporach (czteropunktowe zginanie)”.
- [4] *Spravočnik po proizvodstvu stiekla*, t. 1, pod ried. I.I. Kitajgorodskiego, S.M. Silvestrovicza, GILpoS, AiSM, Moskva 1963, s. 120–136.
- [5] *Stieкло*. Spravočnik pod ried. N.M. Pawłuszki, Strojizdat, Moskva 1973, s. 20–27.
- [6] *Stieкло w stroitelstwie*, Izd. „Budivelnyk”, Kijev 1969, s. 19–43.
- [7] *Technologia szkła*, t. 1, pod red. B. Ziemby, Arkady, Warszawa 1987, s. 74–80.
- [8] Sprawozdanie z wykonania pracy pt. „Alternatywna metoda badań wytrzymałości mechanicznej szkła”, prof. dr. hab. inż. B. Ziemia, mgr inż. T. Zduniewicz, mgr inż. T. Tarczoń, mgr inż. J. Brzezicki, mgr inż. I. Kozubek, Kraków 26.06.2009 r.
- [9] Konsultacje: prof. dr. hab. inż. Bolesław Ziemia.

*TOMASZ ZDUNIEWICZ*

THE RESISTANCE OF TEMPERED GLASS, IN ASPECT OF  
INVESTIGATION THE METOD OF FOUR POINT BENDING AND  
METHOD OF IMPACT-BENDING

The requirements of Factory Control of Production put on manufacturers of tempered glass the applying tests for control and opinion of finished article. To this time in order to qualification of mechanical resistance were applied was the method of four – point bending, which result was got of numerical value expressed in  $N/mm^2$ . This method characterized the labor consumption and with high cost of purchase of press to bending. Therefore also the Investigative Laboratory ISCMOiB in Cracow Branch has processed of alternative method staying in correlation with method the four – point bending. In result of account of experience and tests it has been processed the metod of investigation of mechanical resistance of glass to impact – bending by at use steel balls, which fastly and with low cost allows on checking finished articles from tempered glass.