

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



**Katarzyna Matras**  
Wydział Inżynierii Lądowej,  
Politechnika Warszawska



**Opiekun naukowy:**  
**dr inż. Maciej Gwyl**  
Zespół Konstrukcji  
Metalowych,  
Politechnika Warszawska

Szkoło w konstrukcji jest stosowane od dawna, głównie jako wypełnienie ram okiennych czy jako ściany osłonowe budynków użyteczności publicznej, biurów i apartamentowców. Coraz częściej inżynierowie budowlani spotykają się z rosnącymi wymaganiami architektonicznymi dotyczącymi transparentności konstrukcji, połączonej jednocześnie z dobrym wykorzystaniem nośności przekrojów. Naprzeciw ich oczekiwaniom wychodzi rozwiązanie w postaci hybrydowych belek stalowo-szklanych, złożonych z pótek ze stali oraz szklanego środka. Oba materiały łączone są poprzez połączenie klejone dobrane w sposób zapewniający przeniesienie sił nacisku z półki na środnik, co ze względu na kruchość szkła oraz jego małą wytrzymałość na zginanie stanowi istotną kwestię przy projektowaniu tego typu elementów.

### Szkoło jako materiał konstrukcyjny

W budownictwie stosuje się szkło krzemiankowe, które pod względem struktury jest materiałem nieuporządkowanym. Z faktu, że w strukturze wewnętrznej szkła nie można wyodrębnić żadnych regularnych płaszczyzn, po których jednostki budujące ją mogłyby się przesuwać, wynika idealna sprężystość jego zachowania się. Przy obciążeniu granicznym dochodzi do jego pęknięcia bez wcześniejszych oznak, co w konsekwencji prowadzi do zniszczenia fragmentu konstrukcji bez możliwości powrotu do formy wcześniejszej (brak odkształceń plastycznych).

Szkoło pod względem mechanicznym jest także wrażliwe na obciążenia miejscowe –

# BELKI ZE SZKŁA?

W artykule omówiono charakterystykę stalowo-szklanych elementów konstrukcyjnych. Podano również cechy stosowanego w nich szkła oraz przedstawiono sposób ich pracy. Zaprezentowano podejście projektowe, porównując wyniki z podobnymi elementami czysto stalowymi.

koncentracja naprężeń wywołana obciążeniem zarówno punktowym, jak i liniowym jest czynnikiem, który prowadzi do lokalnych pęknięć elementu. Te niezauważalne gołym okiem elementy powodują osłabienie struktury wewnętrznej oraz wywołują dalsze konsekwencje podczas pracy szkła w konstrukcji. W celu zwiększenia zakresu i możliwości stosowania szkła w konstrukcjach budowlanych powstały różne jego rodzaje odrębne pod względem procesu wytwarzania, a co za tym idzie, jego właściwości.

- Szkoło hartowane ESG – szkło bezpieczne, które w wyniku pęknięcia rozpada się na małe kawałki o nieostrych brzegach. Hartowane termicznie szkło ESG jest otrzymywane w pojedynczym procesie nagrzania do temperatury 700°C i schłodzenia.
- Szkoło półhartowane TVG – uzyskuje dwa razy większą wytrzymałość na zginanie w stosunku do szkła float. Otrzymywane jest w wyniku hartowania termicznego w cyklicznym procesie nagrzewania i ochładzania.
- Szkoło laminowane VSG – składa się z tafli szkła ESG lub TSG sklejonych folią PVB albo żywicy utwardzanych promieniami UV, które to połączenie zapewnia nieodpadanie kawałków szkła od płaszczyzny tafli w przypadku pęknięcia.

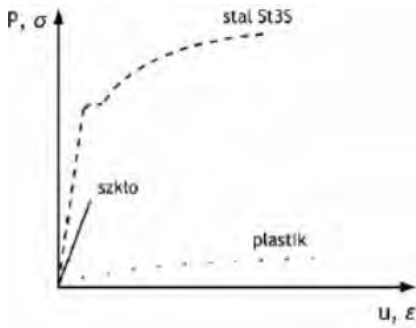
### Belki stalowo-szklane

Gromadząc wcześniej podane informacje o szkle – jego właściwościach zarówno chemicznych, fizycznych, jak i mechanicznych – można odnieść wrażenie, że stworzenie belki ze szkła jest dość wymagające. Jest to tym trudniejsze, gdy zauważy się znaczącą dysproporcję między wytrzymałością szkła na

ściskanie i rozciąganie. Względnie wytrzymałość na ściskanie szkła jest dwudziestokrotnie większa. Analogiczny problem napotkano w konstrukcjach betonowych, w których to beton posiada podobną do szkła cechę – również jest o wiele bardziej wytrzymały na ściskanie niż na rozciąganie. Pomysł wzmocnienia konstrukcji betonowej stałą, która wykazuje bardzo dobre cechy wytrzymałościowe, jeśli chodzi o rozciąganie, wdrożono do konstrukcji stalowych. Pierwsze próby wzmocnienia szklanych elementów konstrukcyjnych polegały na domocowywaniu do szklanych belek prętów stalowych w miejscach stref rozciąganych – zarówno stalowych prętów zwykłych [2], jak i kabli sprężonych [3]. Oba sposoby spowodowały wzrost wytrzymałości belki o kilkanaście procent w stosunku do belki z czystego szkła.

Do późniejszych badań wprowadzono belki dwuteowe składające się ze szklanego środnika i stalowych pótek. Połączenie stali ze szkłem jest realizowane poprzez klejenie przy użyciu różnych materiałów, głównie żywicy epoksydowej lub silikonu. Nie bez znaczenia pozostaje również geometria samego połączenia. Do tej pory opracowano 4 kształty połączeń stali ze szkłem, z różnymi z tego wynikającymi konsekwencjami.

Porównując geometrie połączeń, można zauważyć, że najszybsze, a przez to przenoszące największe obciążenia, jest połączenie z profilem U, a następnie z profilem L. Wynika to bezpośrednio z faktu łączenia dużej powierzchni stali i szkła (odpowiednio na 3 oraz 2 powierzchniach). Z drugiej zaś strony połączenia takie są dość pracochłonne w wykonaniu oraz droższe, trudniejsze w kontroli i naprawie, a także estetycznie



Rys. 1. Wykres zależności między siłą (naprężeniem) a przemieszczeniem (odkształceniem) dla szkła w próbie rozciągania statycznego w porównaniu do stali i plastiku [4]



Rys. 2. Obraz po pęknięciu szkła (od lewej) zwykłego typu float, hartowanego, laminowanego [5]

mniej atrakcyjne w porównaniu do połączenia doczołowego oraz żłobionego. Generalnie zaleca się stosowanie połączenia doczołowego, nawet kosztem zmniejszenia wytrzymałości elementu.

### Podejście do projektowania

W tej części omówione zostanie podejście obliczeniowe ze względu na różne stany wytrzymałościowe w porównaniu do belek czysto stalowych. W celu porównania wyników odnoszono się do referencyjnego przekroju profilu stalowego IPE300 o granicy plastyczności 355 MPa i długości 1 m, zakładając tę samą geometrię dla belki stalowo-szklanej, z pominięciem zaokrągleń.

### Ścinanie

Dla belek czysto stalowych, zgodnie z [6], wytrzymałość na ścinanie sprawdza się zgodnie z poniższymi wzorami:

- dla projektowania plastycznego:

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (1)$$

gdzie:

$A_v$  – przekrój czynny przy ścinaniu,  
 $f_y$  – granica plastyczności,  
 $\gamma_{M0}$  – współczynnik częściowy.

- dla projektowania sprężystego:

$$V_{c,Rd} = \frac{I \cdot t \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot S \cdot \gamma_{M0}} \quad (2)$$

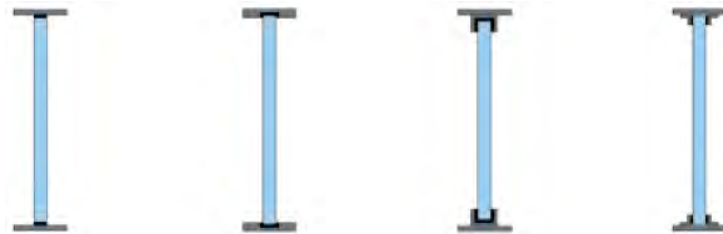
gdzie:

$I$  – moment bezwładności,  
 $t$  – grubość elementu,  
 $S$  – moment statyczny.

Odnosząc powyższe podejścia projektowe belek stalowych do pracy belki ze szklanym środkiem oraz wychodząc z założenia przenoszenia siły ścinającej tylko przez środek szklany i tego, że szkło pracuje tylko w fazie sprężystej, nośność szklanego środka należy wyznaczać według wzoru (2).

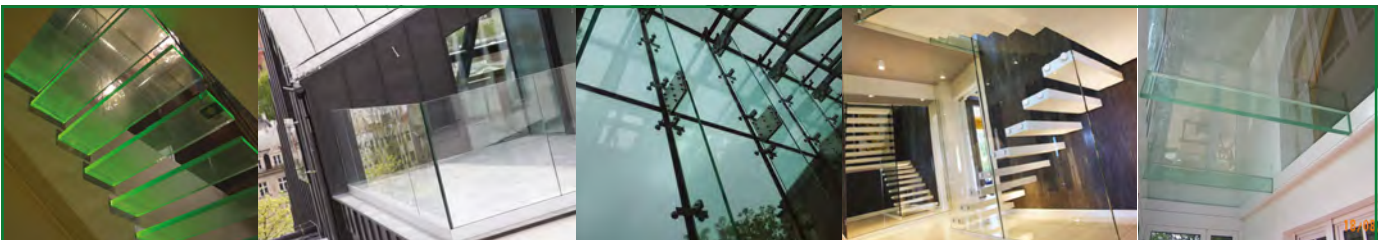
### Rozciąganie

Wytrzymałość na rozciąganie osiowe pręta stalowego określona jest na podstawie zależności:



Rys. 3. Geometria połączenia szkła ze stalą: doczołowe, żłobione, z profilem U, z profilem L [7]

REKLAMA

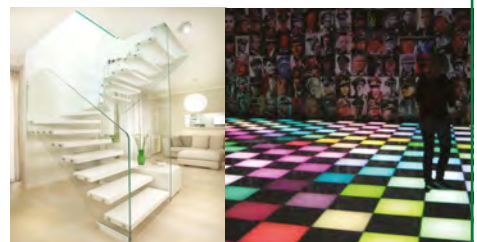


## Dubiel Vitrum

- producent szkła konstrukcyjnego □ kompleksowa obróbka szkła
- szkło bezpieczne hartowane, laminowane, gięte, lakierowane i drukowane



www.dubielvitrum.pl



$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_{y,d}}{\gamma_{M0}} \quad (3)$$

gdzie  $A$  – pole przekroju.

Dla referencyjnej belki nośność na rozciąganie wynosi 1910 kN. Zachowanie się belki stalowo-szklanej pod rozciągającym obciążeniem osiowym można podzielić na 2 etapy: 1) do zniszczenia środka szklanego, 2) do zniszczenia całej belki. Siłę niszczącą środek (etap 1.) można wyznaczyć ze stosunku pola przekroju środka do pola przekroju całej belki, co daje 0,38 w przypadku belki o geometrii zgodnej z tabelą 1. Obrazując sytuację: przy sile rozciągającej belkę o wartości 100 kN 38 kN przypada na środek szklany. Można więc obliczyć, że środek niszczący się przy naprężeniu 45 MPa (w przeliczeniu na siłę w środku 89 kN) osiąga je w momencie obciążenia belki siłą o wartości 233,5 kN. Przy sztywnej skleinie łączącej środek z półkami po zniszczeniu środka półki stalowe przejmują obciążenie, a ich nośność – która teraz równoznaczna jest już ze zniszczeniem całej belki – jest na poziomie 1140 kN. Łatwo więc zauważyć, że w stosunku do belki stalowej spadek nośności kształtuje się na poziomie 40%.

### Ściskanie z utratą stateczności

Ściskanie z uwzględnieniem utraty stateczności dla profili czysto stalowych wyznacza się, biorąc pod uwagę smukłość przekroju, krzywą wybożenia i zależny od niej parametr imperfekcji. W ściskaniu belek stalowo-szklanych należy zwrócić uwagę również na samo zjawisko wybożenia środka szklanego [1]. Siła krytyczna przy ściskaniu żebra ze szkła litego wynosi:

$$N_{cr,Rd} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad (4)$$

gdzie:

$I$  – moment bezwładności w płaszczyźnie zginania,

$L_{cr}$  – dł. wybożeniowa (równa teoretycznej długości zebra).

Z obliczeń przeprowadzonych dla środka szklanego o wymiarach z tabeli 1. wynika, że siła krytyczna, przy której nastąpi wybożenie gięte, wynosi 5 kN. Nie można jednak uznać, jak w przypadku rozciągania, że półki stalowe przenoszą pozostałą część obciążenia, ponieważ wybożenie żebra szklanego powoduje zniszczenie całej belki – dochodzi do wybożenia całego elementu. Jak widać, siła ta jest bardzo mała w porównaniu z siłą dla belki stalowej, wynoszącą dla belki referencyjnej 416 kN. Poprawę nośności na ściskanie z uwzględnieniem wybożenia można uzyskać, stosując szkło laminowane. W przypadku zastosowania szkła klejonego według [1] siłę wyznacza

Tablica 1. Parametry przyjęte do obliczeń

Własność	Belka stalowa IPE300	Belka szklano-stalowa
Przekrój		
Wytrzymałość na rozciąganie	355 MPa	45 MPa
Wytrzymałość na ściskanie	355 MPa	800 MPa

się z zależności:

$$N_{cr,Rd} = \frac{\pi^2 \cdot (1 + \alpha + \pi^2 \cdot \alpha \cdot \beta) \cdot E \cdot I_s}{1 + \pi^2 \cdot \beta \cdot L_{cr}^2} \quad (5)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{I_1 + I_2}{I_s}, \quad \beta = \frac{t_{int}}{G_{int} \cdot b \cdot (z_1 + z_2)} \cdot \frac{E \cdot I_s}{L_{cr}^2}, \quad I_s = b \cdot (t_1 \cdot z_1^2 + t_2 \cdot z_2^2)$$

– moment bezwładności przy skręcaniu,  
 $I_1, I_2$  – momenty bezwładności poszczególnych tafli,

$t_{int}$  – grubość laminatu,

$z_1, z_2$  – odległości środków ciężkości tafli szklanych do środka ciężkości całego pakietu szklanego (środnika),

$b$  – wysokość środka szklanego.

Tak obliczona nośność wynosi ok. 92 kN przy założeniu szkła złożonego z 6 mm tafli. W stosunku do belki czysto stalowej jest to 22% nośności.

### Zginanie

W przypadku zginania dość trudno przełożyć pracę belki stalowej na pracę belki hybridowej, ze względu na skleinę łączącą środek i półki. W zależności od sztywności materiału łączącego półki i środek otrzymuje się różne wyniki nośności. Jednak aby móc określić nośność na zginanie takiej belki, można posłużyć się podobną metodą jak w przypadku rozciągania (jest to właściwe założenie w przypadku sztywnej skleinie). Wyznacza się udział środka we wskaźniku wytrzymałości na zginanie, który dla belki stalowo-szklanej o podanej w tabeli 1. geometrii wynosi 17%. Na tej podstawie oblicza się moment, jakim należy obciążyć cały element, aby osiągnąć niszczące naprężenia w szkłe na poziomie 45 MPa. W tym przypadku jest to moment wielkości 25 kNm, co przy 3-punktowym zginaniu daje wartość na poziomie 100 kN. Oczywiście po pęknięciu szkła siły ulegają redystrybucji i belka nie ulega uszkodzeniu natychmiast, ale jest jeszcze zdolna do przeniesie-

nia obciążenia. Porównując ten wynik do belki stalowej, można zauważyć około 10-krotny spadek wytrzymałości na zginanie w stosunku do belek stalowych.

### Podsumowanie

W porównaniu do kształtowników stalowych belki stalowo-szklane mają zauważalnie mniejszą nośność, jednak spadek ten zrównoważony jest spełnieniem estetycznych wymagań architektonicznych dotyczących transparentności budynku. Dodanie stali do przekroju szklanego jest rozwiązaniem ciekawym, ale wymagającym znajomości pracy szkła, jak również częściowej analizy samej skleinie, która w tej pracy została pominięta. ■

### Bibliografia

- [1] Piekarczyk A., Elementy konstrukcyjne ze szkła budowlanego, ITB, Warszawa 2013.
- [2] Veer F.A., Gross S., Hobbelman G.I et al., Spanning Structures in Glass. Glass Processing Days, 2003, s. 78-81.
- [3] Bos F.P., Veer F.A., Hobbelman G.J. et al., Stainless steel reinforced and post-tensioned glass beams. ICEM12 – 12th International Conference on Experimental Mechanics, Politecnico di Bari, 2004.
- [4] Jaśkowska D., Budowa wewnętrzna i właściwości szkła konstrukcyjnego, „Świat Szkła”, 2009.
- [5] www.cardinalcorp.com.
- [6] PN-EN 1993-1-1. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [7] Abeln B., Preckwinkel E., Entwicklung hybrider Stahl-Glass Traeger, Stahlbau 80, Heft 4, 2018.

### Summary

The article discusses the characteristics of steel-glass construction elements. Characteristics of glass used in these elements are given. Behaviour of them is presented, as well as a design approach, in compare to results with similar pure steel elements.

**Keywords:** steel-glass elements, hybrid beams, gluing joint, translucent building