Politechnika Śląska w Gliwicach Wydział Budownictwa Katedra Inżynierii Budowlanej

Rozprawa doktorska

Mgr inż. Marcin Kozłowski

# Analiza doświadczalno-numeryczna hybrydowych belek drewniano-szklanych

Streszczenie anglojęzycznej rozprawy: "Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams"

> Promotor: Dr hab. inż. Jacek Hulimka, prof. Pol. Śl.

> > Gliwice, 2014

# Spis treści

1	Prze	edmo	wa	1
2	Wst	ęp		1
3	Idea	ı hybı	ydowych belek drewniano szklanych	2
4	Cel	i zak	res pracy	3
5	Tez	y i og	graniczenia	3
6	Prze	egląd	literatury	3
7	Bad	ania	materiałowe	5
7	.1	Bad	ania szkła	5
7	.2	Bad	ania drewna	б
	7.2.	1	Drewno typ A	б
	7.2.	2	Drewno typ B	7
7	.3	Klej	e konstrukcyjne	8
	7.3.	1	Badanie I	8
	7.3.	2	Badanie II 1	1
	7.3.	3	Badanie III 12	2
8	Bad	ania	hybrydowych belek o pomniejszonych wymiarach12	3
9	Bad	ania	belek o rzeczywistych wymiarach1	5
10	Ν	Iodel	owanie numeryczne	8
11	Ν	Iodel	e numeryczne	9
1	1.1	Ana	liza parametryczna	0
1	1.2	Pord	ównanie z wynikami badań	3
	11.2	2.1	Belki o zmniejszonych rozmiarach	3
	11.2	2.2	Belki o rzeczywistych wymiarach	4
12	Ν	Iodel	analityczny	5
13	Р	odsui	nowanie i wnioski końcowe	б

# 1 Przedmowa

Dokument stanowi streszczenie anglojęzycznej rozprawy doktorskiej "Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams" autorstwa Marcina Kozłowskiego. Promotorem rozprawy doktorskiej był dr hab. inż. Jacek Hulimka, prof. Pol. Śl.

Streszczenie prezentuje przede wszystkim wyniki będące osiągnięciami autora, stąd pozostałe elementy zostały potraktowane skrótowo. W streszczeniu przyjęto numerację źródeł jak w wersji anglojęzycznej, skutkiem czego nie ma ciągłości numeracji literatury. Z uwagi na ograniczenie liczby stron w streszczeniu nie ujęto wszystkich badań lub ich wyników – stąd powinno ono być rozpatrywane łącznie z pełnym tekstem.

# 2 Wstęp

Kontakt użytkowników z otoczeniem zewnętrznym jest ważnym psychologicznym czynnikiem w aspekcie społecznym [1], a naturalne światło słoneczne ma pozytywny wpływ na samopoczucie ludzi i ergonomię pracy [2]. Potwierdza to Heinrich Lauterbach (1893-1973), jeden z najważniejszych architektów Wrocławia w okresie międzywojennym, w słowach "Nowoczesny człowiek potrzebuje przestrzeni, światła, czystości, spokoju – nic w przestrzeni nie powinno ograniczać. Otwieramy nasze pomieszczenia dzięki dużym powierzchniom okien na słońce i niebo i wciągamy w ten sposób otoczenie do naszych pomieszczeń. Wydaje się, że są obszerne, nie będąc dużymi". Pomimo upływu wielu lat są one wciąż aktualne i doskonale opisują trendy w nowoczesnej architekturze, polegające na zacieraniu granic między wnętrzem budynku i zewnętrznym środowiskiem. Takie podejście wymaga ciągłego zwiększania powierzchni pozwalających na wprowadzenie naturalnego światła do wnętrza budynku, nie tylko przez szklane fasady, ale także przezierne wewnętrzne elementy konstrukcyjne (rys. 1).



Rys. 1. Pilotażowy projekt; hybrydowe belki drewniano-szklane jako elementy konstrukcyjne dachu oraz ogrodu zimowego (wizualizacja: A. Kozłowska, A. Klich | AK<sup>2</sup>)

Pomimo, że szkło znane jest od tysięcy lat, dopiero od kilku dekad elementy wykonane ze szkła są wykorzystywane jako nośne elementy konstrukcyjne, np. belki, ściany czy słupy [5, 6] w wielu realizacjach, takich jak dachy, fasady, ogrody zimowe, kładki dla pieszych [7-14].

Szkło charakteryzuje się wieloma zaletami, m.in. wysoką wytrzymałością na ściskanie oraz trwałością. Jednakże posiada liczne wady; do najważniejszych można zaliczyć kruchość – po osiągnięciu wytrzymałości szkło pęka w ułamku sekundy, rozpadając się na wiele kawałków o ostrych krawędziach. W przeciwieństwie np. do stali, gdzie zniszczenie poprzedzone jest plastycznymi deformacjami, szkło pęka bez ostrzeżenia. Kolejną wadą jest ekstremalna wrażliwość szkła na koncentrację naprężeń, spowodowana niemożnością redystrybucji sił przez lokalne uplastycznienie materiału. Ponadto, ogromna dysproporcja w wytrzymałości szkła na ściskanie i rozciąganie nie pozwala na pełne wykorzystanie potencjału materiału, szczególnie w elementach zginanych. Dlatego

tradycyjne podejście do projektowania szklanych belek polega głównie na wykorzystaniu szkła hartowanego (bardziej wytrzymałego niż szkło float), laminowaniu kilku tafli w celu minimalizacji prawdopodobieństwa całkowitego zniszczenia belki, wymiarowaniu z ekstremalnie wysokimi współczynnikami bezpieczeństwa oraz stosowaniu dodatkowych tafli mających chronić nośny trzon laminatu. Konserwatywne techniki są jednak nieekonomiczne i nie wykorzystują w pełni własności wytrzymałościowych szkła.

Innym pomysłem jest połączenie szkła z innymi materiałami [16, 17]. Na szczególną uwagę zasługuje drewno, jest bowiem materiałem naturalnym, ekologicznym, a zarazem dobrze przenoszącym naprężenia rozciągające. Poza tym, zwiększenie udziału drewna w zastosowaniach konstrukcyjnych pozwoli europejskim krajom zredukować emisję CO<sub>2</sub>, do czego zobowiązały się m.in. w Protokole z Kioto [4].

Kombinacja fizycznych właściwości szkła i drewna, idealnie wpisująca się w ideę zrównoważonego rozwoju, możliwość recyklingu oraz neutralność materiałów pozwala na szerokie zastosowanie szkła i drewna w wielu realizacjach. Stosowane jednak rozwiązania, polegające na wklejaniu szklanych tafli w drewnianą ramę, oparte są na założeniu, że szkło jedynie wypełnia element nośny i nie uczestniczy w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych, a tylko przekazuje obciążenie wiatrem na nośną drewnianą konstrukcję.

Niniejszy projekt badawczy opiera się na odmiennym założeniu, a mianowicie, że szkło i drewno mogą współpracować w celu przenoszenia obciążeń zewnętrznych. W takim wypadku szklana tafla przestaje pełnić funkcję jedynie wypełnienia, a staje się równorzędnym z drewnem elementem konstrukcyjnym.

# 3 Idea hybrydowych belek drewniano szklanych

Idea hybrydowych belek drewniano-szklanych polega na kombinacji szkła z drewnem w taki sposób, aby połączenie ich własności stworzyło synergiczną i bezpieczną hybrydę. Atutem takiego rozwiązania, w przeciwieństwie do standardowych realizacji, jest wykorzystanie pojedynczej tafli szkła float, co znacznie ogranicza cenę finalnego produktu. Przekrój belki składa się ze szklanego środnika i półek wykonanych z drewna litego lub klejonego (rys. 2).



Rys. 2. Idea hybrydowych belek drewniano-szklanych

Drewniane półki dobrze zabezpieczają belkę przez zwichrzeniem oraz chronią przed uszkodzeniem najbardziej wrażliwą część szklanego środnika, a mianowicie jego krawędzie. Po osiągnięciu wytrzymałości przez szkło i powstaniu rys w rozciąganej strefie przekroju, drewniane półki w połączeniu z niezarysowaną (ściskaną) częścią przekroju są w stanie dalej przenosić obciążenie.

Dlatego jedną z najważniejszych zalet takich belek jest duża nośność poawaryjna po pojawieniu się pierwszej rysy w szkle. Belka dostarcza nam w ten sposób ostrzegawczy sygnał, że jest przeciążona i daje czas na przedsięwzięcie środków zaradczych.

# 4 Cel i zakres pracy

Głównym celem pracy doktorskiej jest rozwinięcie wiedzy na temat hybrydowych belek drewnianoszklanych, ich zachowania pod obciążeniem oraz mechanizmu zniszczenia.

W zakres pracy wchodzą:

- Przegląd literatury, w którym przeanalizowano obecny stan wiedzy na temat hybrydowych belek drewniano-szklanych. Przedstawione zostały wyniki badań zrealizowanych w przeciągu ostatnich kilkunastu lat.

- Zrealizowanie badań materiałowych szkła, drewna i klejów wykorzystanych do budowy hybrydowych belek drewniano-szklanych. Ich głównym celem jest wyznaczenie podstawowych charakterystyk materiałowych, które będą podstawą modelu numerycznego i rozważań analitycznych.

- Zbudowanie i przebadanie w próbie czteropunktowego zginania dziewięciu hybrydowych belek o pomniejszonych rozmiarach (l=1800 mm), przy wykorzystaniu trzech klejów konstrukcyjnych o różnej sztywności. Ta część potraktowana została jako badania wstępne.

- Zbudowanie i przebadanie w próbie czteropunktowego zginania dwunastu hybrydowych belek o rzeczywistych rozmiarach (l=4800 mm), z wykorzystaniem trzech klejów konstrukcyjnych o różnej sztywności.

- Stworzenie numerycznego modelu obliczeniowego hybrydowych belek, uwzględniającego mechanizm zniszczenia szklanego środnika.

- Stworzenie prostego modelu analitycznego hybrydowych belek, pozwalającego na określenie sztywności na zginanie oraz poziom siły, przy którym dochodzi do zarysowania środnika.

- Sformułowanie wniosków końcowych i kierunków dalszych badań.

# 5 Tezy i ograniczenia

Formułując problem badawczy należy wyraźnie zdefiniować główne hipotezy i ograniczenia. W pracy postawiono następujące tezy:

#### Teza I

Belka złożona ze szklanego środnika oraz drewnianych półek połączonych za pomocą kleju konstrukcyjnego jest praktycznym, wytrzymałym i ekologicznym produktem, który może być wykorzystany jako element konstrukcyjny.

Ograniczenia: Praca doktorska ograniczona jest do elementów belkowych.

#### Teza II

Hybrydowa belka drewniano-szklana jest bezpieczna, jej zachowanie jest przewidywalne i charakteryzuje się wysoką nośnością poawaryjną.

<u>Ograniczenia</u>: Praca doktorska ograniczona jest do określania nośności na podstawie próby czteropunktowego zginania.

#### Teza III

Sztywność na zginanie i nośność hybrydowych belek drewniano-szklanych zależy od sztywności wykorzystanego kleju.

Ograniczenia: Praca doktorska ogranicza się do trzech rodzajów klejów o różnej sztywności.

# 6 Przegląd literatury

W literaturze można znaleźć różne przykłady łączenia szkła z innymi materiałami. Generalnie można je podzielić na dwie kategorie: szklane belki wzmocnione innym materiałem (w strefie rozciąganej) oraz hybrydowe belki częściowo szklane. Pierwsza z nich wykazuje analogię do belek żelbetowych – materiał wzmacniający jest przyklejony do dolnej krawędzi belki szklanej. W literaturze można znaleźć przykłady wzmocnienia szklanej belki przy użyciu elementu wykonanego ze stali [18-21],

włókien węglowych [22] lub włókien szklanych [23], przyklejonego do dolnej krawędzi belki. Druga kategoria jest zbliżona do konstrukcji zespolonych. Idea polega na stworzeniu wielomateriałowego przekroju w formie szklanego środnika i półek wykonanych z innych materiałów, takich jak stal [24-26], żelbet [27] lub drewno [28-34]. Wszystkie projekty wskazują tendencję do ograniczenia kruchego zniszczenia szkła i zapewnienia wysokiej nośności poawaryjnej.

Obecny stan wiedzy o możliwości mechanicznej współpracy szkła i drewna oraz synergicznych własnościach drewniano-szklanych kompozytów odnosi się do kilku projektów badawczych przeprowadzonych w europejskich ośrodkach naukowych w okresie ostatnich piętnastu lat. Pierwsze przykłady kompozytów drewniano-szklanych zaprezentowane zostały w późnych latach 90 dwudziestego oraz pierwszych latach dwudziestego pierwszego wieku [36-39]. Dotyczyły one podstawowych badań hybrydowych paneli złożonych ze szklanej tafli i ramy wykonanej z drewna, aluminium oraz tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem polimerowym (GRP), połączonych przy użyciu podatnych klejów.

Bardziej szczegółowe badania hybrydowych elementów drewniano-szklanych przeprowadzone zostały przez Hamma w 2000 roku [28, 29]. Badał on możliwość łączenia drewna i szkła przy użyciu kleju poliuretanowego, na przykładzie hybrydowych belek o przekroju dwuteowym oraz elementów tarczowych. Belki o długości 4000 mm i wysokości 250 mm złożone były ze szklanego środnika o grubości 10 mm i drewnianych półek przyklejonych po obydwu jego stronach. Hamm zauważył wzrost ostatecznej siły o 250% w odniesieniu do pierwszego obciążenia rysującego środnik.

Szerokie badania hybrydowych belek, wykonanych z wykorzystaniem szkła płaskiego wzmacnianego termicznie lub hartowanego, zostały przeprowadzone przez Krehera w 2004 roku [30, 31]. Ich budowa była podobna do belek Hamma [28], jednak zastosowano szkło o grubości 4 i 6 mm przy redukcji wysokości belki do 150 mm i długość do 2000 mm. Podobnie jak Hamm, Kreher zaobserwował nośność poawaryjną belek na poziomie 150% pierwszej siły rysującej.

Hybrydowe belki drewniano-szklane były przedmiotem badań prowadzonych przez Cruza i Pequeno w 2008 roku [32]. Autorzy zbudowali i przebadali piętnaście belek o wysokości 550 mm i długości od 650 do 3200 mm, ze środnikiem ze szkła klejonego. Podobnie jak poprzednicy, Cruz i Pequeno zaobserwowali wzrost nośności po zarysowaniu o 185%.

Najnowsze badania zostały przeprowadzone w 2011 roku przez Blyberg i Serrano [33, 34]. Ich przedmiotem były hybrydowe belki drewniano-szklane o wysokości 240 mm i długości 3850 mm. Autorzy dodatkowo zbadali wpływ wykończenia krawędzi szklanego środnika oraz rodzaju kleju na nośność badanych elementów. Podobnie jak poprzednicy, zaobserwowali średnią nośność poawaryjną belek na poziomie 140% pierwszej siły rysującej.

Przytoczone wyżej prace potwierdzają znaczną nośność poawaryjną (szczątkową) hybrydowych belek drewniano-szklanych, jednakże można znaleźć w nich pewne nieścisłości. Przykładowo, w pracach Cruz and Pequeno [32] autorzy wskazują na silikon strukturalny jako najlepszy do łączenia szkła z drewnem. W przeciwieństwie do nich, Blyberg i Serrano [33, 34] utrzymują, że zdecydowanie bardziej odpowiedni jest klej akrylowy, który jest kilkudziesięciokrotnie bardziej sztywny od silikonu strukturalnego.

Pomimo kilkunastu projektów badawczych nie wszystkie aspekty hybrydowych belek szklanych są do końca rozpoznane. Większość badań niszczących zostało przeprowadzonych na belkach o niewielkich rozpiętościach, podczas gdy badania belek o rzeczywistych wymiarach, rzędu 4-5 m, pozwoliłby na przeanalizowanie efektu skali oraz sprawdzenie przebadanych już zagadnień na belkach, które mogłyby być zabudowane w rzeczywistej konstrukcji. Poza tym, nie ma konkretnych wniosków co do rodzaju kleju, a właściwie jego sztywności, który byłby optymalny dla tego typu rozwiązań. Dodatkowo, większość publikacji nie zawiera numerycznych metod symulowania zachowania się hybrydowych belek pod obciążeniem, a konkretnie sposobów modelowania kruchego zniszczenia szklanego środnika. Równie interesującym aspektem wydaje się zaproponowanie prostego analitycznego algorytmu, który pozwoliłby na szybkie szacowanie sztywności oraz poziomu siły, przy której dochodzi do zarysowania środnika.

# 7 Badania materiałowe

W pracy przeprowadzono badania wszystkich materiałów wykorzystanych do zbudowania hybrydowych belek drewniano-szklanych: szkła, drewna oraz klejów. Ich głównym celem było wyznaczenie wartości parametrów mechanicznych, które następnie zostały wykorzystane w modelach numerycznych i obliczeniach analitycznych.

### 7.1 Badania szkła

Badaniom poddano dwa rodzaje szkła – szkło zwykłe i szkło półhartowane, które charakteryzuje się większą wytrzymałością w porównaniu do szkła płaskiego, ale siatka spękań zbliżona jest do szkła hartowanego.

Pierwsze badania dotyczyły wyznaczenia modułu Younga oraz wytrzymałości na rozciąganie (krytycznych odkształceń) szkła płaskiego. Badania przeprowadzono w prasie hydraulicznej na sześciu próbkach o przekroju 8 × 200 mm i długości 1800 mm, czyli takich samych wymiarach jak tafle, które wykorzystano do budowy hybrydowych belek o zmniejszonych rozmiarach. Rozstaw podpór wynosił 1500 mm. Belki obciążano przemieszczeniowo za pośrednictwem belki stalowej; rozstaw rolek wynosił 500 mm (1/3 rozpiętości). Dla zapewnienia osiowego przyłożenia obciążenia stanowisko wyposażono w dwie stalowe podpory, których zadaniem było przeciwdziałanie wychylenia się belki podczas badania. Próbki wyposażono w tensometry, a stanowisko badawcze w trzy czujniki ugięć (nad podporami oraz w środku rozpiętości) (rys. 3).

![](_page_8_Figure_6.jpeg)

Rys. 3. Przekrój i schemat stanowiska badawczego do badania szkła float.

Wyniki badań tafli szklanych przedstawiono na rys. 4. Wszystkie próbki zachowały się liniowo aż do zniszczenia.

![](_page_8_Figure_9.jpeg)

Rys. 4. Wykres siła-przemieszczenie dla szklanych belek GS.01-GS.06.

Na podstawie badań oszacowano wartość modułu Younga dla szkła równą E=69,8 GPa oraz wartość krytycznych odkształceń rozciągających  $0,651 \times 10^{-6}$ , co odpowiada wytrzymałości na rozciąganie  $f_i=45,6$  MPa. Obie wartości są bardzo zbliżone do wartości normowych, t.j. E=70 GPa i  $f_i=45$  MPa [51].

![](_page_9_Picture_1.jpeg)

Fot. 1. Szklana belka na stanowisku badawczym oraz pomiar naprężeń własnych za pomocą urządzenia SCALP.

Drugim badaniem było określenie profilu naprężeń szczątkowych wzdłuż grubości tafli wykonanej ze szkła półhartowanego (fot. 1). Badania zrealizowano przed wykonaniem badań belek o wymiarach rzeczywistych. Dokonano tego przy użyciu urządzenia SCALP [48]. Badania wykazały, że średni poziom naprężeń ściskających powierzchniowych oraz rozciągających w trzonie przekroju wyniósł odpowiednio -53 oraz 25 MPa.

### 7.2 Badania drewna

W badaniach wykorzystano drewno sortowane, bez sęków, wtrąceń żywicy itp. Elementy zbudowane były z krótszych fragmentów łączonych na mikrowczepy. Drewno wykorzystane do budowy hybrydowych belek o zmniejszonych (typ A), jak i rzeczywistych wymiarach (typ B) pochodziło z różnych krajów.

### 7.2.1 Drewno typ A

Drewno typu A wykorzystano do budowy belek o zmniejszonych rozmiarach. Przeprowadzono dwa rodzaje badań.

Pierwsze badanie polegało na wyznaczeniu modułu Younga i granicznych odkształceń w drewnie w próbie czteropunktowego zginania. Do tego celu wykorzystano trzy belki o takich samych wymiarach (55 × 75 mm) i długości (1800 mm), jak w belkach o zmniejszonych wymiarach. Rozstaw między podporami wynosił 1500 mm, a siły przyłożono symetrycznie w rozstawie 500 mm. Stanowisko wyposażono w czujniki ugięć (nad podporami oraz w środku rozpiętości), a belkę w tensometry (rys. 5).

![](_page_9_Figure_9.jpeg)

Rys. 5. Przekrój i schemat stanowiska badawczego do badania drewna typu A.

Zachowanie wszystkich próbek było podobne (rys. 6). Zależność siła-przemieszczenie przebiegała liniowo, aż do zniszczenia. W każdym przypadku zniszczenie związane było z utratą nośności przez mikrowczepy.

![](_page_10_Figure_1.jpeg)

Rys. 6. Wykres siła-przemieszczenie dla drewnianych belek TS.1-TS.3.

W badaniach uzyskano wartość modułu Younga dla drewna typu A równą E=10,54 GPa oraz wartość krytycznych odkształceń rozciągających  $\varepsilon_t=3,56\times10^{-6}$ , co odpowiada wytrzymałości na rozciąganie  $f_t=35,6$  MPa.

Drugim badaniem było przeprowadzenie próby ściskania na trzech próbkach o długości 100 mm wyciętych z tych samych belek, które były wykorzystane do budowy hybrydowych belek o zmniejszonych rozmiarach. Schemat badania oraz miejsce przyklejenia tensometrów przedstawiono na rys. 7.

![](_page_10_Figure_5.jpeg)

Rys. 7. Próbka drewna typu A oraz schemat stanowiska badawczego.

W badaniach uzyskano średnią wartość modułu Younga przy ściskaniu równy E=11,2 GPa oraz współczynnik Poissona  $\nu=0,438$ .

#### 7.2.2 Drewno typ B

Drewno typu B wykorzystano do budowy belek o rzeczywistych rozmiarach. Przeprowadzono dwa rodzaje badań, mające na celu wyznaczenie dynamicznego modułu Younga oraz określenie modułu Younga i granicznych wartości odkształceń rozciągających w próbie czteropunktowego zginania.

![](_page_10_Figure_10.jpeg)

Rys. 8. Wprowadzanie elementu w drgania oraz wykres jego odpowiedzi

W pierwszym badaniu uzyskano, dla wszystkich 30 próbek, średnią wartość rezonansową f=524,3 Hz, co odpowiada dynamicznemu modułowi sprężystości badanego drewna E=12,4 GPa.

W drugim badaniu sześć belek o długości 800 mm, tych samych, na których wcześniej przeprowadzono badanie rezonansowe, poddano próbie czteropunktowego zginania. Rozstaw między podporami wynosił 710 mm, siły przyłożono symetrycznie w rozstawie 1/3 rozpiętości. Stanowisko wyposażono w czujniki ugięć, a belki w tensometry (rys. 9).

![](_page_11_Figure_2.jpeg)

Rys. 9. Przekrój i schemat stanowiska badawczego do badania drewna typu B.

W badaniach uzyskano wartość modułu Younga dla drewna typu B równy *E*=12,8 GPa (lokalna) i *E*=14,9 GPa (globalna) oraz wartość krytycznych odkształceń rozciągających  $\varepsilon_t$ =3,49×10<sup>-6</sup>, co odpowiada wytrzymałości na rozciąganie  $f_t$ =44,6 MPa.

### 7.3 Kleje konstrukcyjne

W pracy wykorzystano trzy rodzaje klejów o różnej sztywności:

- 3M DP490 (dwuskładnikowy klej epoksydowy) [57],
- SikaFast 5215 (dwuskładnikowy klej akrylowy) [58],
- Sikasil SG-500 (dwuskładnikowy silikon strukturalny) [59].

Badania klejów zostały wykonane w ramach stażu naukowego w Linnaeus University w Szwecji.

Próbki o grubości 4 mm do badań klejów przygotowano według norm ISO 527-1:2012 [61] oraz ISO527-2:2012 [60] (rys. 10). Przed badaniem wymiary wszystkich próbek zostały zmierzone mikrometrem.

![](_page_11_Figure_12.jpeg)

Rys. 10. Próbka typu 1A [norma]

### 7.3.1 Badanie I

Wszystkie próbki były przebadane w prasie hydraulicznej sterowanej przemieszczeniowo (fot. 2). Zastosowano trzy rodzaje prędkości obciążania: 1, 5, 50 mm/min. Do próbek z jednej strony zamocowano ekstensometr o bazie 50 mm i maksymalnym wydłużeniu 4,5 mm do pomiaru odkształceń w kierunku równoległym do osi prasy. Druga strona próbki została odpowiednio przygotowana do pomiaru rozkładu odkształceń na całej jej powierzchni za pomocą niekontaktowej metody pomiaru odkształceń Aramis (fot. 2).

![](_page_12_Picture_1.jpeg)

Fot. 2. Próbka w stanowisku badawczym

Próbki obciążano do pewnego poziomu, następnie odciążano i obciążano ponownie. Tabela 1 przedstawia szczegóły planu badań. Z uwagi na główny cel badań, jakim było wyznaczenie charakterystyk materiałowych oraz z obawy o uszkodzenie ekstensometru, próbki nie były obciążane do zniszczenia. Wyniki badań przedstawiono na wykresach (rys. 11-13).

Tab. 1. Prędkości badania i poziomy sił dla badania I

Klej	Prędkość obciążania [mm/min.]	Poziom obciążenia
		(przemieszczenia) / odciążenia
Epoksydowy	1	980 N / 300 N
Akrylowy	5	8 mm / 10 N
Silikon	50	10 mm / 1N

![](_page_12_Figure_6.jpeg)

Rys. 11. Zależność naprężenia-odkształcenia dla kleju epoksydowego przy różnych prędkościach obciążania próbki.

![](_page_12_Figure_8.jpeg)

Rys. 12. Zależność naprężenia-odkształcenia dla kleju akrylowego przy różnych prędkościach obciążania próbki.

![](_page_13_Figure_1.jpeg)

Rys. 13. Zależność naprężenia-odkształcenia dla silikonu strukturalnego przy różnych prędkościach obciążania próbki.

Próbki wykonane z kleju epoksydowego wykazują bardzo dobrą powtarzalność wyników. W trakcie odciążania krzywe nie wracają po tej samej ścieżce, co świadczy o lepko-sprężystych cechach kleju. Przy wyższych prędkościach obciążania zależność ta jest mniej widoczna. Generalnie, klej cechuje znaczna zależność przebiegu krzywych od prędkości obciążania.

Klej akrylowy wykazuje silną zależność zachowania od prędkości obciążania (zdecydowanie większą niż klej epoksydowy), jednak powtarzalność wyników nie jest tak dobra. Najprawdopodobniej jest to spowodowane bardzo krótkim tzw. "otwartym czasem" kleju, po którym ten zaczyna wiązać. W przypadku kleju akrylowego wynosi on jedynie 5 min. Podczas przygotowywania próbek mogło dojść do częściowego wiązania kleju, co mogło wpłynąć na wyniki.

Najmniejszą zależność wyników od prędkości obciążania oraz największy rozrzut wyników ma silikon strukturalny. Jest to najprawdopodobniej spowodowane tym, że siły uzyskane w czasie badania były bardzo niskie w porównaniu z zakresem pomiarowym siłomierza.

Bazując na zależnościach przedstawionych na wykresach (rys. 11-13) obliczono moduły sprężystości wszystkich trzech klejów w zakresie odkształceń między 0,05 i 0,1% (tab. 2). Z powodu ograniczeń urządzeń pomiarowych nie można było odczytać wartości dla zakresu odkształceń zawartych w normie [61].

Klej	Prędkość o	nm/min.]	
	1	5	50
Epoksydowy	1595	1664	1750
Akrylowy	78	141	284
Silikon	3,17	2,86	2,34

Tab.	2.	Wartości me	odułów	sprężystości	przy	różnych	predkos	ściach	obciażania	próbek
			o dano m	op: 72,500501	P J	102119011	pr 7 miles		000 ng Lanna	P. 00 •

W celu wyznaczenia współczynnika Poissona wykorzystano wyniki z niekontaktowego systemu pomiaru odkształceń Aramis. Rysunek 14 przedstawia mapę odkształceń dla próbki kleju epoksydowego, wykres odkształceń równoległych do osi prasy (uśrednionych z pola między mocowaniami ekstensometru) oraz obliczone wartości współczynnika Poissona. Ostateczną wartość współczynnika Poissona wyznaczono jako średnią wartość z zakresu między 100 a 350 s, w którym wartości są stabilne. Tabela 3 przedstawia wyniki dla wszystkich klejów.

![](_page_13_Figure_10.jpeg)

Rys. 14. Mapa naprężeń (a) oraz wykres siły i zmiany współczynnika Poissona w czasie badania (b).

Klej	Prędkość obciążania próbek [mm/min.]					
	1	5	50			
Epoksydowy	0,422	0,414	0,401			
Akrylowy	0,459	0,458	0,451			
Silikon	0,462	0,462	0,470			

Tab. 3. Wartości współczynnika Poissona przy różnych prędkościach obciążania próbek.

### 7.3.2 Badanie II

Głównym celem badania było obciążanie próbki do zniszczenia i wyznaczenie krytycznej siły, odkształceń i naprężeń. Próbki obciążano przemieszczeniowo w prasie hydraulicznej z prędkością 5 mm/min. Na próbkach nie zamontowano ekstensometru z obawy na możliwość jego uszkodzenia podczas badania. Wykresy (rys. 15-17) przedstawiają krzywe siła-przemieszczenie (tłoka) dla badanych próbek.

![](_page_14_Figure_5.jpeg)

Rys. 15. Zależność siła-wydłużenie dla kleju epoksydowego

![](_page_14_Figure_7.jpeg)

Rys. 16. Zależność siła-wydłużenie dla kleju akrylowego

![](_page_14_Figure_9.jpeg)

Rys. 17. Zależność siła-wydłużenie dla silikonu strukturalnego

Klej epoksydowy zachowuje się prawie idealnie liniowo do wydłużenia ok. 0,02 mm, następnie wykazuje silnie nieliniowe zachowanie, aż do momentu zniszczenia. Klej akrylowy wykazuje wyraźne

dwuliniowe zachowanie po osiągnięciu wydłużenia ok. 0,05 mm. Natomiast klej silikonowy zachowuje się liniowo. W przypadku kleju akrylowego i silikonowego nie doszło do zniszczenia próbki.

Klej	F <sub>t,u</sub> [N]	ε <sub>t,u</sub> [-]	$\sigma_{t,u}$ [MPa]
Epoksydowy	1416,1	0,032	36,50
Akrylowy	313,5	0,652	8,42

Tab. 4. Wyniki badania II

#### 7.3.3 Badanie III

Głównym celem badania było wyznaczenie ostatecznego modułu sprężystości (po zakończeniu procesu relaksacji) przy różnych poziomach obciążenia próbek. Badania przeprowadzono dla klejów wykazujących silną zależność sztywności od prędkości obciążania (epoksydowego i akrylowego).

Badanie przeprowadzono w prasie hydraulicznej. Próbki obciążono do pewnego poziomu siły przy prędkości obciążenia 100 mm/min. Na tej podstawie określono chwilową wartość modułu sprężystości. Następnie, przy stałym odkształceniu (wychyleniu tłoka), mierzono spadek siły w prasie przez 1000 s. Ostateczny moduł sprężystości wyznaczonego przy założeniu, że przy stałych odkształceniach moduł sprężystości jest liniowo zależny od spadku siły. Wyniki badania zostały przedstawione na wykresach (rys. 18-19) oraz w tabeli 5.

![](_page_15_Figure_7.jpeg)

Rys. 18. Spadek modułu sprężystości w czasie dla kleju akrylowego

![](_page_15_Figure_9.jpeg)

Rys. 19. Spadek modułu sprężystości w czasie dla kleju epoksydowego

Tab. 5. Chwilowy i ostateczny moduł sprężystości dla kleju epoksydowego i akrylowego.

Klej	E <sub>inst</sub> [MPa]	E <sub>inf</sub> [MPa]
Epoksydowy	1698	840
Akrylowy	349	17

# 8 Badania hybrydowych belek o pomniejszonych wymiarach

Środniki wszystkich belek, o wymiarach  $200 \times 1800$  mm i grubości 8 mm, wykonano ze szkła float (zgodnie z EN-572). W celu zminimalizowania wpływu stanu krawędzi na wytrzymałość szkła, wszystkie krawędzie szklanych tafli, po przycięciu do pożądanych wymiarów, zostały wyszlifowane. Półki o długości 1800 mm wykonane zostały z drewna litego o wymiarach przekroju poprzecznego  $55 \times 75$  mm. W każdej z nich wyfrezowano podłużną bruzdę, w którą następnie wklejono szklany środnik. Zastosowano bruzdy o stałej głębokości 30 mm i dwóch szerokościach: 13 i 15 mm (rys. 20).

![](_page_16_Figure_3.jpeg)

Rys. 20. Przekrój hybrydowej belki drewniano-szklanej o pomniejszonych wymiarach.

Do połączenia szklanego środnika z drewnianymi półkami użyto trzech rodzajów klejów, charakteryzujących się różnymi sztywnościami:

- SikaFast 5221 (dwuskładnikowy klej akrylowy) [58],
- Sikasil SG-500 (dwuskładnikowy silikon strukturalny) [59],
- Icosit KC 340/7 (dwuskładnikowy materiał na bazie poliuretanów) [64].

W pierwszej serii badawczej zbudowano i przebadano dziewięć belek o wysokości 300 mm i długości 1800 mm, po trzy sztuki z każdym klejem. Badania przeprowadzono w próbie czteropunktowego zginania (fot. 3).

![](_page_16_Picture_10.jpeg)

Fot. 3. Stanowisko badawcze do badania belek.

Rozstaw podpór przy wszystkich badaniach wynosił 1500 mm. Siły przyłożone były symetrycznie w 1/3 rozpiętości belek, za pośrednictwem stalowej belki pośredniej. Z powodu dużej smukłości badanych belek zastosowano na obydwu końcach stalowe podpory zabezpieczające przed jej wychyleniem z płaszczyzny pionowej. Badania przeprowadzone zostały przy użyciu sterowanej

przemieszczeniowo prasy hydraulicznej w laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Belki obciążano stałym przyrostem przemieszczenia, o wartości 1 mm/min.

W celu monitorowania przebiegu badania zainstalowano szereg indukcyjnych czujników przemieszczeń, m.in. w połowie rozpiętości, w miejscach przyłożenia obciążenia i nad podporami; oraz tensometrów elektrooporowych przyklejonych do poszczególnych elementów belki.

![](_page_17_Picture_3.jpeg)

Fot. 4. Przebieg zniszczenia hybrydowej belki drewniano-szklanej o pomniejszonych rozmiarach.

Na Fot. 4 przedstawiono kolejne klatki z nagrania przebiegu próby zginania belki BA2 (klejonej przy użyciu SikaFast 5221).

Zniszczenia belki przebiegało zgodnie z następującym schematem:

- pojawienie się pierwszej rysy w szklanym środniku (zazwyczaj pod miejscem przyłożenia siły),

- pojawienie się drugiej rysy (zazwyczaj symetrycznie w stosunku do pierwszej rysy),
- powstanie trzeciej rysy,
- całkowite zniszczenie belki.

Zniszczenie pozostałych belek przebiegało podobnie.

![](_page_18_Figure_7.jpeg)

Rys. 20. Wyniki badań belek o pomniejszonych wymiarach.

Na rys. 20 przestawiono wykres zależności siła – ugięcie (w środku rozpiętości) dla wszystkich belek poddanych próbie czteropunktowego zginania. Belki pod wpływem obciążenia wykazują wieloetapowy mechanizm zniszczenia. W pierwszej fazie zależność przebiega prawie idealnie liniowo. Pojawienie się pierwszej rysy powoduje nagły spadek siły oraz wzrost pionowego przemieszczenia. Belka nie ulega zniszczeniu, ponieważ drewniana półka, spajająca zarysowany środnik, nie pozwala na dalszy rozwój rysy, i w połączeniu z niezarysowaną (ściskaną) częścią środnika pozwala na dalsze przenoszenie obciążeń. Kolejne załamania wykresów związane są z pojawieniem się kolejnych rys w szklanym środniku, a tym samym zmniejszeniem sztywności belki. Uwidacznia się także wyraźny wpływ rodzaju kleju na sztywność belki. Największą sztywnością charakteryzowały się belki połączone przy użyciu kleju akrylowego, a najmniejszą belki w których zastosowano silikon strukturalny i materiał na bazie poliuretanów.

# 9 Badania belek o rzeczywistych wymiarach

Do badań przyjęto belki o wysokości 240 mm i długości 4800 mm (rys. 21). W przeciwieństwie do belek o zmniejszonej skali szklany środnik o wymiarach 190 × 4800 i grubości 8 mm wykonany został z dwóch rodzajów szkła: płaskiego lub półhartowanego. Aby zminimalizować wpływ krawędzi na wytrzymałość, po docięciu tafli do odpowiednich rozmiarów zostały one wyszlifowane.

Półki o wymiarach 45 × 60 mm wykonano z niekonstrukcyjnego, sortowanego drewna sosnowego, łączonego na mikrowczepy. W półkach wykonano rowki o wymiarach 12 × 20 mm, w które później wklejono szklany środnik. Do połączenia szklanego środnika z drewnianymi półkami wykorzystano trzy rodzaje klejów, o różnej sztywności: 3M DP490 (dwuskładnikowy klej epoksydowy), SikaFast 5221 (dwuskładnikowy klej akrylowy) i Sikasil SG-500 (dwuskładnikowy silikon strukturalny).

![](_page_19_Figure_1.jpeg)

Rys. 21. Przekrój hybrydowej belki drewniano-szklanej o rzeczywistych wymiarach.

W serii badawczej zbudowano i przebadano w próbie czteropunktowego zginania 12 dwuteowych belek: sześć ze środnikiem wykonanym ze szkła płaskiego i klejem epoksydowym oraz po dwie belki ze szkła hartowanego i klejów: epoksydowego, akrylowego i silikonu strukturalnego. Badania przeprowadzone były w ramach stażu naukowego w Linnaeus University w Szwecji. Próbki oznaczono według schematu: klej-szkło-numer próbki.

![](_page_19_Picture_4.jpeg)

Fot. 5. Stanowisko badawcze do badań w próbie czteropunktowego zginania belek o rzeczywistych wymiarach

Ze względu na rozmiary elementów na potrzeby badań zbudowano stanowisko badawcze przedstawione na fot. 5. W celu zabezpieczenia belki przed wychyleniem w trakcie badania, stanowisko zostało wyposażone w dwie stalowe podpory o rozstawie 4320 mm, zlokalizowane ok. 300 mm od miejsca przyłożenia obciążenia. Siły przykładane były symetrycznie w rozstawie równym 1/3 rozpiętości, za pośrednictwem hydraulicznych siłowników sterowanych przemieszczeniowo, z prędkością obciążania równą 12 mm/min.

W trakcie badania monitorowano ugięcie elementu w środku rozpiętości (sztywność globalna) oraz sztywność lokalną, t.j. bez wpływu sił poprzecznych, przy użyciu czujników indukcyjnych zainstalowanych na długości 1200 mm. Dwie belki każdego typu zostały wyposażone w tensometry, które przyklejono przy górnej i dolnej krawędzi szklanego środnika oraz do rozciąganej półki.

![](_page_19_Figure_8.jpeg)

Rys. 22. Wyniki badań belek o rzeczywistych wymiarach

Belki ze środnikiem wykonanym ze szkła float, podobnie jak belki o zmniejszonych rozmiarach, wykazują wieloetapowy mechanizm zniszczenia (rys. 22). W pierwszej fazie zależność przebiega prawie idealnie liniowo. Pojawienie się pierwszej rysy powoduje nagły spadek siły oraz wzrost pionowego przemieszczenia. Belka nie ulega zniszczeniu, ponieważ drewniana półka, spajająca zarysowany środnik, nie pozwala na dalszy rozwój rysy i w połączeniu z niezarysowaną (ściskaną) częścią środnika pozwala na dalsze przenoszenie obciążeń. Kolejne załamania wykresów związane są z pojawieniem się kolejnych rys w szklanym środniku, a tym samym zmniejszeniem sztywności belki. Całkowite zniszczenie belki spowodowane było eksplozją ściskanej strefy środnika oraz utratą nośności przez rozciąganą drewnianą półkę. Kolejne fazy zniszczenia belki zostały przedstawione na fot. 6.

![](_page_20_Picture_2.jpeg)

Fot. 6. Przebieg zniszczenia hybrydowej belki ze środnikiem ze szkła płaskiego.

Belki ze środnikiem wykonanym ze szkła półhartowanego, ze względu na większą wytrzymałość szkła, osiągnęły większą siłę przy pierwszym zarysowaniu, jednak zniszczenie było kruche, bez żadnego ostrzeżenia (fot. 7). Nie można jednoznacznie określić, czy zniszczenie spowodowane było utratą nośności przez szklany środnik (z dużymi naprężeniami własnymi) czy drewnianą półkę.

![](_page_20_Picture_5.jpeg)

Fot. 7. Przebieg zniszczenia hybrydowej belki ze środnikiem ze szkła półhartowanego.

Średnia siła dla belek ze środnikiem wykonanym ze szkła płaskiego, przy której doszło do zarysowania środnika oraz przy ostatecznym zniszczeniu elementów, wyniosła odpowiednio 11,6 i 16,4 kN. Uzyskano w ten sposób 50% wzrost nośności po pierwszym zarysowaniu środnika oraz ciągliwe zachowanie belek.

Belki ze środnikiem wykonanym ze szkła półhartowanego przeniosły prawie dwukrotnie większą siłę, ale nie wykazały żadnej nośności poawaryjnej. Wszystkie belki uległy zniszczeniu przy przemieszczeniu rzędu 40 mm, przy czym sztywność belek z klejem silikonowym była niższa o ok. 25% od tych z klejami sztywniejszymi.

W badaniach uzyskano średnie naprężenia niszczące dla szkła float równe 44,5 MPa. Wartość ta jest zbliżona do wyników badań materiałowych szkła i badań belek szklanych (wykonanych w pozycji stojącej), przedstawionych w pracy [51]. W przypadku szkła półhartowanego wartość ta wyniosła 127 MPa. Zakładając, że średnie naprężenia niszczące dla szkła float wynoszą 45 MPa, poziom naprężeń własnych może być oszacowany na 82 MPa. Badania materiałowe szkła półhartowanego wykazały średni poziom naprężeń własnych na poziomie 53 MPa. Wyjaśnieniem tej rozbierzności jest obserwacja, że w szkle półhartowanym naprężenia własne na krawędziach są o ok. 50% wyższe od mierzonych w oddaleniu do krawędzi. Pomiar urządzeniem SCALP nastąpił w okolicach osi obojętnej belki, stąd naprężenia przy krawędziach mogą być oszacowane na  $1,5 \times 53=79,5$  MPa, co tłumaczy oszacowaną wartość naprężeń własnych równą 82 MPa.

W pracy przeprowadzono analizę, która pozwoliła odnieść uzyskane wyniki do rzeczywistości. Rozważono sytuację, w której hybrydowe belki o długości 4320 mm (w rozstawie co 1,5 m) stanowią podpory szyb zespolonych tworzących szklane przekrycie atrium. Przyjęto budowę zestawu szklanego 88.4/16/8 (szkło laminowane hartowane 2×8 mm, pustka wypełniona argonem, szkło hartowane 8 mm). Przeprowadzona analiza wykazała, że hybrydowe belki o budowie i długości jak w badaniach, w rozstawie co 1,5 m, dla obciążeń stałych i obciążenia śniegiem, wykazują globalny współczynnik bezpieczeństwa równy 2,0 dla I strefy śniegowej w Polsce.

# **10 Modelowanie numeryczne**

Do zbudowania modelu obliczeniowego (3D) hybrydowych belek drewniano-szklanych, uwzględniającego kruche zniszczenie szklanego środnika, wykorzystano program Abaqus 6.12 [35].

W modelach numerycznych zastosowano model materiału - brittle cracking, przeznaczony do modelowania kruchego zniszczenia takich materiałów jak szkło, kruche skały, beton i materiały ceramiczne. Do zobrazowania nieciągłości (rys) w elementach skończonych zastosowano rozmyty model zarysowań. W modelach zastosowano proste kryterium detekcji miejsc powstania zarysowań rysy mogą powstać jedynie w elementach skończonych, w których naprężenia główne osiągną wytrzymałość szkła na rozciaganie (45 MPa). Samo powstanie rysy i jej propagacja oparte są na kryterium Hillerborga, który sformułował nową cechę materiału - energię pękania. Jest ona potrzebna do rozwarcia rysy o jednostkowej powierzchni w szczelinie typu I, w której naprężenia rozciągające są normalne do powierzchni rysy. W takim podejściu kruche zachowanie jest zdefiniowane jako relacja napreżenie – długość rozwarcia rysy. Po powstaniu rysy model zakłada liniowa strate wytrzymałości na rozciaganie wraz z rozwarciem szczeliny, aż do osiagniecia krytycznego rozwarcia, w której napreżenia maleja do zera. O ile inicjacja rysy oparta jest jedynie na szczelinie typu I, to zachowanie się elementów zarysowanych uwzględnia również szczeline typu II (obciążoną w płaszczyźnie rysy). W modelu spadek sztywności poprzecznej jest zdefiniowany jako funkcja sztywności postaciowej G i uzależniony jest od tzw. "shear retention factor", który z kolei zależy od rozwarcia rysy.

W celu przeprowadzania quasi-statycznej analizy oraz uniknięcia znaczących sił bezwładności w module dynamicznym, jakim jest stosowany w analizie Explicit, należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiedni dobór czasu analizy. Nieodpowiednie bowiem dobranie czasu może skutkować nierealistycznymi efektami dynamicznymi. W pracy tak dobrano czas analizy, aby przez cały jej okres proporcja między energią kinetyczną a energią wewnętrzną układu była zawsze poniżej 5%, zgodnie z [80].

# **11 Modele numeryczne**

Na potrzeby pracy zbudowano kilkanaście trójwymiarowych modeli numerycznych. W pierwszym etapie zamodelowano hybrydowe belki drewniano-szklane o zmniejszonych rozmiarach i przeanalizowano wrażliwość modelu na paramatry obliczeniowe szklanego środnika takie, jak rodzaj i wielkość elementów, czy wartość energii pękania. Kolejno, bazując na optymalnych parametrach, zamodelowano hybrydowe belki o rzeczywistych rozmiarach. Dodatkowo, przeprowadzono analizę naprężeń termicznych w belkach o wymiarach rzeczywistych.

W celu ograniczenia liczby elementów skończonych hybrydowe belki zamodelowano jako ćwiartki z odpowiednio dobranymi warunkami brzegowymi, symulującymi czteropunktowe zginanie (rys. 23). Podpory, jak i miejsca przyłożenia obciążenia, zamodelowano jako sztywne powierzchnie o długości 50 mm. Obciążenie przykładano przemieszczeniowo. Analizy uwzględniały nieliniowe efekty dużych deformacji.

![](_page_22_Figure_4.jpeg)

Rys. 23. Przekrój, widok i model 3D hybrydowych belek o rozmiarach a) zmniejszonych, b) rzeczywistych.

Wartości	materiałowe	dla	szkła	i	drewna	przedstawiono	w	tab	6-8
wantosei	materialowe	uia	SZKIA	1	urewna	pizeusiawiono	vv	tao.	0-0.

Tab. 6. Model materiałowy szkła											
E [MPa] $\nu$ $f_t$ [MPa] $G_f$ [J/m²] $\Delta_u$ [m]											
$70 \cdot 10^3$	0,23	45	3	1,333.10-7							

	Tab. 7. Model materiałowy drewna typu A											
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	v <sub>12</sub>	v <sub>13</sub>	V <sub>23</sub>	G <sub>12</sub>	G <sub>13</sub>	G <sub>23</sub>				
[MPa]	[MPa]	[MPa]				[MPa]	[MPa]	[MPa]				
10540	750	750	0,44	0,40	0,52	930	930	120				

$E_1$	$E_2$	E <sub>3</sub>	$v_{12}$	$v_{13}$	v <sub>23</sub>	G <sub>12</sub>	G <sub>13</sub>	G <sub>23</sub>
[MPa]	[MPa]	[MPa]				[MPa]	[MPa]	[MPa]
10540	750	750	0,44	0,40	0,52	930	930	120

	Tab. 8. Woder materialowy drewna typu B											
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$v_{12}$	V <sub>13</sub>	V <sub>23</sub>	G <sub>12</sub>	G <sub>13</sub>	G <sub>23</sub>				
[MPa]	[MPa]	[MPa]				[MPa]	[MPa]	[MPa]				
12410	880	880	0,44	0,40	0,52	1090	1090	140				

ladel materialawa drawna tym

Dla klejów, w zależności od zachowania ujawnionego w badaniach materiałowych, zastosowano różne modele (rys. 24). Odpowiednie parametry przedstawiono w Tabeli 9.

![](_page_23_Figure_6.jpeg)

Rys. 24. Modele materiałowe kleju: a) epoksydowego, b) akrylowego, c) silikonu strukturalnego

Klej	E <sub>t,e</sub> [MPa]	f <sub>t,e</sub> [MPa]	Et,p	ε <sub>t,u</sub>	f <sub>t,u</sub> [MPa]	ν
Eposydowy	1595	-	-	0,032	36,5	0,422
Akrylowy	78,12	8,42	4,84	-	-	0,459
Silikon	3,17	-	-	-	-	0,462

Tab. 9. Modele materiałowe klejów

### 11.1 Analiza parametryczna

Analizę parametryczną przedstawiono na przykładzie belki o zmniejszonych rozmiarach. Rozmyty model zarysowania jest wrażliwy na kształt i wymiary elementów skończonych, dlatego w analizie zastosowano dwie geometrie elementu skończonego (rys. 25) oraz trzy wielkości elementów skończonych: 8, 4 i 2 mm (modele P-01-P-06). Dodatkowo, sprawdzono wrażliwość modelu na wielkość energii pękania.

![](_page_23_Picture_12.jpeg)

Rys. 25. Dwa rodzaje zastosowanej geometrii elementów skończonych

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

Rys. 26. Wyniki dla różnej geometrii oraz wielkości siatki elementów skończonych

Przebieg zależności siła-przemieszczenie (rys. 26) jest idealnie liniowy, aż do momentu pojawienia się pierwszej rysy w środniku. W tym momencie następuje nagły spadek siły i przyrost przemieszczenia oraz zmniejszenie się sztywności belki. Następnie rysa propaguje i pojawiają się nowe zarysowania w innej części środnika. Pierwsza rysa dla wszystkich przypadków pojawiła się przy sile 29 kN; nośność modeli wahała się w granicach 120÷140 kN.

Praktycznie model nie jest wrażliwy na zmianę tych parametrów. Jedynie w ostatniej fazie pojawiają się różnice, które są związane z otrzymaną siłą niszczącą. Jednak, pomimo braku wpływu zmiennych parametrów siatki na przebieg krzywych siła-przemieszczenie, ma ona znaczny wpływ na siatkę spękań (rys. 27). Pierwszą zależnością jaką można zauważyć jest to, że im mniejszy element, tym większa liczba uzyskanych rys. Drugą jest znaczny wpływ geometrii elementów na przebieg rys. W przypadku elementów prostokątnych rysy przebiegają generalnie w dwóch równoległych kierunkach, natomiast przy siatce graniastosłupowej ujawniają się rysy pod różnymi kątami.

![](_page_24_Figure_5.jpeg)

Rys. 27. Obraz spękań dla elementów skończonych o różnej wielkości i geometrii.

Analogiczne wyniki otrzymano dla modeli z różnymi wielkościami energii pękania. Krzywe siłaprzemieszczenie przedstawione na rys. 28 dla przykładowych energii pękania szkła równych 3, 5,5 oraz 8 J/m<sup>2</sup> praktycznie nachodzą na siebie. Można zatem stwierdzić, że zmiana tego parametru nie ma wpływu na przebieg zależności siły od przemieszczenia. Ma ona jednak wpływ na obraz rys, przedstawiony dla przykładowych siatek spękań na rys. 29. Wówczas, im mniejsza energia pękania, tym więcej rys ujawnia się w modelu (rys. 28, 29).

![](_page_25_Figure_1.jpeg)

Rys. 28. Wyniki dla różnej wielkości energii pękania szkła

![](_page_25_Figure_3.jpeg)

Rys. 29. Siatka spękań przy różnej wielkości energii pękania szkła.

Podsumowując można stwierdzić, że zmiana geometrii siatki elementów skończonych, czy wielkości energii pękania szkła nie ma wpływu na poziom otrzymanej siły przy pojawieniu się pierwszej rysy w szkle oraz ma znikomy wpływ na dalszy przebieg krzywych siła-przemieszczenie. Parametry te jednak znacznie wpływają na siatkę spękań. Im mniejszy element oraz mniejsza wielkość energii pękania, tym pojawia się więcej rys. Najlepszą zgodność z obserwacjami poczynionymi podczas badań wykazują modele obliczeniowe o siatce elementów skończonych w kształcie graniastosłupa. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę czas obliczeń, który przy wymiarach elementu 2 mm wyniósł ponad 72 godziny, najbardziej optymalną kombinacją parametrów wydaje się być: elementy skończone o wymiarach 4 mm, kształt graniastosłupa oraz wielkość energii pękania równa 3 J/m<sup>2</sup>. Takie parametry zostały wykorzystane w dalszych analizach numerycznych hybrydowych belek.

## 11.2 Porównanie z wynikami badań

### 11.2.1 Belki o zmniejszonych rozmiarach

Wykresy na rys. 30 przedstawiają porównanie wyników uzyskanych z obliczeń numerycznych z badaniami belek o zmniejszonych rozmiarach.

![](_page_26_Figure_4.jpeg)

Rys. 30. Porównanie wyników z analiz numerycznych z badaniami

Otrzymane na podstawie analiz numerycznych zachowanie belek z klejem akrylowym (F-SSB-01-02) o różnej grubości spoiny klejowej (spowodowanej różną geometrią rowka w półce) do momentu pojawienia się pierwszej rysy w szkle jest bardzo podobne do uzyskanych w laboratorium. Przy sile ok. 60 kN, i pojawianiu się drugiej rysy, wykresy zaczynają się rozbiegać. Jest to spowodowane tym, że grubsza spoina klejowa pozwala na większe odkształcenia kleju. Podobną zależność zaobserwowano w modelach obliczeniowych belek z klejem silikonowym (F-SSB-03-04). Jako moment całkowitego zniszczenia przyjęto zrównanie odkształceń w pasie rozciąganym z wartościami krytycznymi uzyskanymi w badaniach materiałowych drewna.

W przypadku belek z klejem akrylowym (F-SSB-01-02) otrzymana na podstawie analiz numerycznych początkowa sztywność jest o ok. 47% wyższa niż otrzymana w testach laboratoryjnych, a poziom siły, przy której dochodzi do zarysowania środnika, o ok. 13%. Jest to związane z faktem, że rzeczywista sztywność kleju jest niższa niż wyznaczona w czasie badań materiałowych (78 MPa), nawet dla najniższej prędkości obciążania. Celem wyeliminowania tego efektu, a zarazem ekonomicznego projektowania belek, przeprowadzono dodatkową analizę obliczeniową, przyjmując sztywność kleju akrylowego uzyskaną z badań relaksacji (17 MPa). Otrzymano znacznie lepsze dopasowanie, a mianowicie różnica sztywności jest równa ok. 23%, a poziomu siły – 4%.

Również wartość siły, przy której belka ulega całkowitemu zniszczeniu, wyznaczona przy użyciu modeli obliczeniowych F-SSB-01-02 jest przeszacowana. Przyczyniło się do tego całkowite zniszczenie belki w analizach numerycznych, spowodowane utratą nośności przez szklany środnik. Rzeczywisty obraz zniszczenia, obserwowany w badaniach laboratoryjnych wskazał, że zniszczenie spowodowane było awarią półki (zerwanie mikrowczepów). Podobną zależność zaobserwowano dla modeli belek hybrydowych z klejem silikonowym (F-SSB-03-04), przy czym w analizach tych otrzymano wartość sztywności początkowej wyższą o ok. 8% od otrzymanych w badaniach laboratoryjnych oraz wartość siły przy pierwszej rysie niższą o ok. 10%.

Siatka spękań uzyskana z analiz numerycznych poprawnie odwzorowuje zachowanie się belek w warunkach laboratoryjnych (rys. 31, 32). Nie zaobserwowano różnicy dla modeli F-SSB-01-02 oraz F-SSB-03-04.

![](_page_27_Picture_1.jpeg)

Rys. 31. Siatka spękań w modelu F-SSB-01.

![](_page_27_Picture_3.jpeg)

Rys. 32. Siatka spękań w modelu F-SSB-04.

### 11.2.2 Belki o rzeczywistych wymiarach

Pełną analizę numeryczną przeprowadzono dla belek ze szkłem float (model F-LSB-01), ponieważ jako jedyne w badaniach laboratoryjnych wykazały wieloetapowy mechanizm zniszczenia i nośność poawaryjną. Dla belek ze szkłem półhartowanym obliczenia zatrzymano w chwili pojawienia się pierwszej rysy w szkle i przeprowadzono wyłącznie analizę sztywnościową.

![](_page_27_Figure_7.jpeg)

Rys. 33. Porównanie wyników z analiz numerycznych z badaniami

Wyniki z analiz numerycznych modelu F-LSB-01 wykazują dużą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych (rys. 33). Sztywność po zarysowaniu środnika jest niższa od uzyskanej w badaniach, jednak jest to spowodowane tym, że w analizie założono symetrię modelu. Podobnie jak w przypadku belek o zmniejszonych rozmiarach, w modelu numerycznym całkowite zniszczenie elementu spowodowane było awarią szklanego środnika. W rzeczywistości, analogicznie jak poprzednio, zniszczenie spowodowane było awarią półki (zerwanie mikrowczepów). Jako moment zniszczenia przyjęto zrównanie odkształceń w pasie rozciąganym z wartościami krytycznymi uzyskanymi w badaniach materiałowych drewna.

Na podstawie przeprowadzonych analiz uzyskano wartości sztywności początkowej hybrydowych belek różniące się od w zakresie 1,7 do 4,7% w stosunku do wartości otrzymanych w testach laboratoryjnych. Dla siły przy pierwszym zarysowaniu różnice te wyniosły od -0,1 do 10% (tab. 10).

	5		5 5	5
Model	Badania laboratoryjne		Model numeryczny	
	F <sub>crack</sub> [kN]	EI [MNm <sup>2</sup> ]	F <sub>crack</sub> [kN]	EI [MNm <sup>2</sup> ]
E-AF-01-02	8,25	0,887	9,11	0,920
E-HS-01-02	25,5	0,898	25,48	0,920
A-HS-01-02	25,2	0,907	24,60	0,904
S-HS-01-02	19,8	0,720	18,27	0,692

Tab. 10. Porównanie wyników badań modelowych i analizy numerycznej.

Siatka spękań uzyskana z analiz numerycznych poprawnie odwzorowuje zachowanie się belek w warunkach laboratoryjnych (rys. 34)

![](_page_28_Figure_6.jpeg)

Rys. 34. Siatka spękań w modelu F-LSB-01.

W ramach pracy przeprowadzono również analizę naprężeń termicznych, które mogą być niebezpieczne szczególnie w przypadku długich belek o rzeczywistych wymiarach, z klejami sztywnymi. Przeprowadzone analizy dla zmiany temperatury o  $\pm 25^{\circ}$ C wykazały, że w najbardziej niekorzystnym przypadku (klej epoksydowy) naprężenia termiczne nie przekraczają 9% charakterystycznej wytrzymałości szkła na rozciąganie, nie ma zatem niebezpieczeństwa zarysowania środnika przy zmianie temperatury. Niemniej, efekt ten powinien zostać uwzględniony przy szacowaniu nośności hybrydowych belek drewniano-szklanych.

# **12 Model analityczny**

W pracy zaadaptowano metodę zawartą w Eurokodzie 5, tzw. "metodę gamma". W celu wyznaczenia sztywności wielomateriałowej belki oraz rozkładu odkształceń w poszczególnych jej komponentach została wykorzystana zmodyfikowana procedura znajdująca się w Załączniku B normy PN-EN 1995-1-1 [83]. Współczynnik  $\gamma$  redukuje drugi składnik wzoru Steinera w zależności od podatności połączenia między środnikiem i półkami, a wzór na sztywność zastępczą przedstawia się następująco:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^{n} \left[ E_{i} I_{i} n_{i} + \gamma_{i} E_{i} A_{i} (a_{i})^{2} n_{i} \right],$$

gdzie:

E<sub>i</sub> - moduł sprężystości materiału i-tego komponentu,

I<sub>i</sub> - moment bezwładności przekroju i-tego komponentu,

n<sub>i</sub> - stosunek E<sub>i</sub> do E<sub>v</sub>,

Ev - moduł sprężystości materiału odniesienia,

γ<sub>i</sub> - współczynnik redukcyjny,

A<sub>i</sub> - pole powierzchni przekroju i-tego komponentu,

a<sub>i</sub> – odległość środka ciężkości i-tego komponentu do środka ciężkości całego przekroju.

Zgodnie z [9] współczynnik  $\gamma$  zależy od modułu podatności K<sub>i</sub> oraz rozstawu łączników mechanicznych s<sub>i</sub>. Dla ciągłych połączeń klejonych współczynnik  $\gamma$  został przekształcony przez autora do postaci:

$$\gamma_i = \left[ 1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i}{\left(\frac{2 \cdot G \cdot h_{fg}}{t_1} + \frac{G \cdot w_{fg}}{t_2}\right) \cdot l^2} \right],$$

gdzie:

G - moduł odkształcalności postaciowej kleju,

 $h_{fg}$ ,  $w_{fg}$  - wymiary rowka w pasie,

t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> - grubości spoiny klejowej

1 - długość belki.

Podobne podejście zastosował Kreher [30]. Współczynnik  $\gamma$  może przyjmować wartości od 0,0 – w przypadku braku zespolenia (poślizgu) do 1,0 – w przypadku pełnego zespolenia.

Wyniki modelu analitycznego wykazują bardzo dobrą zgodność z badaniami (patrz Tabela 11) i analizami numerycznymi. W zakresie sztywności oraz siły przy pierwszym zarysowaniu środnika wyniki różnią się o mniej niż 5%.

Klej / rodzaj szkła	$F_{calc} / F_{test}$	EI <sub>calc</sub> / EI <sub>test</sub>
Epoksydowy / szkło float	1,053	1,030
Epoksydowy / szkło półhartowane	0,961	1,030
Akrylowy/ szkło półhartowane	0,968	1,018
Silikon / szkło półhartowane	0,995	1,044

Tab. 11. Sztywności początkowa hybrydowych belek

# 13 Podsumowanie i wnioski końcowe

Niniejsza praca poświęcona jest badaniom i analizom hybrydowych belek drewniano-szklanych o przekroju dwuteowym. W ramach pracy wykonano: rozpoznanie literaturowe tematu, badania materiałowe szkła, drewna i klejów, badania laboratoryjne serii próbnych belek w pomniejszonej skali, badania laboratoryjne serii belek o rzeczywistych wymiarach oraz analizę numeryczną przebadanych modeli, a dodatkowo zaproponowano model analityczny pozwalający na oszacowanie nośności i sztywności przedmiotowych belek.

Powracając do tez przedstawionych w punkcie 5, sformułować można przedstawione poniżej wnioski.

- Wykonane badania modelowe potwierdzają możliwość i zasadność konstruowania hybrydowych belek złożonych ze szklanego środnika i drewnianych półek, połączonych przy użyciu kleju konstrukcyjnego, jako pełnoprawnych elementów konstrukcyjnych.
- Przeprowadzone badania, zarówno modeli pomniejszonych, jak i w skali rzeczywistej, wykazują wysoką nośność poawaryjną belek po wystąpieniu pierwszego zarysowania środnika (od 140% do 210% pierwszej siły niszczącej), świadcząc tym samym o możliwości bezpiecznego użytkowania badanych elementów. Wniosek ten jest aktualny dla szkła płaskiego (float), gdyż szkło półhartowane ulega nagłemu zniszczeniu, co zostało wykazane w badaniach.
- Zarówno zachowanie się klejów, jak i siła powodująca zarysowanie środnika, są silnie uzależnione od parametrów mechanicznych zastosowanych klejów. Zaobserwowano, że zastosowanie klejów o największej sztywności (w ramach badanych materiałów) skutkuje najwyższą sztywnością belek oraz największą wartością pierwszej siły rysującej środnik.
- Przeprowadzona analiza numeryczna potwierdza możliwość wiarygodnego modelowania zachowania się hybrydowych belek pod obciążeniem. Wykazano zgodność uzyskanych w modelu numerycznym sztywności oraz poziomu siły powodującej zarysowanie środnika w odniesieniu do badań wyników laboratoryjnych. Ponadto, analiza numeryczna pozwala na wiarygodną symulację powstania i propagacji rys w szklanym środniku.
- Istnieje możliwość modyfikacji normowej metody gamma przez rozmycie współczynnika gamma na długości spoiny klejowej (w oryginale pozwala on na uwzględnienie rzeczywistej sztywności belki złożonej z mechanicznymi łącznikami w układzie dyskretnym). Zmodyfikowana metoda gamma pozwala na szacowanie sztywności oraz nośności hybrydowych belek drewniano-szklanych z dużą dokładnością. W pracy zaproponowano odpowiednią formułę.
- Z praktycznego punktu widzenia możliwe jest zastosowanie belek o badanych parametrach w rzeczywistej konstrukcji. Modyfikując geometrię elementów (wysokość i grubość środnika oraz przekrój półek) i parametry kleju można sterować wartością nośności oraz ugięć.

Trzeba jednak pamiętać, że wszystkie powyższe wnioski bazują na wykonanych badaniach krótkich, powtarzalnych serii elementów, a zatem nie mogą być traktowane jako uniwersalne.

Bazując na dotychczasowych badaniach i analizach stwierdzono zasadność podjęcia w przyszłości następujących prac:

- poszerzone badania klejów konstrukcyjnych, ujmujące następujące czynniki: obciążenia długotrwałe, starzenie materiału, badania własności materiału z uwzględnieniem warunków klimatycznych w obniżonych i podwyższonych temperaturach,
- badania laboratoryjne belek z wykorzystaniem szkła klejonego i wpływ tej modyfikacji na nośność i sztywność elementów belkowych,
- zastosowanie do wykonania pasów bardziej zaawansowanych materiałów, charakteryzujących się homogenicznymi oraz stabilnymi własnościami (np. fornir klejony warstwowo LVL),
- badania hybrydowych belek drewniano-szklanych pod obciążeniem długotrwałym,
- badania hybrydowych belek drewniano-szklanych z uwzględnieniem warunków klimatycznych, zwłaszcza zmian temperatury,
- rozwinięcie metody analitycznej oraz modeli numerycznych z uwzględnieniem wyników wymienionych wyżej badań.