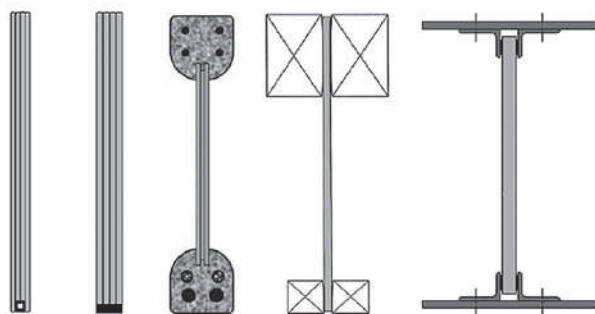


# Wpływ zmiennej temperatury i wilgotności na rozkład naprężeń w zespolonych belkach drewniano-szklanych

Mgr inż. Kondrad Rodacki, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

Ostatnie dwadzieścia lat przyniosło wiele publikacji i ciekawych realizacji konstrukcji, w których szkło pełni funkcję materiału nośnego. Szkło stosowane jest nie tylko jako elementy tarczowo-płytowe, do których byliśmy przyzwyczajeni, ale coraz częściej używane jest również jako materiał składowy belek i słupów. Pierwsze belki, w których szkło pełniło funkcję nośną, zostały zaprojektowane i wbudowane w budynku konserwatorium w Hampstead, jednej z dzielnic Londynu w 1992 roku [1]. Były to belki wykonane ze szkła laminowanego, złożone z trzech szyb szklanych grubości 10 mm połączonych folią PVB, zapewniając bezpieczeństwo tak zbudowanych elementów.



**Rys. 1.** Przekroje belek analizowanych przez różnych badaczy (opis w tekście) [4]

Ze względu na wysoką wytrzymałość na ściskanie szkła (ok. 900 MPa) i relatywnie niską wytrzymałość na rozciąganie (ok. 45 MPa) na przestrzeni lat powstały liczne koncepcje tworzenia belek zbrojonych i sprężonych za pomocą zewnętrznych cięgien ukrytych w elementach stalowych oraz pomysły tworzenia belek teowych i dwuteowych, łącząc szklany środek z pasami wykonanymi ze szkła, stali, betonu lub drewna (rys. 1). Szerszy opis wymienionych sposobów konstruowania belek przy udziale szkła czytelnik znaleźć może w [2], [3].

Do łączenia elementów używa się klejów i żywic sztywnych, takich jak: żywice epoksydowe, kleje akrylowe; podatnych, tu głównie silikonów szklarskich oraz kleje o sztywności pośredniej, np. kleje poliuretanowe. Połączenia klejowe są bardzo

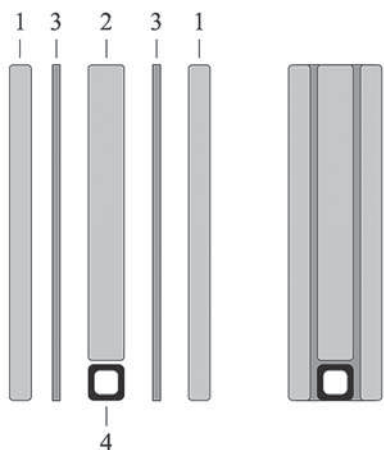
tanie w wykonaniu i dobrze wpływają na rozkład naprężeń w strefie kontaktowej, w odróżnieniu od łączników mechanicznych, które wymagają otworowania szkła i wprowadzają znaczne koncentracje naprężeń.

## 2. Dotychczasowe badania zachowania belek o szklanym środku w zmiennej temperaturze i wilgotności

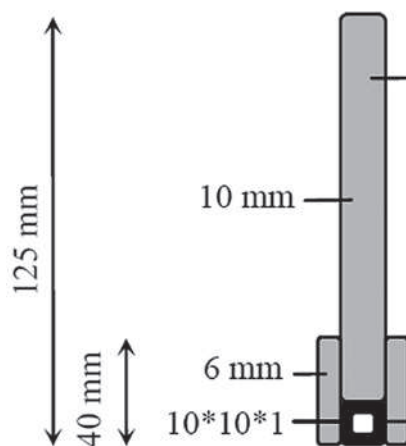
Badania nad belkami szklanymi czy to zbrojonymi elementami stalowymi czy zespolonymi z innymi materiałami pozwoliły wykazać, że niezależnie od konstrukcji, belki takie bardzo dobrze spisują się jako elementy poddane zginaniu pod obciążeniem statycznym. Łącząc ze sobą materiały o bardzo różnych właściwościach, takie jak szkło, stal i drewno, należy pamiętać, że materiały te całkowicie odmiennie reagują na zmiany temperatury czy wilgotności. W literaturze zagranicznej pojawiają się coraz częściej publikacje, w których podejmowane są zagadnienia wpływu zmian temperatury (nie pożarowej), zmian wilgotności i promieni UV na zachowanie elementów szklanych i stalowych oraz spoin klejowych między nimi. Syntetyczną analizę przeprowadzonych do tej pory badań elementów o szklanym środku i ich zachowaniu w różnej temperaturze zaprezentowano poniżej, a pełniejsze zestawienie czytelnik znaleźć może w [3].

Ze względu na duży rozwój tzw. szkła bezpiecznego i hartowanego szkła bezpiecznego, w którym to elementy ze szkła zwykłego, półhartowanego lub hartowanego laminowane są na specjalnej folii o właściwościach zespalających te dwa elementy, to właśnie belki złożone z takich zestawów (rys. 2) zostały najszerzej zbadane. Jak już wspomniano, szkło ze względu na swe właściwości mechaniczne należy łączyć z innymi elementami lub sprężać za pomocą doklejaných elementów. Na rysunku 2 zaprezentowano przekroje belek badane w pracy [5], w których to zewnętrzne kanały na kable sprężające ze stali nierdzewnej zostały wklejone za pomocą folii SentryGlass® [5].

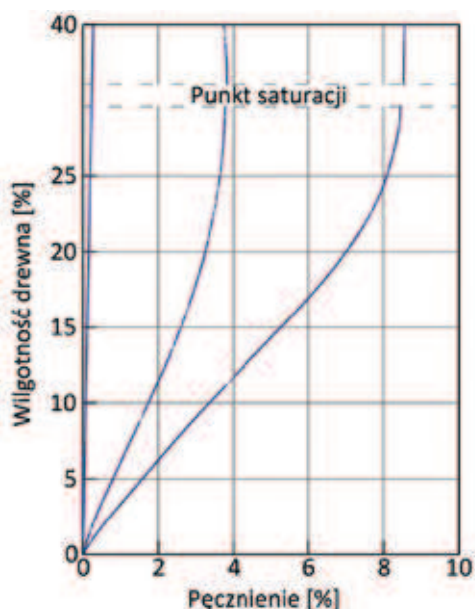
Na rysunku 3 zaprezentowano element belkowy, w którym elementy ze stali nierdzewnej zostały wklejone w przekrój szklany za pomocą klejów poliuretanowych, akrylowych, żywicy epoksydowej oraz silikonu [6]. Wykonane badania pokazały, że najlepiej spisały się w tym przypadku kleje o średniej sztywności,



**Rys. 2.** Przekrój belki zespolonej przy użyciu folii PVB lub SG [Louter 2012]



**Rys. 3.** Schematyczny przekrój belki [6]



**Rys. 4.** Wykres zmiany objętości drewna w zależności od wilgotności materiału (1 – zmiana objętości wzdłuż włókien, 2 – zmiana objętości w kierunku stycznym, 3 – zmiana objętości w kierunku radialnym) [7]

a więc akryle oraz poliuretany. Powodem tego jest fakt, że zarówno dla temperatury 20°C, jak i 60°C pracują one powyżej temperatury zeszklenia (temperatura wityfikacji).

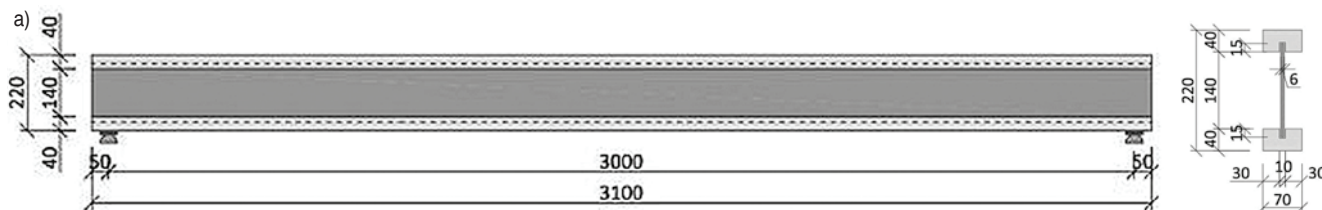
### 3. Analiza numeryczna

Ciągle brak jest badań wpływu zmian temperatury na belki drewniano-szklane, gdzie oprócz różnych współczynników rozszerzalności termicznej materiały te charakteryzują się odmienną reakcją na zmianę wilgotności. Szkło nie wchłania wody, a co za tym idzie nie zmienia swojej objętości pod wpływem działania środowiska o zmiennej wilgotności. Sytuacja wygląda diametralnie inaczej w przypadku drewna, które jako materiał organiczny zmienia

swoją objętość w zależności od wilgotności (rys. 4). Drewno ze względu na swoją anizotropowość charakteryzuje się odmiennymi wartościami pęcznienia w zależności od kierunku włókien. Największy wpływ na dodatkowe naprężenia  $\sigma_x$  w pasach drewnianych i środku szklanym będzie miało pęcznienie materiału wzdłuż włókien, które jak widać na wykresach (rys. 4) ma relatywnie niską wartość w porównaniu z pęcznieniem w pozostałych kierunkach. Ze względu na znikomą zmianę długości drewna po długości elementu pęcznienie i skurcz drewna na skutek zmiany jego wilgotności mają pomijalny wpływ na dodatkowe naprężenia w poszczególnych elementach belki.

Współczynnik rozszerzalności termicznej dla szkła jest równy  $0.9e-5K^{-1}$ , stali S355  $1.2e-5 K^{-1}$ , stali nierdzewnej  $1.6e-5K^{-1}$ , aluminium  $2.35e-5K^{-1}$ , drewna  $3.1-4.5e-6 K^{-1}$  [8]. Różnica we współczynnikach rozszerzalności termicznej generować będzie kolejne naprężenia w elementach składowych przekrojów zespolonych, a wartość tych naprężeń zależeć będzie od zmiany temperatury i sztywności połączenia. Największe różnice we współczynnikach rozszerzalności termicznej występują między drewnem i szkłem, a więc materiałami, dla których interakcja w zmieniającej się temperaturze została najmniej rozpoznana. Ze względu na fakt, że belki tego typu stosowane są głównie jako elementy nośne stropodachów przeziernych, temperatury ich pracy mogą się wahać w zależności od pory roku od -20°C w zimie i nawet do +80°C latem.

W celu przeanalizowania zachowania belek zespolonych drewniano-szklanych w zmieniających się warunkach termicznych zaproponowano stworzenie modelu numerycznego belki jak na rysunku 5. Charakterystyczne parametry modelu przyjęto zgodnie z elementem rzeczywistym (dane geometryczne) oraz zgodnie z przeprowadzonymi wcześniej badaniami doświadczalnymi badanych materiałów (właściwości mechaniczne). Do badań użyto drewna jodłowego klasy C22 zgodnego z [9] oraz szkła float (annealed), którego właściwości podano w tabeli 1.



Rys. 5. a) Schemat modelowanej belki



Rys. 5. b) Widok belki zespolonej drewniano-szklanej bezpośrednio po wytworzeniu w warsztacie stolarskim

Tabela 1. Właściwości szkła zwykłego („annealed”) na podstawie badań

Moduł Young'a, E [GPa]	Liczba Poisson'a, n [-]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
69,27	0,23	36,07

Model numeryczny został zbudowany jako model przestrzenny i podzielony siatką elementów skończonych sześciennych o wymiarze boku 5 mm (rys. 6). Zastosowano dwa typy elementów skończonych: elementy z pojedynczym całkowaniem dla drewna oraz elementy z podwójnym całkowaniem dla warstwy klejowej oraz szyby szklanej. Powodem zastosowania podwójnego całkowania w niektórych elementach składowych była ich mała grubość, co pozwalało na stworzenie jednej warstwy elementów skończonych.

Jak już wspomniano, na wielkość naprężeń wywołanych nierównomiernym odkształcaniem się elementów składowych belki pod wpływem temperatury wpływają różnice we współczynnikach rozszerzalności termicznej oraz moduł sztywności postaciowej spoiny między szkłem i drewnem. Moduł sztywności postaciowej spoiny jest w tym miejscu kluczowym parametrem, który jako projektanci możemy w prosty sposób modyfikować. Dla lepszego zobrazowania problemu przeprowadzono analizy belki potężonej czterema rodzajami klejów o diametralnie różnych modułach sztywności postaciowej. Klej o największym module odkształcenia postaciowego, jaki wykorzystano do badań, to żywica epoksydowa Sikadur®-31 CF. Klejami pośrednimi były poliuretanowe kleje Sika®PS oraz Sika®PM, natomiast klejem o najmniejszym module sztywności postaciowej był standardowy silikon szklarski. Właściwości mechaniczne poszczególnych klejów zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości użytych do analiz klejów (dane producenta)

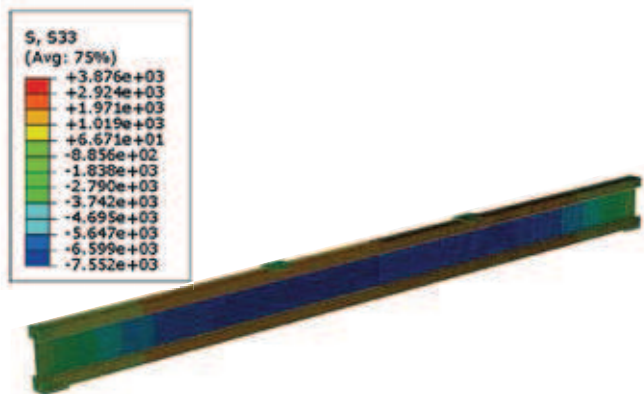
Nazwa kleju	Moduł odkształcenia postaciowego [MPa]	Współczynnik Poissona [-]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej [K <sup>-1</sup> ]
Sikadur®-31 CF	1778	0,422	5,9·10 <sup>-5</sup>
Sika®PS	5,77	0,498	2,0·10 <sup>-5</sup>
Sika®PM	1,33	0,498	2,0·10 <sup>-5</sup>
Silikon szklarski	0,18	0,462	10·10 <sup>-5</sup>



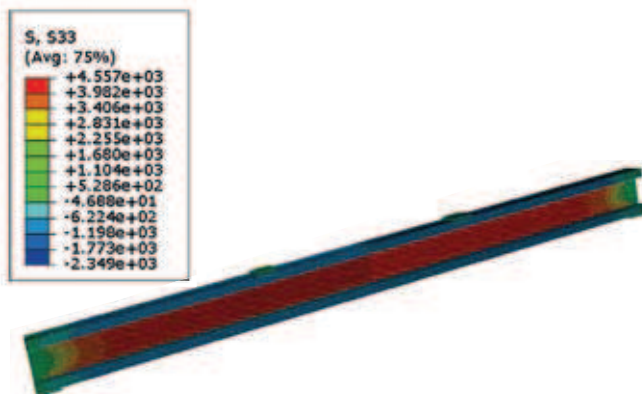
Rys. 6. Widok modelu numerycznego belki

Obciążenie termiczne modelu dobrano jako równomierne ochłodzenie od temperatury montażu, która w tym przypadku została przyjęta jako +20°C do temperatury -20°C, co wydaje się przypadkiem mało prawdopodobnym dla belki stropodachu, jednak możliwym. Na konstrukcję stropodachu przeziernego największe oddziaływanie będzie miało ogrzanie konstrukcji ze względu na bezpośrednie oddziaływanie promieni słonecznych, ale jak pokazano na mapie naprężeń (rys. 7), działanie takie nie stwarza niebezpieczeństw dla pęknięcia szkła, ponieważ wywołuje jedynie ścislenie środka. Niemniej jednak należy pamiętać, że w przypadku stropodachów temperatura powierzchni elementów może osiągać w okresie letnim nawet +80°C, co w odniesieniu do przyjętej temperatury złożenia +20°C daje gradient temperatury równy +60°C.

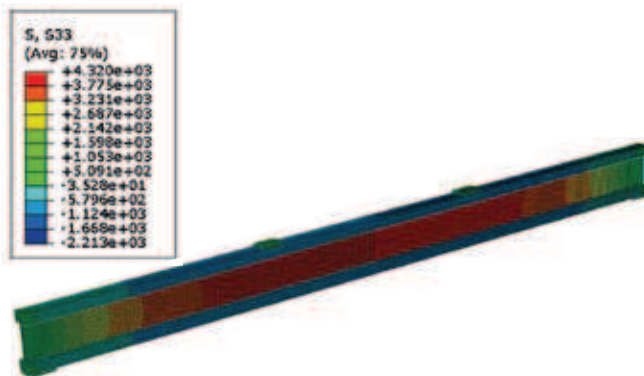
Na rysunkach 8–11 zaprezentowano mapy naprężeń  $\sigma_x$  dla belek zespolonych drewniano-szklanych obciążonych równomiernie temperaturą -40°C, w których warstwy klejowe wykonane zostały z materiałów o różnym module sztywności postaciowej. Warty uwagi jest fakt, że zarówno dla klejów poliuretanowych Sika®PM, Sika®PS oraz dla żywicy epoksydowej uzyskano bardzo podobne poziomy naprężeń, mimo znacznej różnicy między modułami sztywności tych materiałów. Jedynie w przypadku silikonu szklarskiego, wartości naprężeń w elemencie wywołane jego ochłodzeniem są znacznie niższe od pozostałych. Zależność tą przedstawiono



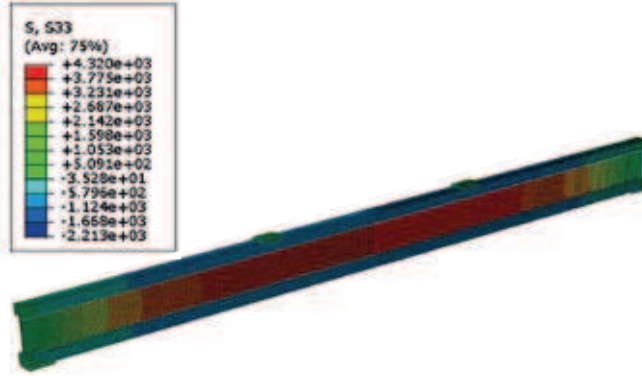
**Rys. 7.** Naprężenia  $\sigma_x$  [kPa] dla belki łączonej za pomocą kleju poliuretanowego Sika®PS poddanej równomiernemu ogrzaniu o  $+60^\circ\text{C}$  (wartości dodatnie oznaczają rozciąganie)



**Rys. 8.** Naprężenia  $\sigma_x$  [kPa] dla belki łączonej za pomocą żywicy epoksydowej Sikadur®-31 CF poddanej równomiernemu oziębieniu o  $-40^\circ\text{C}$



**Rys. 9.** Naprężenia  $\sigma_x$  [kPa] dla belki łączonej za pomocą kleju poliuretanowego Sika®PS poddanej równomiernemu oziębieniu o  $-40^\circ\text{C}$

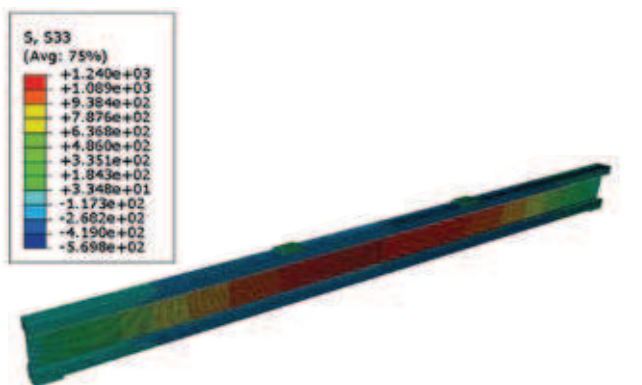


**Rys. 10.** Naprężenia  $\sigma_x$  [kPa] dla belki łączonej za pomocą kleju poliuretanowego Sika®PM poddanej równomiernemu oziębieniu o  $-40^\circ\text{C}$

na wykresie (rys. 12). Widać tu, że naprężenia rozciągające w środku znacznie spadają przy zastosowaniu kleju o bardzo małym module sztywności, podobnie zresztą do naprężeń ściskających w pasach drewnianych.

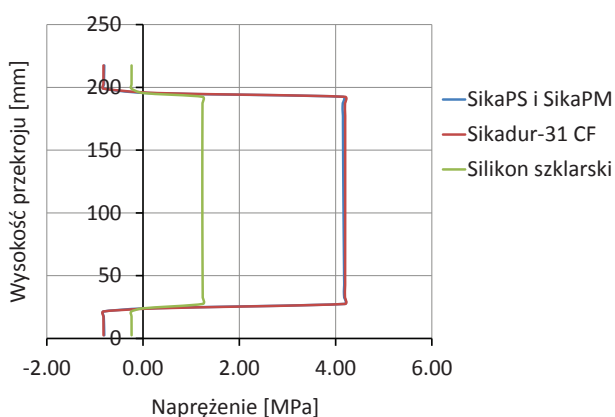
Dla analizowanej belki w zdefiniowanych wyżej warunkach otrzymano wartości naprężeń rozciągających wzdłuż belki nieco powyżej 4 MPa dla klejów poliuretanowych oraz żywicy epoksydowej. Jest to wartość, którą należy uwzględnić podczas wymiarowania elementu w innych przypadkach obciążeniowych łączonych za pomocą tych klejów. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na inny aspekt, a mianowicie na poziom zespolenia pasów ze środkiem. Zastosowanie kleju o mniejszym module sztywności postaciowej (silikon) będzie skutkowało mniejszym zespoleniem elementów niż w przypadku kleju o większym module sztywności (poliuretan, żywica epoksydowa), co będzie miało znaczący wpływ na nośność elementu przy zginaniu. Na wykresach (rys. 13) zaprezentowano rozkłady naprężeń w przekroju środkowym belki poddanej zginaniu w zależności od modułu sztywności zastosowanego kleju.

Kolejnym czynnikiem wartym uwagi mającym wpływ na nośność belek stropodachów jest tzw. temperatura zeszklenia zastosowanego kleju. W przypadku żywic epoksydowych parametr ten ma szczególne znaczenie,

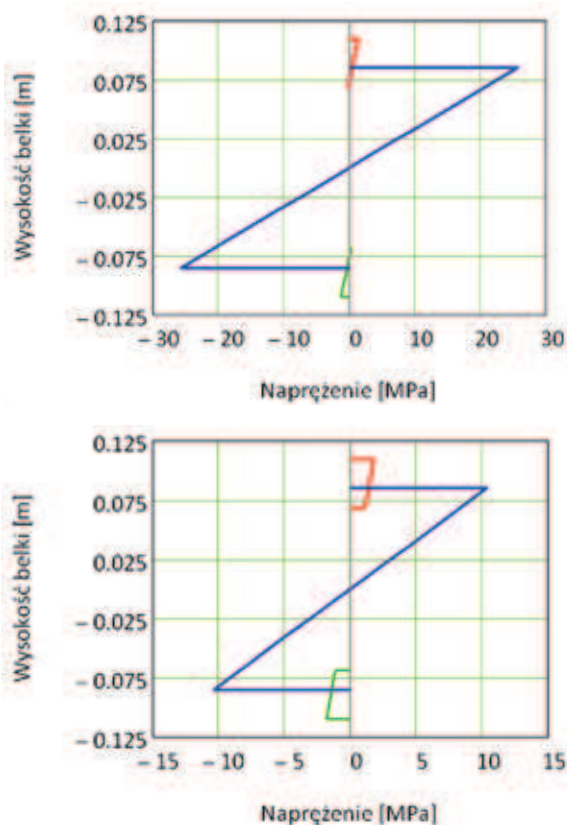


**Rys. 11.** Naprężenia  $\sigma_x$  [kPa] dla belki łączonej za pomocą silikonu szklarskiego poddanej równomiernemu oziębieniu o  $-40^\circ\text{C}$

ponieważ temperatura zeszklenia może wynosić niewiele ponad  $+40^\circ\text{C}$  [11]. Oznacza to, że w przypadku podgrzania do wyższej temperatury moduł sztywności żywicy zaczyna spadać, co może być przyczyną awarii elementu. Problem ten nie występuje w przypadku klejów poliuretanowych czy silikonów, ponieważ w normalnych warunkach pogodowych i wewnątrz obiektów substancje te pracują powyżej temperatury zeszklenia.



**Rys. 12.** Wykresy naprężeń  $\sigma_x$  w przekroju środkowym belki zespolonej przy łączeniu klejami o różnym module sztywności



**Rys. 13.** Wykresy naprężeń  $\sigma_x$  w przekroju środkowym belek zespolonych za pomocą żywicy epoksydowej Sikadur®-31 CF (u góry) i silikonu szklarskiego (u dołu)

#### 4. Podsumowanie

Dotąd nie przeprowadzono szczegółowych badań wpływu obciążeń termicznych na belki zespolone dwuteowe, o średniku szklanym połączonym z pasami za pomocą kleju. Co więcej, badając elementy dwuteowe złożone ze szklanego średnika i pasów z innych materiałów, nie wykazano jednoznacznie, jaka sztywność połączenia klejowego będzie optymalna do łączenia obu materiałów. W zależności od tego, jakie obciążenia

przykładane są do elementów, różne sztywności połączeń wydają się mniej lub bardziej odpowiednie. Jak pokazano powyżej, ze względu na pracę pod obciążeniem statycznym najodpowiedniejsze byłyby kleje bardzo sztywne, które z kolei powodują znaczne naprężenia w elementach pod obciążeniem termicznym. Na szczególną uwagę zasługuje potrzeba rzetelnej analizy wpływu wzajemnych przemieszczeń na rozkład naprężeń w elementach spowodowanych różnymi wartościami współczynników rozszerzalności termicznej.

Analizując wpływ temperatury na dodatkowe naprężenia w belce zespolonej, największy nacisk powinien być kładziony na ograniczenie naprężeń rozciągających w szkłem. W związku z tym, w przypadku połączenia drewna ze szkłem to obniżenie temperatury elementu będzie miało mniej korzystny wpływ na element niż jego podgrzanie. Spowodowane jest około dwukrotnie niższym współczynnikiem rozszerzalności termicznej drewna niż współczynnik rozszerzalności termicznej szkła. Co więcej, jak pokazują badania [3], sztywność kleju maleje wraz ze wzrostem temperatury, co wpływa korzystnie na rozkład naprężeń w elemencie.

Rozważając zachowanie przedstawionych wyżej elementów w warunkach zmieniającej się temperatury, należałoby również wspomnieć o zachowaniu tych elementów w warunkach pożarowych. Ze względu na złożoność i koszty nie przeprowadzono jeszcze badań elementów zespolonych drewniano-szklanych w warunkach pożarowych, które dla elementów składających się z materiałów nieodpornych na działanie pożaru wydają się być konieczne, zanim elementy takie będą mogły być stosowane na szerszą skalę.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Schittich i et al., Glass Constuction Manual. 2nd revised and expanded edition, Monahium: Birkhauser, 2007
- [2] K. Rodacki, Belki zespolone drewniano-szklane – przegląd zagadnienia, w Zagadnienia aktualne poruszane przez młodych naukowców, t. 2, 2 t., Kraków, 2016, str. 549-554
- [3] K. Rodacki i M. Mieszczak, Obciążenia termiczne belek o szklanym średniku – przegląd, w Nowoczesne projektowanie i realizacja konstrukcji budowlanych – praca zbiorowa, Kraków, 2015
- [4] C. Louter, Adhesively bonded reinforced glass beams, Heron, nr 52, str. 31-57, 2007
- [5] C. Louter, J. Belis, F. Veer, i J.-P. Lebet, Durability of SG-laminated reinforced glass beams: Effects of temperature, thermal cycling, humidity and load-duration, Construction and Building Materials, nr 27, str. 280-292, 2012
- [6] C. Louter, F. A. Veer i J. Belis, Redundancy of reinforced glass beams: temperature, moisture and time dependent behaviour of the adhesive bond, zaprezentowano na Challenging Glass: conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Faculty of Architecture, TU Delft, 2008, str. 479-491
- [7] B. Stefańczyk, Budownictwo ogólne, t. I, V t. Warszawa: Arkady, 2005
- [8] R. Bergman, Wood handbook. Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: Forest Products Laboratory, 2010
- [9] PN-EN 338: 1999 Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości, PKN, 1999
- [10] C. Louter, A. van de Graaf, i T. Rots, Modeling the structural response of reinforced glass beams using an SLA scheme, zaprezentowano na Challenging Glass 2 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft, 2010
- [11] A. Kwiecień, Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murew i betonowych. Kraków: Wydawnictwo PK, 2012