

Odporność ogniowa sworzniowych połączeń drewnianych z wewnętrzną płytą stalową

Dr hab. inż. Tomasz Domański, mgr inż. Kamil Kmiecik, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Połączenia są często najłabszymi elementami w konstrukcjach drewnianych, zwłaszcza podczas ekspozycji na działanie ognia. W sytuacji pożaru metalowe łączniki przewodzą ciepło w głąb przekroju, powodując szybsze zwęglanie drewna. Na nośność połączeń drewnianych w warunkach pożarowych wpływ ma również redukcja wytrzymałości elementów stalowych pod wpływem wysokiej temperatury [1]. Analiza odporności ogniowej połączeń jest skomplikowana, ponieważ istnieją różne typy złączy, różne geometrie i układy łączników. Celem przeprowadzonych analiz było zbadanie wpływu elementów stalowych na nośność połączeń sworzniowych z wewnętrzną płytą stalową, o różnych konfiguracjach łączników, w sytuacji pożaru. Do symulacji temperatury w funkcji czasu w analizowanych połączeniach wykorzystano oprogramowanie ANSYS Workbench [2]. Przedstawiona w pracy analiza nośności pokazuje różnice w nośności złączy w zależności od rozmieszczenia i liczby łączników stalowych. Przykład sworzniowego połączenia drewnianego z wewnętrznymi płytami stalowymi przedstawia rysunek 1.

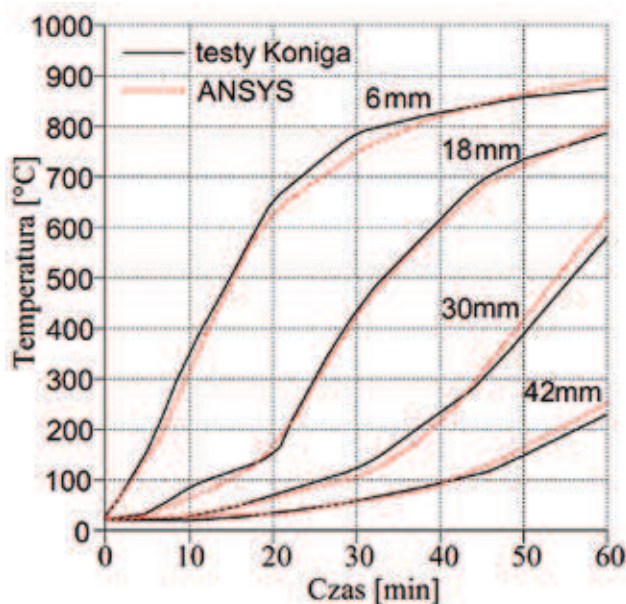


Rys. 1. Sworzniowe połączenie drewniane z wewnętrznymi płytami stalowymi

2. Analiza termiczna połączeń

2.1. Weryfikacja modelu obliczeniowego

Przed wykonaniem modelu do przeprowadzenia symulacji przepływu ciepła w połączeniach dokonano weryfikacji właściwości drewna w pożarze standardowym ISO [3]. Wyniki modelowania porównano z wynikami testów ogniowych Königa [4]. König przeprowadził testy ogniowe na czterech niezależnych ogniowo próbkach drewnianych, o gęstości około 425 kg/m³ i wilgotności 12%. Elementy drewniane poddano działaniu pożaru zgodnego z ISO 834 [3], a wartości temperatury w czasie były rejestrowane na głębokości 6, 18, 30 i 42 mm od powierzchni wystawionej na działanie ognia. Porównanie wyników uzyskanych z modelowania numerycznego z wynikami testów Königa przedstawiono na rysunku 2.

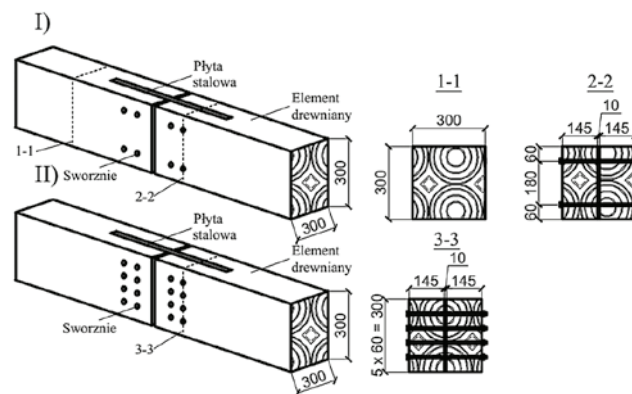


Rys. 2. Zależność temperatury od czasu na różnych głębokościach elementu drewnianego poddanego krzywej ISO

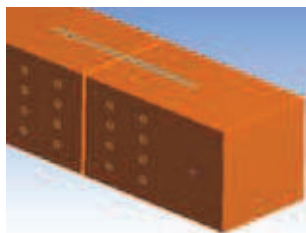
Wyniki modelowania są zbliżone do wyników testów ogniowych przeprowadzonych przez Königa.

2.2. Symulacje numeryczne przepływu ciepła

Analizie poddano dwa połączenia sworzniowe z wewnętrzną płytą stalową. W obu przypadkach połączenie zostało



Rys. 3. Geometria analizowanych połączeń

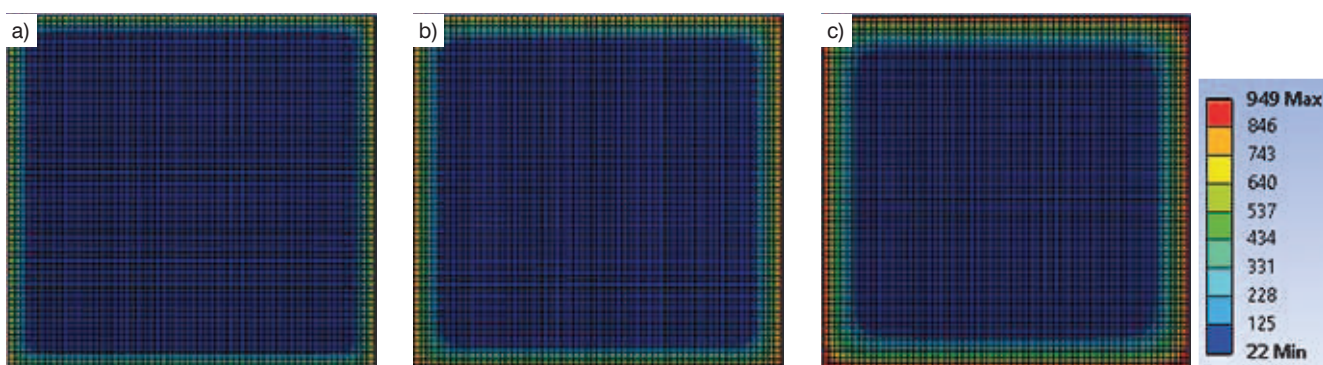


Rys. 4. Widok modelu numerycznego złącza

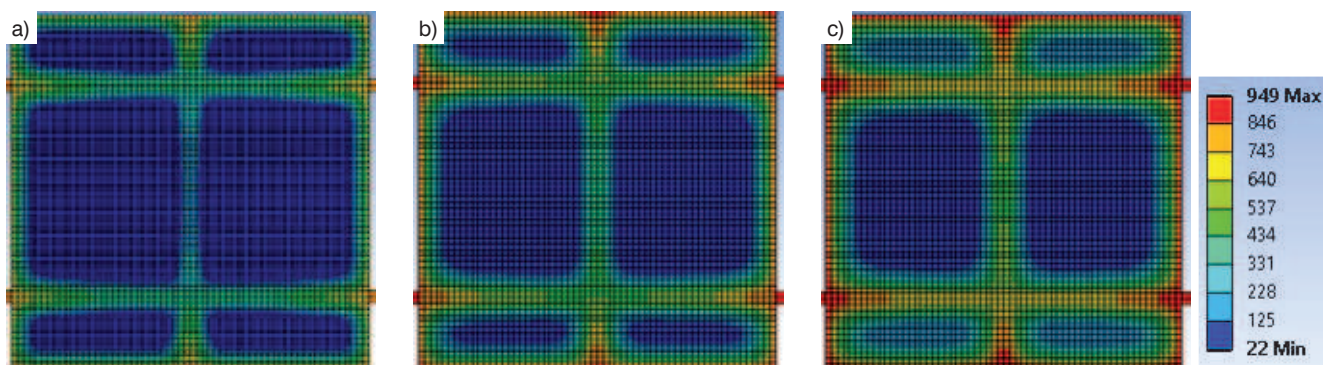
wykonane z drewna klasy C20 o wilgotności 12% (elementy drewniane o przekroju 300×300 mm) oraz różnej liczby sworzni M10 klasy 4.6 (rys. 3). W modelu zadano obciążenie ogniowe krzywą standardową ISO z czterech stron połączenia.

W celu przeanalizowania rozkładu temperatury w badanych połączeniach w zmieniających się warunkach termicznych wykonano model numeryczny złącza jak na rysunku 3. Model numeryczny został wykonany jako model przestrzenny (rys. 4) i podzielony siatką elementów skończonych o wymiarze boku ok. 5 mm. Głównym

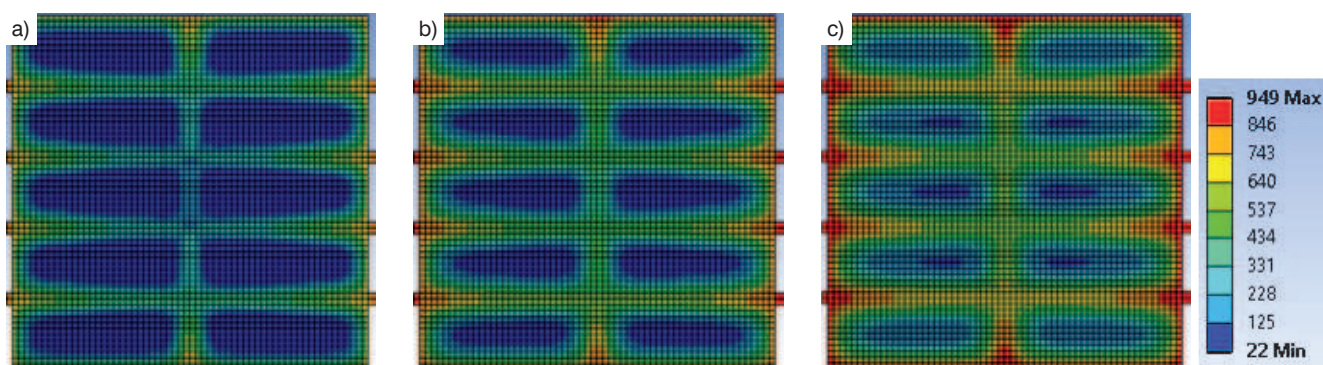
celem modelowania połączeń metodą elementów skończonych było określenie wpływu elementów stalowych (płyty, łączniki) w sworzniowych złączach z wewnętrzną płytą stalową na rozkład temperatury. Rozkład temperatury w przekroju przez element drewniany bez łączników metalowych przedstawiono na rysunku 5. Zgodnie z oczekiwaniami gradient temperatury jest taki sam z każdej strony, ze zwiększonymi wartościami w narożach. Wewnątrz elementu drewnianego ciągle występuje temperatura pokojowa. Rozkład temperatury w złączu poddanym działaniu ognia jest zupełnie inny, jeśli uwzględnimy elementy metalowe. Rozkład temperatury w przekrojach z płytą stalową i śrubami przedstawiają rysunki 6 i 7. Ze względu na wysokie przewodnictwo ciepłe stali strumień ciepła przechodzący przez łączniki prowadzi do wyższych temperatur wewnątrz elementu drewnianego [5, 6]. Już po ok. 15



Rys. 5. Rozkład temperatury w przekroju 1-1 (bez elementów metalowych) po: a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min trwania pożaru



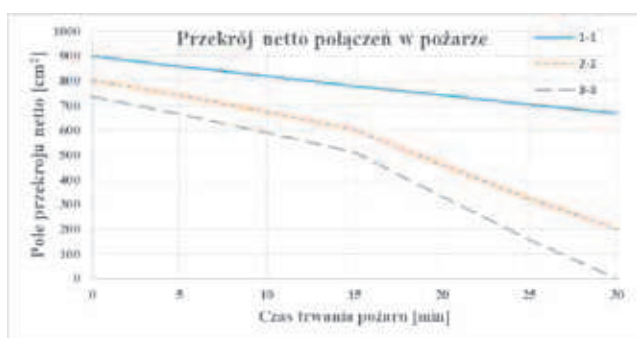
Rys. 6. Rozkład temperatury w przekroju 2-2 po: a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min trwania pożaru



Rys. 7. Rozkład temperatury w przekroju 3-3 po: a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min trwania pożaru

Tabela 1. Pole przekroju netto w analizowanych połączeniach w sytuacji pożaru

Czas trwania pożaru [min]	A _{netto} [cm ²]		
	Przekrój 1-1	Przekrój 2-2	Przekrój 3-3
0	900	801	735
5	859	742	664
10	818	673	590
15	778	602	510
20	741	458	332
25	702	324	157
30	667	202	0



Rys. 8. Pole przekroju netto w analizowanych połączeniach

Tabela 2. Odporności ogniowe niezabezpieczonych złączy z bocznymi elementami drewnianymi według [7]

Złącza	Czas odporności ogniowej t _{d,fi} [min]	Warunki
Gwoździe	15	d ≥ 2,8 mm
Wkręty	15	d ≥ 3,5 mm
Śruby	15	t1 ≥ 45 mm
Sworznie	20	t1 ≥ 45 mm
Łączniki według EN 912	15	t1 ≥ 45 mm

d jest średnicą łącznika, t1 jest grubością elementu bocznego

minutach trwania pożaru temperatura drewna wewnątrz przekroju, w obrębie łączników metalowych, wynosi ok. 300°C.

2.3. Przekrój netto

Drewno jest materiałem palnym. W temperaturze ok. 300°C następuje piroliza – wytwarzanie gazów palnych, któremu towarzyszy utrata masy. Początkowo piroliza ma miejsce na obrzeżach, postępując wraz ze wzrostem temperatury w głąb

przekroju. Drewno po osiągnięciu temperatury 300°C nie jest w stanie przenosić obciążeń, w wyniku czego wzrastają naprężenia w zredukowanym przekroju. W związku z tym znając czas ekspozycji drewna na pożar, można określić zredukowany przekrój, który nadal jest w stanie pełnić funkcje nośne. W przekroju 1-1 (bez łączników metalowych) następuje stosunkowo niewielka redukcja przekroju w pożarze – ok. 25% po 30 min. W przekrojach 2-2 i 3-3 elementy stalowe mają istotny wpływ na rozkład temperatury w połączeniach. Do około 15 min pożaru następuje zwęglanie tylko zewnętrznych powierzchni elementu drewnianego. Później, gdy temperatura drewna w obrębie łączników wyniesie ok. 300°C, następuje redukcja wewnętrznych części przekroju drewnianego. Pola przekroju netto w trzech różnych przekrojach analizowanych połączeń w warunkach pożaru przedstawiono w tabeli 1. Wartości A_{netto} w pożarze w przekrojach 1-1, 2-2 oraz 3-3 zestawiono na rysunku 8. W przekroju 1-1 bez elementów stalowych występuje zwęglanie zewnętrznej powierzchni drewna, stałe w czasie o wartości ok. 0,7 mm/min. W przekrojach 2-2 i 3-3 do ok. 15 minuty następuje zwęglanie zewnętrznych części przekroju. Po 15 min trwania pożaru następuje przyspieszenie redukcji A_{netto} ze względu na zwęglanie drewna wewnątrz przekroju.

3. Analiza nośności połączeń w sytuacji pożaru

3.1. Metody projektowania połączeń w warunkach pożarowych wg PN-EN 1995-1-2 [7]

W normie PN-EN 1995-1-2 [7] przedstawiono tylko wybrane zagadnienia projektowania połączeń z uwagi na warunki pożarowe w konstrukcjach drewnianych. Zasady projektowania dotyczą złączy z zastosowaniem łączników trzpieniowych typu: gwoździe, śruby, sworznie itp. przy standardowym oddziaływaniu pożaru. Maksymalny czas odporności ogniowej, jaki można określić według zasad ujętych w normie, określony jest na 60 minut.

W normie PN-EN 1995-1-2 [7] przedstawiono dwie metody określania nośności ogniowej złączy: metody uproszczone oraz metody zredukowanego obciążenia.

Pierwsza metoda przedstawia wymagania, jakie powinny spełniać złącza w celu osiągnięcia odpowiedniego czasu odporności ogniowej. Szacowana odporność ogniowa złączy z bocznymi elementami drewnianymi zależy od typu łączników. W PN-EN 1995-1-2 [7] nie uwzględniono ilości oraz rozmieszczenia łączników w złączu. Według metody uproszczonej, nośność analizowanych połączeń szacuje się na 20 min dla obu konfiguracji łączników. Metoda zredukowanego obciążenia przedstawia procedury obliczenia nośności złącza w warunkach pożarowych. Powyższe metody dotyczą połączeń niezabezpieczonych oraz zabezpieczonych ogniowo. W metodzie zredukowanego obciążenia dla standardowego oddziaływania pożaru nośność charakterystyczną złącza z zastosowaniem łączników pracujących na ścinanie należy obliczać ze wzoru:

$$F_{v,Rk,fi} = \eta F_{v,Rk} \quad (1)$$

gdzie:

$F_{v,Rk}$ – charakterystyczna nośność poprzeczna złącza z zastosowaniem łączników pracujących na ścinanie w normalnej temperaturze,

η – współczynnik przeliczeniowy

$$\eta = e^{-k \cdot t_{d,fi}} \quad (2)$$

gdzie:

k – parametr zależny od rodzaju złącza,

$t_{d,fi}$ – obliczeniowa odporność ogniowa złącza [min].

$$t_{d,fi} = - \frac{1}{k} \ln \frac{\eta_{fi} \gamma_{M,fi}}{\gamma_M k_{fi}} \quad (3)$$

gdzie:

η_{fi} – współczynnik redukcji dla obciążenia obliczeniowego w warunkach pożarowych,

γ_M – współczynnik częściowy złącza,

k_{fi} – współczynnik zależy od rodzaju drewna,

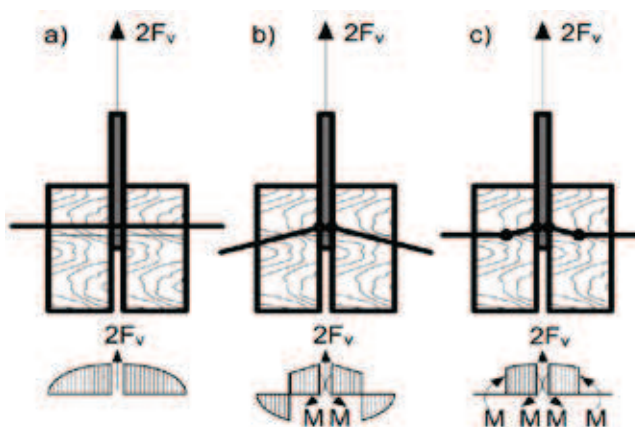
$\gamma_{M,fi}$ – współczynnik częściowy drewna w warunkach pożarowych.

Przy wyznaczaniu odporności ogniowej analizowanych połączeń za pomocą metody zredukowanego obciążenia – nośność takich złączy wynosi ok. 16 min.

Norma [7] podaje tylko podstawowe metody określania nośności ogniowej złączy z bocznymi elementami drewnianymi. Zarówno metody uproszczone, jak i metoda zredukowanego obciążenia pozwala wyznaczyć maksymalny czas odporności ogniowej danego połączenia. Oba podejścia nie uwzględniają geometrii połączenia, konfiguracji łączników, jak również rozkładu temperatury w przekroju.

3.2. Modele zniszczenia

Proponowanym przez autorów podejściem obliczeniowym projektowania połączeń w sytuacji pożaru jest projektowanie w oparciu o normę PN-EN 1995-1-1 [8] z uwzględnieniem zwęglania przekroju drewnianego oraz redukcji wytrzymałości stali w wysokiej temperaturze. Zawarte w tej normie modele zniszczenia zależą od rodzaju połączenia, geometrii, liczby, średnicy i rozmieszczenia łączników. Połączenia dwucięte z płytą stalową, stanowiącą środkowy element złącza, mogą zniszczyć się w różny sposób. Możliwe rodzaje zniszczenia takich połączeń przedstawia rysunek 9. W wielu przypadkach zniszczenie połączenia następuje na skutek kombinacji kilku modeli zniszczeń.



Rys. 9. Modele zniszczeń w złączach stal-drewno z płytą stalową wewnętrzną

Testy ogniowe dla złączy typu stal-drewno wykazały, że głównymi modelami zniszczenia w warunkach pożarowych są: wydłużenie otworów w złączach (a) i deformacja elementów łącznych (b). Wynika to ze zwęglania elementów drewnianych oraz szybkiego wzrostu temperatury w łącznikach stalowych [9, 10]. Trzeci model zniszczenia (c) może być decydujący o nośności złącza, w przypadku gdy elementy drewniane są bardzo grube [11]. PN-EN 1995-1-1 [8] podaje uproszczone reguły:

$$F_{v,Rk,I} = f_{h,l,k} t_l d \quad (4a)$$

$$F_{v,Rk,II} = f_{h,l,k} t_l d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,l,k} d t^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (4b)$$

$$F_{v,Rk,III} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,l,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (4c)$$

$$F_{v,Rk} = \min(F_{v,Rk,I}, F_{v,Rk,II}, F_{v,Rk,III}) \quad (4d)$$

gdzie:

$F_{v,Rk,i}$ – nośność łącznika na ścinanie dla i-tego modelu zniszczenia [kN],

$f_{h,l,k}$ – wytrzymałość na docisk łącznika do elementu drewnianego [MPa],

t_l – mniejszy z wymiarów: grubości drewnianego elementu zewnętrznego i długości zakotwienia łącznika [mm],

d – średnica łącznika [mm],

Tabela 3. Nośność charakterystyczna łącznika na ścinanie w warunkach pożaru

Czas trwania pożaru [min]	Nośność charakterystyczna łącznika na ścinanie [kN]						$F_{v,Rk}$ [kN]	
	Model zniszczenia a		Model zniszczenia b		Model zniszczenia c			
	I	II	I	II	I	II	I	II
0	81,5	81,5	34,5	34,5	15,1	15,1	15,1	15,1
5	70,2	70,2	29,9	29,9	14,3	14,3	14,3	14,3
10	59,1	59,1	25,3	25,3	13,8	13,8	13,8	13,8
15	47,8	47,8	20,9	20,9	12,9	12,9	12,9	12,9
20	36,5	26,9	16,3	15,1	11,7	11,7	11,7	11,7
25	25,3	15,7	11,9	10,1	10,3	10,3	10,3	10,1
30	14,1	0	8,4	7,9	8,6	8,6	8,4	0

$M_{y,Rk}$ – moment uplastycznienia łącznika [kNm],

$F_{ax,Rk}$ – nośność łącznika na wyciąganie [kN].

Charakterystyczną nośność łącznika na ścinanie w czasie pożaru przedstawiono w tabeli 3. W obliczeniach uwzględniono redukcję przekroju drewnianego oraz obniżenie właściwości stali w wysokiej temperaturze.

Ze względu na duże wymiary elementów drewnianych (300×300 mm) decydującym modelem zniszczenia w obu przypadkach jest model c. Należy zwrócić szczególną uwagę na modele zniszczenia a i b. Po 30 min pożaru nośność łącznika na ścinanie spada o około 80%.

4. Podsumowanie

Wyznaczenie odporności ogniowej złączy drewnianych z łącznikami metalowymi jest zagadnieniem złożonym. Elementy stalowe mają istotny wpływ na nośność sworzniowych połączeń drewnianych z wewnętrzną płytą stalową w warunkach pożarowych. Wysoka przewodność cieplna stali powoduje przyspieszenie węglania przekroju drewnianego. Wzrost ilości niezabezpieczonych ogniowo łączników powoduje szybsze węglanie wewnątrz przekroju.

PN-EN 1995-1-2 [7] podaje tylko podstawowe metody projektowania połączeń ze względu na warunki pożarowe. Nie uwzględnia wielu czynników, takich jak geometria połączenia, ilość i rozmieszczenie łączników, rozkład temperatury w przekroju. Metody numeryczne pozwalają na bardziej dokładną ocenę nośności złącza w warunkach pożarowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1993 1-2 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-2: Reguły ogólne. Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe, PKN, Warszawa, 2007
- [2] ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19.0.
- [3] ISO834 Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1: general requirements, International Organization for Standardization, Switzerland, 1999
- [4] König J., Wallei L., One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and post-protection fire situations. Rapport I 9908029, Swedish Institute for Wood Technology Research, Stockholm, Sweden, 1999
- [5] Audebert M., Dhima D., Taazount M., Bouchair A., Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire, Engineering Structures, 33/2011, str. 3257–3268
- [6] Thi V.D., Khelifa M., Oudjene M., El Ganaoui M., Rogaume Y., Finite element analysis of heat transfer through timber elements exposed to fire, Engineering Structures, 143/ 2017, str. 11–21
- [7] PN-EN 1995 1-2 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych, Część 1-2: Postanowienia ogólne. Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe, PKN, Warszawa, 2008
- [8] PN-EN 1995 1-1 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych, Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków, PKN, Warszawa, 2010
- [9] Maraveas C., Miamis K., Matthaiou E., Performance of timber connections exposed to fire, Fire Technology, 51/2013, str. 1401–1432
- [10] Moss P., Buchanan A., Fragiocomo M., Austruy C., Experimental testing and analytical prediction of the behavior of timber bolted connections subjected to fire, Fire Technology, 46/2010, str. 129–148
- [11] Peng L., Mehaffey J., Mohammad M., Predicting the fire resistance of wood-steel-wood timber connections, Fire Technology, 47/ 2009, str. 1101–1119



Koło Naukowe Zarządzania Projektami Budowlanymi COMA serdecznie zaprasza do udziału w IV Międzynarodowej Konferencji Naukowej z cyklu Współczesne problemy budownictwa, Innowacyjne rozwiązania (Civil Engineering – Present Problems, Innovative Solutions CEPPIS).

Konferencja jest okazją do prezentacji wyników badań, a także wymiany doświadczeń czego beneficjentem jest szeroko rozumiane środowisko naukowe.

Tematem przewodnim tegorocznej konferencji jest budownictwo w XXI wieku – wyzwania i ryzyko.

Zachęcamy do wzięcia udziału w dyskusji podczas konferencji, prezentacji rozważań teoretycznych lub praktycznych, doświadczeń i wyników realizowanych badań. Oficjalny język konferencji: angielski.

WYDARZENIE JEST CZĘŚCIĄ OBCHODÓW EUROPEJSKIEGO ROKU INŻYNIERA BUDOWNICTWA (2018 European Year of Civil Engineers)

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy,

Regionalne Centrum Innowacyjności, Sala C-8, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

12 września br. (środa), godz. 8:00

• Współorganizatorzy:

- Koło Naukowe Zarządzania Projektami Budowlanymi COMA,
- Wydział Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska (WBAIIS),
- Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy (UTP),
- Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział w Bydgoszczy (PZITB),
- Naczelna Organizacja Techniczna Federacja Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych (NOT),

• Partnerzy:

- Kujawsko-Pomorska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa (KUPOIIB)
- Europejska Rada Inżynierów Budownictwa - European Council of Civil Engineers (ECCE)

• Patronat:

- Marszałek Województwa Kujawsko-Pomorskiego, Piotr Całbecki – honorowy patronat
- Prezydent Miasta Bydgoszczy, Rafał Bruski – honorowy patronat

• Szczegółowe informacje nt. konferencji na stronie: www.ceppis.pl