

Nośność blachownic stalowych o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru według EN 1993-1-2 oraz prEN 1993-1-2

The load capacity of steel plate girders with class 4 cross-sections under fire conditions according to EN 1993-1-2 and prEN 1993-1-2

mgr inż. Szymon Kaźmierski, dr inż. Marcin Chybiński (ORCID: 0000-0003-2539-7764), dr inż. Łukasz Polus (ORCID: 0000-0002-1005-9239), Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Politechnika Poznańska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1309

Streszczenie: W artykule porównano nośność ogniową blachownic stalowych o przekrojach klasy 4 obliczoną według normy PN-EN 1993-1-2 oraz projektu jej nowelizacji – prEN 1993-1-2. Oceniono również nagrzewanie blachownic według krzywej standardowej oraz na podstawie krzywej otrzymanej z modelu pożaru strefowego w programie OZone.

Słowa kluczowe: blachownice stalowe, przekrój klasy 4, nośność ogniowa, temperatura krytyczna, pożar strefowy.

Abstract: In this paper the fire resistance of steel plate girders with class 4 cross-sections calculated in accordance with the PN-EN 1993-1-2 standard and the prEN 1993-1-2 draft were compared. What is more, the steel plate girder heating according to the standard curve and the curve obtained from the zone fire model in the OZone program was also evaluated.

Keywords: steel plate girders, class 4 cross-section, fire resistance, critical temperature, zone fire.

1. Wprowadzenie

Blachownice stalowe o przekrojach klasy 4 stosowane są często jako dźwigary w mostach oraz jako podciągry w stropach. Ich duże przekroje umożliwiają przenoszenie znacznych obciążeń. W celu ograniczenia zużycia stali stosowane są smukłe środniki, które tym samym stają się podatne na utratę stateczności lokalnej. Oszczędności wynikające z mniejszego zużycia stali w blachownicach o przekrojach klasy 4 mogą być niestety zniwelowane przez konieczność zastosowania większej ilości zabezpieczeń ogniochronnych. Zasady projektowania elementów stalowych w warunkach pożaru zawarto w normie PN-EN 1993-1-2 [1]. Obecnie trwają konsultacje projektu nowej wersji tej normy – prEN 1993-1-2 [2], dlatego w niniejszym artykule rozpoczęto dyskusję nad planowanymi zmianami dotyczącymi obliczania nośności zginanych blachownic o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru.

W obecnie obowiązującej normie [1] wprowadzono informację o granicznej wartości temperatury krytycznej dla elementów o przekrojach klasy 4 wynoszącej 350°C. Jest to podejście konserwatywne, ponieważ nie uwzględnia ono wyciężenia elementu [3]. W badaniach przedstawionych w pracach [4, 5] blachownice o przekrojach klasy 4 miały temperatury krytyczne wyższe niż 350°C. Ponadto w obecnie obowiązującej normie [1] zawarto załącznik E, który dotyczy elementów stalowych o przekrojach klasy 4. W artykule [6] zwrócono uwagę,

że wykonując obliczenia wg algorytmu z załącznika E można (dla elementów o niewielkim wyciężeniu) otrzymać temperaturę krytyczną wyższą niż 350°C. Jednak, ze względu na zapis o granicznej wartości temperatury krytycznej, przyjmuje się temperaturę krytyczną równą 350°C dla elementów o przekrojach klasy 4. Projekt drugiej generacji normy dotyczącej konstrukcji stalowych w warunkach pożaru [2] nie zawiera załącznika E. Sposób obliczeń elementów o przekrojach klasy 4 został umieszczony w zasadniczej części normy. W projekcie normy [2] dla elementów o przekrojach klasy 4 temperatura krytyczna równa 350°C została uznana za domyślną. W pracy [7] przeprowadzono analizę nośności słupów stalowych o przekrojach klasy 4, wykonując obliczenia według algorytmu zamieszczonego w prEN 1993-1-2 [2] i zwracając uwagę, że możliwe będzie uzyskanie na podstawie tego algorytmu temperatur krytycznych wyższych niż 350°C. Natomiast w niniejszym artykule poddano analizie nośność ogniową i czas odporności ogniowej blachownic stalowych o przekrojach klasy 4, korzystając z zapisów obecnie obowiązującej normy [1] oraz projektu jej nowej wersji [2].

Zarówno w projekcie normy [2], jak i jej obecnie obowiązującej wersji [1] w podwyższonej temperaturze redukcji ulega wartość granicy plastyczności. Redukcja granicy plastyczności wraz ze wzrostem temperatury jest mniejsza według projektu normy [2], ponieważ stosuje się współczynnik redukcyjny granicy plastyczności $k_{y,\theta}$ taki sam jak dla klas 1–3.

Współczynnik ten jest większy niż współczynnik redukcji granicy plastyczności dla elementów o przekrojach klasy 4 – $k_{p0,2,\theta}$ z normy [1].

W obliczeniach według projektu normy [2] efektywny wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_{eff} jest inny w warunkach pożaru niż w warunkach normalnych. W projekcie normy [2] wprowadzono wzór pozwalający na wyznaczenie wartości współczynnika redukcyjnego ścianki ściskanej ρ . Natomiast w obliczeniach prowadzonych według obecnie obowiązującej normy [1] stosowany jest taki sam wskaźnik efektywny zarówno w warunkach pożarowych, jak i w warunkach normalnych.

Dla przekrojów klasy 4 inną wartość ma też współczynnik imperfekcji α_{LT} . W normie [1] ma on wartość $0,65\sqrt{(235/f_y)}$, natomiast w projekcie normy [2] jego wartość zależy od stosunku efektywnego wskaźnika wytrzymałości do sprężystego wskaźnika wytrzymałości względem osi y .

W niniejszym artykule wykonano obliczenia dla blachownic o różnym stopniu wyężenia według obecnie obowiązującej normy [1] oraz projektu jej nowej wersji [2]. Oceniono wpływ proponowanych zmian na nośność ogniową zginanych blachownic stalowych o przekrojach klasy 4. Przedstawiono również wpływ sposobu modelowania rozwoju temperatury w blachownicach, nagrzewając je zarówno w pożarze standardowym, jak i strefowym sklepu. Dzięki zamodelowaniu pożaru w programie OZone uwzględniono wymiary pomieszczenia, gęstość obciążenia ogniowego, czynne środki ochrony przeciwpożarowej oraz ilość tlenu podtrzymującego spalanie. Nagromadzone materiały palne oraz warunki dostępu tlenu wpływają znacząco na to czy w rozpatrywanym obiekcie dojdzie do rozgorzenia pożaru [8].

2. Analiza nośności ogniowej blachownic w pożarze standardowym

Analizie poddano blachownice o schemacie belki swobodnie podpartej i rozpiętości 12,0 m, wykonane ze stali S235 [9]. Przyjęto, że analizowane elementy zabezpieczone są przed zwichrzeniem zarówno na podporach, jak i w miejscach przyłożenia obciążeń (dwóch sił skupionych) przez ich podparcie boczne co 4,0 m. Każda z analizowanych blachownic zaprojektowana była z dwuteownika IKS 1000-1, który jest przekrojem klasy 4. Blachownice różniły się między sobą wyężeniem w warunkach normalnych, które wynosiło od 10 do 100% ze zmianą co 10%. Moment krytyczny wyznaczono jak dla belki swobodnie podpartej obciążonej dwoma siłami skupionymi, przyjmując długość na zwichrzenie równą 4,0 m. Przyjęto kategorię obciążenia E oraz założono, że udział obciążenia stałego oraz zmiennego w obciążeniu blachownicy w warunkach normalnych wynosi odpowiednio 30 oraz 70%. Obliczenia każdej z blachownic składały się z kilku etapów. Blachownice analizowano jako wydzielone elementy. Na początku wyznaczono przekrój

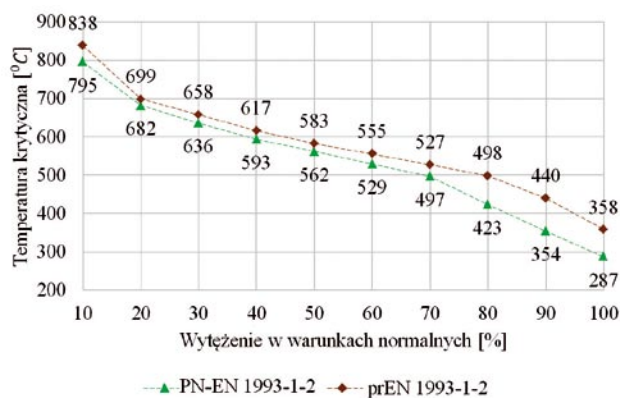
efektywny blachownicy oraz nośność jej przekroju. W przypadku analizowanych blachownic nie wystąpił efekt szerokiego pasa. Następnie określono nośność elementu na zwichrzenie. Po wyznaczeniu nośności blachownicy na zginanie ze zwichrzeniem określono obciążenie odpowiadające wyężeniu 10–100%, po czym określano jaka jego część stanowi obciążenie stałe oraz zmienne w warunkach normalnych. Następnie wyznaczono obciążenie oraz moment zginający blachownicę w warunkach pożarowych dla kombinacji wyjątkowej. W kolejnym etapie obliczono temperaturę krytyczną metodą iteracyjną, wykorzystaną również w pracy [10]. Następnie wyznaczono czas odporności ogniowej, uwzględniając nagrzewanie blachownic w pożarze standardowym. W przypadku obliczeń według projektu nowej wersji normy [2] uwzględniono zmianę efektywnego wskaźnika wytrzymałości na zginanie w warunkach pożarowych. Porównanie obliczonych parametrów dla blachownicy o wyężeniu 70% w warunkach normalnych przedstawiono w tabeli 1. Pomimo tego, że podczas obliczeń według projektu normy [2] uzyskano mniejszy efektywny wskaźnik wytrzymałości, wartość temperatury krytycznej była wyższa, a czas odporności ogniowej był dłuższy. Związane to jest z większą wartością współczynnika redukcyjnego granicy plastyczności, który przyjmuje się w projekcie normy [2]. Otrzymaną temperaturę krytyczną oraz czas odporności ogniowej dla każdej z analizowanych blachownic przedstawiono na rysunkach 1 oraz 2.

Tabela 1. Porównanie obliczeń wg PN-EN 1993-1-2 [1] oraz prEN 1993-1-2 [2] dla blachownicy o wyężeniu 70% w warunkach normalnych

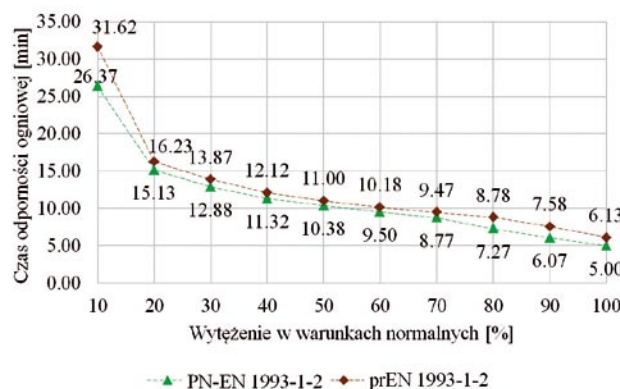
| Parametr | PN-EN 1993-1-2 (a) | prEN 1993-1-2 (b) | (a)/(b) |
|--|-------------------------|-------------------------|---------|
| Wskaźnik efektywny W_{eff} | 2563,80 cm ³ | 2087,01 cm ³ | 1,23 |
| Współczynnik α lub α_{LT} | 0,65 | 0,75 | 0,87 |
| Współczynnik zwichrzenia w temperaturze krytycznej $\chi_{LT,\theta_{cr}}$ | 0,517 | 0,488 | 1,06 |
| Współczynnik redukcyjny $k_{p0,2,\theta}$ lub $k_{y,\theta}$ | 0,534 | 0,696 | 0,77 |
| Temperatura krytyczna θ_{cr} | 497°C | 527°C | 0,94 |
| Czas odporności ogniowej | 8,77 min | 9,47 min | 0,93 |

3. Analiza nośności ogniowej blachownic w pożarze strefowym

Analizie nośności ogniowej w pożarze strefowym poddano te same blachownice, które analizowano wcześniej w pożarze standardowym. Uwzględniono temperatury krytyczne blachownic wyznaczone wcześniej według [1] oraz [2]. Pożar strefowy sklepu został zamodelowany w programie OZone, który wykorzystywany jest do modelowania pożarów strefowych [11, 12]. Pomieszczenie sklepu o wysokości 3,8 m miało plan prostokąta o wymiarach

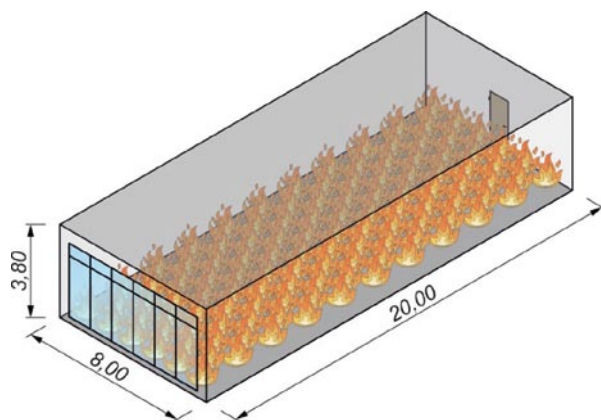


Rys. 1. Porównanie temperatury krytycznej otrzymanej na podstawie [1] i [2]

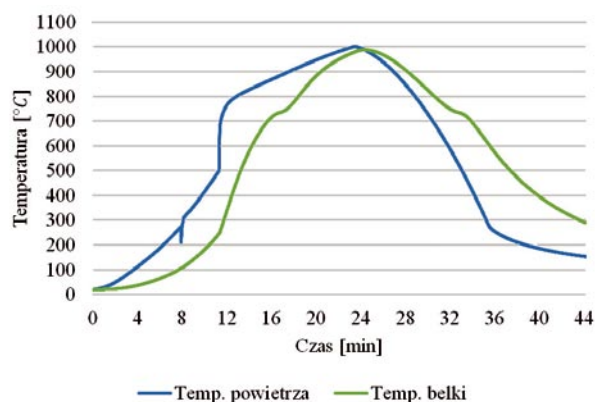


Rys. 2. Porównanie czasu odporności ogniowej wyznaczonego na podstawie [1, 2]

8,0x20,0 m (rys. 3). Wejście do pomieszczenia (1,0x2,1 m) znajdowało się na środku krótszej ściany, natomiast na przeciwległej ścianie umieszczono otwór okienny (7,0x3,0 m). Strop nad i pod pomieszczeniem przyjęto jako żelbetowy o grubości 22,0 cm. Na podłodze uwzględniono drewniane deski o grubości 2,0 cm. Ściany wykonano z bloczków z betonu komórkowego o grubości 24,0 cm wykończone tynkiem gipsowym o grubości 1,5 cm. Wartość obliczeniowej gęstości obciążenia ogniowego ($300,7 \text{ MJ/m}^2$) wyznaczono w programie OZone, biorąc pod uwagę wartość fraktyla 80% charakterystycznej gęstości obciążenia ogniowego (730 MJ/m^2), współczynnik korekcyjny uwzględniający czynne środki ochrony przeciwpożarowej ($\delta_n = 0,36$), współczynniki uwzględniające ryzyko pojawienia się pożaru ($\delta_{q1} = 1,43$, $\delta_{q2} = 1,00$) oraz współczynnik spalania ($m = 0,8$). Krzywe nagrzewania gazu oraz blachownicy z programu OZone przedstawiono na rysunku 4. Wzrost temperatury blachownicy w początkowym okresie pożaru (do około 12 minuty) jest wolniejszy w przypadku pożaru strefowego z programu OZone (rys. 5). Ponadto w przypadku pożaru strefowego temperatura blachownicy od około 16 do około 30 minuty jest wyższa niż w przypadku nagrzewania według krzywej standardowej. Porównanie czasu odporności ogniowej blachownic nagrzewanych w pożarze standardowym oraz w pożarze strefowym, których



Rys. 3. Pomieszczenie sklepu, dla którego zamodelowano pożar w programie OZone

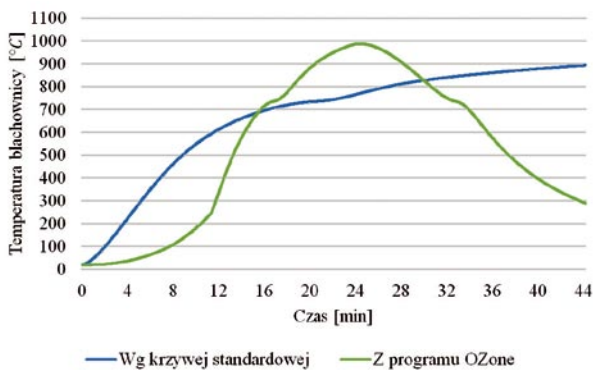


Rys. 4. Temperatura gazu oraz temperatura blachownicy w pożarze strefowym modelowanym w programie OZone

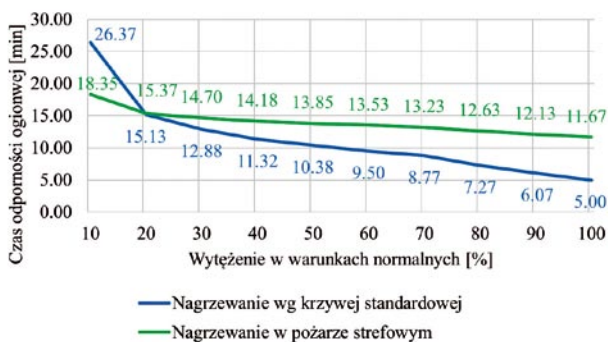
temperatury krytyczne ustalono wg PN-EN 1993-1-2 [1] oraz prEN 1993-1-2 [2] przedstawiono na rysunkach 6 oraz 7. Czas odporności ogniowej blachownicy o wyłączeniu 10% był dłuższy w przypadku nagrzewania jej w pożarze standardowym. Związane to było z tym, że elementy o małym wyłączeniu miały dłuższy czas odporności ogniowej, a temperatura blachownicy w pożarze strefowym od około 16 do około 30 minuty jest wyższa niż w pożarze standardowym. Czas odporności ogniowej blachownicy o wyłączeniu 20% był zbliżony do czasu tej nagrzewanej w pożarze standardowym. Natomiast dla blachownic o wyłączeniu od 30 do 100%, czas odporności ogniowej był dłuższy w pożarze strefowym. Różnica między czasem odporności ogniowej w pożarze strefowym a standardowym zwiększała się wraz ze wzrostem wyłączenia od 30 do 100%. Wynikało to z tego, że elementy o większym wyłączeniu miały krótsze czasy odporności ogniowej, a temperatura blachownicy na początku pożaru strefowego była zdecydowanie mniejsza od temperatury blachownicy na początku pożaru standardowego.

4. Podsumowanie

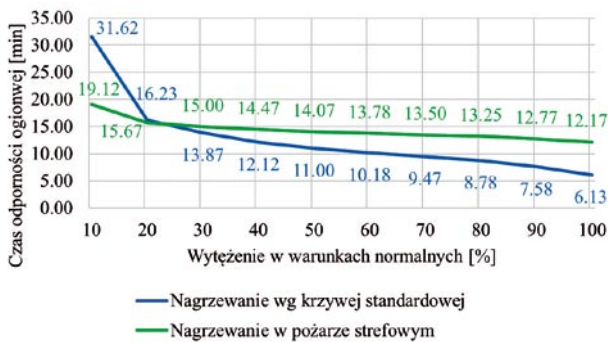
W artykule poddano analizie zmiany dotyczące obliczania zginanych blachownic o przekrojach klasy 4, które spodziewane



Rys. 5. Porównanie temperatury blachownicy w pożarze standardowym oraz strefowym



Rys. 6. Porównanie czasu odporności ogniowej dla blachownic nagrzewanych w pożarze standardowym oraz strefowym, których temperatury krytyczne ustalono według PN-EN 1993-1-2 [1]



Rys. 7. Porównanie czasu odporności ogniowej dla blachownic nagrzewanych w pożarze standardowym oraz strefowym, których temperatury krytyczne ustalono według prEN 1993-1-2 [2]

są po wprowadzeniu drugiej generacji Eurokodów. W projekcie nowelizacji normy [2] usunięto załącznik E dotyczący obliczania elementów o przekrojach klasy 4, a zasady ich projektowania zostały zamieszczone w zasadniczej części normy [2]. W projekcie nowelizacji normy [2] granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze redukuje się, korzystając ze współczynnika $k_{y,\theta}$ zamiast $k_{p0,2,\theta}$, poza tym dla obliczeń w warunkach pożarowych wyznacza się ponownie efektywny wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_{eff}

a wartość współczynnika imperfekcji α_{LT} zależy od stosunku wskaźników W_{eff} do $W_{el,y}$.

Przeprowadzone analizy wykazały, że temperatura krytyczna blachownicy obliczona według prEN 1993-1-2 [2] była od 1,02 do 1,25 razy wyższa niż ta wyznaczona według PN-EN 1993-1-2 [1], a jej czas odporności ogniowej w pożarze standardowym obliczony według projektu normy [2] był od 1,06 do 1,25 razy dłuższy niż ten wyznaczony według normy [1].

W artykule porównano również nagrzewanie blachownic w pożarze standardowym oraz strefowym sklepu. Czas odporności ogniowej blachownicy o wyłączeniu 10% był dłuższy w przypadku nagrzewania jej w pożarze standardowym. Dla blachownicy o wyłączeniu 20% czas odporności ogniowej w pożarze strefowym był zbliżony do czasu jej nagrzewania w pożarze standardowym, zaś dla wyłączenia 30–100% czas odporności ogniowej był dłuższy w pożarze strefowym.

Podsumowując, zasady obliczeń elementów o przekrojach klasy 4 zostały zawarte w zasadniczej części projektu nowelizacji normy [2]. Wyższą wartość temperatury krytycznej i dłuższy czas odporności ogniowej dla analizowanych blachownic otrzymano po wykonaniu obliczeń według projektu normy [2].

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1993-1-2:2007: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe
- [2] Draft prEN 1993-1-2:2022, Eurokod 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design
- [3] Woźniczka P., Piekarczyk M., The fire resistance of steel plate girders with slender webs – a comparative study, Technical Transactions 11/2018, str. 97–104, doi: 10.4467/2353737XCT.18.165.9421
- [4] Woźniczka P., Experimental Study of Lateral-Torsional Buckling of Class 4 Beams at Elevated Temperature, Materials 14/2021, str. 4825, doi: 10.3390/ma14174825
- [5] Woźniczka P., Critical temperature of laterally unrestrained steel plate girders with slender section, Engineering Structures 291/2023, str. 116242, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116242
- [6] Rzeszut K., Polus Ł., Classes of Cross-Sections of Steel Structural Elements in the Fire Situation, Procedia Engineering 57/2013, str. 967–976, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.123
- [7] Mąka T., Analiza nośności słupów stalowych o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru według EN 1993-1-2 oraz prEN 1993 1-2, praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2023
- [8] Maślak M., Woźniczka P., Wpływ lokalizacji źródła ognia na rozwój pożaru w wielkopowierzchniowym halowym obiekcie handlowym, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 45(1)/2017, str. 154–169, doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.12
- [9] Kaźmierski S., Analiza nośności blachownic stalowych o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru według EN 1993-1-2 oraz prEN 1993-1-2, praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2023
- [10] Chybiński M., Polus Ł., Kloj M., Fire Resistance of the Rafter Used in the Steel Portal Frame, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 471/2019, 052082, doi: 10.1088/1757-899X/471/5/052082
- [11] Pintea D., Zaharia R., Charlier M., Hanus F., WP1 – Preparation of nomograms, design guide, Powerpoint presentations and adaptation of Ozone software. Technical Report D1.4, TG58, 2018
- [12] Figuli L., Horváth L. I., Kubíková Z., Magdolenová P., Malendowski M., Mózer V., Spremic M., Szikra C., Szymkuć W., Takács L., Wald F., V4 guidelines on advanced structural fire safety design with Eurocodes, Czech Technical University in Prague, Prague, 2021