

mgr inż. Piotr Turkowski\*  
Klaudia Aleksandrowicz\*\*

# Opis betonu na potrzeby dwuwymiarowych analiz numerycznych przepływu ciepła w świetle aktualnej wiedzy technicznej i przeprowadzonych badań odporności ogniowej

## *Description of concrete for the purpose of 2-dimensional numerical analysis of heat transfer in the light of current technical knowledge and conducted fire tests*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań odporności ogniowej stropów żelbetowych, w szczególności rozkładu temperatury w zbrojeniu tych elementów oraz na powierzchni nienagrzewanej. Na podstawie porównania zmierzonych wartości z obliczonymi numerycznie przedstawiono zalecenia do modelowania przekrojów betonowych i żelbetowych.  
**Słowa kluczowe:** beton, właściwości termiczne, odporność ogniowa, analiza numeryczna przepływu ciepła.

**Abstract.** This paper presents results of conducted fire tests on reinforced concrete slabs, in particular on the temperature distribution in the reinforcement of these elements, and on the unexposed side. Based on the comparison of the measured values with the numerically calculated ones, recommendations for modeling concrete and reinforced concrete sections were given.  
**Keywords:** concrete, thermal properties, fire resistance, heat transfer numerical analysis.

Jednymi z najważniejszych parametrów w ocenie odporności ogniowej żelbetowych elementów konstrukcyjnych jest temperatura zbrojenia oraz temperatura powierzchni nienagrzewanej po zadaniem czasu oddziaływania pożaru standardowego. Pierwsza wartość jest kluczowa w ocenie nośności ogniowej (kryterium R), a druga w ocenie izolacyjności ogniowej (kryterium I).

Norma PN-EN 1992-1-2:2008 [3], dotycząca projektowania konstrukcji z betonu z uwagi na warunki pożarowe, podaje wiele wytycznych dotyczących właściwości termicznych i mechanicznych betonu, które nie są jednoznaczne, ani nawet spójne z innymi normami z serii Eurokodów. Niewłaściwy opis materiału może prowadzić do przeszacowania lub niedoszacowania temperatury betonu i zbrojenia, co ma istotny wpływ na ocenę nośności ogniowej elementów żelbetowych. Należy również mieć na uwadze zjawisko odpryskiwania i odpadania betonu, które istotnie wpływa na zmianę geometrii przekrojów, zmniejszając otulinę zbrojenia, co bywa niemożliwe do odwzorowania w modelu numerycznym. Przykłady obliczeń odporności ogniowej elementów żelbetowych, prowadzonych zgodnie z PN-EN 1992-1-2:2008, można znaleźć w [1].

### Badania odporności ogniowej

Spośród licznych badań odporności ogniowej wykonanych w Laboratorium Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej wytypowano pięć z okresu 2011 – 2012 przeprowadzonych

na tym samym piecu poziomym, w których elementami badanymi były niezabezpieczone ogniochronnie stropy żelbetowe z trzpieniami dylatacyjnymi.

Badania wykonano zgodnie z PN-EN 1365-2:2002 [4], przy standardowej krzywej nagrzewania i nagrzewaniu przez 120 min, zgodnie z PN-EN 1363-1:2001 [5], określonej wzorem:

$$\theta_g = 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) + 20 \quad (1)$$

gdzie:  
 $\theta_g$  – średnia temperatura w piecu [°C];  
 $t$  – czas [min].

Wszystkie elementy próbne wykonane były z betonu klasy C 20/25, na kruszywie krzemianowym o maksymalnej średnicy ziarna 8 mm. Przed badaniem sezonowano je od 90 do 105 dni. Wilgotność betonu każdego z elementów próbnych wynosiła ok. 2%. Elementy badano pod różnym obciążeniem, które ustalano z uwagi na nośność zamontowanych w nich łączników dylatacyjnych. Wyteżenie płyt żelbetowych w każdym z przypadków nie przekraczało 50% obliczeniowej nośności płyty na zginanie w warunkach normalnych (istotne było zniszczenie w złączu, a nie płycie żelbetowej). W tabeli 1 zestawiono charakterystykę badanych elementów.

W każdej płycie stropowej, w osi prętów zbrojenia głównego oraz na powierzchni nienagrzewanej stropów, zamontowano po 5 termoelementów, równomiernie rozmieszczonych na całej powierzchni płyty. Żaden z termoelementów (zarówno tych do pomiaru temperatury zbrojenia, jak i temperatury powierzchni nienagrzewanej) nie znajdował się bliżej krawędzi stropu niż 50 cm. Założyć można, iż ewentualne nagrzewanie krawędzi swobod-

\* Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych  
\*\* Studentka Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego

Tabela 1. Elementy próbne w badaniach odporności ogniowej

Element próbny	Wymiary elementu próbnego				
	rozpiętość podpór [cm]	szerokość [cm]	grubość [cm]	średnica prętów [mm]	odległość osiowa [mm]
Strop-1	500	200	16	10	40
Strop-2	500	200	18	16	40
Strop-3	500	200	18	10	40
Strop-4	500	200	20	16	40
Strop-5	500	200	20	14	40

nych, ugiętych elementów próbnych, nie miało wpływu na pomiar temperatury. Prowadzono również pomiar ugięcia elementów próbnych w środku ich rozpiętości. Warto zwrócić uwagę na relację ugięcia do temperatury zbrojenia głównego. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 2 ÷ 4.

W przypadku wszystkich badań, między 10 a 25 minutą, słychać było huk wywołane odpadaniem otuliny zbrojenia. Stwierdzono ubytki nie większe niż 3 mm na całej powierzchni płyt oraz lokalnie, szczególnie przy podporach, ubytki całej otuliny, aż do odsłonięcia prętów. Widok stropów w trakcie i po badaniach pokazano na fotografii 1.

Tabela 2. Temperatura zbrojenia głównego stropu

Element próbny	Temperatura [°C] zbrojenia głównego stropu, po czasie [min] nagrzewania wg krzywej standardowej							
	15'	30'	45'	60'	75'	90'	105'	120'
Strop-1	134	252	358	463	495	542	579	610
Strop-2	107	208	300	372	428	476	520	557
Strop-3	93	178	266	335	392	442	484	521
Strop-4	100	162	241	311	368	417	459	496
Strop-5	102	186	279	349	403	445	483	517

Tabela 3. Temperatura na powierzchni nienagrzewanej stropu

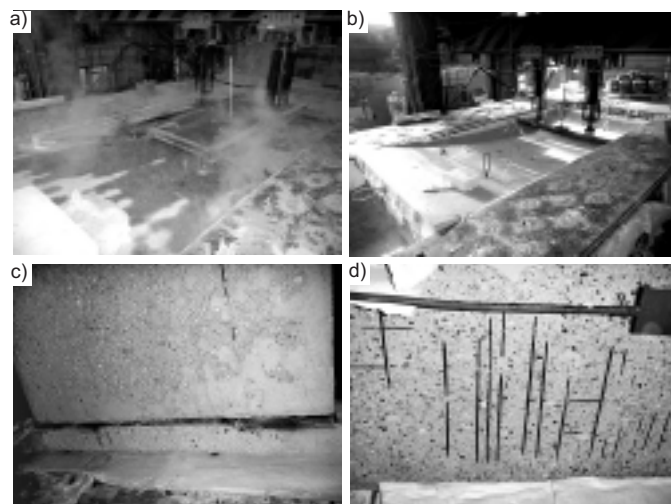
Element próbny	Temperatura [°C] na powierzchni nienagrzewanej stropu, po czasie [min] nagrzewania wg krzywej standardowej							
	15'	30'	45'	60'	75'	90'	105'	120'
Strop-1	20	23	36	52	64	75	85	93
Strop-2	22	25	38	55	71	86	96	103
Strop-3	20	22	30	41	48	56	65	72
Strop-4	16	17	25	38	49	56	59	63
Strop-5	16	16	20	28	38	47	55	62

Tabela 4. Ugięcie stropu

Element próbny	Ugięcie stropu [mm] po czasie [min] nagrzewania wg krzywej standardowej							
	15'	30'	45'	60'	75'	90'	105'	120'
Strop-1	55	94	117	135	151	166	170	169
Strop-2	32	62	82	97	112	127	143	159
Strop-3	35	69	85	95	105	114	123	131
Strop-4	36	59	74	88	100	112	122	133
Strop-5	35	61	73	91	101	112	123	133

### Pomiar temperatury zbrojenia

Założenia do modelu numerycznego zweryfikowano w badaniu ogniowym płyty żelbetowej o wymiarach 300 mm x 300 mm i grubości 100 mm, z dwoma prętami w połowie grubości: jednym



Fot. 1. Widok elementów próbnych w trakcie i po badaniu: a) strop-4, w trakcie badania (50 min), widoczne zawilgocenie stropu; b) strop-2, w trakcie badania (120 min), widoczne znaczne ugięcie stropu; c) strop-5, po badaniu, ubytek otuliny na powierzchni płyty; d) strop-3, po badaniu, ubytek otuliny sięgający zbrojenia głównego

Fot. archiwum ITB

Ø25 mm i drugim Ø10 mm (odległość osiowa  $\alpha_0 = 50$  mm), umieszczonej w konstrukcji mocującej w postaci ściany z autoklawizowanego betonu komórkowego grubości 25 cm. Na każdym przęcie zamontowano po 4 termoelementy. Rozmieszczenie termoelementów oraz widok elementu próbnego przedstawiono na fotografii 2.

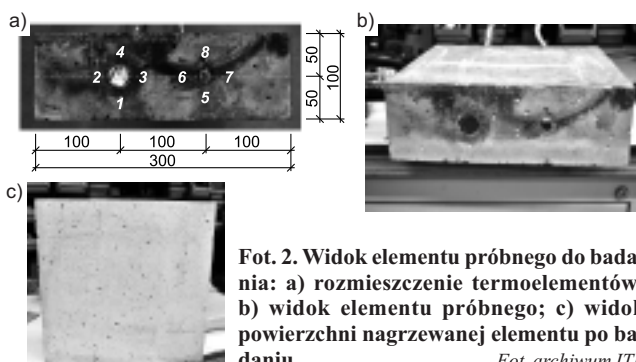
Element nagrzewano jednostronnie, wg krzywej standardowej temperatura-czas (I) przez 120 minut. Po badaniu nie stwierdzono ubytku betonu na powierzchni nagrzewanej. Jednocześnie przeprowadzono analizę numeryczną zgodnie z przyjętymi założeniami, w dwóch wariantach: I – modelując przekrój składający się z betonu oraz stali, II – modelując przekrój czysto betonowy.

Z porównania wyników badań i obliczeń numerycznych wynika, że:

- niezależnie od średnicy pręta, średnia temperatura zarejestrowana w badaniu jest podobna w obu przypadkach – różnice nie przekraczają 5°C;

- niezależnie od średnicy pręta, średnia temperatura obliczona numerycznie, w wariantach I i II jest podobna – różnice nie przekraczają 7°C;

- temperatura obliczona numerycznie jako średnia z 4 punktów pomiarowych wokół pręta lub jako średnia z 2 punktów pomiarowych w osi równoległej do płaszczyzny nagrzewanej, w modelach



Fot. 2. Widok elementu próbnego do badania: a) rozmieszczenie termoelementów; b) widok elementu próbnego; c) widok powierzchni nagrzewanej elementu po badaniu

Fot. archiwum ITB

dwumateriałowych jest zgodna z temperaturą obliczoną w modelu czysto betonowym w punkcie teoretycznego środka pręta stalowego;

### Analiza numeryczna stropów

Założenia do modelu numerycznego przyjęto, uwzględniając zalecenia podane w PN-EN 1992-1-2:2008 [3], PN-EN 1991-1-2:2006 [6] oraz prEN 13381-3:2012 [7], w szczególności dolną granicę przewodności cieplnej oraz ciepło właściwe jak dla betonu o zawartości wilgoci 1,5%.

Analizując przepływ ciepła w warunkach pożaru standardowego wg przedstawionych zasad, przy nagrzewaniu pod stropem, ustalono przebieg temperatury:

- w zbrojeniu głównym ( $\alpha_0 = 40$  mm);
- na powierzchni nienagrzewanej stropów.

Ponadto w modelowaniu dwuwymiarowych przekrojów elementów posłużono się siatką ortogonalną o długości boku elementu nie większej niż 5 mm. Przekrój w całości opisano jednym materiałem – betonem, a temperaturę zbrojenia wyznaczono jako temperaturę węzła środka umiejscowienia prętów zbrojeniowych.

Niezależnie od grubości elementu (16 ÷ 20 cm), temperatura w odległości 40 mm od powierzchni nienagrzewanej była identyczna lub różniła się o nie więcej niż 1%, w związku z czym przyjęto jeden zestaw temperatur (jak dla płyty grubości 20 cm). W odniesieniu do temperatury na powierzchni nienagrzewanej obliczenia w programie MSC.Marc 2013.1 przeprowadzono na dwuwymiarowych modelach płyt o grubości: 16, 18 i 20 cm. Wyniki przedstawiono w tabelach 5 i 6.

Tabela 5. Temperatura obliczona zbrojenia głównego stropów

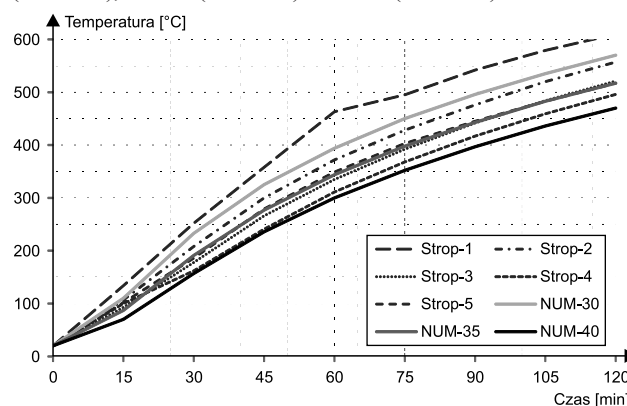
Element próbny	Temperatura obliczona [°C] zbrojenia głównego stropu, po czasie [min] nagrzewania wg krzywej standardowej							
	15'	30'	45'	60'	75'	90'	105'	120'
Strop-1, Strop-2, Strop-3, Strop-4, Strop-5	70	157	236	300	352	397	436	470

Tabela 6. Temperatura obliczona na powierzchni nienagrzewanej

Element próbny	Temperatura obliczona [°C] na powierzchni nienagrzewanej stropu, po czasie [min] nagrzewania wg krzywej standardowej							
	15'	30'	45'	60'	75'	90'	105'	120'
Strop-1	20	20	23	29	37	48	60	72
Strop-2, Strop-3	20	20	21	24	29	36	44	53
Strop-4, Strop-5	20	20	20	21	24	28	33	40

Temperatura zbrojenia głównego i powierzchni nienagrzewanej, obliczona numerycznie jest niższa od zarejestrowanej podczas badań. Jest to związane przede wszystkim z odpryskiwaniem i odpadaniem betonu zaobserwowanym podczas badań, które nastąpiło między 10 a 25 min, co efektywnie zmniejszyło odległość osiową zbrojenia z 40 mm do 30 ÷ 35 mm. Szczególnie uwidoczniło się to w przypadku Stropu-1, o najmniejszej grubości, gdzie odpryskiwanie betonu powodowało wzrost temperatury zbrojenia, co zwiększało ugięcie, które powodowało dalsze odpryskiwanie, a w konsekwencji jeszcze bardziej podnosiło temperaturę zbrojenia i zwiększało deformacje. Ta sekwencja powtarzała się aż do osiągnięcia ugięcia granicznego, przy którym odciążono ele-

ment próbny. Na rysunku pokazano wykresy temperatury zbrojenia głównego zarejestrowane w czasie badań oraz wykresy temperatury obliczone numerycznie na głębokości 30 mm (NUM-30), 35 mm (NUM-35) i 40 mm (NUM-40).



Wykresy temperatury zbrojenia głównego stropów zarejestrowane w czasie badań i obliczone numerycznie

W artykule [2] Borowy i Woźniak przeprowadzili podobne analizy, bazując wtedy na projektach Eurokodów, wykazując zgodność rozkładów temperatury otrzymanych w badaniach belek żelbetowych i analiz numerycznych.

### Wnioski

Na podstawie badań odporności ogniowej stropów żelbetowych przeprowadzonych w Laboratorium Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej wykazano, że dwuwymiarowa analiza numeryczna przepływu ciepła w elementach żelbetowych, wykonanych z betonu klasy C20/25, na kruszywie krzemianowym o wilgotności ok. 2%, ze względu na możliwość eksplozywnego odpryskiwania betonu, którego proste narzędzia numeryczne nie uwzględniają, może prowadzić do znacznego niedoszacowania temperatury zbrojenia, sięgającego 100 °C. Wylimitowanie odpryskiwania betonu przez np. zastosowanie włókien polipropylenowych powoduje, że zbieżność modelu numerycznego o przedstawionych parametrach z wynikami realnych badań jest duża, co oznacza, że dla takich przypadków znacznie tańsza od badań analiza obliczeniowa daje porównywalne wyniki i spełnia wymagania postawione w p. 4.1(2) normy PN-EN 1992-1-2:2008 [3].

### Literatura

[1] Woźniak G., Turkowski P., Projektowanie konstrukcji z betonu z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodu 2, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2013.  
 [2] Borowy A., Woźniak G., Rozkład temperatury w elementach żelbetowych w warunkach badania odporności ogniowej – badania i obliczenia, Beton i prefabrykacja: 18 Konf. nauk.-tech. Jadwisin 2002.  
 [3] PN-EN 1992-1-2:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.  
 [4] PN-EN 1365-2:2002. Badania odporności ogniowej elementów nośnych. Część 2: Stropy i dachy.  
 [5] PN-EN 1363-1:2001. Badania odporności ogniowej – Część 1: Wymagania ogólne.  
 [6] PN-EN 1991-1-2:2006. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.  
 [7] prPN-EN 13381-3:2012. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 3: applied protection to concrete members.