

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Obliczeniowa ocena nośności płyt żelbetowych w strefie przęsłowej w warunkach działania pożaru

MICHAŁ MACIĄG, SZYMON SPODZIEJA, GRZEGORZ ADAMCZEWSKI  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

**Słowa kluczowe:** płyta, żelbet, nośność, pożar

#### STRESZCZENIE:

W pracy obliczono nośność pożarową płyt żelbetowych o grubościach nie mniejszych niż 15 cm. Przyjęto standardową krzywą pożarową. Obliczenia wykonano przy pomocy metody Izoterma 500. Wyznaczono krzywe równowagi pomocne do wyznaczenia nośności ogniowej analizowanych płyt. Jako pomoc dla projektantów wyniki zebrano w formie tabelarycznej.

### Computational assessment of the load bearing capacity of reinforced concrete slabs under fire conditions

**Keywords:** slab, reinforced concrete, load capacity, fire

#### ABSTRACT:

The load capacity of reinforced concrete slabs, with a thickness not less than 15 cm, under fire conditions was calculated in the publication. A standard fire curve was adopted. The calculations were made using the simplified method of Isotherm 500. The equilibrium curves, helpful in determining the fire resistance of the analysed boards, were determined. The results were tabulated to be used by designers.

## 1. WSTĘP

W praktyce zawodowej konstruktor ma obowiązek zapewnienia odpowiedniej nośności konstrukcji w sytuacji pożarowej. W celu spełnienia stawianych wymagań przeciwpożarowych dla projektowanych budynków EC2 [6] proponuje się następujące metody:

- zaawansowane modele obliczeniowe,
- uproszczone modele obliczeniowe dla wydzielonych elementów konstrukcyjnych takie jak metoda Izotermy 500 lub metoda strefowa,
- metoda tabelaryczna.

Najczęściej stosowana jest metoda tabelaryczna. Zgodnie z nią nośność pożarową zapewnia się przez zachowanie minimalnych wymiarów przekroju i odległości środka ciężkości zbrojenia głównego od lica płyty.

Posługując się Izotermą 500 [4, 6] jesteśmy w stanie ocenić nośność ogniową dowolnego elementu konstrukcyjnego, na co nie pozwalają ograniczenia tabelaryczne zgodne z EC2. W pracy porównano wiele parametrów mających wpływ na nośność konstrukcji w sytuacji pożarowej takich jak:

- odległość środka ciężkości zbrojenia głównego od lica płyty –  $a$ ,
- stopień zbrojenia –  $\alpha$ ,
- współczynnik redukcyjny obciążenia obliczeniowego –  $\eta_{fr}$

Celem pracy jest analiza wyników uzyskanych z obliczeń, porównanie ich z danymi tabelarycznymi podawanymi jako bezpieczne wg EC2 oraz stworzenie dokładniejszych tabel nośności. Dzięki temu możliwe będzie uzyskanie oszczędności z punktu widzenia inżyniera oraz inwestora.

## 2. ZAŁOŻENIA METODY IZOTERMY 500

Do obliczenia nośności wykorzystano analizę bazującą na metodzie Izotermy 500°C.

Założenia tej metody to [6]:

- redukcja granicy plastyczności stali zależna od obliczeniowej temperatury w środku ciężkości zbrojenia,
- redukcja strefy ściskania betonu wyznaczona przez zasięg Izotermy 500°C. Założono, że w zredukowanej strefie beton posiada wytrzymałość na ściskanie zgodnie z EC2 w warunkach normalnych,

– pożar według standardowej krzywej pożarowej. Dodatkowe ograniczenia nałożone przez autorów:

– Analizowano jedynie przekroje zbrojone stalą o  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ , o odpowiedniej ciągliwości, która pozwala na osiągnięcie odkształceń nie mniejszych niż w temperaturach większych niż  $\theta \geq 200^\circ\text{C}$ ;

– Analizowano betony o wytrzymałości na ściskanie do  $f_{yk} \leq 50 \text{ MPa}$ ;

– Przyjęto prostokątne przekroje poprzeczne o grubości  $h \geq 15 \text{ cm}$ ;

– Przyjęto, że ze względu na warstwy podłogowe płyty są zabezpieczone przed działaniem pożaru od górnej strony. Szlichta znacznie zwiększa bierną ochronę elementu przed niepożądanymi skutkami pożaru;

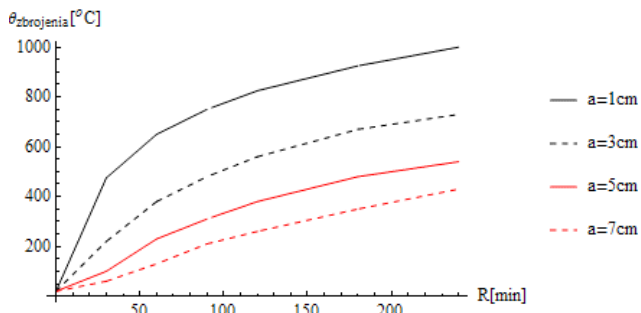
– Dopuszczono w sytuacji pożarowej zniszczenie płyty na skutek zerwania stali lub zmiażdżenie betonu;

– Zredukowano obliczeniowe obciążenie w warunkach działania pożaru korzystając ze współczynnika  $\eta_{fr}$  zgodnie z EC2 [6].

Poprzez znaczny wzrost odkształceń stali spowodowanych ich wysoką temperaturą spada graniczny zasięg strefy ściskanej. Dlatego dla wysokich stopni zbrojenia w sytuacji pożarowej możliwe jest zniszczenie przekroju poprzez wyczerpanie nośności betonu. Autorzy dopuszczają taką sytuację, gdyż pominięcie jej spowodowałoby niedoszacowanie nośności konstrukcji, która w sytuacji normalnej ulega zniszczeniu poprzez zerwanie stali, czyli jest zaprojektowana poprawnie.

## 3. TEMPERATURA W ZBROJENIU

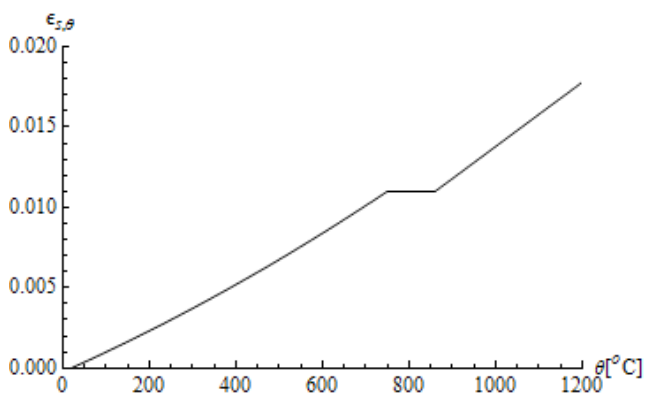
Do obliczenia nośności potrzebujemy dodatkowo określić temperaturę w środku ciężkości projektowanego zbrojenia płyty. Korzystając z wyników symulacji numerycznych ogrzewanych płyt żelbetowych z pracy [2] uzyskano wartości temperatury w zbrojeniu rozciągającym dla płyt o minimalnej grubości 15 cm. Temperatura w zbrojeniu przekroju żelbetowego jest zależna od odległości środka ciężkości zbrojenia głównego od lica płyty, co zilustrowano poniżej (Rys. 1).



**Rysunek 1** Zależność temperatury w środku ciężkości zbrojenia od czasu trwania pożaru dla różnych odległości od ogrzewanego lica płyty, por. [2]

#### 4. ODKSZTAŁCENIA STALI

Zgodnie z pracą [1] przyjęcie odkształceń granicznych stali zgodnie z EC2 i pominięcie odkształceń spowodowanych termiką może doprowadzić do przeszacowania nośności ogniowej elementów żelbetowych. Do odkształceń granicznych stali dodano więc odkształcenia spowodowane przez temperaturę:  $\mathcal{E}_{s,fi,\theta,lim} = \mathcal{E}_{s,\theta} + \mathcal{E}_{s,fi,lim}$ .

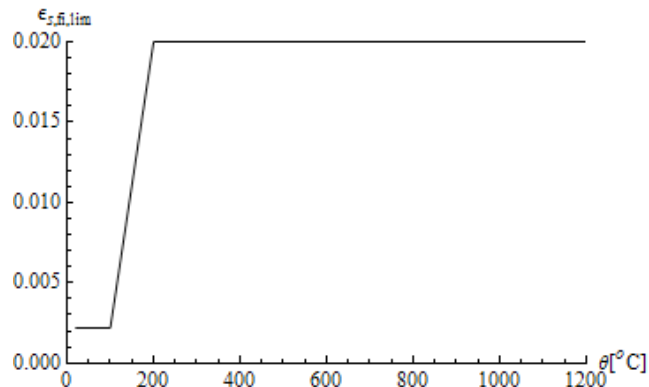


**Rysunek 2** Odkształcenia termiczne dla stali w warunkach pożarowych

Według EC2 całkowite wydłużenie termiczne dla zwykłej stali zbrojeniowej przedstawione zostało na Rysunku 2. Wraz ze wzrostem temperatury zmieniają się maksymalne odkształcenia plastyczne wywołane siłami w stali zbrojeniowej. Dla temperatury poniżej 100°C maksymalne odkształcenia plastyczne wynoszą 0,2%. W temperaturach większych niż 200°C maksymalne odkształcenia plastyczne wynoszą 2%. W sytuacjach pośrednich przyjęto interpolację liniową (Rys. 3).

**Tabela 1** Współczynnik w zależności od temperatury

T[°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800
$k_{s\theta}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	0,47	0,23	0,11



**Rysunek 3** Maksymalne odkształcenia plastyczne dla stali w warunkach pożarowych

#### 5. WSPÓŁCZYNNIKI REDUKUJĄCE WYTRZYMAŁOŚĆ MATERIAŁÓW

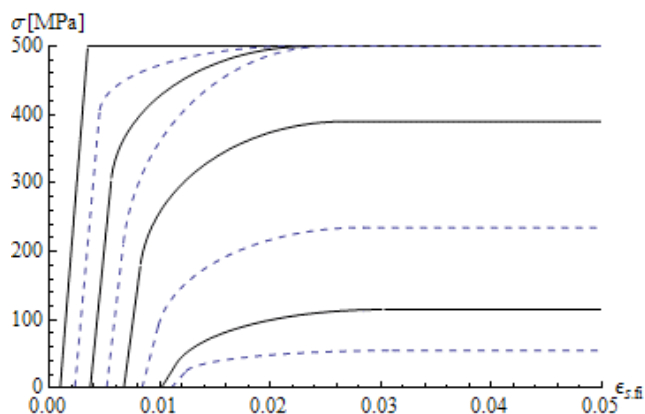
##### 5.1 Beton

Zgodnie z założeniami metody Izotermy 500 obniżenie nośności betonu osiąga się przez zredukowanie przekroju betonu w miejscach, gdzie beton osiąga temperaturę wyższą niż 500°C. Dla obszaru o temperaturze  $\theta < 500^\circ\text{C}$  przyjęto  $f_{cd,fi} = f_{ck}$ , natomiast dla obszarów, gdzie  $\theta \geq 500^\circ\text{C}$  założono  $f_{cd,fi} = 0$ .

##### 5.2 Stal

Spadek właściwości wytrzymałościowych zbrojenia uwzględniono stosując zależny od temperatury współczynnik redukujący charakterystyczną granicę plastyczności stali  $f_{yd,fi} = k_{s\theta} f_{yk}$ . Zgodnie z zaleceniami EC2, wartość współczynnika  $k_{s,\theta}$  przyjęto zgodnie z Tabeli 1 [6].

Jak zaznaczono wcześniej w pracy, analizowane będą też przypadki wyczerpania nośności przekroju ze względu na zmiażdżenie betonu. Dla takiej sytuacji obliczeniowej odkształcenia w stali nie osiągają odkształceń granicznych, a tym samym naprężenia w stali są mniejsze od granicy plastyczności badanego zbrojenia. Chcąc wyznaczyć obliczeniową wartość naprężeń w zbrojeniu w chwili wyczerpania nośności skorzystano z poniższych wykresów Rysunek 4 [1].

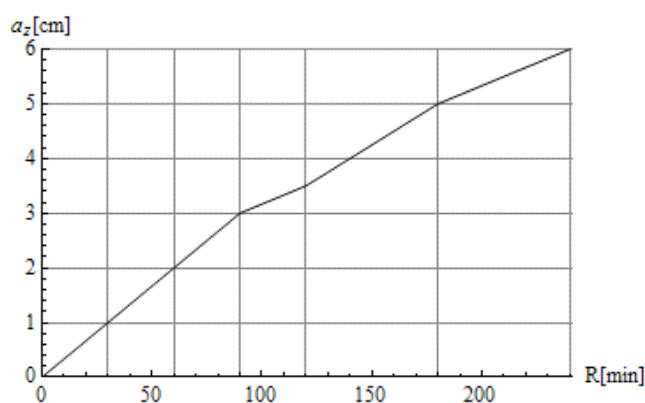


**Rysunek 4** Zależność dla różnych temperatur stali zbrojeniowej (Linie ciągłe od góry – 100/300/500/700°C, linie przerywane od góry – 200/400/600/800°C) [1]

Warto zaznaczyć, że z tab.1 określającej współczynnik redukcyjny  $k_{s\theta}$  oraz zależności  $\sigma(\varepsilon)$  można korzystać dla stali walcowanych na zimno, o odpowiedniej ciągliwości, która pozwala na osiągnięcie odkształceń nie mniejszych niż w temperaturach większych niż  $\theta \geq 200^\circ C$ .

## 6. REDUKCJA PRZEKROJU

W pracy [2] po przeprowadzeniu analizy numerycznej najczęściej stosowanych elementów zginanych żelbetowych zalecono arbitralne wartości  $a_z$  – położenie Izotermy 500 w płytach żelbetowych. Okazuje się, że dla płyt o grubości  $h \geq 15 \text{ cm}$  położenie Izotermy 500 jest właściwie niezależne od grubości badanego elementu (Rys. 5).



**Rysunek 5** Określenie położenie Izotermy 500; zależność  $\alpha_z(t)$  [2]

## 7. NOŚNOŚĆ PŁYT

Analizie obliczeniowej poddano najczęściej spotykane płyty stropowe o grubości powyżej 15 cm. Przyjęto wartości  $a = 2 \text{ cm}, 3 \text{ cm}, 4 \text{ cm}, 5 \text{ cm}$ , gdzie  $a$  jest odległością środka ciężkości zbrojenia od lica płyty.

## 8. WSPÓŁCZYNNIK REDUKCYJNY OBCIĄŻENIA OBLICZENIOWEGO

Ociążenie pożarem należy do wyjątkowych obciążeń konstrukcji. Do określenia wytrzymałości konstrukcji narażonych na działanie pożaru korzystamy ze stosunku obliczeniowego obciążenia w warunkach pożarowych do obliczeniowego obciążenia w warunkach zwykłych  $\eta_{fi}$ .

EC2 [6] zaleca przyjęcie  $\eta_{fi} = 0,7$  w sytuacji, gdy wartość współczynnika jest nieznana bądź trudna do określenia. Jest to oszacowanie po bezpiecznej stronie. Przyjęcie mniejszych wartości współczynników redukcyjnych może podnieść klasę nośności ogniowej projektowanego budynku. Mniejsze wartości zostały również uwzględnione w Tablicach 2.

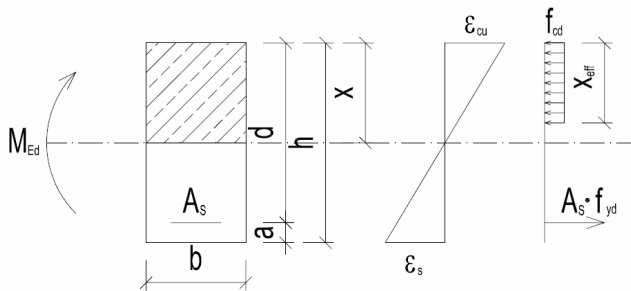
**Tabela 2** Nośności pożarowe

Nośności pożarowe dla $a = 2 \text{ cm}$						
$\eta_f$	maksymalne $\alpha$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	0,5	0,44	0	0	0	0
0,6	0,5	0,5	0	0	0	0
0,5	0,5	0,5	0,006	0	0	0
0,4	0,5	0,5	0,5	0	0	0
0,3	0,5	0,5	0,5	0,122	0	0

Nośności pożarowe dla $a = 3 \text{ cm}$						
$\eta_f$	maksymalne $\alpha$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	0,5	0,5	0,5	0,092	0	0
0,6	0,5	0,5	0,5	0,494	0	0
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,336	0
0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0

Nośności pożarowe dla $a = 4 \text{ cm}$						
$\eta_f$	maksymalne $\alpha$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,401	0
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Nośności pożarowe dla a = 5 cm						
$n_f$	maksymalne $\alpha$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,34
0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5



Rysunek 6 Siły w przekroju dla sytuacji normalnej

## 9. NOŚNOŚĆ PŁYTY W SYTUACJI NORMALNEJ

Nośność graniczną na zginanie obliczono według normy [5] przybliżając prostokątem wykres naprężeń w strefie ściskanej betonu. Równania równowagi sił i momentów (Rys. 6) przyjmują postać [3]:

$$bx_{eff} f_{cd} = A_s f_{yd} \quad (4)$$

$$M_{Rd} = x_{eff} f_{cd} (d - \frac{x_{eff}}{2}) \quad (5)$$

Po przejściu na wielkości bezwymiarowe otrzymujemy:

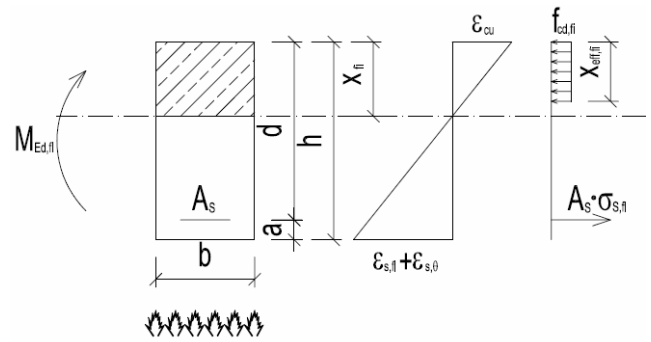
$$m_{Rd} = \alpha (1 - \frac{\alpha}{2}) \quad (5)$$

gdzie:

$$m_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{f_{cd} b d^2} \text{ – bezwymiarowa nośność przekroju na zginanie,}$$

$$\alpha = \xi_{eff} = \frac{x_{eff}}{d} = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}} \text{ – stopień zbrojenia [3].}$$

W dalszych rozważaniach założono, że  $m_{Ed} = m_{Rd}$ . Po zredukowaniu siły przez współczynnik  $\eta_{fi}$  otrzymujemy bezwymiarowe obciążenie w sytuacji pożarowej  $m_{Ed,fi} = \eta_{fi} m_{Ed}$ .



Rysunek 7 Siły w przekroju dla sytuacji pożarowej

## 10. NOŚNOŚĆ PŁYTY W SYTUACJI POŻAROWEJ

Analogicznie dla sytuacji pożarowej (Rys. 7):

$$bx_{eff,fi} f_{cd,fi} = A_s \sigma_{s,fi}; \quad \sigma_{s,fi} = p f_{yd,fi}; \quad (7)$$

$$f_{yd,fi} = k_{s,\theta} f_{yk}$$

$$M_{Rd,fi} = x_{eff,fi} f_{ck} (d - \frac{x_{eff,fi}}{2}) \quad (8)$$

Po przejściu na wielkości bezwymiarowe otrzymujemy:

$$m_{Rd,fi} = \alpha \gamma_s p k_{s,\theta} (1 - \frac{1}{2} \frac{\gamma_s}{\gamma_c} p k_{s,\theta}) \quad (9)$$

gdzie:

$$m_{Rd,fi} = \frac{M_{Rd,fi}}{f_{cd} b d^2} \text{ – bezwymiarowa nośność przekroju na zginanie w sytuacji pożarowej,}$$

$\sigma_{s,fi}$  – naprężenia w zbrojeniu w sytuacji pożarowej,

$p$  – stopień wykorzystania zbrojenia w sytuacji pożarowej,  $p \in (0,1)$ ,

$\gamma_c$  – współczynnik częściowy betonu w warunkach normalnych (wg EC2 = 1,4),

$\gamma_s$  – współczynnik częściowy stali w warunkach normalnych (wg EC2 = 1,15).

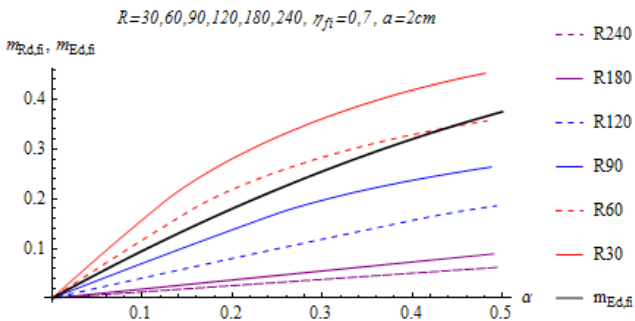
Do wyznaczenia  $p$  rozwiązano następujący układ równań:

Do wyznaczenia  $p$  rozwiązano następujący układ równań:

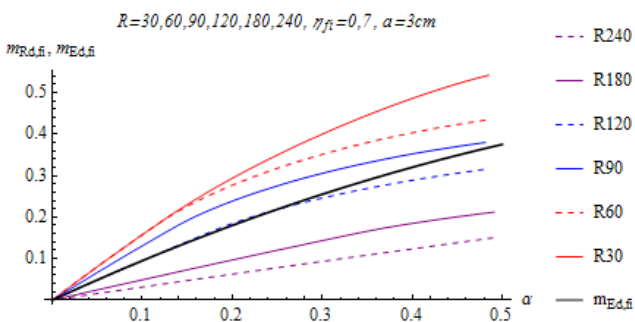
$$\begin{cases} \varepsilon_{s,fi} + \varepsilon_{s,\theta} = \frac{\varepsilon_{cu} (1 - \xi)}{\xi} \\ \sigma_{s,fi} = p f_{yd,fi} \\ \xi_{eff,fi} = \alpha \frac{\gamma_s}{\gamma_c} p k_{s,\theta} \\ \sigma_{s,fi} = f(\varepsilon_{s,fi} + \varepsilon_{s,\theta}) \end{cases} \quad (9)$$

## 11. WYNIKI ANALIZY

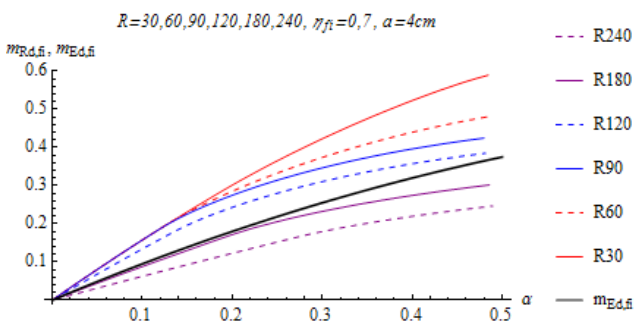
Po rozwiązaniu układu równań (10) otrzymano wykresy nośności (Rys. 8-11) dla odległości środka ciężkości zbrojenia do lica płyty  $a = 2$  cm, 3 cm, 4 cm i 5 cm. Na osi poziomej odłożone są bezwymiarowe stopnie zbrojenia, natomiast na pionowej bezwymiarowa nośność przekroju. Jeżeli wykres nośności pożarowej (R30, R60, R90, R120, R180, R240) jest nad wykresem obciążenia, oznacza to, że dany przekrój ma co najmniej taką nośność pożarową.



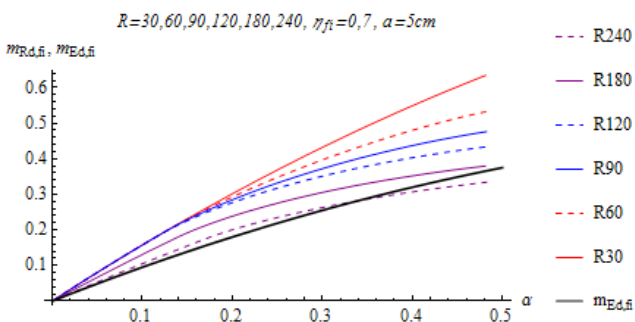
Rysunek 8 Nośności pożarowe dla  $a = 2$  cm



Rysunek 9 Nośności pożarowe dla  $a = 3$  cm



Rysunek 10 Nośności pożarowe dla  $a = 4$  cm



Rysunek 11 Nośności pożarowe dla  $a = 5$  cm

Z wykresów wynika, że przekroje w pełni wytężone o niższych stopniach zbrojenia należą do wyższej klasy nośności pożarowej. Aby ułatwić korzystanie z wykresów sporządzono tabele (Tab. 2), w których pokazano dla jakich maksymalnych stopni zbrojenia płyta należy do danej klasy nośności pożarowej. Ze względu na fakt, iż przyjęcie  $\eta_{fi} = 0,7$  jest bardzo restrykcyjne, rozróznilo jeszcze tę nośność dla różnych wartości tego współczynnika.

Dla przekrojów niewytężonych w 100% można przeliczyć nośność pożarową płyty korzystając ze wzoru  $M_{Rd,fi} = m_{Rd,fi} f_{cd} b d^2$  ( $m_{Rd,fi}$  odczytując z wykresów) i przyrównać do obciążenia w sytuacji pożarowej równego  $M_{Ed,fi} = \eta_{fi} M_{Ed}$ . W ten sposób możliwe jest podniesienie klasy odporności ogniowej płyty przez zwiększenie stopnia zbrojenia bez modyfikacji gabarytów elementu.

## 12. WNIOSKI

Z pracy wynika, że nośność pożarowa rozważanych płyt obliczona metodą Izotermy 500 pokrywa się w dużym stopniu z metodą tabelaryczną podaną w EC2 [6]. Opracowano dokładniejsze tabele zawierające więcej istotnych parametrów. Na ich podstawie można uwzględnić stopień zbrojenia -  $\alpha$ , współczynnik redukcyjny obciążenia -  $\eta_{fi}$  i odległość środka ciężkości zbrojenia od ogrzewanego lica płyty -  $a$ .

W dalszej pracy autorzy planują zbadać strefę przypodporową, tj. przebiecie oraz nośność na zginanie. Stosując tę samą metodę należy również zbadać inne elementy konstrukcji żelbetowej, takie jak belki oraz słupy.



## LITERATURA

- [1] Abramowicz M., Kowalski R., Stress-strain relationship of reinforcing steel. Subjected to Tension and High Temperature, Application of Structural Fire Design, Prague, Czech Republic, 19-20 February 2009.
- [2] Kowalski R., Obliczeniowa ocena nośności zginanych elementów żelbetowych w sytuacji pożaru, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Tomy Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo, nr 149/2008.
- [3] Knauff M., Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.
- [4] Hertz K., A Survey of a System of Methods for Fire Safety Design of Traditional Concrete Constructions, Structures in fire – proceeding of first international workshop, 2000, s. 283-292.
- [5] PN-EN 1992-1-1-2008: Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [6] PN-EN 1992-1-2-2008: Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-2: Reguły ogólne-Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.