

Zoja BEDNAREK¹
Tomasz DRZYMAŁA²

ZAGROŻENIE WYSTĘPOWANIA EKSPLOZYJNEGO ODPRYSKIWANIA BETONU W CZASIE POŻARU W TUNELACH KOMUNIKACYJNYCH

W artykule przedstawiono przyczyny i skutki eksplozyjnego odpryskiwania betonu, które może mieć miejsce w tunelach komunikacyjnych w czasie pożaru. Zjawisko to stwarza poważne zagrożenie dla ekip ratowniczych oraz w znacznym stopniu obniża wytrzymałość i bezpieczeństwo konstrukcji. Szczególną uwagę zwrócono na zastosowanie do betonu dodatku w postaci włókien polipropylenowych jako antidotum na eksplozyjne odpryskiwanie betonu narażonego na działanie wysokich temperatur.

THREAT OF CONCRETE THERMAL SPALLING DURING FIRES IN TRAFFIC TUNNELS

The article discusses causes and effects of concrete thermal spalling, which may occur in traffic tunnels during a fire. This phenomenon constitutes a serious threat to emergency teams and it significantly reduces strength and safety of the construction. The article details in particular use of polypropylene fibres as an additive preventing thermal spalling of concrete exposed to high temperatures.

1. WPROWADZENIE

Tunele komunikacyjne są domeną państw wysoko rozwiniętych, najczęściej z górzystym ukształtowaniem terenu. W Polsce poza tunelem metra warszawskiego takie obiekty dotychczas nie występowały na szeroką skalę, jednak ostatnimi czasy, w większych polskich miastach i aglomeracjach przemysłowych tunele są coraz częściej wykorzystywane w celu reorganizacji i usprawnienia ruchu. Oprócz niewątpliwych korzyści dla transportu drogowego, podziemne obiekty komunikacyjne stwarzają poważne problemy wynikające z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa dla ich użytkowników, w tym też bezpieczeństwa pożarowego. Katastrofy w tunelach zwłaszcza gdy towarzyszy im zjawisko pożaru są trudne do opanowania w krótkim czasie przez służby ratownicze.

¹The Main School of Fire Service, Faculty of Fire Safety, POLAND, Warsaw 01-629, Slowackiego 52/54. Phone: +48 22 561-76-54, Fax: +48 22 833-07-24, E-mail: zoja.bednarek@gmail.com

²The Main School of Fire Service, Faculty of Fire Safety, POLAND, Warsaw 01-629, Slowackiego 52/54. Phone: +48 22 561-76-54, Fax: +48 22 833-07-24, E-mail: tomekdrzymala@wp.pl

Duże zadymienie i wysoka temperatura stwarzają śmiertelne zagrożenie dla osób przebywających w tym czasie w tunelu. Bezpieczeństwo pożarowe tuneli komunikacyjnych w sposób kompleksowy i usystematyzowany jest tematem prac uczonych i specjalistów na całym świecie, w zasadzie od 1990 roku. Podejmowane programy badawcze nad rozwiązaniem tego typu problemów sprawiają, że każdy nowo wybudowany tunel ma coraz lepsze zabezpieczenia przeciwpożarowe, co gwarantuje również lepsze bezpieczeństwo jego użytkownikom.

Szereg pożarów, i z tym związanych poważnych katastrof w tunelach komunikacyjnych (w których konstrukcja wykonana jest na ogół z żelbetu) zwróciło uwagę naukowców oraz ośrodków naukowo – badawczych na niebezpieczeństwo związane ze zjawiskiem eksplozyjnego odpryskiwania betonu (*ang. spalling*) w czasie pożarów, rozszerzając zakres badań.

2. EFEKTY ODDZIAŁYWANIA TERMICZNEGO NA KONSTRUKCJĘ TUNELU

W tunelach komunikacyjnych odnotowuje się wiele wypadków, których następstwem jest pożar. Czas trwania pożarów, występujące temperatury oraz skutki mierzone liczbą ofiar śmiertelnych, stratami ekonomicznymi i zakresem zniszczeń konstrukcji tuneli, były znacznie większe niż można było spodziewać się, biorąc pod uwagę dotychczasowe doświadczenia, metody obliczeniowe i obowiązujące normy. Dzieje się tak z powodu kilku czynników, m.in. trudnych warunków ewakuacji, problemów z wentylacją czy wynikających z samej geometrii i kształtu tuneli. W szczególności, w strefie bezpośredniego oddziaływania ognia, zaobserwowano częste występowanie zjawiska termicznego odpryskiwania betonu („spallingu”), które polega na gwałtownym odrywaniu się fragmentów wierzchniej warstwy konstrukcji betonowej powodującym duże zagrożenie dla ratowników i obniżającym wytrzymałość konstrukcji. Na wystąpienie tego niepożądanego zjawiska narażone są szczególnie betony wysokiej wytrzymałości BWW (*ang. HSC high – strength concrete*) [16, 33], które charakteryzują się bardzo niskimi wartościami porowatości i przepuszczalności właściwej. Dlatego też w niektórych państwach, np. w USA, zastosowanie tego typu betonu jest bardzo ograniczone.

Po trwającym ok. 10 godzin pożarze w „Eurotunelu” pod kanałem La Manche (rys. 1), gdzie zastosowano BWW, zaobserwowano ubytki ok. 20 – 30 cm warstwy na długości ok. 500 m, a w niektórych miejscach nawet całkowity brak 50 cm warstwy betonu [16, 35, 36]. Zjawisko „spallingu” miało tam tak gwałtowny przebieg, że strażacy musieli osłaniać się przed odpryskującymi z dużą prędkością odłamkami betonu, co bardzo utrudniało akcję ratowniczą [16].



Rys. 1. Pożary w tunelach: skutki pożaru w „Eurotunelu” i betonowa obudowa tunelu po wystąpieniu „spallingu” [16]

Odpryskiwanie betonu zmniejsza otulinę prętów zbrojenia co powoduje narażenie konstrukcji na utratę nośności. Zjawisko termicznego odpryskiwania betonu było np. bezpośrednią przyczyną zawalenia się fragmentu stropu w Tunelu Gottharda w październiku 2001 roku. Wysoka temperatura powoduje również obniżenie parametrów wytrzymałościowych stali i betonu [2, 37].

Częstotliwość i skutki pożarów w tunelach (tablica 1) spowodowały, że Unia Europejska przeznaczyła znaczne środki na realizację szeregu projektów badawczych, które miały na celu wyjaśnienie zachowania się betonu w wysokich temperaturach oraz betonowej obudowy tuneli w warunkach pożarowych.

W Stanach Zjednoczonych w instytucie badawczym NIST (*ang. National Institute of Standards and Technology*) prowadzone były badania [33], mające na celu pełniejsze zrozumienie efektów wystawienia betonów o wysokiej wytrzymałości na działanie wysokich temperatur, a także określenie wpływu poszczególnych parametrów betonu na jego podatność na „spalling”.

Tab. 1 Dane dotyczące ważniejszych pożarów z ofiarami śmiertelnymi w tunelach w latach 1983 – 2002 [16]

Rok	Nazwa tunelu (długość)	Lokalizacja (kraj)	Przyczyna pożaru	Liczba ofiar śmiertelnych (rannych)	Liczba zniszczonych pojazdów	Zniszczenia konstrukcji tunelu
1983	Pecorila Galleria (662 m)	Genes Savone (Włochy)	kolizja pojazdów	9(22)	10	nieznaczące
1986	L'Arme (1 105 m)	Nicea (Francja)	kolizja pojazdów	3(5)	5	zniszczenia urządzeń
1987	Gumefens (343 m)	Berno (Szwajcaria)	kolizja pojazdów	2	3	nieznaczące
1993	Serra Ripoli (442 m)	Bolonia (Włochy)	kolizja pojazdów	4(4)	16	nieznaczące
1994	Hugenot (3 914 m)	(Rep. Płd. Afryki)	awaria instalacji elektrycznej	1(28)	1	poważne
1995	Pfander (6 719 m)	(Austria)	kolizja pojazdów	3(4)	3	poważne
1996	Isola delle Femmine (148 m)	Palermo (Włochy)	kolizja pojazdów	5(20)	20	poważne
1999	Mont Blanc (11 600 m)	(Francja – Włochy)	wyciek oleju - kolizja pojazdów	39	33 + 2 wozy strażackie	bardzo poważne
1999	Tauern (6 401 m)	Salzburg (Austria)	kolizja pojazdów	12(49)	36	bardzo poważne
2001	Gleinalm (8 320 m)	Graz (Austria)	czołowe zderzenie pojazdów	5(4)	brak danych	brak danych
2001	St. Gotthard (16 918 m)	(Szwajcaria)	czołowe zderzenie pojazdów	11	brak danych	bardzo poważne
2001	Guldborgsund (460 m)	(Dania)	kolizja pojazdów	5(6)	brak danych	bardzo poważne

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE I SYMULACJE KOMPUTEROWE ZACHOWANIA SIĘ KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH PODCZAS POŻARU

Odporność konstrukcji betonowych na działanie wysokich temperatur ocenia się obecnie najczęściej na podstawie wyników badań eksperymentalnych lub symulacji komputerowych. Wykorzystuje się do tego celu pewne ustalone przebiegi czasowe zmian temperatury (krzywe „temperatura – czas”), które mają odpowiadać warunkom występującym podczas pożaru. Podczas badań zachowania się konstrukcji w warunkach pożarowych najczęściej stosuje się następujące przebiegi czasowe zmian temperatury [1]:

- a) **krzywa normowa** – opisuje zmiany temperatury podczas standardowego pożaru w pomieszczeniach mieszkalnych; znajduje zastosowanie przy określaniu odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych metodą eksperymentalną,
- b) **krzywa węglowodorowa** – opisuje zmiany temperatury podczas pożaru substancji ropopochodnych,
- c) **krzywa zewnętrzna** – stosowana w przypadku nienośnych przegród zewnętrznych,
- d) **krzywa pełzająca** – stosowana w przypadku dużego obciążenia ogniowego i małej „podaży” tlenu,
- e) **krzywe parametryczne** – stosowane dla pożarów w konkretnych pomieszczeniach o znanych parametrach,
- f) **krzywa tunelowa RABT/ZTY** – stosowana w Niemczech krzywa, która opisuje zmiany temperatury podczas 30 – 90 minutowego pożaru w tunelu oraz 110-minutowej fazy gaszenia (chłodzenia konstrukcji),
- g) **krzywa tunelowa RWS (Rijkwaterstaat)** – stosowana w Holandii krzywa, która opisuje zmiany temperatury podczas pożaru w tunelu.

Najbardziej znana jest krzywa normowa (standardowa), mająca zastosowanie w badaniach ogniowych elementów budowlanych, wyrażająca się wzorem (1). Krzywa normowa odzwierciedla rozwój temperatury w pożarach celulozowych, w których paliwem jest głównie drewno i materiały drewnopochodne.

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

gdzie:

T - temperatura [°C],

t - czas [min].

Ponieważ w niektórych przypadkach istnieje konieczność analizowania konstrukcji w innych sytuacjach wyjątkowych, dopuszcza się stosowanie innych krzywych „temperatura – czas”. Do krzywych tych zaliczamy:

Krzywa węglowodorowa – stosowana jest podczas analizy pożarów, w których głównym paliwem jest ropa naftowa lub jej pochodne, czyli magazynów olejów, benzyn, wież wiertniczych. Pożary węglowodorowe symulowane są przez krzywą węglowodorową, której bieg w czasie określa wzór:

$$T = 20 + 1080[1 - 0,325 \exp(-0,167t) - 0,675 \exp(-2,5t)] \quad (2)$$

T , t – jak we wzorze (1).

Krzywa zewnętrzna – opisuje pożar mniej intensywny od pożaru reprezentowanego przez krzywą „normową”. W przypadku nienośnych przegród zewnętrznych (np. ścian osłonowych) wzrost temperatury po stronie nienagrzewanej jest niższy na skutek chłodzenia powietrzem zewnętrznym. Takie przypadki przez okres pierwszych 10 minut symulowane są przez krzywą zewnętrzną, której przebieg w czasie jest określany wzorem:

$$T = 20 + 660[1 - 0,687 \exp(-0,32t) - 0,313 \exp(-3,8t)] \quad (3)$$

T , t – jak we wzorze (1).

Krzywa pełzająca – w przypadkach szczególnych, gdy pożar początkowo rozwija się wolno (np. przy dużym obciążeniu ogniowym i małej podaży tlenu). Pożar taki może wskutek zmiany warunków przekształcić się w pożar rozwinięty. Pożar taki można opisać wzorami:

$$\text{(w zakresie } 0 < t \leq 21 \text{ minut): } T = 20 + 154 \cdot t^{0,25} \quad (4)$$

$$\text{(dla } t > 21 \text{): } T = 345 \cdot \log(8 \cdot (t - 20) + 1) + 20 \quad (5)$$

T , t – jak we wzorze (1).

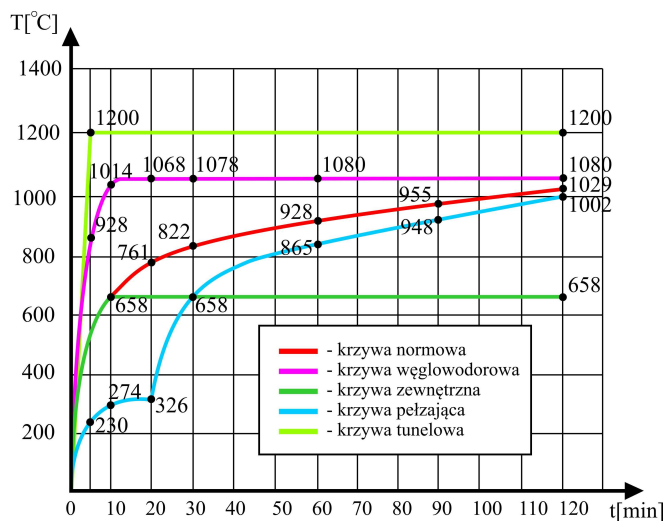
Krzywe parametryczne – dają możliwość sporządzenia indywidualnych krzywych dla pożarów w konkretnych pomieszczeniach o znanych parametrach, którymi są:

- gęstość obciążenia ogniowego na powierzchni przegród otaczających pomieszczenie,
- wentylacja pożarowa wyrażająca się wskaźnikiem otworów,
- pojemność cieplna przegród,
- geometria pomieszczenia.

Szczególą grupę pożarów stanowią pożary w tunelach komunikacyjnych. Wobec znikomego odprowadzania ciepła na zewnątrz, temperatury w pożarach tunelowych osiągają najwyższe wartości w krótkim czasie. Pożary symulowane przez krzywe tunelowe przedstawiają:

- niemiecka RABT, według której są badane w Niemczech budowle podziemne, a zwłaszcza tunele komunikacyjne,
- holenderska Rijkswaterstaat, według której są badane w Holandii tunele komunikacyjne, a która osiąga najwyższe temperatury ze wszystkich krzywych modelowych.

Przebiegi omówionych krzywych „temperatura – czas” przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Porównanie przebiegu zmian temperatury w czasie dla różnych „krzywych pożarowych” [1, 38]

Przyjęte scenariusze zmian temperatury, tj. szybkości jej przyrostu oraz jej wartości maksymalne, różnią się znacznie między sobą. Może to mieć wpływ na ocenę odporności ogniowej konstrukcji betonowych, dla której szybkość wzrostu temperatury ma istotne

znaczenie [9 – 12]. Badania ogniowe zachowania się konstrukcji betonowych podczas pożaru prowadzi się najczęściej przy użyciu krzywej standardowej, na podstawie której określa się rozkłady „temperatura – czas” wewnątrz masy betonu ze względu na trudności techniczne osiągnięcia szybkiego wzrostu temperatury [9, 10].

Ze względu na wysokie koszty badań laboratoryjnych i poligonowych, analizy zachowania się konstrukcji poddanych oddziaływaniu wysokich temperatur prowadzi się coraz częściej przy zastosowaniu symulacji komputerowych wykonywanych przy pomocy sprawdzonych programów komputerowych. Jednym z nich jest program HITECOSP (ang. *High Temperature Concrete Spalling*) [16]. Zaletą symulacji numerycznych jest możliwość stosunkowo łatwego i szybkiego, a przede wszystkim taniego, przeanalizowania wpływu różnych rozwiązań materiałowo – konstrukcyjnych dla różnych „scenariuszy” zmian temperatury podczas pożaru. Przy pomocy programu HITECOSP można określić podstawowe dane o wilgoci (jej zawartość oraz zmiany w czasie), ciśnienie w porach, termiczną, chemiczną i fizyczną reakcję betonowych elementów na proces nagrzewania. Na podstawie tego można prognozować ryzyko wystąpienia zjawiska eksplozyjnego odpryskiwania.

Zastosowanie modelu sieci neuronowej ma wielkie perspektywy na przyszłość dla budownictwa podziemnego, choć - niestety - nie uwzględnia on oddziaływania dodatków np. w postaci włókien polipropylenowych na wytrzymałość betonu oraz w dostatecznym stopniu zagrożenia eksplozyjnego odpryskiwania.

4. BADANIA ZWIĄZANE Z WYJAŚNIENIEM PRZYCZYNY WYSTĘPOWANIA „SPALLINGU”

Ze względu na bardzo duże znaczenie praktyczne, wielu uczonych na świecie m.in. Anderberg [3, 31], Bažant [4, 35], Hertz [22 – 24], Consolazio [31], Diederichs i Schneider [13], Kalifa [25, 26], Khoury [27 – 29], Phan [31 – 34] podjęło badania teoretyczne i eksperymentalne, mające na celu szersze poznanie i wyjaśnienie przyczyn zjawiska „spallingu”. Na podstawie ich wyników stworzono kilka teorii, nie uzyskano jednak jednego, spójnego wyjaśnienia jego przyczyn. Problem tkwi między innymi w stochastycznej naturze zjawiska. W wyniku tego trudno jest jednoznacznie określić, kiedy „spalling” wystąpi. Aktualnie istnieją dwie główne teorie dotyczące mechanizmu jego powstawania [16, 33]. W myśl pierwszej z nich (uznawanej głównie przez naukowców europejskich) podstawową przyczyną „spallingu” jest wysokie ciśnienie gazu powstałe w wyniku odparowywania wilgoci w przypowierzchniowej warstwie konstrukcji betonowych, przy równoczesnym spadku własności wytrzymałościowych tego materiału w wysokiej temperaturze, co powoduje „złuszczenie się” kolejnych warstw materiału, które czasem ma charakter eksplozyjny. Druga teoria (rozwijana głównie przez naukowców amerykańskich) podstawowej przyczyny „spallingu” upatruje w wysokich naprężeniach rozciągających powstałych w betonie, które mogą przekroczyć wytrzymałość na rozciąganie betonu, obniżaną wskutek wysokiej temperatury. W efekcie, nagromadzona energia potencjalna odkształcenia, może zostać uwolniona, często w gwałtowny sposób, gdy przekroczy ona wartość energii pęknięcia materiału. Obydwie przedstawione teorie zawierają w sobie istotne elementy, choć rzeczywisty przebieg tego zjawiska jest na pewno bardziej złożony niż przewiduje każda z nich.

Z dyskusji przeprowadzonej przez K. Hertzę nad zjawiskiem termicznego odpryskiwania betonu wynika [22, 23], że na to zjawisko ma wpływ szereg czynników, lecz wilgoć jest

najważniejszym z nich. Można wyciągnąć wniosek, że konstrukcje z tradycyjnego betonu (bez dodatku mikrokrzemionki) o zawartości wilgoci mniejszej od 3% nie będą odpryskiwać, i że tradycyjny beton o zawartości wilgoci 3 – 4% ma ograniczone ryzyko odpryskiwania.

W tunelach komunikacyjnych, pomieszczeniach piwnicznych oraz innych nie ogrzewanych pomieszczeniach, cechą charakterystyczną dla betonu jest zawartość stosunkowo dużej ilości wilgoci. W czasie pożaru w takich obiektach odnotowuje się wystąpienie zjawiska termicznego odpryskiwania [17 – 19]. Jest to niebezpieczne zjawisko zagrażające życiu ludzi przebywających w czasie pożaru w miejscach narażonych na „spalling” oraz dla ratowników prowadzących działania ratowniczo – gaśnicze [15, 16].

5. METODY PRZECIWDZIAŁANIA „SPALLINGOWY” ORAZ BARIERY OCHRONNE DLA TUNELI

Najbardziej efektywne metody biernej ochrony konstrukcji i jednocześnie zmniejszające ryzyko wystąpienia termicznego odpryskiwania przedstawiono poniżej [27]:

- użycie bariery termicznej (izolacje ogniochronne – zabezpieczenie powierzchni płytami lub warstwą betonu natryskowego z włóknami lub bez włókien polipropylenowych PP),
- zastosowanie włókien polipropylenowych do mieszanki betonowej,
- dodanie środka napowietrzającego do mieszanki betonowej,
- projektowanie elementów o możliwie cienkich przekrojach,
- stosowanie kruszyw o niskiej rozszerzalności cieplnej.

Zastosowanie bariery ochronnej wykonanej z ognioodpornych materiałów do zabezpieczenia ścian, sufitów, przepustów i tras kablowych oraz szczelin dylatacyjnych powoduje, że szkody jakie mogą powstać w wyniku pożaru mogą zostać maksymalnie zredukowane, a naprawa uszkodzonego odcinka tunelu w wyniku oddziaływania wysokich temperatur ograniczyć się może do wymiany okładzin ognioochronnych.

Poszukiwanie antidotum na to bardzo niebezpieczne zjawisko doprowadziło do wniosku, że zwiększenie porowatości betonu, doprowadzi w czasie pożaru do złagodzenia tego zagrożenia. Jedną z metod, budzącą duże zainteresowanie naukowe i praktyczne, jest stosowanie dodatku do betonu w postaci włókien polipropylenowych najczęściej w ilości 0,1 – 0,2% objętości betonu [22, 26, 30]. Badania prowadzone na większych fragmentach ścian tuneli potwierdzają, że dodatek włókien polipropylenowych do betonu ogranicza zjawisko „spallingu”.

6. BADANIA ZWIĄZANE ZE STOSOWANIEM DODATKU DO BETONU W POSTACI WŁÓKIEN POLIPROPYLENOWYCH (PP)

W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia odkryto pozytywny wpływ dodatku włókien polipropylenowych (PP) do mieszanki betonowej w zakresie ograniczenia ryzyka wystąpienia zjawiska termicznego odpryskiwania betonu. Wśród dostępnej literatury technicznej, odnoszącej się do tematu badań daje się zauważyć pewna luka dotycząca zachowania się fibrobetonów zwykłych oraz wysokowartościowych z włóknami polipropylenowymi w wysokich temperaturach występujących w czasie pożaru. Istnieje niewiele publikacji opisujących wpływ dodatku do betonu zwykłego i wysokowartościowego włókien polipropylenowych (PP) na zmiany parametrów wytrzymałościowych takich jak: moduł sprężystości, wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury. Ponadto w literaturze ujawniono niewiele informacji na temat resztkowej wytrzymałości na rozciąganie,

po przekroczeniu której występuje oderwanie warstw betonu oraz eksplozyjne zniszczenie. Istnieje zatem potrzeba kontynuowania badań.

Badania wpływu podwyższonych temperatur na podstawowe parametry wytrzymałościowe betonu bez oraz z dodatkiem włókien polipropylenowych prowadzono również w Polsce, m.in. w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie [5 – 8, 14] oraz na Politechnice Krakowskiej [20, 21].

W opublikowanych badaniach nie zaobserwowano wyraźnego wpływu dodatku włókien polipropylenowych (PP) na wytrzymałość resztkową na ściskanie i moduł sprężystości, czyli wytrzymałość badaną po wystudzeniu próbek. Autorzy artykułu na podstawie badań twierdzą, że dodanie włókien w ilości $1,8 \text{ kg/m}^3$ jest korzystne z punktu widzenia wytrzymałości na rozciąganie betonu w temperaturach pożarowych. Prawdopodobnie jest to związane z ograniczeniem powstawania i wzrostu mikropęknięć na skutek dodania włókien PP. Biorąc pod uwagę, że oderwanie elementów betonu od konstrukcji, powodujące termiczne odpryskiwanie betonu („spalling”), następuje w momencie przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie betonu, ten fakt należy również brać pod uwagę analizując wpływ dodatku włókien PP na zmniejszenie zagrożenia odpryskiwaniem [14].

7. WNIOSKI

1. Straty wynikające z pożaru w tunelu wiążą się bezpośrednio z dużymi kosztami związanymi z odbudową oraz pośrednio z długotrwałym wyłączeniem tunelu z eksploatacji. Jednym ze sposobów ograniczania strat jest odpowiednie zabezpieczenie przeciwpożarowe zwiększające odporność ogniom konstrukcji oraz zapewniające sprawne działanie urządzeń i instalacji. Niezawodne działanie urządzeń i instalacji takich jak: wykrywania pożaru, sygnalizacji, oświetlenia, monitoringu i nadzoru, wentylacji i oddymiania, potrzebne jest do prowadzenia sprawnej i skutecznej akcji ratowniczo – gaśniczej.
2. Po analizie dostępnej literatury należy stwierdzić, że prawie wszyscy badacze pozytywnie oceniają dodatek włókien polipropylenowych jako antidotum przeciwko termicznemu odpryskiwaniu betonu. Niektórzy, m.in. Kalifa, wskazują, że już przy dozowaniu $0,9 \text{ kg/m}^3$ obserwuje się pozytywny wynik. Dodatek włókien polipropylenowych w ilości do $2,0 \text{ kg/m}^3$ może znacząco poprawić resztkowe mechaniczne właściwości betonów obniżone na skutek wzrostu temperatury.
3. Dalsze badania poszerzające wiedzę o zjawisku eksplozyjnego odpryskiwania betonu pozwalające na wyjaśnienie jego przyczyn oraz metod przeciwdziałania powinny być kontynuowane.
4. Wymagania techniczno – budowlane w zakresie bezpieczeństwa pożarowego tuneli powinny uwzględniać specyfikę tych obiektów również na wypadek prowadzenia akcji ratowniczo – gaśniczych przy różnych scenariuszach zdarzeń oraz być rozszerzone o wytyczne odnośnie postępowania przy ocenie zniszczenia lub uszkodzenia konstrukcji tunelu.

8. LITERATURA

- [1] Abramowicz M., Adamski R. G.: „*Bezpieczeństwo pożarowe budynków*”, Część I, Wydawnictwo SGSP, Warszawa 2002.
- [2] Abramowicz M., Kosiorek M., Łukomski M.: „*Bezpieczeństwo pożarowe tuneli*”, Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Krynica 2004”, Warszawa – Krynica, 12 – 17 września 2004 r., str. 11- 20.
- [3] Anderberg Y.: „*Spalling Phenomena of HPC and OC*”, NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete 1, February 13 - 14, Gaithersburg 1997.
- [4] Bažant Z. P., Kaplan M. F.: „*Concrete at High Temperatures*”, Material Properties and Mathematical Models, Longman, Harlow, 1996.
- [5] Bednarek Z., Drzymała T.: „*Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu*”, Zeszyty Naukowe SGSP nr 36, Warszawa 2008.
- [6] Bednarek Z., Drzymała T.: „*Wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w warunkach termicznych pożarów*”, Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli, Warszawa 18 – 19 listopada 2008.
- [7] Bednarek Z., Krzywobłódzka – Laurów R., Drzymała T.: „*Effect of high temperature on the structure phase composition and strength of concrete*”, Zeszyty Naukowe SGSP nr 37, Warszawa 2009.
- [8] Bednarek Z., Drzymała T.: „*Influence of high temperature and type of polypropylene fibres on compressive strength of reinforced concrete*”, International Symposium Fire Protection, Ostrava 2009.
- [9] Bednarek Z.: „*Studium wpływu nieustalonych warunków termicznych na stosowane przy ocenie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji parametry wytrzymałościowe stali budowlanych*”, Zeszyty Naukowe SGSP, nr 1 (10), Warszawa 1992.
- [10] Bednarek Z.: „*Studium wpływu nieustalonych warunków termicznych na stosowane przy ocenie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji parametry wytrzymałościowe stali budowlanych*” – monografia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1996.
- [11] Bednarek Z.: „*Wybrane zagadnienia z wytrzymałości konstrukcji żelbetowych i betonowych w podwyższonych temperaturach*”, Zeszyty Naukowe WOSP nr 2/1978.
- [12] Bednarek Z.: „*Wlianie rosta temperatury na procnostnyje charakteristiki stali primienijemyje pri ocenke biezopasnoti żelezobietonnych konstrukcji – monografia*”. Oficyna Wydawnicza „Technika”, Vilnius 1996.
- [13] Diederichs U., Schneider U.: „*High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete*”, Proceedings of Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete, HAB Weimar. Germany, str. 219 – 235.
- [14] Drzymała T.: „*Wpływ temperatur pożarowych na wytrzymałość fibrobetonu z włóknami polipropylenowymi*”, Praca doktorska, Biblioteka Politechniki Lubelskiej, Lublin 2010.
- [15] Erdakov P., Khokhryachkin D.: „*Impact of fire on the stability of tunnels*”, Master's Thesis, Luleå University of Technology 2005.
- [16] Gawin D., Pasavento F., Majorana C. E., Schrefler B. A.: „*Modelling of degradation process of concrete structures at high temperature with application*”

- to tunnel fires*”, XXI Konferencja Naukowo – Techniczna „Awaryje Budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje 20 – 23 maja 2003.
- [17] Gawin D., Witek A., Pasavento F., Schrefler B.A.: „*Efficacy of various methods used for protection of concrete structures against thermal spalling in fire conditions*”, V Międzynarodowa Konferencja, “Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli”, Warszawa Miedzeszyn, 14 – 16 listopada 2005.
- [18] Gawin D., Witek A., Pasavento F.: „*O ochronie betonowej obudowy tunelu przed zniszczeniem w warunkach pożarowych – wyniki projektu UPTUN*”, Inżynieria i Budownictwo nr 11/2006.
- [19] Gawin D., Pasavento F., Majorana C. E., Schrefler B. A.: „*Modelowanie procesu degradacji betonu w wysokich temperaturach*”, Inżynieria i Budownictwo 4/2003.
- [20] Hager I., Tracz T.: „*Wpływ wysokiej temperatury na wybrane właściwości betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych*”, Cement – Wapno – Beton, nr 1/2009, str. 3 – 10.
- [21] Hager I., Pimienta P.: „*Wpływ dodatku włókien polipropylenowych na właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych, poddanych działaniu wysokiej temperatury*”, materiały IV Konferencji Naukowo – Technicznej, MATBUD, Politechnika Krakowska, Kraków, 25 – 27 czerwca 2003, str. 202 – 210.
- [22] Hertz K.: „*Heat – induced explosion of dense concretes*”, Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report No 166, 1998.
- [23] Hertz K.: „*Limits of Spalling of Fire Exposed Concrete*”, Fire Safety Journal, vol. 38 (2003), str. 103 – 116.
- [24] Hertz K. D.: „*Concrete strength for fire safety design*”, Magazine of Concrete Research 8/2005.
- [25] Kalifa P., Menneteau F. D., Ouenard D.: „*Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*”, Cem. and Conc. Res., 30 (2000) str. 1915 – 1927.
- [26] Kalifa P., Chene G., Galle C.: „*High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure*”, Cem. Concr. Res. 31 (2001) str. 1487 – 1499.
- [27] Khoury G. A.: „*Effect of Heat on Concrete – spalling*”, Materiały kursu „Effect of Heat on Concrete” CISM, Roma, June 9 – 13, 2003.
- [28] Khoury G. A.: „*Design of concrete for better performance in fire*”, IMechE 1992, C438/042, str. 121 – 127.
- [29] Khoury G. A.: „*Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria*”, Magazine of Concrete Research, (2008), 60, No. 3, April, str. 189 – 204.
- [30] Nishida A., Yamazaki N., Inoue H., Schneider U., Diederichs U.: „*Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance*”, Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading, vol. 2, 1995.
- [31] Phan L. T., Carino N. J., Duthinh D., Garboczi E.: „*Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete*”, NIST. Gaithersburg, February 13 – 14, 1997.
- [32] Phan L. T., Lawson J. R., Davis F. L.: „*Heating, Spalling Characteristics and Residual Properties of High Performance Concrete*”, Fifteenth meeting of the

- UJNR panel on fire research and safety, vol. 2, report NISTIR 6588, March 1 – 7, 2000.
- [33] Phan L. T., Carino N.J.: „*Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures*”, NISTIR 6725, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, March 2001.
- [34] Phan L. T.: „*High - Strength Concrete at High Temperature – An Overview, Utilization of High Strength Performance Concrete*”, 6th International Symposium Proceedings, vol. 1, June 2002.
- [35] Uim F. J., Coussy O., Bažant Z. T.: The Chunnel Fire. I.: „*Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete*”, Journal of Eng. Mech. ASCE 125, March 1999, str. 272 – 282.
- [36] Uim F. J., Acker P., Levy M.: „*The Chunnel Fire. II: Analysis of Concrete Damage*”, Journal of Eng. Mech. ASCE 3 25, March 1999, str. 283 – 289.
- [37] Vollmer M.: „*Techniczna ochrona przeciwpożarowa w tunelach komunikacyjnych*”, V Międzynarodowa Konferencja „Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli”, Warszawa – Miedzeszyn, 14 – 16 listopada 2005 r., str. 269 – 276.
- [38] PN-EN 1991-1-2: 2004. „*Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru*”.