

mgr inż. Katarzyna Mróz, prof. Izabela Hager

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych

Przyczyny i mechanizm powstawania odprysków betonu pod wpływem wysokiej temperatury wywołanej pożarem

Causes and mechanism of concrete spalling under high temperature caused by fire

1. Wprowadzenie

Beton jest najpowszechniej stosowanym konstrukcyjnym materiałem budowlanym. Długa historia jego rozwoju, sięgająca czasów przed naszą erą, to historia ciągłych zmian jego składu, w celu poprawy właściwości fizycznych, jak i zapewnienia większej trwałości. Ta ostatnia właściwość jest najtrudniejsza do osiągnięcia, jeżeli weźmiemy pod uwagę budowle rzymskie, na przykład akwedukt w Nimes, który został zbudowany w 47 roku naszej ery. Jako spoiwo zastosowano w jego budowie mieszaninę wapna z popiołami wulkanicznymi. Obserwowana w ostatnich dekadach tendencja do wznoszenia coraz bardziej wymagających konstrukcji budynków wysokościowych, mostów, tuneli, elektrowni jądrowych czy elementów sprężonych, doprowadziła do rozwoju nowych rodzajów betonu. Rozwój był i jest nadal ukierunkowany na osiągnięcie coraz większych wytrzymałości betonu, między innymi dzięki zmniejszeniu stosunku wodno-cementowego oraz stosowania aktywniejszych cementów i dodatków mineralnych. Takie zmiany prowadzą do otrzymania betonów szczelnych, o małej porowatości (1). Te same właściwości mogą jednak wpływać negatywnie na zachowanie się tych betonów w pożarze.

Ze względu na swoją niepalność, beton uważany jest za materiał ogniodporny (2). Niemniej jednak w wysokiej temperaturze jego właściwości ulegają pogorszeniu początkowo powierzchniowe-

1. Introduction

Presently, concrete is among the most common structural materials used in construction. The long history of its development, which dates back to BCE, has been one of continuous improvement in its composition and achieving better physical properties as well as making the hardened composite more durable. The durability is most difficult to achieve, for example, if we consider Roman buildings, such as the aqueduct of Nimes, which was built in 47 AD. As a binder, a mixture of lime and volcanic ash was used in its construction. The trend towards erecting increasingly demanding structures such as high-rise buildings, bridges, tunnels, nuclear power plants or pre-tensioned elements, which has been observed in recent decades, has resulted in the emergence of new types of concrete. This development has been aimed at steadily increasing concrete strength, *inter alia* by reducing the water-cement ratio and using more active cements and mineral additives. These changes allow the production of tight concrete that exhibits low porosity and high density (1). These the same properties may, however, adversely affect the behaviour of such concretes in fire.

Since it is non-flammable, concrete is considered a fire-resistant material (2). However, its properties became deteriorated at high temperature. In some cases, concrete is prone to explosive spalling in fire; as a result, reinforcing steel elements are exposed, which

mu, a przy wzroście temperatury w głębszych jego warstwach, zniszczeniu. W niektórych przypadkach w pożarach występuje eksplozyjne odpryskiwanie powierzchniowych warstw betonu prowadzące do odsłonięcia stali zbrojeniowej, która także nie jest odporna na działanie wysokiej temperatury. Duże ubytki betonu zmniejszają także nośność elementów konstrukcyjnych.

Powstawanie odprysków i uleganie złuszczeniu materiałów mineralnych w warunkach pożaru nie jest typowe tylko dla betonu. Niszczenie materiałów budowlanych w warunkach pożaru występują także w przypadku innych materiałów mineralnych, do których zaliczamy kamień i ceramikę czerwoną (3). W przypadku tych materiałów przyczyną odłupywania fragmentów materiału od powierzchni są głównie naprężenia wywołane różnicą temperatur między powierzchnią zewnętrzną a warstwami wewnętrznymi betonu. Proces ten był wykorzystywany przez człowieka już około 70 tysięcy lat temu (4) w celu łatwiejszej obróbki kamienia i jest stosowany do dziś przy obróbce płomieniowej kamienia budowlanego (5).

Pierwsze wzmianki o odpryskiwaniu betonu pojawiły się w XIX wieku; Barrett (6) opisywał możliwość rozpadu betonu z krzywem krzemionkowym podczas pożaru. Kolejne obserwacje, różne od tych towarzyszących betonom zwykłym poddanych działaniu ognia, zostały odnotowane w czasie inwentaryzacji zniszczeń po trzęsieniu ziemi w San Francisco w 1906 roku. W czasie pożaru doszło do powstania odprysków otuliny w wielu elementach żelbetonowych, odsłaniając zbrojenie i poddając je bezpośrednio działaniu ognia [rysunek 1]. Elementy konstrukcyjne nie utraciły całkowicie swojej nośności, ale bezpieczeństwo obiektów i nośność elementów konstrukcyjnych zostały znacznie zmniejszone, w związku, z czym w wielu przypadkach nie było możliwości ich dalszej eksploatacji (7).

Kilka lat później (1911 – 1916), Gary w badaniach zniszczeń ogniowych przeprowadzonych w budynkach wykonanych z betonu zauważył, że powstanie odprysków może przyjmować różną postać i jako pierwszy zaproponował klasyfikację tego procesu, która w dużej części jest stosowana do dziś (8).

Mimo wielu wcześniejszych publikacji o podatności betonu na odpryskiwanie w czasie pożaru, projektowanie składu betonu o coraz lepszych właściwościach wydaje się niedostatecznie uwzględniać warunki pożarowe. Potwierdzają to bardzo poważne uszkodzenia betonu spowodowane powstawaniem odprysków w czasie pożarów w tunelach Channel Tunnel [1996 (9), 2008 (10), 2015 (11)], Mont Blanc [1999 (12)] i innych. Dopiero po serii pożarów w obiektach inżynierskich, duża skala uszkodzeń oraz koszty prac naprawczych spowodowały rozwój badań nad poznaniem przyczyn odpryskiwania betonu w trakcie pożaru i czynników wpływających na podatność różnych materiałów na ten proces, jak również metod zapobiegania jego występowaniu.

Jak pokazały liczne przypadki pożarów (9 - 12) oraz badania doświadczalne (13 - 22) ryzyko powstania odprysków w trakcie pożaru wzrasta znacznie wraz ze zwiększeniem wytrzymałości

are not resistant to high temperature. Where significant amounts of concrete are lost, this also reduces the load bearing capacity of structural elements.

The spalling and peeling of mineral materials under fire conditions is not exclusively typical for concrete. Such behavior involving the destruction of construction materials under fire conditions are also observed in other mineral materials, including stone and red ceramics (3). In the case of these materials, the spalling of pieces from the surface results mainly from the stress caused by the temperature difference between the outer surface and inner layers. This was already exploited by humans around 70,000 years ago (4) in order to facilitate stone processing and is still used today in stone flaming in the construction industry (5).

First mentions of concrete spalling appeared in the 19th century; Barrett (6) described the possibility of concrete with silica aggregate disintegrating during fire. More observations that were distinct from those seen when ordinary concrete is exposed to fire were made during the inventory of the damage wrecked by the San Francisco earthquake in 1906. In fire, the cladding of many reinforced concrete elements became spalled, exposing rebars directly to the action of fire [Fig. 1]. None of the structural elements lost their load bearing capacity completely, but the safety of the structures and the load bearing capacity of many structural elements were significantly decreased, and thus in many cases those structures could not be used any longer (7).

A few years later (1911–1916), as a result of fire studies conducted in concrete buildings, Gary noted that spalling may take different forms, and was the first to propose a classification of the spalling process, which is still largely used today (8).

Despite many existing papers on the susceptibility of concrete to spalling in fire, the design of concrete compositions that yield to the improvement of its properties appears to take account of fire conditions to an insufficient degree. This has been confirmed by the very serious damage of concrete caused by spalling during the fires in the Channel Tunnel [1996 (9), 2008 (10), 2015 (11)], in the Mont Blanc tunnel [1999 (12)] and in other fires. It was only after a



Rys. 1. Odpryski na elementach żelbetonowych w piwnicach Budynku Akademii Nauk powstałe w trakcie pożaru i w czasie trzęsienia ziemi w San Francisco, 1906 (7)

Fig. 1. Spalling of reinforced concrete elements in the basement of the Academy of Sciences building that occurred in the fire during the San Francisco earthquake in 1906 (7)

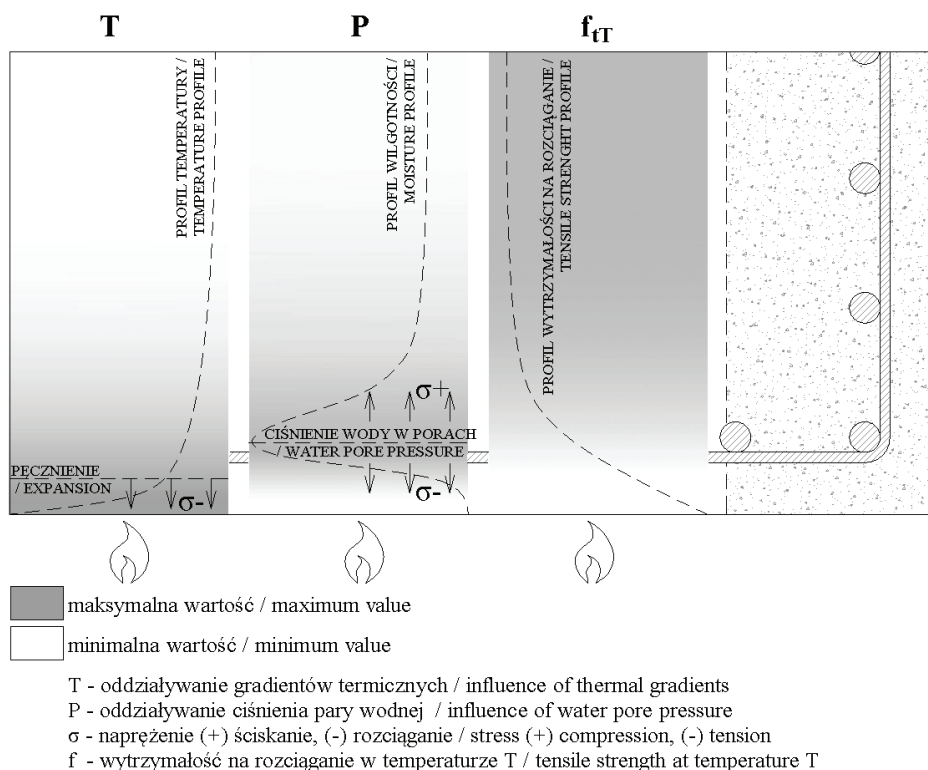
betonu, stając się przeszkodą w dalszym rozwoju i stosowaniu betonów wysokowartościowych (BWW) (23 - 26). Wszystkie zmiany właściwości tych betonów wynikające ze zwiększenia szczelności i ograniczenia porowatości, a więc prowadzące do zwiększenia trwałości mogą bezpośrednio wpływać na wzrost ryzyka odpryskiwania betonu w trakcie pożaru (27 - 29). Jak pokazują doświadczenia, do betonów narażonych na odpryskiwanie pod działaniem ognia zaliczają się także betony niższych klas [$f_c = 40$ MPa, (20)] oraz betony samozagęszczające się zawierające dodatek mączki wapiennej (30). Zainteresowanie badaczy tym zagadnieniem jest duże, o czym świadczą organizowane od 2008 roku warsztaty „Odpryskiwanie betonu w wyniku oddziaływania pożaru”. Mimo zrealizowanych dotychczas badań i opracowanych modeli numerycznych wciąż nie jest możliwe określenie stopnia zagrożenia powstawaniem odprysków betonu w trakcie pożaru. Obecnie prowadzone są prace nad wydaniem rekomendacji dotyczących badań elementów betonowych pozwalających na selekcję betonów nie wykazujących tendencji do odpryskiwania w wyniku oddziaływania pożaru (31).

2. Różne rodzaje odprysków i hipotezy dotyczące przyczyn ich powstawania

Uważa się, że za powstanie odprysków betonu w trakcie pożaru odpowiedzialne są przede wszystkim dwa współdziałające ze sobą mechanizmy: termiczno-mechaniczny i termiczno-wilgotnościowy (3, 15), powodujące powstanie naprężeń rozciągających przekraczających wytrzymałość betonu na rozciąganie ($\sigma_k > f_{tT}$). Mechanizm powstawania odprysków w elemencie jednostronnie ogrzewanym przedstawia rysunek 2, który uwzględnia obserwo-

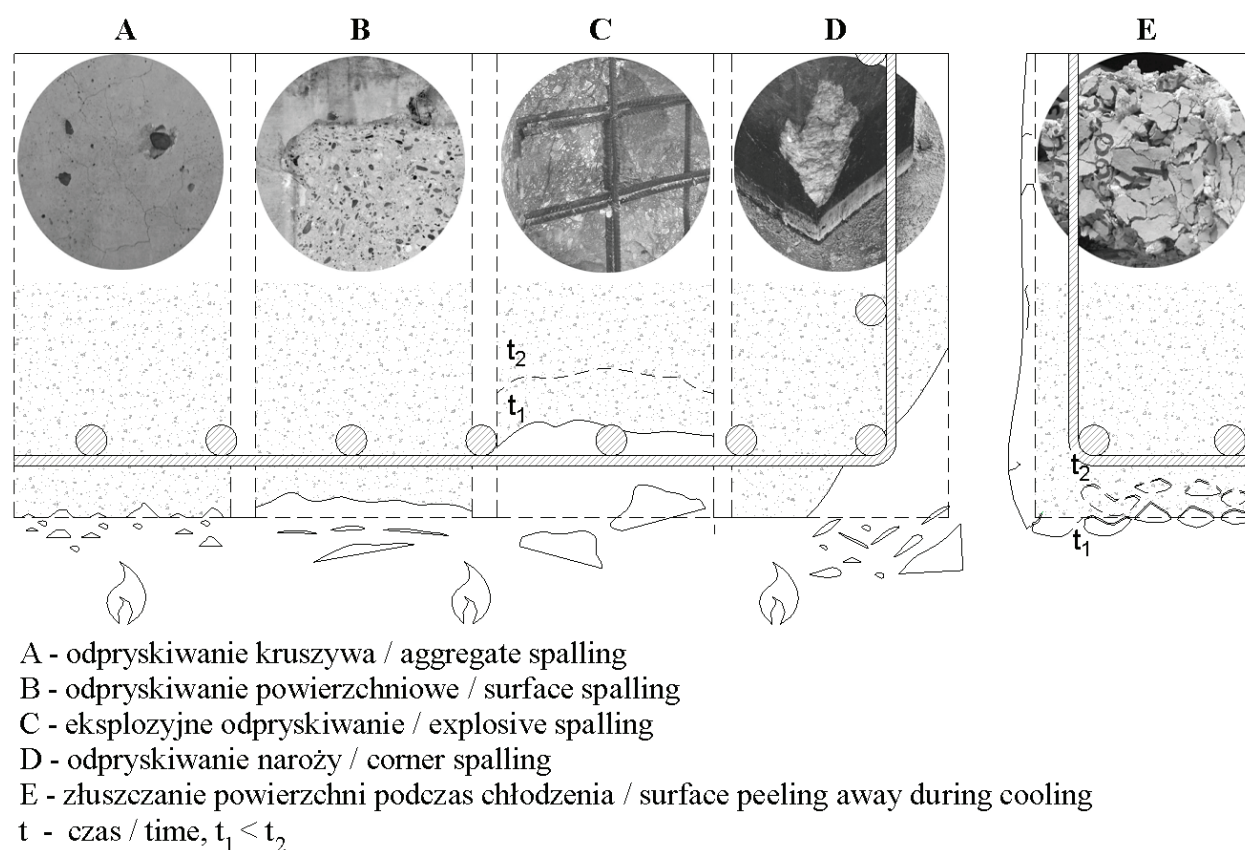
series of fires of engineering structures that the scale of damage and the high cost of repair work triggered further studies on the causes of concrete spalling due to fire exposure. The factors that affect concrete susceptibility to spalling as well as the methods of preventing its occurrence were examined.

As demonstrated by numerous cases of fires (9 - 12) and experimental research (13 - 22), the risk of spalling under fire conditions significantly rises with the increase in concrete compressive strength, which presents an obstacle to the further development and use of high performance concretes (HPC) (23 - 26). All desired changes in the properties of these concretes which result from their increased tightness and reduced porosity, and lead to their increased durability, may directly contribute to heightened of the risk of concrete spalling in fire (27 - 29). Experience shows that lower grade concretes ($f_c = 40$ MPa, (20)) and self-consolidating concretes containing limestone filler (30) are susceptible to spalling as well. Researchers show considerable interest in this problem which was proved by the organization of “Concrete Spalling due to Fire Exposure” workshops, which have been held since 2008. Despite the research conducted so far and the numerical models developed, it is still not possible to effectively determine the risk of concrete spalling due to fire exposure. Work is currently underway with the aim to issue recommendations concerning the testing of concrete elements that would allow the preliminary selection of concretes that do not exhibit tendencies towards spalling at high temperature (31).



Rys. 2. Przyczyny powstawania odprysków betonu w trakcie pożaru

Fig. 2. Causes of concrete spalling due to fire exposure



Rys. 3. Formy zniszczenia polegające na różnych rodzajach odpryskiwania betonu w czasie pożaru

Fig. 3. Forms of damage observed in various types of concrete spalling due to fire exposure

waną w badaniach zmianę właściwości mechanicznych betonów, polegającą na zmniejszeniu wytrzymałości betonu na rozciąganie w temperaturze 120 °C (32, 33).

Odpryskiwanie może polegać na bardzo powolnym odspajaniu się powierzchniowej warstwy materiału, jak również szybkim „eksplozyjnym” odrywaniu się kawałków betonu od powierzchni elementu (34). Mechanizmy powodujące powstawanie odprysków są różne, co wpływa na czas i częstotliwość jego występowania w trakcie pożaru. Obserwacje uszkodzeń po pożarze oraz badania laboratoryjne pozwoliły na wyodrębnienie pięciu różnych typów odprysków [rysunek 3]:

- A) odpryskiwanie kruszywa,
- B) postawanie odprysków powierzchniowych, postępujące progresywnie, w sposób ciągły,
- C) eksplozyjne odpryskiwanie, postępujące progresywnie, dyskretnie t_1, t_2 ,
- D) odpryskiwanie naroży elementu betonowego,
- E) łuszczenie powierzchni betonu podczas spadku temperatury.

Odpryskiwanie kruszywa [A na rysunku 3] - związane jest bezpośrednio z przemianami fazowymi minerałów wchodzących w skład kruszywa. W tym przypadku odpryskiwaniu ulegają ziarna kruszywa wraz z otaczającym je zaczynem cementowym. Odpryskiwanie kruszywa najczęściej nie jest niebezpieczne dla nośności konstrukcji. Nie prowadzi ono do utraty znacznej części przekroju oraz najczęściej nie powoduje odsłonięcia zbrojenia. Me-

2. Different types of spalling and hypotheses concerning causes of spalling

It is believed that two interrelated (3) mechanisms are primarily responsible for concrete spalling due to fire: the thermal-mechanical (15) and hygro-thermal mechanisms result in tensile stress in concrete and in critical stresses that exceed the concrete tensile strength ($\sigma_k > f_t$). The mechanism of spalling in an element heated on one face is shown in Fig. 2, which takes into account the reduction in strength parameters at 120°C (32; 33) observed in tests of changes in mechanical properties of concrete.

Observations of the damage caused by fire and laboratory tests have made it possible to distinguish five different types of spalling. Spalling may take the form of a very slow detachment of the surface layer of the material as well as of pieces of material breaking away in a rapid, explosive manner from the surface of the concrete element (34). The mechanisms that result in individual types of spalling are different, which affects the time and frequency of spalling at temperature increase. In the literature, the following types of concrete spalling in fire are distinguished [Fig. 3]:

Aggregate spalling [A in Fig. 3] is directly related to the phase changes of the minerals in the aggregate grains. In this case, aggregate grains together with the surrounding cement paste are subject to spalling. Aggregate spalling is usually not dangerous for the structure's load bearing capacity. It does not result in the loss of a significant part of cross-section of structural elements

chanizm odpowiedzialny za pojawienie się odprysków z kruszywa jest analogiczny jak w przypadku płomieniowej obróbki kamienia budowlanego. Odpryskiwanie ziaren kruszywa jest wynikiem przemian polimorficznych zawartych w nim minerałów, których polimorfy różnią się gęstością. W większości kruszyw występuje kwarc, którego odmiana polimorficzna β jest trwała w temperaturze pokojowej, natomiast w temperaturze 573°C przechodzi w odmianę α . Przemianie tej towarzyszy wzrost objętości o około 0,84 %. Kolejna przemiana α kwarcu w α trydymit, która zachodzi w temperaturze 870°C i wywołuje około 14 % wzrost objętości, nie jest tak groźna ponieważ w wyniku uszkodzenia zaczynu cementowego odkształcenia kruszywa mogą przebiegać bez wywoływania naprężeń. Krzemionka występuje w przyrodzie w wielu odmianach polimorficznych, z których najbardziej rozpowszechniony jest kwarc β , a pozostałe 7 odmian występuje znacznie rzadziej (35), jednak w kruszywie zdarzają się trydymit i krystobalit, ten ostatni na przykład w opalu.

Odpryski powierzchniowe [B na rysunku 3] występują w przypadku cienkich i płaskich fragmentów powierzchniowych warstw elementów betonowych, na przykład ścian, stropów, które w wyniku powstawania naprężeń rozciągających pomiędzy pęczniejącą warstwą o wyższej temperaturze, a zimniejszymi głębszymi warstwami betonu, odrywają się od powierzchni. Ten rodzaj odprysków najczęściej nie jest niebezpieczny dla nośności konstrukcji ponieważ przeważnie nie prowadzi do utraty znacznej części przekroju elementu i odsłonięcia zbrojenia (36).

W eksplozywnym odpryskiwaniu [C na rysunku 3], któremu towarzyszy odgłos wybuchu, następuje gwałtowne odrywanie się kawałków betonu, o znacznych powierzchniach i głębokości pojedynczego odprysku sięgającej nawet kilkunastu centymetrów. Eksplozyjne odspajanie się betonu prowadzi do odsłonięcia zbrojenia, a często do zniszczenia całej grubości elementu konstrukcyjnego (8). Cechą, która wyróżnia ten rodzaj powstawania odprysków jest udział wody i pary wodnej w mechanizmie jego powstawania. Równocześnie z procesem termiczno-mechanicznym, ogrzewanie powierzchni betonu powoduje ruch wody w kapilarach w kierunku chłodniejszych stref materiału, prowadząc do wytworzenia nasyconej wodą warstwy betonu. Powstanie nasyconej wodą warstwy betonu potwierdzili doświadczalnie Jansson i Boström (18), analizując przełamy jednostronnie ogrzewanych próbek betonu rozłupywanych w różnych odstępach czasu, od rozpoczęcia ogrzewania.

W środowisku naukowym trwa dyskusja czy naprężenia rozciągające w betonie wywołane są wyłącznie ciśnieniem pary wodnej w porach betonu czy też obecnością wody w porach kapilarnych betonu, która zwiększając swoją objętość ($210 \cdot 10^{-6}/\text{K}$) działa rozklinowująco powodując wzrost ciśnienia w porach betonu i w konsekwencji eksplozywnego jego odpryskiwanie (37). Można ten proces porównać do zasady działania armaty parowej opisanej po raz pierwszy przez Leonardo da Vinci, jako Architronito (38).

Do eksplozywnego odpryskiwania dochodzi po kilkunastu minutach trwania pożaru, ciśnienie w porach osiąga wartość krytyczną, przewyższającą wytrzymałość betonu na rozciąganie w tych wa-

and typically does not cause reinforcing steel to become exposed. The mechanism responsible for aggregate spalling is similar to that observed in the case of stone flaming. The reason why gravel aggregate grains spall are the differences in the thermal expansion coefficients of the minerals that form them; this type of spalling occurs at temperature range from 350 to 380°C . Most aggregates contain quartz, which is stable at room temperature as the β polymorph, but is transformed into the α phase at 573°C . This change is accompanied by an increase in volume of around 0.84%. Another transformation of α -quartz to α -tridymite, which occurs at 870°C and results in an increase in volume of around 14%, is not as dangerous since due to the damage to cement paste, the aggregate can deform freely. Silica is found in nature in many polymorphic phases, of which only β -quartz is stable at room temperature. The remaining seven phases occurs rarely (35), but in aggregate the tridymite and cristobalite may be found, the cristobalite in opal.

Surface spalling [B in Fig. 3] affects thin and flat fragments of surface layers of concrete elements such as walls and ceilings which become detached from these elements as a result of tensile stress σ_T between the expanded heated layer and the colder deeper concrete layers. This is usually not dangerous to the load bearing capacity of structures, since it generally does not result in the loss of a significant part of the cross-section of concrete and of reinforcing steel uncover (36).

Explosive spalling [C in Fig. 3], which is accompanied by characteristic explosion sound, is the violent chipping off of concrete pieces with large surface areas and spalling depth reaching up to around a dozen centimetres for a single piece of concrete that is spalled. Explosive spalling of concrete results in reinforcing steel being exposed, and often in complete destruction of the concrete construction element (8). The distinguishing characteristic of this type of spalling is the role of water and water vapour in the process. Simultaneously with the thermal-mechanical process, the heating of the concrete surface results in the thermo-capillary effect occurring, i.e. the movement of water in capillaries towards colder zones within the material, resulting in the formation of a water-saturated, impermeable layer of concrete. The presence of a water-saturated concrete layer has been experimentally confirmed by Jansson and Boström (18) during their observations of concrete fractures that were one side heated only and were fractured at different intervals of the time from the start of the heating process.

There has been a discussion in the scientific community whether tensile stress in concrete is caused exclusively by the pressure of water vapour in concrete pores or also by the presence of water in the concrete capillary pores, which increasing their volume ($210 \cdot 10^{-6}/\text{K}$) and wedges the concrete apart (37) by increasing the pressure present in concrete pores and causing explosive spalling as a result. This process can be compared to the operating principle of the steam cannon, which was described for the first time by Leonardo da Vinci who dubbed it the Architronito (38).

runkach. Wzrost ciśnienia wody w porach betonu uważa się więc za decydujący dla eksplozyjnego odpryskiwania betonu w trakcie pożaru po czasie t_1 , a kolejne odpryski w tej strefie mogą wystąpić po czasie t_2 gdy transport wody w głąb elementu spowoduje wytworzenie następnej warstwy wody, powodującej ponowne wytworzenie ciśnienia krytycznego.

Odpryskiwanie naroży [D na rysunku 3] zachodzi w elementach betonowych, w których ogrzewane są dwie prostopadłe do siebie powierzchnie tworzące naroże. Są to słupy, belki, połączenia belka-słup i belka-ściana. W przypadku typowego przebiegu pożaru do odpryskiwania naroży najczęściej dochodzi po około 30 minutach. Naroża ogrzewają się szybciej, co powoduje większe gradienty termiczne w tych strefach, a w konsekwencji szybsze ich uszkodzenie (39).

Łuszczenie się betonu podczas chłodzenia [E na rysunku 3] zachodzi w trakcie spadku temperatury elementów. Może ono trwać nawet przez kilka godzin, a nawet dni po zakończeniu pożaru. Łuszczenie się warstw uszkodzonego betonu jest wynikiem odwrócenia gradientu temperatury podczas jej spadku. Są wysuwane hipotezy zakładające, że łuszczenie się betonu po pożarze jest spowodowane uwadnianiem tlenku wapnia powstałego w betonie w trakcie pożaru (23). Dotychczas jednak brak jest doświadczalnego potwierdzenia, jakie składniki betonu ulegają rozkładowi w czasie pożaru z utworzeniem CaO.

3. Metody badań podatności betonu na odpryskiwanie w trakcie pożaru

Prowadzone są badania zmierzające do wyjaśnienia przyczyn odpryskiwania betonu jak i określenia czynników mających wpływ na jego przebieg (22, 30, 40). Równocześnie prowadzi się analizę numeryczną tego procesu (41, 42). Jednym z celów prowadzonych badań jest opracowanie metod umożliwiających przewidywanie ryzyka powstawania odprysków i ograniczenie ich występowania.

Do badań procesu powstawania odprysków betonu stosuje się najczęściej elementy betonowe o rzeczywistych wymiarach – ścian, belek, słupów, co zapewnia, że stan naprężeń w elemencie odpowiada projektowanym warunkom eksploatacji. Piecami służącymi do takich badań dysponuje zaledwie kilka laboratoriów w Europie (22, 30, 40, 43) w tym polskie laboratorium Zakładu Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej w Pionkach (44). Wyniki badań prowadzonych w takich warunkach uważane są za najbardziej reprezentatywne. Ocena podatności betonu na odpryskiwanie z wykorzystaniem elementów w skali rzeczywistej jest jednak zbyt kosztowna i nie zawsze celowa, zwłaszcza gdy badania dotyczą tylko wpływu składu betonu na jego podatność na odpryskiwanie w wyniku oddziaływania pożaru. Badania takie są także prowadzone na próbkach o mniejszych rozmiarach, z betonów o różnym składzie. Próbkę formowaną są najczęściej, jako płyty o objętości nieprzekraczającej 1 m^3 , które w czasie badania spoczywają na ścianach pieca, a następnie ogrzewane są jednostronnie palnikami gazowymi lub olejowymi. Wzrost tem-

Explosive spalling in fire occurs after around a dozen minutes when pressure in the pores has reached a critical value that exceeds the tensile strength of concrete under these conditions. Thus the increase in water pressure in concrete pores is considered to be of critical importance for the occurrence of explosive concrete spalling in fire at time t_1 ; a subsequent event in the cross-section zone in question occurs after time t_2 when mass transfer towards deeper layers of the structural element has produced another impermeable water layer that causes critical pressure to be reached again.

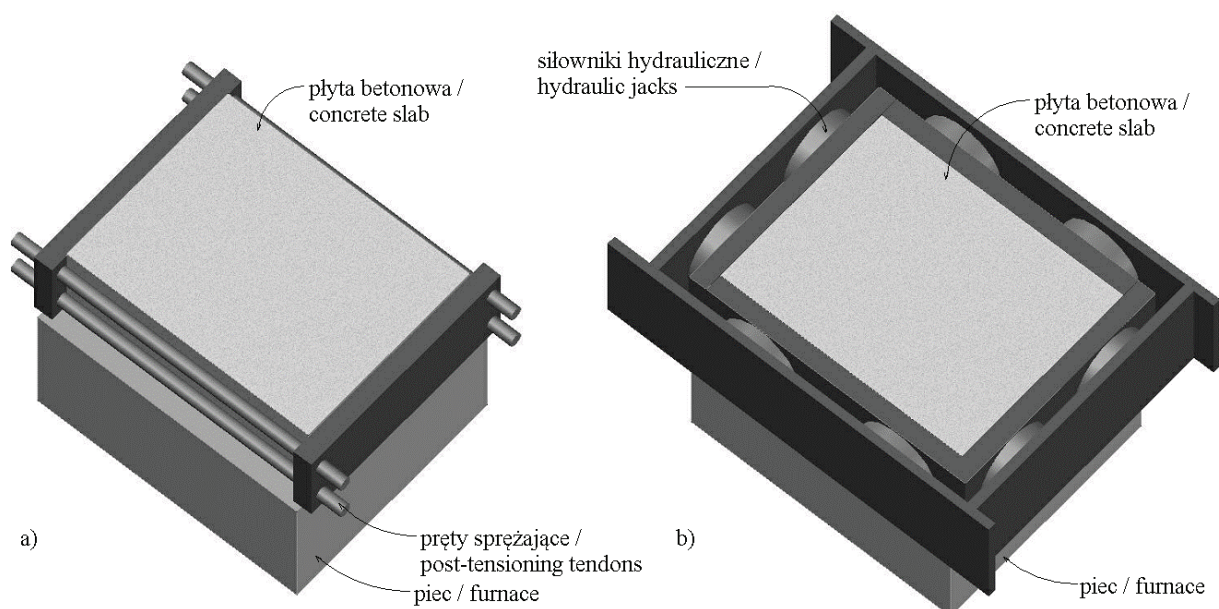
Corner spalling [D in Fig. 3] is observed in concrete elements in which two orthogonal surfaces forming a corner (in columns, beams, beam-column joints, beam-wall joints, etc.) are heated. In a typical fire, corner spalling usually takes place around 30 minutes after the fire has started. Corners become heated faster, resulting in greater thermal gradients at such points, and consequently corners are damaged faster as well (39).

The peeling of concrete after a fire [E in Fig. 3] occurs during the cooling of the structural element. This may take place a few hours or even days after the fire has ended. The peeling of damaged concrete layers is the result of the reversal of the temperature gradient during cooling. There are assumptions that the concrete peeling of concrete after fire is caused by hydration of calcium oxide formed in concrete during fire (23). However, there is no experimental confirmation of what constituents are decomposing during the fire with the CaO formation.

3. Methods of testing concrete susceptibility to spalling due to fire exposure

Studies aimed at understanding the causes of spalling as well as determining material factors that affect its intensity are conducted both in the form of experiments (22; 30; 40) and using the numerical analysis (41; 42). One of the objectives of these studies is to develop methods that would make possible to predict the risk of concrete spalling and to effectively reduce its occurrence.

In concrete spalling examination most often the full-sized concrete elements [walls, beams or posts], which ensures that the stresses acting on these elements correspond to exploitation conditions. There are only a few fire-testing laboratories in Europe that have the furnaces required for such testing (22; 30; 40; 43), including the Polish laboratory of the Fire Testing Department of the Building Research Institute in Pionki (44). The results of tests conducted in these conditions are considered to be the most representative. However, the assessment of concrete susceptibility to spalling using real-scale elements is too costly and not always appropriate, particularly when the tests concern exclusively the material used and their purpose is to analyse the impact of concrete composition on its susceptibility to spalling in fire. Tests of this type, which are carried out on smaller specimens, consist in testing a large number of specimens made of concretes with different compositions and are referred to as screening. Specimens are usually produced as slabs with a volume not exceeding 1 m^3 which are supported



Rys. 4. Stanowiska do badań podatności na odpryskiwanie pod obciążeniem ściskającym: a) z zastosowaniem prętów sprężających (48), b) z zastosowaniem siłowników hydraulicznych (47)

Fig. 4. Test stands for testing susceptibility to spalling under compressive loads: a) using post-tensioning tendons (48); b) using hydraulic jacks (47)

peratury w piecu przebiega zazwyczaj zgodnie ze standardowym scenariuszem pożaru podanym w wytycznych ISO 834-1 (45) lub krzywej węglowodorowej według normy EN 1363-2 (46), która stosowana jest do badań betonowych elementów do obudowy tuneli. W niektórych laboratoriach wprowadza się w płytach naprężenia ściskające poprzez skrępowanie aktywne (47), lub pasywne (48, 49). Naprężenia ściskające sprzyjają występowaniu odprysków ponieważ utrudniają rozwój rys umożliwiających migrację pary wodnej, co potwierdzają również badania i obserwacje elementów po zakończeniu pożaru (47). Aktywne skrępowanie (16, 30, 47) można uzyskać poprzez wykorzystanie siłowników hydraulicznych lub kabli sprężających, dzięki którym możliwe jest zastosowanie naprężeń ściskających i ich kontrola w trakcie badania [rysunek 4].

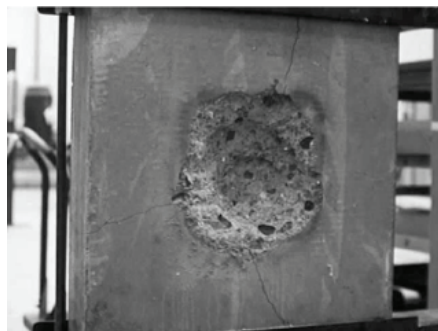
Pasywne skrępowanie elementów (51, 52) stosuje się jako symulację efektu ograniczającego naprężenia termiczne przez nieogrzewaną część elementu betonowego. Efekt ten występuje przy lokalnym oddziaływaniu ognia i tym samym zwiększa wewnętrzne naprężenia ściskające. Można go uzyskać stosując na obrzeżu badanego elementu stalową ramę, która przeciwstawia się odkształceniom termicznym ogrzewanego betonu (56). Takie badania modelują zachowanie się próbki betonowej ogrzewanej miejscowo (51). Doświadczenia (51) wykazały, że w nieogrzewanych częściach próbek powstają znaczne zarysowania, a odpryski ustają wraz z pojawieniem się pierwszych widocznych rys [rysunek 5]. Prawdopodobnie zarysowanie powoduje zmniejszenie naprężeń w ogrzewanym elemencie, które powodowały powstawanie odprysków. W badaniach wykazano, że większa sztywność stalowej ramy, wpływając na ograniczenie odkształceń termicznych, może zwiększać głębokość i ilość odprysków (52).

Należy podkreślić, iż wobec braku znormalizowanych metod i różnego poddawania próbek naprężeniom ściskającym, stosując

on furnace walls during the test and are subsequently heated on one side with gas or oil burners. The furnace temperature usually develops in line with the standard fire scenario as per ISO 834-1 (45) or following the hydrocarbon curve (HC) (46), which is used to test the elements used in concrete tunnel enclosures. At some laboratories, compressive stress is induced in slabs through active (47) or passive (48; 49) confinement. Compressive stress favours spalling because it impedes the development of cracks that enable water vapour to migrate; this is also confirmed by tests and observations of elements after fire treatment (47). Active confinement can be obtained through the use of hydraulic servo or post-tensioning tendons, which enable compressive stress to be applied and controlled during testing [Fig. 4] (16; 30; 47).

Passive confinement (51; 52) is applied to tested elements to simulate the effect of limited thermal stress by the unheated part of the concrete element. It occurs when the fire is localised, and it is caused by the unheated part of the element, which limits thermal deformations of the heated part and thus increases internal compressive stresses. This effect can be achieved by using a metal frame on the edges of the tested element (56). Tests show the behaviour of a locally heated concrete specimen (51). The unheated part of the specimen became severely cracked during the test, and spalling ceased as cracks appeared in the unheated part of the concrete [Fig. 5]. This can be explained by the fact that cracking results in a reduction of the stresses generated in the heated element, which are responsible for spalling. Tests have demonstrated that a more rigid steel frame, which reduces thermal deformation, may result in deeper spalling and increase the number of locations where spalling occurs (52).

It should be emphasised that in the absence of standardised testing procedures and in view of the various methods of introducing com-



Rys. 5. Odpryskiwanie betonu ogrzewanego miejscowo palnikiem płomieniowym i zarysowanie nieogrzewanej części próbki. Część ogrzewana widoczna jest w postaci powierzchni z odpryskami (51)

Fig. 5. Spalling of locally heated concrete and cracks in the unheated part of the specimen (51)

pasywne lub aktywne skrzepowanie elementu, interpretacja wyników badań w różnych laboratoriach oraz ich porównywanie może być utrudnione (16, 50).

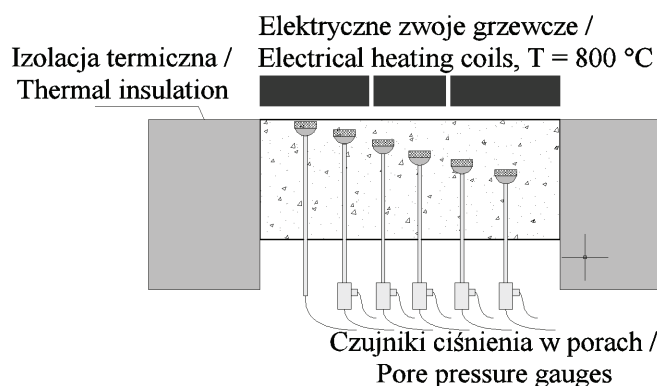
Znacznym postępowaniem w badaniach mechanizmu powstawania odprysków jest opracowana przez Kalifę (13) metoda pomiaru ciśnienia pary wodnej, temperatury i zmiany masy ogrzewanego jednostronnie elementu betonowego [rysunek 6]. Opracowany układ pozwolił na pomiar zmian ciśnienia pary wodnej w porach betonu, i wykazanie, że ciśnienie to może osiągać nawet 4 MPa. Wyniki badań Kalify i in. (53) są często wykorzystywane do weryfikacji modeli matematycznych zależności cieplno-wilgotnościowych w betonie.

4. Czynniki wpływające na zwiększenie ryzyka powstawania odprysków betonu pod działaniem ognia

Do najważniejszych czynników wpływających na rodzaj i intensywność powstawania odprysków betonu w trakcie pożaru należą czynniki materiałowe: skład betonu (16, 54) i maksymalny rozmiar kruszywa (16, 55)], właściwości mechaniczne i fizyczne betonu [wytrzymałość (56; 57)], przepuszczalność betonu dla gazów i wilgotność betonu (51, 58–61) jak i geometria [kształt (39), rozmiar elementu (48)], wielkość naprężeń w elemencie), a także przebieg pożaru [maksymalna temperatura, czas trwania, intensywność ogrzewania elementu].

Najważniejsze czynniki mające wpływ na odpryskiwanie betonu podano w tablicy 1 przypisując każdemu z czynników wielkość ich wpływu na intensywność odpryskiwania w trzystopniowej skali: 1 – słaby, 2 – średni, 3 – duży, uwzględniającej liczne badania (16, 39, 47, 48, 51, 54 - 61).

Mimo szerokiego spektrum czynników, które mogą mieć udział w powstaniu eksplozywnego odpryskiwania betonu w trakcie pożaru, uważa się, że nie może ono zajść gdy zawartość wody w betonie będzie mała (51, 54, 61) lub też gdy w beton będzie miał dużą porowatość otwartą utrudniającą powstawanie dużego ciśnienia pary wodnej.



Rys. 6. Stanowisko badawcze do pomiarów ciśnienia pary wodnej w porach ogrzewanego betonu (53)

Fig. 6. Test stand for measuring water vapour pressure in heated concrete pores (53)

pressive stress through passive or active elements confinement, the interpretation of results of interlaboratory studies and their comparisons may be difficult (16; 50).

A major contribution to studies of the mechanism of spalling is the system for measuring water vapour pressure, temperature and mass change of a concrete specimen heated on one face, which has been developed by Kalifa (13) [Fig. 6]. The system developed has allowed the measurement of water vapour pressure in material pores, demonstrating that this pressure may reach as high as 4 MPa. Results of studies by Kalifa et al. (53) are often used in the verification of mathematical models of hygro-thermal process.

4. Factors contributing the life's increase of the risk of concrete spalling due to fire exposure

The most important factors that affect the nature and intensity of concrete spalling due to fire exposure are material-related factors: concrete composition [w/c ratio, presence of mineral additives, aggregate type (16; 54) and maximum grain size (16; 55)], concrete properties [strength (56, 57), gas permeability of concrete and moisture content in concrete (51, 58–61) as well as element geometry [the shape (39) and size of the element (48)] and the type of mechanical load and the stresses induced by that load in the element as well as the fire scenario [duration, intensity, the manner in which the element is heated at maximal temperature].

A summary of the most important factors affecting concrete spalling is presented in Table 1, with each factor being assigned a weight that reflects the extent to which this factor affects spalling intensity on a three-point scale: 1 – low, 2 – medium, 3 – high, based on research (16, 39, 47, 48, 51, 54 - 61).

Despite the wide range of factors that may contribute to the occurrence of explosive spalling of concrete due to fire exposure, it is believed that it cannot occur where the water content of concrete is sufficiently low (51; 54; 61) or where the material has an open-pore structure that prevents high water vapour pressure from building up in its pores.

5. Zapobieganie powstawania odprysków w betonie w trakcie pożaru

Dobrym rozwiązaniem ograniczającym występowanie odprysków w betonie, zalecanym w przypadku zabezpieczenia istniejących konstrukcji betonowych, na przykład tuneli komunikacyjnych, jest stosowanie barier termicznych. Są to płyty z mineralnych materiałów termoizolacyjnych, które zmniejszają szybkość nagrzewania elementu betonowego i zmniejszają gradient temperatury w tym elemencie.

W przypadku nowych obiektów betonowych można przeciwdziałać eksplozyjnemu odpryskiwaniu betonu w trakcie pożaru przez dodatek do mieszanki betonowej włókien polipropylenowych (PP). Skuteczność dodatku włókien PP, jako efektywnego rozwiązania technologicznego zapobiegającego odpryskom, potwierdzają liczne badania (16, 48, 62, 63), a dodatek włókien zalecany jest również przez normę EN 1992-1-2 (64). Włókna PP topią się w temperaturze około 170°C, a więc w temperaturze niższej niż temperatura wystąpienia maksymalnego ciśnienia pary wodnej w betonie, która przypada w zakresie 190–260°C (13). Po stopieniu polipropylen jest częściowo wchłaniany przez matrycę cementową (63). Jednak głównie stopienie włókien powoduje powstanie sieci porów zwiększających przepuszczalność betonu, ułatwiają transport pary wodnej i zmniejszając jej ciśnienie w porach betonu (33, 65). Obserwacje struktury ogrzewanych betonów przeprowadzone przez Sullivana (66) wykazały jednak powstanie dodatkowych licznych mikropęknięć w ogrzewanym betonie z dodatkiem włókien PP. Ich powstanie uzasadniano zwiększeniem współczynnika rozszerzalności cieplnej polipropylenu w porównaniu z betonem, co prowadzi do powstawania sieci mikrorys wokół włókien. Jest to korzystne z punktu widzenia zmniejszenia ciśnienia pary wodnej w porach betonu.

Bentz (67) przeprowadził analizę numeryczną pozwalającą na ilościowe określenie dodatku włókien PP do betonu zapewniające osiągnięcie progu perkolacji, a więc po stopieniu zapewniające powstanie w betonie połączonych sieci porów otwartych. Próg ten osiągnięto w przypadku dodatku włókien wynoszącym 0,1 % objętościowo, przy założeniu, że transport przebiega również w porowatej strefie przejściowej kruszywa z zaczynem.

Włókna PP eliminują lub zmniejszają powstawanie odprysków w przypadku betonów średnich i wyższych klas, jednak według niektórych autorów (3, 68) dodatek włókien PP nawet w ilości 2% nie zapewnia powstrzymania powstawania odprysków w przypadku betonów o bardzo wysokiej wytrzymałości, wynoszącej na przykład 180 MPa. Stanowi to niewątpliwie ograniczenie w stosowaniu tych kompozytów, z punktu widzenia zagrożeń pożarowych.

Poza barierami termicznymi i dodatkiem włókien PP, proponowane metody zapobiegania powstawaniu odprysków betonu polegają na stosowaniu powierzchniowych siatek zbrojeniowych, dodatku włókien stalowych lub domieszek napowietrzających. Metody te nie pozwalają jednak na uzyskanie znacznego zmniejszenia

5. Preventing the concrete spalling due to fire exposure

An effective solution that limits the occurrence of concrete spalling, which is recommended where existing facilities such as communication tunnels need to be secured, is the use of thermal barriers in the form of mineral thermal insulation slabs whose function is to slow down the heating of the concrete element and lower the cross-sectional temperature gradient.

In the case of new concrete structures, explosive spalling of concrete due to fire exposure may be prevented by adding polypropylene (PP) fibres to the concrete mix. The effectiveness of PP fibres addition as a technological solution that prevents spalling is confirmed by numerous experimental studies (16; 48; 62; 63), and the addition of fibres is also recommended in the standard EN 1992-1-2 (64). PP fibres melt at a temperature of around 170°C, i.e. lower than the temperature at which the maximum water vapour pressure in concrete is reached [190–260°C (13)]. After melting, the polypropylene is partly absorbed by the cement matrix (63). At 350°C, polypropylene became combusted with CO₂ and H₂O formation. After the fibres have melted, a network of additional pores is created, which increases concrete permeability, facilitating the transport of water vapour and reducing its pressure in concrete pores (33; 65). Observations of the structure of heated concrete by Sullivan (66) demonstrated that numerous additional microcracks were present in heated concrete that contained PP fibres; those cracks were explained by the higher thermal expansion coefficient of polypropylene compared to concrete, which leads to the formation of a network of microcracks around the fibres, which have a beneficial effect of reducing water vapour pressure in concrete pores.

Bentz (67), presented a numerical analysis, which makes possible to determine the amount of PP fibres which, when added to concrete, allow the percolation threshold to be reached so that after their melting a network of interconnected open pores forms in the concrete element. This threshold value was reached after adding 0.1% of fibres by volume [the underlying assumption was that the porous interface zone between aggregate grains and cement paste participates in mass transfer].

PP fibres eliminate or reduce spalling in the case of medium and higher grade concrete, but according to reports (3, 68), even the addition of 2% of PP fibres does not prevent spalling in ultra-high strength concretes [UHSC = 180 MPa], which is undoubtedly a limitation to the application of these mineral materials.

Other proposed methods of limiting spalling, which are presented as alternatives to thermal barriers and PP fibres, such as reinforcing steel meshes near the element surface application, the use of steel fibres or aerating additives do not result in significant improvement in resistance to explosive spalling, and have even been reported (69) to increase its occurrence.

eksplozyjnego odpryskiwania, a nawet według Hertza (69) mogą zwiększyć jego występowanie.

6. Podsumowanie

Przedstawiony przegląd prac badawczych dotyczących zniszczeń betonu w wyniku działania pożaru wskazuje na dwie główne przyczyny prowadzące do powstawania odprysków: termiczną i termiczno-wilgotnościową. Powstawanie odprysków dotyczy przede wszystkim betonów o dużej wytrzymałości, praktycznie nie występując w betonach niskich klas, które mają dużą porowatość otwartą. Betony wysokowartościowe są szczególnie narażone na powstawanie odprysków pod działaniem pożaru, a stosowanie włókien polipropylenowych nawet znacznego ich dodatku nie zawsze pozwala na ich wyeliminowanie.

Obserwacje uszkodzeń powstałych w wyniku pożaru oraz badania laboratoryjne pozwoliły na wyróżnienie czterech rodzajów odprysków w trakcie pożaru i piątej formy polegającej na łuszczeniu się betonu, po zakończeniu pożaru [rysunek 3].

Pomimo licznych badań i opracowaniu modeli numerycznych wciąż nie opracowano metody określania ryzyka powstawania odprysków betonu, o znanych właściwościach. Trwają prace nad znalezieniem metody umożliwiającej nawet wstępną selekcję betonów niewykazujących tendencji do powstawania tych uszkodzeń. Na powstawanie odprysków ma niewątpliwie wpływ skład betonu i jego właściwości, przede wszystkim przepuszczalność, lecz również wielkość i kształt elementu, rodzaj obciążenia i stan naprężeń, głównie ściskających [tablica 1]. Duży wpływ ma także szybkość wzrostu temperatury i usytuowanie elementu betonowego w stosunku do źródła ognia, które ulegają zmianom w zależności od przebiegu pożaru. Złożoność tych czynników, brak normowych metod badania podatności betonu na powstawanie odprysków w wyniku pożaru oraz stochastyczny charakter jego występowania powodują, iż prace nad poznaniem tego procesu będą niewątpliwie kontynuowane, a metody przeciwdziałania jego występowaniu doskonalone.

Podziękowania

Artykuł opracowano w ramach projektu: Wpływ krępowania odkształceń termicznych na charakterystykę odpryskiwania betonu w pożarze” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki NCN 2016/23/N/ST8/01155.

Literatura / References

1. C. Perry, J. Gillott, The influence of mortar aggregate bond strength on the behaviour of concrete in uniaxial compression, *Cem. Concr. Res.* **7**, 553-564 (1977).
2. G. Khoury, Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling, *Federation Internationale du Beton (fib), Sprint-Digital-Druck, Stuttgart* (2007).

6. Summary

The overview of current information concerning the concrete spalling due to fire exposure presented in the paper indicates two main mechanisms leading to its occurrence: the thermal-mechanical mechanism and the hygro-thermal one. The risk of concrete spalling arises together with an increase in concrete strength, and is practically absent in low-grade with high open porosity. New-generation high and ultra-high performance concretes are particularly susceptible to the risk of fire spalling, and as reported in literature, the use of polypropylene fibres, even in large quantities, does not always enable this behavior to be eliminated.

Observations of damage caused by fire and laboratory tests made it possible to distinguish four types of fire spalling, and also a fifth form which consists of peeling that occurs after the fire has ended [Fig. 3].

Despite the numerous experiments conducted so far and the complex numerical hygro-thermal models developed, it is still not possible to effectively determine the risk of fire spalling for concrete with a given composition and properties. Work is underway on the development of a simple test method that would enable the preliminary selection of concretes that are not susceptible to spalling. Spalling is undoubtedly a process that is affected by the composition of concrete (w/c ratio, type of aggregate) and its properties (gas permeability, moisture content) but also element geometry, the manner in which it is loaded and stress conditions (primarily the presence of compressive stress) (Table 1). In addition, this is also affected by the intensity and manner of heating, which vary depending on the fire scenario. The complex nature of the problem discussed, the absence of standard procedures for testing the susceptibility of concrete to fire spalling and the stochastic nature of the process will undoubtedly result in further work on spalling being conducted and in the methods for counteracting of this behaviour being refined.

Acknowledgements

The article was developed under the “Impact of Restraining Thermal Deformations on Concrete Fire Spalling Characteristics” project funded by the National Science Centre, NCN 2016/23/N/ST8/01155.

3. G.A. Khoury, Y. Anderberg, Concrete spalling - review, *Fire Safety Design* (2000).
4. K. Brown, C. Marean, A. Herries, Z. Jacobs, C. Tribolo, D. Braun, D. Roberts, Meyer, M. Meyer, J. Bernatchez, *Fire As an Engineering Tool of Early Modern Humans* **325**, 859-862 (2009).
5. H. Wilcke, W. Thunig, *Kamieniarstwo, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne*, Warszawa, 134 (1997).
6. Barrett, On the French and other methods of constructing iron floors, **XVI**, 90-98 (1854).
7. A.L.A. Himmelwright, *The San Francisco earthquake and fire; a brief history of the disaster; a presentation of facts and resulting phenomena, with special reference to the efficiency of building materials, lessons of the disaster*, New York: The Roebing construction company (1906).
8. M. Gary, *Fire tests on reinforced concrete buildings (in German)*, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Heft 11, Germany (1916).
9. C.T.S. Authority, *Inquiry into the fire on Heavy Goods Vehicle shuttle 7539 on 18 November 1996*, H.M. Stationery Office 1997.
10. Technical Investigation Report concerning the Fire on Eurotunnel Freight Shuttle 7412 on 11 September 2008, BEA-TT, RAIB (2010).
11. Technical Investigation Report Concerning the Fire on Eurotunnel Freight Shuttle 7340 on 17 January 2015, BEA-TT, RAIB 2016.
12. Task force for technical investigation of the 24 March 1999 fire in the Mont Blanc vehicular Tunnel, Minister of the Interior, Ministry of Equipment, Transportation and Housing (1999).
13. P. Kalifa, F. Menneteau, D. Quenard, Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, *Cem. Concr. Res.*, **30**, 1915-1927 (2000).
14. I. Hager, *Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques*. PhD Thesis, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées and Cracow University of Technology, 65 – 67 (2004).
15. G. Khoury, Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria., *Mag Concrete Res* **60**, 189-204 (2008).
16. R. Connolly, *The Spalling of Concrete in Fires*. PhD Thesis, The University of Aston in Birmingham 1995.
17. R. Jansson, L. Bostrom, The spalling in concrete - The moisture effect, part II, *International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Paris, France 2013.
18. R. Jansson, L. Bostrom, *Fire spalling - the moisture effect*, w 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure , Leipzig, Germany 2009.
19. P. Kalifa, F. Menneteau, H. Sallee, Moisture and temperature distribution in a specimen heated on one face, *BRITE EURAM III Hiteco Programme BE-95-1158*, 1998.
20. J.C. Mindeguia, *Contribution Expérimentale A La Compréhension Des Risques D'instabilité Thermique Des Bétons*. PhD Thesis, Université de Pau et des Pays de l'adour 2009.
21. G. Peng, Y. Kang, X. Liu, Q. Chen, J. Zhao, Explosive spalling and residual mechanical properties of Reactive Powder Concrete subjected to high temperature, *2nd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Delft, The Netherlands 2011.
22. N. Taillefer, P. Pimienta, D. Dhima, Spalling of concrete: a synthesis of experimental tests on slabs, w *3rd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Paris, France 2013.
23. I. Hager, T. Tracz, J. Śliwiński, K. Krzemień, The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature, *Fire Mater*, **40**, 668-682 (2016).
24. M. Heap, Y. Lavallee, A. Laumann, K.U. Hess, P. Meredith, D. Dingwell, S. Huisman, F. Weise, The influence of thermal-stressing (up to 1000C) on the physical, mechanical and chemical properties of siliceous aggregate, high strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, **42**, 248-256 (2013).
25. U. Schneider, M. Alonso, P. Pimienta, R. Jansson, Physical properties and behaviour of High Performance Concrete at high temperature, *RILEM Technical Committee 227-HPB*, 2010.
26. I. Hager, T. Zdeb, K. Krzemień, The impact of the amount of polypropylene fibres on spalling behaviour and residual mechanical properties of Reactive Powder Concretes, *MATEC Web of Conferences* **6**, 02003, 2013.
27. J. C. Mindeguia, P. Pimienta, A. Noumowe, M. Kanema, Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature - Experimental and numerical discussion on spalling risk, *Cem. Concr. Res.*, **40**, 477-487 (2012).
28. J. C. Mindeguia, P. Pimienta, H. Carre, C. La Borderie, Experimental study on the contribution of pore vapour pressure to the thermal instability risk of concrete, *International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Leipzig, Germany 2009.
29. H. Carré, P. Pimienta, C. La Borderie , F. Pereira, J.C. Mindeguia, Effect of compressive loading on the risk of spalling, *MATEC Web of Conferences* **6**, 01007, 2013.
30. L. Boström, R. Jansson, *Self-Compacting Concrete Exposed to Fire*, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås 2008.
31. RILEM Technical Committee 256-SPF : Spalling of concrete due to fire: testing and modelling, [Online]. Available: <https://www.rilem.net/groupe/256-spf-spalling-of-concrete-due-to-fire-testing-and-modelling-309>. [12.08.2017].
32. I. Hager, P. Pimienta, Mechanical properties of HPC at High Temperature, *Workshop Fire Design of Concretes: What now? What next?*, Milan, Italy, 95 – 100, 2004.
33. I. Hager, T. Tracz, Wpływ wysokiej temperatury na wybrane właściwości betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych, (Influence of high temperature on selected properties of high performance concrete modified by the addition of polypropylene fibres), *Cement Wapno Beton*, **1**, 3-10 (2009).
34. G. A. Khoury, Y. Anderberg, *Fire Safety Design. Concrete spalling - review*, Swedish National Road Administration, 2000.
35. A. Bolewski, *Mineralogia Szczegółowa*, Wydawnictwa Geologiczne, 609 – 617, 1965.
36. G. Debicki, R. Haniche, F. Delhomme, An experimental method for assessing the spalling sensitivity of concrete mixture submitted to high temperature, *Cem. Concr. Comp.*, **34**, 958 – 963 (2012).
37. D. Cook, M. Haque, The effect of sorption on the tensile creep and strength reduction of desiccated concrete, *Cem. Concr. Res.*, **4**, 367-379 (1974).
38. Lahanas, *Ancient Greek Artillery Technology from Catapults to the Architrionio Canon*, [Online]. Available: <http://www.hellenicaworld.com>. [30.06.2017].
39. K. Willam, K. Lee, Y. Xi, G. Xotta, V. Salomoni, Explosive spalling of concrete materials under extreme environments, *2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Delft, The Netherlands 2011.
40. E. Richter, Fire test on single-shell tunnel segments made of a new high-performance fireproof concrete, *Workshop Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?*, 261-270, 2004.
41. D. Gawin, F. Pesavento, B. Schrefler, Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and me-

- chanical material degradation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **192**, 1731-1771 (2003).
42. D. Gawin, F. Pesavento, Prediction of the thermal spalling risk of concrete structures exposed to high temperatures, *ACEE* **1**, 49-60 (2009).
43. I. Hager, T. Tracz, K. Krzemień, The usefulness of selected non-destructive and destructive methods in the assessment of concrete after fire, *Cement Wapno Beton* **3**, 145-151 (2014).
44. Instytut Techniki Budowlanej, [Online]. www.itb.pl/. [10.08.2017].
45. ISO 834-1: Fire resistance tests. Elements of building construction - Part 1: General requirements, International Organization for Standardization 1999.
46. EN 1363-2: Fire resistance tests. Alternative and additional procedures, BSI CO TO?, 1999.
47. H. Carré, P. Pimienta, C. La Borderie, F. Pereira, J.C. Mindeguia, Effect of compressive loading on the risk of spalling, *MATEC Web of Conferences* **6**, 01007, 2013.
48. R. Jansson, L. Boström, Spalling of concrete exposed to fire, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås 2008.
49. A. Heel, W. Kusterle, Die Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton [Fire resistance of fiber-reinforced, reinforced, and prestressed concrete] (in German), Tech. Rep. 544, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Vienna 2004.
50. K. Krzemień, I. Hager, Assessment of concrete susceptibility to fire spalling: A report on the state-of-the-art in testing procedures, *Procedia Engineering*, **108**, 285-292 (2015).
51. D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete, *Fire Safety Journal*, **38**, 103-116 (2003).
52. T. Tanibe, M. Ozawa, R. Kamata, R. Sato, K. Rokugo, Thermal stress estimation in relation to spalling of HSC restrained with steel rings at high temperatures, *MATEC Web of Conferences* **6**, 01004, 2013.
53. P. Kalifa, G. Chene, C. Galle, High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. From spalling to microstructure, *Cem. Concr. Res.*, **31**, 1487 - 1499 (2001).
54. FIB, Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling, Bulletin 38, Laussane, Switzerland 2007.
55. H. Malhotra, Spalling of concrete in fires. Technical note 118, Construction Industry Research and Information Association, London 1984.
56. L. Phan, Spalling and mechanical properties of high strength concrete at high temperature, w *Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading*, F. Toutlemonde et al. (eds), Tours, Francia 2007.
57. I. Hager, T. Tracz, Parameters influencing concrete spalling severity - intermediate scale tests results, 4th International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Leipzig, Germany 2015.
58. C. Meyer-Ottens, The question of spalling of concrete structural elements of standard concrete under fire loading, PhD Thesis, Technical University of Braunschweig, Germany 1972.
59. C. Mayer-Ottens, Behaviour of concrete structural members in fire conditions (in German), *Beton* **4**, 133 - 136 (1974).
60. C. Majorana, V. Salomoni, G. Mazzucco, G. Khoury, An approach for modelling concrete spalling in finite strains, *Mathematics and Computers in Simulation*, **80** (2010).
61. G. Shorter, T. Hermathy, Discussion on the Fire Resistance of Prestresses Concrete Beams, *Proceedings of the Institution of Civil Engineering*, **20**, 313 (1961).
62. I. Hager, T. Tracz, The impact of the amount and length of fibrillated polypropylene fibres on the properties of HPC exposed to high temperature, *Archives of Civil Engineering* **56**, 57 – 68 (2010).
63. P. Tatnall, Shortcrete in Fires: Effects of fibers on explosive spalling, *Shortcrete*, 10-12 (2002).
64. EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, (English) (2004).
65. K. Pistol, F. Weise, B. Meng, U. Schneider, The mode of action of polypropylene fibres in high performance concrete at high temperatures, 2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Delft, The Netherlands 2011.
66. P. Sullivan, Deterioration and spalling of high strength concrete under fire, Report for UK Health & Safety Executive, City University London 2001.
67. D. Bentz, Fibres, Percolation, and Spalling of High Performance Concrete, *ACI Materials Journal* **97**, 351-359 (2000).
68. I. Hager, T. Zdeb, K. Krzemień, The impact of the amount of polypropylene fibres on spalling behaviour and residual mechanical properties of Reactive Powder Concretes, *MATEC Web of Conferences*, **6**, 02003 (2013).
69. D. Hertz, Heat induced explosion on fire behaviour of concrete, Denmark: Report no. 166, Institute of Building Design, 1984.