

Assessment of spalling risk in concrete subjected to fire

Ocena ryzyka eksplozyjnego odpryskiwania betonu w pożarze

mgr inż. Katarzyna Mróz

STRESZCZENIE

Odpryskiwanie betonu w pożarze definiuje się jako gwałtowne lub stopniowe odrywanie kawałków lub warstw betonu od powierzchni betonowego elementu konstrukcyjnego, podczas ekspozycji na wysoką i szybko rosnącą temperaturę, jak na przykład w przypadku pożaru. W literaturze wyróżnia się kilka rodzajów odpryskiwania: odpryskiwanie kruszywa, odpryskiwanie przypowierzchniowych warstw, odpryskiwanie naroży, niszczące odpryskiwanie, złuszczenie i eksplozyjne odpryskiwanie. Odpryskiwanie może być jednak kombinacją kilku lub, w niektórych przypadkach, wszystkich wymienionych typów. Każdy typ może charakteryzować się inną formą i intensywnością.

Dotychczas przeprowadzono wiele badań eksperymentalnych i numerycznych w celu opisanie przyczyn odpryskiwania betonu w wysokiej temperaturze. Najczęściej spotykanym w literaturze podejściem jest eksperymentalne wskazanie różnych czynników, które mogą zwiększyć ryzyko odpryskiwania, takich jak skład mieszanki betonowej, scenariusz ogrzewania, początkowa wilgotność betonu, geometria próbki lub mechaniczne warunki brzegowe. Badania odpryskiwania betonu w pożarze prowadzone są na elementach badawczych o różnym rozmiarze i kształcie, przy użyciu różnych procedur badawczych. Duża różnorodność stanowisk i metod badawczych, oraz brak znormalizowanych wytycznych dotyczących badań podatności betonu na odpryskiwanie w pożarze, powodują szeroką różnorodność uzyskanych wyników przez różne zespoły badawcze. Ponadto, podczas badań, prowadzone są różne pomiary, które mają na celu lepiej opisać zmiany zachodzące w betonie podczas ogrzewania. Porównanie wyników otrzymanych przy zastosowaniu różnych metod badawczych jest trudne, a jednoznaczne określenie podatności betonu na odpryskiwanie często niemożliwe.

Ostatnie badania dotyczące odpryskiwania betonu w pożarze przeprowadzone przez naukowców wskazują, że elementy betonowe mogą podlegać samoograniczeniu odkształceń podczas pożaru. Uważa się, że nieogrzewana część betonu (tzw. zimna obręcz, ang. *cold rim*) może ograniczać jego odkształcenia termiczne, a tym samym zwiększać wewnętrzne naprężenia ściskające. W przypadku rzeczywistego zdarzenia pożaru, efekt zimnej obręczy może wystąpić w nieogrzewanej części elementu betonowego, np. w przypadku lokalnego pożaru. W badaniach laboratoryjnych zjawisko to może być odzwierciedlone przez aktywne lub pasywne ograniczenie odkształceń badanego elementu.

Obecnie istnieje duża potrzeba wprowadzenia rekomendacji dotyczących sposobu oceny ryzyka wystąpienia odpryskiwania betonu w pożarze. Nad takim dokumentem pracuje w ostatnich latach komitet RILEM 256-SPF *Spalling of concrete due to fire: testing and modelling*, którego autorka jest aktywnym członkiem. Ze względu na potrzebę wprowadzenia rekomendacji dotyczących badania podatności betonu na odpryskiwanie, które umożliwią przeprowadzenie badań przesiewowych podatności betonu na odpryskiwanie w pożarze, zostały rozpoczęte porównawcze badania parametryczne zachowania się betonu w pożarze.

Celem przedstawionych w rozprawie badań eksperymentalnych jest porównanie intensywności i form odpryskiwania betonu poddanego działaniu pożaru przy zastosowaniu różnych procedur badawczych, wcześniej stosowanych w innych laboratoriach (RISE - Szwecja, CSTB, CERIB - Francja, Politecnico di Milano – Włochy, Gunma University – Japonia). Wybrane różne procedury badawcze mają na celu wprowadzenie różnych metod aktywnego i pasywnego skrzepowania odkształceń termicznych betonu, które mogą wpłynąć na charakter i intensywność odpryskiwania betonu wysokowartościowego (BWW) w wysokiej temperaturze.

Aby umożliwić porównanie wyników i uniknąć wpływu zmian właściwości betonu, warunków brzegowych i innych zmiennych, które mogą pojawić się w czasie badań prowadzonych na różnych stanowiskach badawczych,

autorka zaproponowała ujednolicony program badawczy. Wszystkie elementy badawcze zostały wykonane z jednej mieszanki betonowej, pochodzącej z tej samej partii. Badania przeprowadzone zostały na jednym uniwersalnym stanowisku badawczym opracowanym przez autorkę. Do badań zastosowano beton BWW, charakteryzujący się początkową, 28-dniową wytrzymałością na ściskanie $f_{c,28days} = 63$ MPa. W celu zaobserwowania wpływu różnych sposobów skrzepowania odkształceń termicznych betonu autorka zaproponowała pięć konfiguracji badań płyt betonowych w piecu laboratoryjnym: i) badania płyt nieskrępowanych (brak zimnej obręczy), ii) płyty z nieogrzewaną obręczą o dwóch różnych szerokościach (10 cm i 20 cm), iii) płyty skrzepowane przez stalowe obręcze o dwóch różnych grubościach ścianki (11 mm i 17 mm), iv) płyty ściskane jednostronnie z naprężeniem 13 MPa (20 % $f_{c,28days}$) i v) płyty ściskane dwustronnie obciążeniem równym 13 MPa (20 % $f_{c,28days}$).

Autorka pracy zbudowała oryginalny uniwersalny system ramowy umożliwiający przeprowadzenie badań ogniowych na elementach płytowych poddanych osiowemu ściskaniu w płaszczyźnie płyty. Zaprojektowana przez autorkę rama wykorzystuje zespół szczotek Hilsdorfa, których celem jest beztarciowe przekazanie obciążenia ściskającego na element badawczy. Płyty betonowe mogą być poddane zarówno jednoosiowemu jak i dwuosiowemu ściskaniu do maksymalnego poziomu naprężeń 15 MPa. Stanowisko wyposażone zostało w czujnik ciśnienia oleju w siłownikach hydraulicznych, co pozwala na śledzenie rzeczywistego obciążenia działającego na płytę w czasie badania.

Autorka opracowała także nową metodę identyfikacji postaci i intensywności odpryskiwania z wykorzystaniem analizy emitowanego przez beton sygnału akustycznego. Do oceny intensywności i monitorowania przebiegu odpryskiwania w czasie pożaru zastosowano analizę rejestrowanego dźwięku pochodzącego z komory pieca. Na podstawie analizy amplitud sygnału określono intensywność odprysków. Analiza zapisów dźwięku wykazała, że formę odpryskiwania można scharakteryzować poprzez dobrze zdefiniowaną wartość częstotliwości. Na podstawie analizy widma szybkiej transformaty Fouriera (*ang. Fast Fourier Transform – FFT*) autorka wyróżniła następujące zjawiska będące źródłem sygnału: eksplozyjne odpryskiwanie, odpryskiwanie kruszywa i destrukcyjne odpryskiwanie betonu przypisując odpowiadające im częstotliwości drgań fali dźwiękowej.

W ramach programu badawczego autorka zaproponowała pionierskie wykorzystanie cyfrowej korelacji obrazu (*ang. Digital image correlation – DIC*) do pomiaru zmian odkształceń nieogrzewanej powierzchni elementu betonowego w czasie badania ogniowego. Jest to pierwsze tego typu zastosowanie tej metody w takich badaniach. Metoda z powodzeniem umożliwia przedstawienie pól odkształceń w kierunku X i Y w czasie ekspozycji na ogień dla całej nieogrzewanej powierzchni betonu (z pewnymi ograniczeniami opisanymi w pracy). Po badaniu ogniowym pole odkształcenia może zostać przedstawione dla dowolnego punktu w czasie. Na etapie przetwarzania końcowego (*ang. post-processing*) na powierzchni płyty betonowej instalowane są wirtualne tensometry, dzięki czemu możliwe jest generowanie i analizowanie wykresu rozwoju odkształceń w dowolnym kierunku i w dowolnym punkcie. Metodę DIC autorka zastosowała w celu porównania stanu odkształcenia przy różnych typach i poziomach skrzepowania odkształceń termicznych elementu betonowego. Dzięki wynikom DIC potwierdzono, że cała nieogrzewana część betonu (*ang. cold rim*) pracuje na rozciąganie, nawet po pojawieniu się rysy na bokach elementu badawczego. Co więcej, zostało wyraźnie pokazane, że środkowa część elementu betonowego pracuje głównie na ściskanie.

Przed przystąpieniem do badań właściwych, autorka przeprowadziła badania wstępne, potwierdzające wpływ skrzepowania przez zimną krawędź betonu na intensywność odpryskiwania, jak również efektywność stosowania metody cyfrowej korelacji obrazu DIC. Badania polegały na jednostronnym ogrzewaniu małych płyt betonowych punktowym palnikiem gazowym, który zapewniał lokalne powtarzalne przyłożenie obciążenia termicznego. Zbadano 6 elementów betonowych, wykonanych z dwóch różnych mieszanek betonowych. Elementy różniły się rozmiarem, co powodowało zmianę zasięgu nieogrzewanej strefy. Jednocześnie prowadzono pomiary metodą DIC. Badania dały zadowalające rezultaty, zarówno w zróżnicowaniu intensywności odpryskiwania, jak i wyników pól odkształceń opracowanych metodą DIC.

Następnie, autorka przeprowadziła 20 badań ogniowych na płytach betonowych w 5 różnych konfiguracjach skrępowania odkształceń termicznych, wymienionych wcześniej. Prezentowane i analizowane dane obejmują określenie początkowych i resztkowych właściwości badanego betonu, dyskusję dotyczącą obserwacji poczynionych podczas badań ogniowych: opis zdarzeń odpryskiwania (jego intensywność, postać i rozwój zarysowania), a także pomiarów przeprowadzonych po badaniach ogniowych - topografię odprysków, analizę fal dźwiękowych emitowanych przez badaną płytę, a także wyniki odkształceń nieogrzewanej powierzchni metodą DIC.

Wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają, że poziom skrępowania odkształceń termicznych betonu w czasie jego ogrzewania ma duży wpływ na intensywność odpryskiwania i jego charakter. Większy stopień skrępowania implikuje bardziej wybuchowe zachowanie betonu. Dodatkowo zaobserwowano, że w bardzo wysokim poziomie skrępowania - w przypadku elementów badanych w stanie dwuosiowego ściskania, odpryskiwanie w postaci odpryskiwania kruszywa występuje zdecydowanie rzadziej niż w pozostałych badanych przypadkach. Dominuje za to odpryskiwanie powierzchniowe i eksplozyjne, któremu towarzyszą głucho uderzenia, rejestrowane tylko w badaniach płyt dwuosiowo ściskanych.

Podczas badań ogniowych, zauważono, że zarówno stalowa obręcz jak i obciążenie zewnętrzne przyczyniają się do zamykania rys powstałych w betonie, co utrudnia parowanie wody z przekroju betonowego. Ponadto, zaobserwowano, że odpryskiwanie kończy się, gdy woda pojawia się na powierzchni próbki lub zaczyna wypływać z zewnętrznych pęknięć elementu. W przypadku elementu dwustronnie ściskanego, nie zaobserwowano ani parowania ani wycieku wody, czemu towarzyszyło nieprzerwane odpryskiwanie kontynuowane aż do zniszczenia elementu badawczego.

Kompleksowe porównanie uzyskanych wyników pozwoliło autorce stwierdzić, że badanie podatności betonu na odpryskiwanie w pożarze należy przeprowadzać zawsze w warunkach skrępowania elementu badawczego. Ponadto, znaczne różnice wyników między samo-skrępowaniem przez zimną krawędź (*cold rim*), a aktywnym skrępowaniem przez zewnętrzne obciążenie, sugerują, że w procesie projektowania konstrukcji betonowych, podczas określania podatności na odpryskiwanie stosowanego w projekcie betonu, rodzaj skrępowania elementu poddanego takiej ocenie powinien być dobrze zdefiniowany i dostosowany do docelowego zastosowania elementu betonowego.

Na podstawie obszernego porównania uzyskanych wyników autorka zaleca, aby podczas projektowania uwzględniać odpryskiwanie betonu w warunkach pożaru. Ryzyko powstania odprysków spowodowanych pożarem powinno być oceniane za pomocą jednej z trzech metod, dostosowanej do warunków brzegowych odzwierciedlających docelowe warunki pracy elementu: i) badanie płyty skrępowanej zimną krawędzią o stosunku między obszarem nieogrzewanym a obszarem ogrzewanym większym niż 70%, ii) badanie elementu jednoosiowo ściskanego przy poziomie obciążenia $> 15 \% f_{c,28dmi}$ lub iii) badanie elementu dwuosiowo ściskanego z poziomem obciążenia $> 15 \% f_{c,28dmi}$. Mniejsze poziomy wyteżenia płyty oraz mniejszy poziom skrępowania wprowadzonego przez zimną krawędź betonu, mogą według autorki powodować otrzymanie niemiernodajnych wyników z punktu widzenia projektowania konstrukcji betonowych.

Niniejsza praca i prezentowane badania zostały przeprowadzone w ramach projektu naukowego „Wpływ krępowania odkształceń termicznych na charakterystykę odpryskiwania betonu w pożarze” 2016/23/N/ST8/01155 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w konkursie „PRELUDIUM 12” oraz stypendium doktorskiego 2018/28/T/ST8/00352 przyznanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu „ETIUDA 6”.

Słowa kluczowe: beton, odpryskiwanie, pożar, wysoka temperatura, ISO 834-1, skrępowanie pasywne, skrępowanie aktywne, zimna krawędź, stalowa obręcz, jednoosiowe ściskanie, dwuosiowe ściskanie, obciążenie, odkształcenie, cyfrowa korelacja obrazu, szybka transformata Fouriera, częstotliwość, intensywność odpryskiwania, charakter odpryskiwania, zarysowanie.

Assessment of spalling risk in concrete subjected to fire

Ocena ryzyka eksplozyjnego odpryskiwania betonu w pożarze

Katarzyna Mróz

SUMMARY

Fire spalling of concrete is defined as the violent or non-violent breaking off of layer pieces of concrete from the surface of a structural element when it is exposed to high and rapidly rising temperature as experienced in fire. In literature few natures of spalling are distinguished: aggregate spalling, explosive surface spalling, explosive corner spalling, destructive spalling, sloughing off and explosive spalling. Spalling may become also as the combination of several or, in certain case, all of the listed types. Each type may be characterized by different form and intensity.

So far, numerous experimental and numerical research were carried out in order to describe the fire spalling in concrete. Most common attempt is to indicate experimentally different parameters that may enhance spalling risk, such as the concrete mix composition, heating scenario, the initial water content, geometry of specimen or mechanical boundary conditions. Testing of concrete spalling in fire is carried out on specimens of different size and shape, moreover, using different testing procedures. Due to variety of research setups and experimental methods and due to lack of standardized testing guidance, there is a wide range of approaches to concrete fire spalling assessment and a wide diversity of obtained result. What's more, during the test, different measurements are carried out by the researchers in order to give a better description of the processes taking place in concrete during heating. Therefore, their comparison of these results is difficult and it is hard to predict the spalling sensitivity of concrete.

The recent concrete fire spalling experiments carried out by a number of scientists indicate that concrete elements may experience a self-restraint during fire. It is believed that unheated part of concrete (cold rim) may limit its thermal dilation and hence may increase the inner compressive stresses. In case of a real fire event, the cold rim effect may occur in the unheated part of a structural element, ex. in case of localized fire. In laboratory tests, such a phenomenon may be reflected by active or passive restraint of investigated element.

There is currently a great need to provide recommendations on methods to assess the risk of fire spalling of concrete. In recent years, the Technical Committee *RILEM 256-SPF: Spalling of concrete due to fire: testing and modelling*, whose author is an active member, has been working on such a document. To deliver more input data on reliable methods for assessing the concrete susceptibility to fire spalling, the comparative parametric tests of concrete behaviour in fire have been started.

Facing the need to provide the recommendations concerning the testing of concrete propensity to spalling and providing the viable and simple testing method for concrete mix screening tests, a comparative study of concrete behaviour in fire is launched. The main objective of the project is to demonstrate the influence of different passive and active restraint of thermal dilation of concrete on nature and intensity of spalling of high-performance concrete (HPC) at high temperature.

The aim of the experimental work is to compare the concrete spalling behaviour: its extent and severity, when exposed to fire using different testing procedures that were previously employed in different fire laboratories (RISE - Sweden, CSTB, CERIB - France, Politecnico di Milano – Italy, Gunma University – Japan). The chosen research procedures are aimed at introducing various methods of active and passive restraint of thermal dilation of concrete, which may affect the nature and intensity of fire spalling of high strength concrete (HSC).

To enable the comparison of results and avoid the impact of changes in concrete properties, boundary conditions and other variables that may appear during tests carried out at different testing setups, the author

proposed a unified research program. All concrete specimens are made of one concrete mix and are cast from one batch. The research was carried out at one universal testing setup developed by the author. One high strength concrete (HSC) characterized by initial 28-days compressive strength of $f_{c,28days} = 63$ MPa is tested. In order to observe the effect of different passive and active restraint, five configurations of slab are used to test in the laboratory furnace: i) unrestrained slabs (without unheated rim), ii) slabs with unheated rim of two different widths (10 cm and 20 cm), iii) slabs restrained by steel rings of two different thickness (11 mm and 17 mm), iv) slabs under uniaxial compression of 13 MPa (20 % of $f_{c,28days}$) and v) slabs under biaxial compression of 13 MPa (20 % of $f_{c,28days}$).

The author of the work developed an original universal frame system enabling fire tests on plate elements subjected to axial in-plane compression. The frame designed by the author employs a set of Hilsdorf brushes, which aim is the frictionless transmission of compressive load to the tested element. Concrete slabs can be subjected to both uniaxial and biaxial compression of stress level up to 15 MPa. The setup has been equipped with an oil pressure sensor in hydraulic cylinders, which allows us to track the actual load acting on the concrete element during the test.

The author also developed a new method for identifying the form and intensity of spalling using an analysis of the acoustic signal emitted by concrete. To assess the intensity and monitor the course of concrete spalling during a fire exposure, the analysis of the recorded sound from the furnace chamber is used. Spalling intensity was determined on the basis of signal amplitude analysis. Investigation of sound records showed that the character of spalling can be categorized by a well-defined frequency value. Based on the analysis of the Fast Fourier Transform (FFT) spectrum, the author has distinguished the following phenomena that are the source of the signal by assigning the corresponding frequency of the sound wave vibration: explosive spalling, aggregate spalling and destructive spalling.

As part of the research program, the author proposed the pioneering use of Digital Image Correlation (DIC) to measure changes in deformation of the unheated concrete surface during a fire test. This is the first application of this method in such studies. The method successfully presents the deformation fields in the X and Y directions during fire exposure for the entire unheated concrete surface (with some restrictions described in the manuscript). After the fire test, the deformation field can be presented for any point in time. At the post-processing stage, virtual extensometers are installed on the surface of the concrete slab, making it possible to generate and analyse a deformation development in any direction and at any point. The author used the DIC method to compare the strain state at different types and levels of restraint of thermal dilation of a concrete element. DIC results confirmed that the unheated part of concrete (cold rim) works under tension, even after a crack development on the sides of the test element. Moreover, it has been clearly shown that the central part of the concrete element works mainly under compression.

Before starting the actual research, the author carried out preliminary tests confirming the impact of cold concrete edge restraint on spalling intensity as well as the effectiveness of using the digital image correlation method. The tests consisted of one-sided heating of small concrete slabs with a gas spot burner, which provided local, repeatable application of thermal load. Six concrete elements made of two different concrete mixtures were tested. The elements differed in size, which changed the range of the unheated zone. During the test, measurements were carried out using the DIC method. The research gave satisfactory results, both in the differences in spalling intensity and the results of deformation fields developed by the DIC method.

Then, the author carried out 20 fire tests on concrete slabs in 5 different configurations of restraint to thermal dilation, mentioned earlier. The data presented and analysed include the determination of the initial and residual properties of the tested concrete, a discussion of observations made during fire tests: description of spalling events (its intensity, form and development of cracks), as well as measurements made after fire tests - spalling topography, analysis of sound emitted by the tested plate, as well as the strain results of the unheated surface by the DIC method.

The results of experimental studies confirm that the level of restraint of thermal dilation of concrete during its heating has a major impact on the intensity of spalling and its character. A greater degree of restraint implies more explosive behaviour of concrete. In addition, it was observed that in a very high level of restraint - in the case of elements tested in the biaxial compression state, spalling in the form of aggregate spalling occurs much less frequently than in the other examined cases. Instead, the surface and explosive spalling dominates, accompanied by deaf sound, recorded only in the tests of biaxially compressed elements.

During the fire tests, it was noticed that both the steel rim and external load contribute to closing the cracks formed in the concrete, which hinders the evaporation of water from the concrete cross-section. In addition, it has been observed that spalling terminates when liquid water appears on the surface of the slab or begins to flow from the external cracks of the element. In the case of element tested under biaxial compression, neither evaporation nor water leakage was observed, which was accompanied by uninterrupted spalling continued until the tested element was destroyed.

A comprehensive comparison of the obtained results allowed the author to conclude that the testing of concrete susceptibility to fire spalling should always be carried out under conditions of restraint of the tested element. In addition, the significant scatter of results between self-restraint by cold rim and active restraint by external load suggest that in the process of designing concrete structures, while determining the concrete susceptibility to fire spalling, the type of restraint of the element subjected to such assessment should be well defined and adapted to the intended use of the concrete element.

Based on a comprehensive comparison of the obtained results, the author recommends that the design of concrete structures shall take into account the spalling of concrete in fire conditions. The risk of fire spalling should be assessed using one of three methods adapted to the boundary conditions that reflect the target operating conditions of the element: i) testing of slab restrained by a cold rim with a ratio between unheated area and heated area greater than 70%, ii) uniaxial testing of the element compressed at a load level $> 15\% f_{c,28\text{days}}$ or iii) testing of a biaxial compressed element with a load level $> 15\% f_{c,28\text{days}}$. Lower levels of stresses and a lower level of restraint introduced by the cold rim, according to the author, may result in obtaining unreliable results from the point of view of concrete structure design.

The presented work and experimental program were carried out under the scientific project "The impact of restraining of thermal deformation on characteristics of the concrete spalling in fire" 2016/23/N/ST8/01155 financed by the National Science Centre in Poland in the "PRELUDIUM 12" competition and the doctoral scholarship 2018/28/T/ST8/00352 awarded by the National Science Centre in Poland in the "ETIUDA 6" competition.

Keywords: concrete, spalling, fire, high temperature, ISO 834-1, passive restraint, active restraint, cold rim, ring test, uniaxial compression, biaxial compression, load pressure, strain, digital image correlation, Fast Fourier Transform, frequency, spalling intensity, spalling nature, cracking.