

Dr inż. Katarzyna Mróz, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki
Dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki

Ocena podatności betonu na termiczne odpryskiwanie w świetle rekomendacji RILEM

Assessment of Concrete Susceptibility to Fire Spalling in the context of RILEM Recommendations

Streszczenie

Termiczne odpryskiwanie betonu stanowi istotny problem inżynierski, występujący w warunkach działania wysokiej i dynamicznie narastającej temperatury, charakterystycznej dla pożarów. Odpryskiwanie prowadzi do ubytku przekroju poprzecznego betonu podczas nagrzewania, skutkując zmniejszeniem nośności elementów konstrukcyjnych oraz stwarzając realne zagrożenie dla ekip ratowniczych pracujących podczas pożaru. Szczególnie narażone na odpryskiwanie są betony wysokowartościowe, charakteryzujące się niską porowatością i przepuszczalnością. Komitet Techniczny RILEM 306-SPF opracował rekomendacje dotyczące oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie w skali technicznej (badania przesiewowe) i wytyczne uzupełniające dla badań odporności ogniowej. Głównym celem badań przesiewowych jest wyłonienie mieszanek betonowych o odporności na odpryskiwanie w warunkach pożaru. Niniejszy referat przedstawia zasady oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie zarówno w ramach badań przesiewowych, jak i badań odporności ogniowej, w odniesieniu do najnowszych rekomendacji RILEM opublikowanych na przełomie 2023 i 2024 roku. Omówione są zarówno podstawy teoretyczne przyjętych rozwiązań, jak i przykłady praktycznego zastosowania tych badań w projektowaniu betonu odpornego na termiczne odpryskiwanie.

Abstract

Fire spalling of concrete is a significant engineering problem that occurs under the high and dynamically increasing temperatures characteristic of fires. Spalling leads to a loss of concrete cross-sectional area during heating, resulting in a reduction in the load-bearing capacity of structural elements and posing a real danger to emergency crews working during a fire. High-performance concretes, characterized by low porosity and permeability, are particularly prone to spalling.

The RILEM 306-SPF Technical Committee has developed recommendations for assessing the susceptibility of concrete to fire spalling on a technical scale (screening tests) and supplementary guidelines for fire resistance tests. The main objective of screening tests is to select concrete with resistance to spalling under fire conditions. This paper presents the principles of assessing the susceptibility of concrete to fire spalling in both screening and fire resistance tests, with reference to the latest RILEM recommendations published in 2023/2024. Both the theoretical basis of the adopted solutions and examples of practical application of these tests in the design of concrete being resistant to fire spalling are discussed.

1. Wprowadzenie

Zagadnienie bezpieczeństwa konstrukcji w warunkach pożaru jest jednym z kluczowych wyzwań współczesnego budownictwa. Wysoka temperatura, dynamicznie narastające gradienty cieplne oraz towarzyszące im naprężenia wewnętrzne mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych, w tym do termicznego odpryskiwania betonu. Termiczne odpryskiwanie to nagłe i gwałtowne odspojenie fragmentów betonu z powierzchni narażonej na działanie ognia, prowadzące do redukcji przekroju poprzecznego i osłabienia właściwości nośnych elementu. Termiczne odpryskiwanie stwarza również bezpośrednie zagrożenie dla ekip ratowniczych oraz osób znajdujących się w strefie pożaru, z uwagi na możliwość wystąpienia gwałtownych eksplozji materiału.

Znaczenie problemu zostało szeroko dostrzeżone w środowisku naukowym i inżynierskim, w szczególności po przypadkach pożarów w tunelach, co doprowadziło do licznych badań eksperymentalnych i teoretycznych mających na celu jego zrozumienie oraz minimalizację skutków. Potwierdzono, że podatność betonu na termiczne odpryskiwanie zależy od wielu czynników, w tym od składu mieszanki betonowej, rodzaju zastosowanego cementu, klasy wytrzymałości betonu, porowatości, zawartości wody oraz warunków dojrzewania [1–3]. Obok czynników materiałowych, zwrócono uwagę na znaczny wpływ warunków brzegowych w czasie ekspozycji betonu na ogień na stopień odpryskiwania betonu [4,5]. Zarówno scenariusz pożaru, jak i stan naprężeń w elemencie decydują o intensywności lub w ogóle pojawieniu się termicznego odpryskiwania. Czynniki te, zarówno materiałowe, jak i zewnętrzne, mechaniczne i termiczne, decydują o zachowaniu się betonu nie tylko w przypadku pożaru w obiektach budowlanych, ale także w czasie badań laboratoryjnych. Odpowiednio dobrana metodyka badania ma zatem istotne znaczenie dla uzyskania właściwych wniosków o podatności betonu na termiczne odpryskiwanie.

Aktualna wersja Eurokodu 2 (PN-EN 1992-1-2:2024) [6], w rozdziale 10 *Rules for spalling*, zawiera nowe, bardziej szczegółowe wytyczne dotyczące termicznego odpryskiwania dla elementów konstrukcyjnych. Zapisy te nie wyjaśniają jednak, w jaki sposób przeprowadzić badanie podatności betonu na odpryskiwanie, w przypadku, gdy przeprowadzenie takiej oceny jest konieczne.

W odpowiedzi na potrzebę ujednolicenia metod badawczych oraz umożliwienia porównywalności wyników, Komitet Techniczny RILEM 256-SPF: *Spalling of Concrete Due to Fire: Testing and Modelling*, opracował rekomendacje dotyczące metod oceny podatności betonu na odpryskiwanie. Rekomendacje te obejmują zarówno uproszczone badania przesiewowe, jak i wytyczne dotyczące prowadzenia

badzeń pełnoskalowych w warunkach badań odporności ogniowej wg EN 1363-1 [7] i ISO 834-1 [8]:

- Recommendation of RILEM TC 256-SPF on the method of testing concrete spalling due to fire: material screening test [9],
- Recommendation of RILEM TC 256-SPF on fire spalling assessment during standardised fire resistance tests: complementary guidance and requirements [10].

Celem niniejszego referatu jest przegląd i analiza metod oceny podatności betonu na odpryskiwanie w świetle zaleceń wymienionych rekomendacji RILEM oraz przedstawienie ich zastosowania w praktyce inżynierskiej. Omówione zostaną podstawy fizykochemiczne termicznego odpryskiwania, procedury badawcze oraz przykłady wdrożeń w procesie projektowania betonu odpornego na działanie ognia.

2. Podstawy fizykochemiczne termicznego odpryskiwania betonu

Mechanizmy termicznego odpryskiwania betonu są złożone i wynikają ze współdziałania fizycznych i chemicznych procesów zachodzących w materiale pod wpływem wysokiej temperatury. Do najważniejszych należą: wzrost ciśnienia pary wodnej w porach betonu, naprężenia termiczne oraz uszkodzenia i osłabienie betonu wynikające z działania wysokiej temperatury. Każdy z tych mechanizmów może działać niezależnie, jednak w praktyce najczęściej nakładają się one na siebie, co znacząco zwiększa ryzyko pojawienia się odpryskiwania w betonie.

Jednym z podstawowych czynników prowadzących do odpryskiwania jest wzrost ciśnienia pary wodnej w porach betonu [11,12]. Pod wpływem wzrastającej temperatury woda zawarta w betonie zaczyna odparowywać, a w miarę dalszego nagrzewania para wodna zaczyna przemieszczać się w głąb elementu, w kierunku chłodniejszych warstw betonu. W betonach o niskiej porowatości ruch pary wodnej jest utrudniony. Gromadzi się ona w zamkniętych porach, tworząc na pewnej głębokości nieprzepuszczalną dla gazów warstwę, ang. *moisture clog*, w sąsiedztwie której obserwuje się znaczny wzrost ciśnienia pary wodnej i wody w przekroju betonu [13]. Jeśli ciśnienie to przekroczy lokalną wytrzymałość betonu na rozciąganie, dochodzi do nagłego, odspojenia się fragmentu materiału.

Drugim mechanizmem są naprężenia termiczne, które powstają na skutek nierównomiernego nagrzewania betonu. W warunkach pożaru powierzchnia elementu betonowego szybko osiąga wysoką temperaturę, podczas gdy jego wnętrze pozostaje stosunkowo chłodne. Prowadzi to do powstawania gradientów temperatury, a tym samym do nierównomiernych odkształceń termicznych w przekroju elementu. Beton, będąc materiałem o niskiej wytrzymałości na rozciąganie, jest szczególnie wrażliwy na takie obciążenia. W połączeniu z osłabieniem struktury spowodowanym wzrostem temperatury, naprężenia te mogą prowadzić do powstania delaminacji i odprysków fragmentów powierzchni [3].

Jednocześnie, wraz ze wzrostem temperatury zachodzą w betonie nieodwracalne przemiany chemiczne. Już w temperaturze około 105–150 °C następuje odparowanie wody wolnej, a powyżej 200 °C do dehydratacji żelu C-S-H. W wyższej temperaturze (ok. 400–600 °C) dochodzi do rozkładu portlandytu, co dalej osłabia spójność struktury. W wyniku tych przemian beton ulega uszkodzeniu i maleje jego wytrzymałość na rozciąganie co sprzyja jego odspojeniu pod wpływem ciśnienia pary i/lub naprężeń termicznych [1].

Najpopularniejszą teorią wyjaśniającą przyczyny termicznego odpryskiwania jest współwystępowanie wzrastającego ciśnienia pary wodnej, naprężeń termicznych i

degradacji mikrostruktury betonu. Wraz z pojawianiem się nowych metod diagnostycznych oraz rozwojowi modeli numerycznych pojawiają się bardziej zaawansowane modele wyjaśniające to trudne do przewidzenia i niebezpieczne zachowanie się betonu.

Należy pamiętać, że obok zmian, które zachodzą w samym materiale, warunki brzegowe, które oddziałują na sam element konstrukcyjnym czy element badawczy mają istotny wpływ na jego zachowanie się w czasie ekspozycji na ogień. To, czy dojdzie do termicznego odpryskiwania, w jakim momencie oraz z jaką intensywnością, zależy nie tylko od właściwości samego betonu, ale również od charakteru pożaru. Dotyczy to również sposobu przeprowadzenia badania ogniowego. W laboratoryjnej ocenie podatności betonu na termiczne odpryskiwanie różnice w metodologii mogą prowadzić do odmiennych wyników nawet przy badaniu tego samego materiału. Stanowi to dodatkowe wyzwanie w zakresie opracowania metodologii realizacji badań tego typu.

3. Badania przesiewowe termicznego odpryskiwania betonu

Podczas normowych badań odporności ogniowej PN-EN 1363, odpryski wpływają na odporność ogniową elementu i mogą być w trakcie tych badań inwentaryzowane. Jednak ze względów praktycznych i ekonomicznych istnieje potrzeba prostszych badań przesiewowych betonu, realizowanych na mniejszych elementach, w celu wstępnego doboru składu betonu z uwagi na najmniejszą podatność na odpryskiwanie. Procedura dotycząca przeprowadzania badań przesiewowych przedstawia metodologię badawczą, która jest dostosowywana do indywidualnego problemu badawczego. W badaniach przesiewowych wyróżnia się (i) *materiałowe badania przesiewowe* oraz (ii) *badania przesiewowe produktów*.

3.1 Cel badań przesiewowych

Opracowane przez zespół RILEM rekomendacje [9] dotyczą *badanych przesiewowych materiału i badań przesiewowych produktów*.

Badania przesiewowe materiału są zazwyczaj realizowane przez zespoły, które opracowują składy betonów. Celem tego typu badań jest porównanie zachowania się betonów o różnym składzie w warunkach ogniowych i określenie np. wpływu udziału składników (w/c, rodzaj kruszywa, rodzaj cementu, udział dodatków mineralnych, ilość i rodzaj włókien, itp.). Celem *badanych przesiewowych materiału* jest wytypowanie składów betonów o najwyższej odporności na odpryskiwanie.

W *badaniach przesiewowych produktów* zastosowanie betonu jest znane (beton na elementy konstrukcyjne: słupy, ściany; elementy osłonowe; el. obudowy tuneli itp.). W takim przypadku konfiguracja stanowiska badawczego, kształt elementów są dobierane pod kątem jak najwierniejszego odtworzenia sposobu obciążenia i pracy w konstrukcji docelowego zastosowania końcowego betonu. Celem tych badań jest przebadanie kilku kompozycji betonów i wybór składu betonu odpornego na odpryskiwanie zanim przystąpi się do czasochłonnnych w przygotowaniu i kosztownych badań odporności ogniowej elementów betonowych w skali rzeczywistej.

Należy podkreślić, że *badania przesiewowe produktów*, niezależnie od stopnia odtworzenia warunków brzegowych w elementach badawczych nie mogą zastąpić badań odporności ogniowej elementów prowadzonych wg normy PN-EN 1363.

Rekomendacja RILEM dla badań przesiewowych materiału [9] obejmuje informacje dotyczące badanych rodzajów materiałów i ich charakterystyki, rodzajów i geometrii próbek, warunków przechowywania, metod badań i mierzonych parametrów. Zawiera także informacje na temat technik obserwacji odpryskiwania podczas badania oraz metod oceny ilościowej odpryskiwania po badaniu.

Badania przesiewowe powinny pozwolić na wyselekcjonowanie betonu o optymalnym pod względem odporności na termiczne odpryskiwanie. Wytypowany w ten sposób beton powinien zostać wykorzystany do wykonania elementów pełnoskalowych, na których przeprowadza się ocenę odporności ogniowej wg PN-EN 1363. Badania odporności ogniowej potwierdzą brak występowania odpryskiwania w elemencie lub poziom odpryskiwania na bezpiecznym dla celów projektowych poziomie.

3.2 Geometria próbek i konfiguracja badania

Próbki stosowane w badaniach powinny mieć kształt płyty prostokątnej lub kołowej, o minimalnych wymiarach (minimalna długość boku, średnica i grubość) podanych w Tabeli 1. Minimalne wymiary elementów badawczych zaproponowano na podstawie doświadczeń badawczych członków Komitetu Technicznego RILEM 256-SPF, w oparciu o stosowane zasady dobrych praktyk dla tego typu badań.

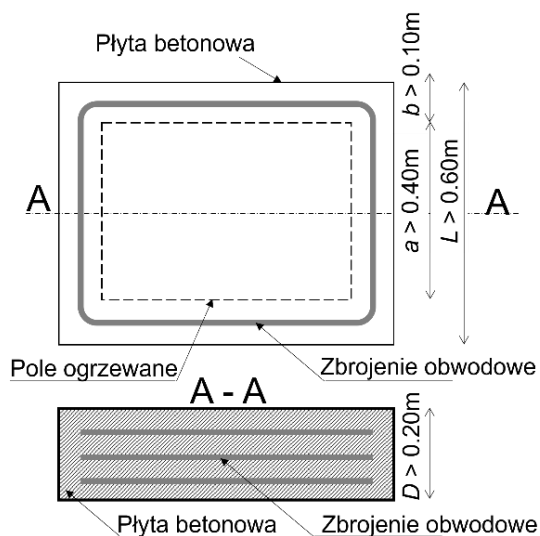
Wykazano, że skrępowanie odkształceń termicznych w płaszczyźnie płyty w czasie badania sprzyja pojawieniu się odpryskiwania. Dotyczy to nie tylko samego faktu jego pojawienia się, ale także jego głębokości i intensywności. Skrępowanie odkształceń w płaszczyźnie płyty powoduje ograniczenie pojawienia się mikropęknięć w przekroju badanego elementu i swobodnego zarysowania się płyty w czasie badania. Skutkuje to pogorszeniem właściwości transportowych w betonie dla pary wodnej i wody, a zatem zwiększeniem ciśnienia porowego w kolejnych warstwach betonu, w których łatwiej i częściej dochodzi do odpryskiwania [14].

Tabela 1. Minimalne wymiary elementów badawczych do badań przesiewowych [9].

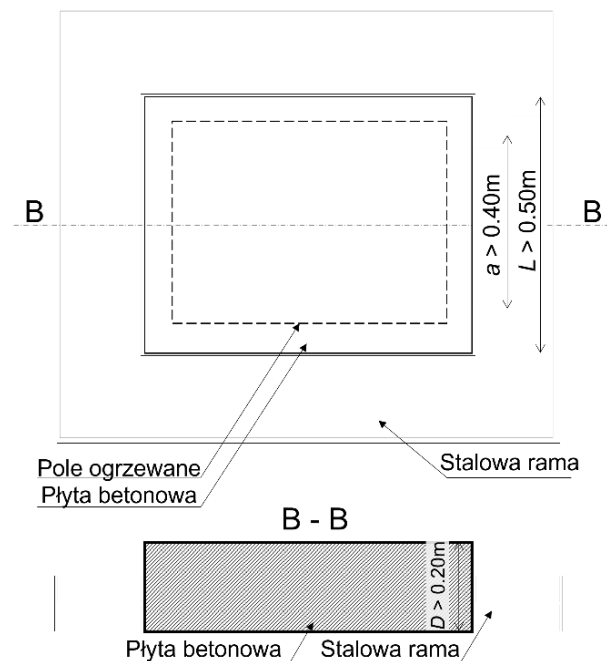
płyty prostokątne	
minimalny wymiar dł. boku L , Rys. 1, Rys. 2	0,50 m
minimalny wymiar dł. boku pola ogrzewanego a	0,40 m
płyty kołowe	
minimalna średnica L , Rys. 3	0,60m
minimalna średnica pola ogrzewanego a , Rys. 3	0,50m
minimalna grubość płyty D:	
płyta nieobciążona (i)	0,30 m
płyta skrępowana pasywnie, Rys. 1 / (ii-A), Rys. 2 / (iii-B), Rys. 3 (iii-C)	0,20 m
płyta obciążona, Rys. 4 / (iv-D)	0,15 m

Skrępowanie odkształceń termicznych w elemencie betonowym można wprowadzić na kilka rekomendowanych przez komitet RILEM sposobów; (i) zwiększając grubość płyty, co powoduje utrudnienie powstawania rys w nieogrzewanej obwodowej części płyty (ang. *cold rim*), (ii-A) wprowadzając obwodowe zbrojenie w trzech warstwach: zwiększa się wytrzymałość płyty na rozciąganie ograniczając możliwość odkształcenia elementu w strefie obwodowej płyty, Rys. 1, (iii-B) krępując odkształcenia płyty poprzez stalową ramę w przypadku

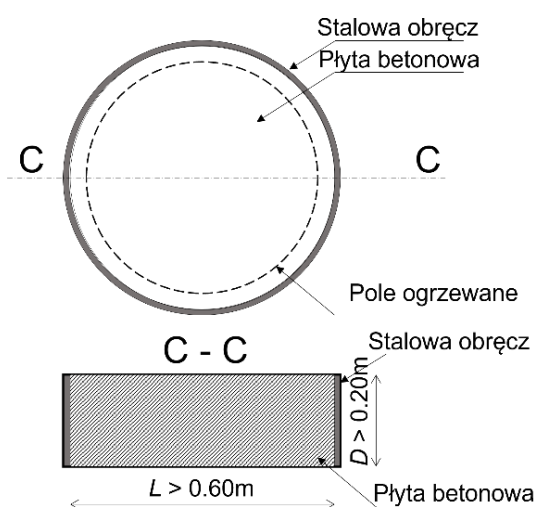
płyt prostokątnych, Rys. 2, lub (iii-C) stalową obręcz (sztywną rurę bezszwową) w przypadku płyt kołowych, Rys. 3, (iv-D) wprowadzając obciążenie ściskające w płaszczyźnie płyty w postaci: elementów sprężających, siłowników hydraulicznych lub innych urządzeń umożliwiających wprowadzenie dwu-, lub przynajmniej jedno-kierunkowego ściskania w płaszczyźnie płyty na poziomie 2 MPa, który, jak wynika z badań jest wystarczającym naprężeniem dla zapewnienia skrępowania płyty, Rys. 4.



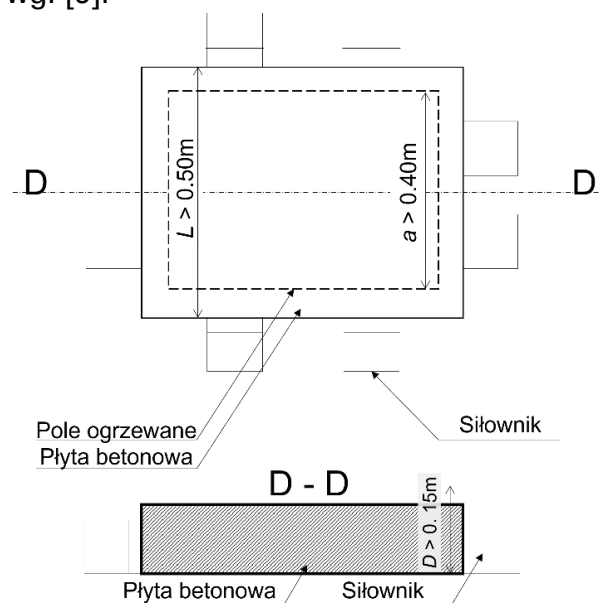
Rys. 1. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez zbrojenie obwodowe, wg. [9].



Rys. 2. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez stalową ramę, wg. [9].

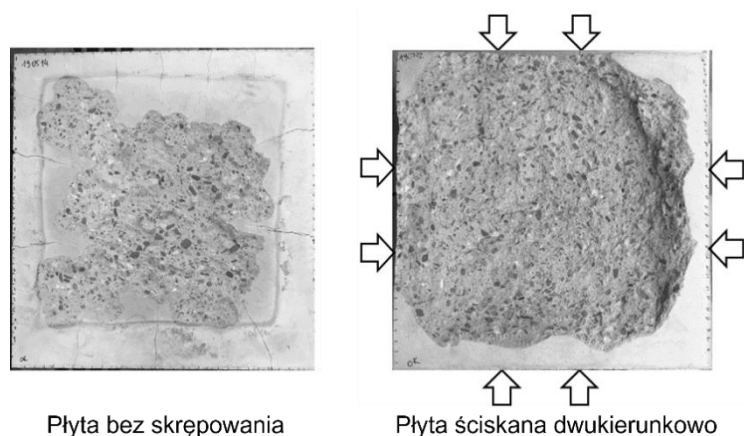


Rys. 3. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez stalową obręcz, wg. [9].



Rys. 4. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez obciążenie zewnętrzne.

Wymagana minimalna grubość elementów badawczych jest zatem związana z koniecznością zapewnienia skrzepowania odkształceń termicznych betonu w czasie badania ogniowego. Uwolnienie odkształceń termicznych i umożliwienie swobodnego zarysowania się płyty powoduje dalece różne wyniki przeprowadzonego badania. Przykład termicznego odpryskiwania w płycie bez skrzepowania i w płycie ściskanej dwukierunkowo przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Wpływ obecności skrzepowania odkształceń termicznych w badaniach przesiewowych na termiczne odpryskiwanie betonu o takim samym składzie (badania własne)

3.3 Pielęgnacja próbek i wiek betonu w chwili badania

Próbki mogą być przygotowywane w laboratorium lub w warunkach budowy, ale należy zapewnić im odpowiednią jakość wykonania i zachować jednorodność warunków dojrzewania dla wszystkich wykonanych elementów.

Prawidłowa pielęgnacja betonu i jednakowe warunki przechowywania stanowią istotne czynniki mogące wpływać na wyniki badań, głównie poprzez kształtowanie profilu wilgotnościowego w płytach do badań przesiewowych. Proces pielęgnacji warunkuje tempo hydratacji cementu oraz ogranicza niekontrolowane wysychanie, które może prowadzić do powstania gradientów wilgotności w przekroju elementu. Zbyt intensywna utrata wilgoci z powierzchni skutkuje przesuszeniem strefy przypowierzchniowej, co może fałszować mechanizm odpryskiwania poprzez sztuczne ograniczenie ciśnienia pary wodnej. Z kolei niedostateczna pielęgnacja może prowadzić do zatrzymania nadmiernej ilości wody w rdzeniu betonu, co w warunkach wysokotemperaturowych sprzyja gwałtownemu wzrostowi ciśnienia wewnętrznego i intensyfikacji odpryskiwania.

Z tego względu, zapewnienie kontrolowanej, ujednoliconej pielęgnacji próbek w badaniach przesiewowych jest kluczowe dla uzyskania reprezentatywnych, powtarzalnych wyników i wiarygodnej oceny wpływu składu mieszanki na podatność na termiczne odpryskiwanie.

Po rozformowaniu, płyty powinny być przechowywane przez 7 dni pod folią, w celu zapewnienia odpowiedniej pielęgnacji. Następnie próbki należy przechowywać w stałych warunkach, definiując temperaturę i wilgotność powietrza, oraz zapewniając płytom swobodną dopływ powietrza z każdej strony. Należy zapewnić jednakowe warunki przechowywania dla wszystkich próbek, unikając ich przesuszenia.

Zaleca się, aby badania były prowadzone na próbkach w jednakowym wieku, nie wcześniej niż po 90 dniach, w jak najkrótszym możliwie odstępie czasowym dla całej serii badań. Zalecenia dotyczące realizacji badań po 90 dniach wynikają z doświadczeń wskazujących na istotne procesy zachodzące w mikrostrukturze betonu, a zwiększające podatność na termiczne odpryskiwanie dojrzałego betonu. Wyróżnić tutaj należy proces hydratacji w szczególności dla spoiw z dodatkami mineralnymi o charakterze pucolanowym i tych o niskim wskaźniku wodno-cementowym. Po 28-dniach zachodzi dalsze zagęszczanie mikrostruktury, które powoduje obniżanie porowatości i zmniejszenie przepuszczalności betonu, zwiększając ryzyko odpryskiwania. Ponadto jak pokazują doświadczenia, podczas oceny wpływu rodzaju kruszywa, typu i ilości włókien czy też dodatków mineralnych, na podatność betonu na termiczne odpryskiwanie, bardziej jednolite w serii wyniki uzyskuje się w betonach dojrzałych. Starszy beton charakteryzuje się bardziej ustabilizowanym rozkładem wilgotności na przekroju, co wpływa na lepszą identyfikację rzeczywistego oddziaływania poszczególnych składników na mechanizm odpryskiwania.

3.4 Przygotowanie, realizacja badania i pomiary

Podczas badania przesiewowego próbki są poddawane ogrzewaniu jednostronnemu, w pozycji pionowej lub poziomej, zgodnie ze standardową krzywą pożarową zdefiniowaną w ISO 834-1. Czas trwania badania powinien wynosić co najmniej 30 minut i powinien być taki sam dla wszystkich badanych płyt w kampanii badawczej. Zwykle badanie trwa 60 minut. Próbkę mogą być badane bez obciążenia, z obciążeniem ściskającym w płaszczyźnie płyty albo z pasywnym skrupowaniem odkształceń termicznych, jak opisano w rozdziale 3.2. zapewniając ten sam typ obciążenia dla wszystkich badanych elementów.

W czasie badania należy rejestrować w sposób ciągły temperaturę, a w przypadku obciążenia zewnętrznego, również wartość siły przekazywanej na płytę. W przypadku wystąpienia odpryskiwania monitoruje się parametry opisujące postęp i zasięg odpryskiwania.

- początek i czas trwania odpryskiwania (min);
- ogólny opis zdarzeń odpryskiwania wraz z opisem jego charakteru (oszacowanie wielkości odprysków i kształtu, jeśli to możliwe);
- ilość i intensywność zdarzeń odpryskiwania oraz dominująca formę odpryskiwania (odpryskiwanie powierzchniowe, odpryskiwanie kruszywa, zdarzenia eksplozyjnego odpryskiwania [15]);
- określany jest także moment, w którym wystąpi odslonięcie zbrojenia.

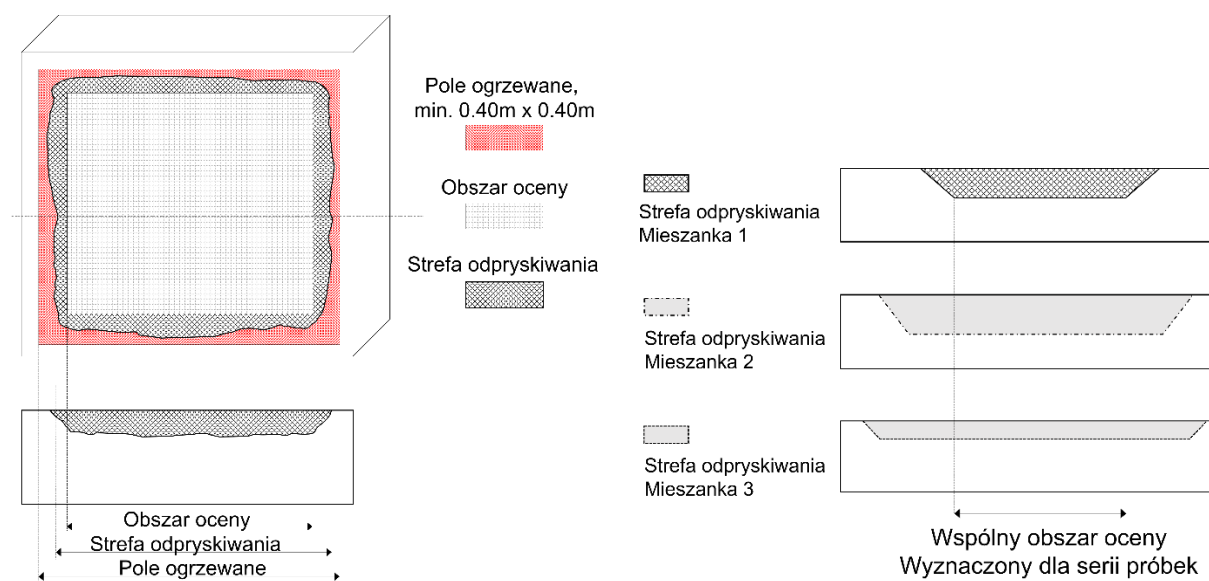
Po zakończeniu badania oględziny badanej próbki przeprowadzane są w ciągu 24 godzin. Czas upływający od zakończenia badania jest istotny dla oszacowania ilości i zasięgu odprysków, w szczególności w przypadku stosowania kruszyw wapiennych, dla których obserwuje się w kontakcie z wilgocią zawartą w powietrzu proces ponownego uwodnienia tlenku wapnia, ekspansję produktów reakcji, które prowadzą do złuszczeń.

W przypadku braku uszkodzeń jest to odnotowane w raporcie. W przypadku wystąpienia uszkodzeń i odprysków pojawia się konieczność oceny ilości i zasięgu ich występowania. W rekomendacji RILEM zdefiniowano obszar, dla którego dokonuje się inwentaryzacji odpryskiwania (*assessment area*). Wyznaczenie tego obszaru stanowi istotny element procedury badawczej, ponieważ pozwala na

rzetelną ocenę rozległości i głębokości odprysków oraz na porównanie betonów o różnym składzie.

Obszar podlegający ocenie jest to ogrzewana powierzchnia, z wyłączeniem nieogrzewanej obwodowej części płyty. Dodatkowo należy wykluczyć strefę, w której występuje nierównomierne odpryskiwanie. Jest to obszar, gdzie widoczna jest zmienność między powierzchniami z intensywnym odpryskiwaniem, a fragmentami pozbawionymi uszkodzeń. Takie przejściowe strefy nie są reprezentatywne i mogą zaburzać wyniki oceny, ponieważ warunki termiczne i mechaniczne przy krawędziach często różnią się od tych panujących w środkowej części próbki podlegającej równomiernemu ogrzewaniu.

Obszar płyty podlegający ocenie powinien obejmować możliwie największą jednorodną powierzchnię płyty w strefie centralnej, w którym odpryskiwanie ma charakter równomierny, Rys.6. Co istotne, tak wyznaczony obszar powinien zostać ustalony dla wszystkich płyt badanych w danej serii, umożliwiając porównanie betonów. W praktyce oznacza to, że należy wyznaczyć najmniejszy wspólny jednorodny obszar, który występuje we wszystkich badanych próbkach. Przykład właściwego wyznaczenia obszaru oceny dla serii próbek przedstawiono na Rys. 7.



Rys. 6. Wyznaczenie obszaru oceny po badaniu przesiewowym, wg. [9].

Rys. 7. Wyznaczenie obszaru oceny dla serii próbek, wg. [9].

W sytuacji, gdy nie da się jednoznacznie wskazać obszaru o spójnym charakterze odpryskiwania, zaleca się, aby obszar oceny przyjąć jako powierzchnię o 10% mniejszą niż powierzchnia bezpośrednio ogrzewana.

Dokładne wyznaczenie obszaru ma istotne znaczenie, ponieważ na jego podstawie ustala się:

- średnią głębokość odpryskiwania w obszarze oceny;
- maksymalną głębokość odpryskiwania (nawet jeśli znajduje się poza regularną siatką).

Pomiary głębokości odprysków mogą być wykonywane ręcznie w regularnej siatce w co najmniej 20 równomiernie rozłożonych punktach lub za pomocą narzędzi

zautomatyzowanych, np. skanowania 3D, umożliwiających sporządzenie mapy odprysków.

Wyniki badań powinny być dokładnie udokumentowane w raporcie, który obejmuje: przedstawienie składu mieszanki betonowej, właściwości mechanicznych i fizycznych betonu, informacje o kształcie próbek i warunkach ich przechowywania. Dodatkowo w raporcie zamieszcza się opis sposobu realizacji obciążenia termicznego i mechanicznego. Raport zawiera wszystkie obserwacje i pomiary związane z występowaniem i charakterystyką odprysków.

3.5 Wnioski z badań przesiewowych

Badania przesiewowe mają na celu identyfikację składu betonowej o najniższej podatności na termiczne odpryskiwanie. Jeżeli badane mieszanki mają na celu być stosowane w elementach konstrukcyjnych, wytypowana mieszanka jako najbardziej odporna na termiczne odpryskiwanie powinna następnie zostać zastosowana do wykonania elementów w skali rzeczywistej, które posłużą do przeprowadzenia pełnoskalowych badań odporności ogniowej. Takie badania pozwolą potwierdzić brak odprysków lub ich występowanie na poziomie akceptowalnym z punktu widzenia bezpieczeństwa i wymagań projektowych. Raportowanie odpryskiwania w badaniach odporności ogniowej przeprowadza się zgodnie z wytycznymi RILEM opisanymi w kolejnym rozdziale.

4. Ocena podatności betonu na termiczne odpryskiwanie podczas realizacji badań odporności ogniowej: uzupełniające wytyczne i wymagania

Badania pełnoskalowe mają na celu przede wszystkim ocenę odporności ogniowej elementów pełnoskalowych. Mogą one również dostarczyć przydatnych informacji na temat charakteru i zasięgu termicznego odpryskiwania. Wymaga to jednak, aby raport z badań był sporządzany w sposób bardziej szczegółowy niż ten wymagany przez normę dotyczącą badań odporności ogniowej, w której jedynie odnotowuje się wystąpienie tego zjawiska.

W porównaniu do podstawowych wymagań norm ISO 834-1 oraz EN 1363-1, które definiują ogólne warunki badań odporności ogniowej (m.in. przebieg obciążenia ogniowego, wymagania dotyczące pieca i sposobu przyłożenia obciążeń mechanicznych), zalecenia RILEM TC 256-SPF [10] w zakresie oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie wprowadzają szereg dodatkowych, bardziej szczegółowych wytycznych. Celem tych uzupełnień jest umożliwienie rzetelnej identyfikacji i ilościowej oceny odpryskiwania, czego standardowe badanie wg normy nie obejmuje. Poniżej przedstawiono, rekomendacje RILEM w tym zakresie.

4.1 Dodatkowa charakterystyka betonu

Poza 28-dniową wytrzymałością betonu na ściskanie, należy wyznaczyć referencyjną wytrzymałość na ściskanie (w dniu badania) na próbkach przechowywanych w takich samych warunkach jak główny element badawczy.

Ponadto, ze względu na istotny wpływ wilgotności betonu na wyniki odpryskiwania, zaleca się dokładne oznaczenie zawartości wilgoci w różnych strefach próbki: 0–2,5 cm i 2,5–5 cm od powierzchni ekspozowanej, oraz powyżej 5 cm głębokości (rdzeń). Zalecana procedura oznaczania wilgotności w warstwie

przypowierzchniowej (do 5 cm) polega na przygotowaniu cylindrycznych próbek o średnicy co najmniej 10 cm i długości równej grubości badanego elementu. Aby zapewnić takie same warunki dojrzewania, próbki powinny pozostać w plastikowych formach aż do momentu badania. Przed określeniem wilgotności próbki należy przeciąć, np. poprzez rozłupywanie lub cięcie „na sucho”. Określenie wilgotności realizuje się suszenie w $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ do uzyskania stabilnej masy powstałych dysków.

4.2 Pielęgnacja betonu

Normy ISO 834-1 i EN 1363-1 nie precyzują wymagań dotyczących sposobu przechowywania betonu ani wieku betonu w momencie realizacji badań. Dla omawianych celów, podobnie jak w badaniach przesiewowych, zalecany wiek betonu w chwili badania to co najmniej 3 miesiące dojrzewania w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Ponadto, ważnym jest unikanie przyspieszonego suszenia, ponieważ może to zaburzyć profil wilgotności i zafałszować ocenę odprysków. Elementom w czasie dojrzewania i przechowywania powinno się zapewnić stałą cyrkulację powietrza. Należy unikać układania płyt bezpośrednio na podłożu, w szczególności powierzchni eksponowanej na działanie ognia. Zaleca się układanie płyt na przekładkach umożliwiających dostęp powietrza.

4.3 Pomiary i obserwacje specyficzne dla odpryskiwania

Podczas przeprowadzania badań odporności ogniowej z uwzględnieniem oceny podatności na termiczne odpryskiwanie, rekomendowane jest stosowanie dodatkowych procedur pomiarowych i obserwacyjnych, wykraczających poza standardowe wymagania norm ISO i EN.

W czasie badania zaleca się prowadzenie ciągłej oceny wizualnej i akustycznej. Należy rejestrować moment rozpoczęcia i zakończenia odprysków, a także określać ich intensywność, lokalizację i charakter. Jeżeli dojdzie do odsłonięcia zbrojenia w wyniku odprysków, należy zaraportować czas. Dla pełnej analizy rozwoju odpryskiwania, rekomenduje się nagrywanie wideo oraz dźwięku przez cały czas trwania badania.

Po zakończeniu badania i ostudzeniu elementu, przeprowadza się inwentaryzację odprysków. Podobnie jak w badaniach przesiewowych, może być wykonana ręcznie w układzie siatki pomiarowej obejmującej co najmniej 100 punktów pomiarowych lub przy zastosowaniu innych dokładnych technik pomiarowych. Na podstawie tych danych należy określić: średnią głębokość odprysków na całej powierzchni ogrzewanej, średnią głębokość odprysków mierzoną w obrębie obszarów z odpryskami, a także maksymalną głębokość, jeśli nie została uchwycona w siatce pomiarowej.

Dodatkowo, po zakończeniu badania należy przeprowadzić ocenę oderwanych fragmentów betonu. Informacje dotyczą rozmiarów i objętości oraz opisu kształtu, a także wykonania dokumentacji fotograficznej z odniesieniem (np. linijką).

4.4 Raport końcowy z badań odporności ogniowej z uzupełnieniem o termiczne odpryskiwanie

Raport końcowy z badania powinien zawierać rozszerzony zakres danych. Oprócz wyników standardowych, należy w nim ująć rzeczywisty, objętościowy skład mieszanki betonowej, szczegóły dotyczące zastosowanych włókien (jeśli były używane), parametry zbrojenia, wyniki pomiarów wilgotności i wytrzymałości betonu

na ściskanie, w tym referencyjną wartość, a także wszystkie obserwacje i dane ilościowe związane z odpryskiwaniem. Normy ISO i EN ograniczają wymagany zakres raportowania do podstawowych kryteriów odporności ogniowej, pomijając szczegółową analizę i inwentaryzację odprysków.

Stosowanie rekomendacji RILEM w zakresie oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie podczas badań odporności ogniowej ma istotne znaczenie, ponieważ stanowi uzupełnienie ogólnych norm ogniowych (takich jak ISO 834-1 czy EN 1363-1), które nie obejmują tego problemu w wystarczającym stopniu. Odpryskiwanie może prowadzić do znacznej utraty przekroju nośnego i przyspieszonej degradacji elementu, a tym samym wpływać na jego rzeczywistą odporność ogniową.

5. Przykłady praktycznego zastosowania rekomendacji w projektowaniu betonu odpornego na termiczne odpryskiwanie

Badania przesiewowe zgodne z rekomendacjami RILEM [9], ukierunkowane na ocenę odporności betonu na termiczne odpryskiwanie, znajdują coraz szersze zastosowanie również w Polsce. Przykładem jest jedna z kampanii badawczych przeprowadzonych na Politechnice Krakowskiej, której celem była ocena skuteczności modyfikacji składu betonu poprzez dodatek włókien polipropylenowych oraz stalowych w ograniczaniu termicznego odpryskiwania betonu, w kontekście jego docelowego zastosowania w prefabrykowanych obudowach tunelowych.

Badania przeprowadzono w piecu wysokotemperaturowym DRAGON, gdzie płyty betonowe poddano jednostronnemu nagrzewaniu zgodnie z krzywą ISO 834-1 oraz dwukierunkowemu ściskaniu w płaszczyźnie płyty. Wprowadzenie obciążenia miało na celu odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy elementu oraz zwiększenie ryzyka wystąpienia zdarzeń odpryskiwania, poprzez ograniczenie możliwości swobodnych odkształceń i transportu pary wodnej.

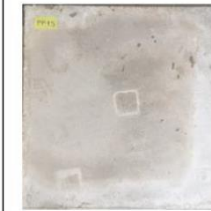
Zrealizowano ocenę pięciu betonów z różnym udziałem włókien PP i stalowych. W płycie bez włókien (referencyjnej) zaobserwowano liczne zdarzenia odpryskiwania występujące w sposób ciągły. Termiczne odpryskiwanie, objęło 89% powierzchni ogrzewanej, z maksymalną głębokością odprysków sięgającą 29 mm. Mieszanki z dodatkiem włókien PP, niezależnie od ilości dozowania (w zakresie 1, 1,5 i 2%) skutecznie zapobiegły wystąpieniu odprysków. W badaniach wskazano na dwa poziomy dozowania włókien, umożliwiające skuteczne wyeliminowanie odpryskiwania, dla których dodatkowo zaobserwowano ograniczenie zarysowania elementu.

W przypadku betonów z włóknami PP i stalowymi odnotowano wystąpienie sieci drobnych spękań powierzchniowych i brak odpryskiwania. Porównanie wyglądu płyt po badaniu przedstawiono na Rys. 8.

Zidentyfikowano problem wtórnego złuszczenia się powierzchni betonu po kilku dniach od badania, wynikające z ponownego uwodnienia tlenku wapnia powstałego z kruszywa wapiennego obecnego w betonie.

Badania przesiewowe umożliwiły szybkie i technicznie wiarygodne wskazanie optymalnych mieszanek pod względem odporności na termiczne odpryskiwanie. Potwierdziły tym samym zasadność stosowania tej metody jako efektywnego narzędzia inżynierskiego. Dzięki porównaniu pięciu różnych mieszanek betonowych w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, możliwe było szybkie i skuteczne

zidentyfikowanie składu wykazującego najkorzystniejsze zachowanie z uwagi na termiczne odpryskiwanie.

Zdjęcie powierzchni po 7 dniach od badania				
Pęcznienie kruszyw wapiennych	Złuszczenie części powierzchni	Brak zmian (niska T_{max})	Intensywne złuszczenie powierzchni (wysoka T_{max})	Złuszczenie części powierzchni
				

Rys. 8. Wyniki przykładowej kampanii badań przesiewowych (badania własne).

6. Podsumowanie i wnioski

W odpowiedzi na ryzyko związane z termicznym odpryskiwaniem oraz brak jego uwzględnienia w normowych badaniach odporności ogniowej (ISO 834-1, EN 1363-1), rekomendacje RILEM TC 256-SPF wprowadzają badania przesiewowe jako pomocne narzędzie inżynierskie służące do wczesnej oceny podatności mieszanek betonowych. Badania te mają na celu identyfikację i selekcję składu betonu, który nie wykazuje tendencji do odpryskiwania w warunkach pożaru.

Procedura badań przesiewowych została opracowana w sposób elastyczny. Pozwala dopasować ją do etapu projektowego: *badania przesiewowe materiału* stosuje się przy opracowywaniu nowych składów mieszanki betonowej, natomiast *badania przesiewowe produktów*, przy optymalizacji składu betonu pod kątem zdefiniowanego zastosowania. Umożliwia to efektywne porównywanie różnych składów mieszanki i eliminację mieszanek podatnych na odpryskiwanie jeszcze przed realizacją czasochłonnych i kosztownych badań pełnoskalowych.

Rekomendacje RILEM zawierają szczegółowe wytyczne dotyczące geometrii próbek, metod pielęgnacji, wieku betonu, konfiguracji termicznej i mechanicznej badania, sposobu obserwacji odprysków oraz precyzyjnego wyznaczania obszaru oceny jak i sposobu inwentaryzacji odprysków. Dzięki temu badania przesiewowe są powtarzalne, porównywalne i wiarygodne. Zaleca się ze szczególną uwagą i w jednakowych warunkach pielęgnować i przechowywać próbki betonu w celu uzyskania zbliżonych stanów wilgotnościowych, ponieważ te czynniki silnie determinują możliwość wystąpienia odprysków.

Zaleca się również rozszerzenie obserwacji w zakresie odpryskiwania podczas realizacji normowych badań odporności ogniowej. Zgodnie z rekomendacjami RILEM, należy prowadzić dodatkowe obserwacje i dokumentować charakterystykę odprysków.

Konsekwentne wdrażanie badań przesiewowych zgodnie z zaleceniami RILEM powinno być coraz szerzej stosowaną praktyką w procesie projektowania i oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie.

7. Literatura

- [1] G.A. Houry, Y. Anderberg, Concrete Spalling Review, 2000.
- [2] I. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance

- évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse Dr. (2004).
- [3] R. Jansson, Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies, KTH, Stockholm, 2013.
- [4] K. Mróz, I. Hager, M. Tekieli, Effect of cold rim on extent and type of concrete fire spalling, in: 5th Int. Work. Concr. Spalling Due to Fire Expo., Borås, Sweden, 2017: pp. 51–62.
- [5] F. Lo Monte, R. Felicetti, A. Meda, A. Bortolussi, Influence of the test method in the assessment of concrete sensitivity to explosive spalling, in: 5th Int. Work. Concr. Spalling Due to Fire Expo., Borås, Sweden, 2017: pp. 289–300.
- [6] PN-EN 1992-1-2:2024-05, Eurokod 2 -- Projektowanie konstrukcji z betonu -- Część 1-2: Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe, 2004.
- [7] EN-1363-1:201, Fire resistance tests - Part 1: General Requirements, 2012.
- [8] ISO 834-1:1999, Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements, 1999.
- [9] P. Pimienta, R. McNamee, I. Hager, K. Mróz, L. Boström, S. Mohaine, S.-S. Huang, J.-C. Mindeguia, F. Robert, C. Davie, R. Felicetti, M.J. Miah, M. Lion, F. Lo Monte, M. Ozawa, I. Rickard, K. Sideris, M.C. Alonso, A. Millard, U.-M. Jumppanen, L. Bodnarova, J. Bosnjak, S. Dal Pont, V. Dao, D. Dauti, F. Dehn, R. Hela, T. Hozjan, M. Juknat, J. Kirnbauer, J. Kolsek, M. Korzen, H. Lakhani, C. Maluk, F. Meftah, B. Moreau, F. Pesavento, D.T. Pham, K. Pistol, J.P. Correia Rodrigues, M. Roosefid, M. Schneider, U.K. Sharma, L. Stelzner, B. Weber, F. Weise, Recommendation of RILEM TC 256-SPF on the method of testing concrete spalling due to fire: material screening test, Mater. Struct. 56 (2023) 164. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02202-z>.
- [10] P. Pimienta, R. McNamee, F. Robert, L. Boström, S.-S. Huang, K. Mróz, C. Davie, S. Mohaine, M.C. Alonso, L. Bodnarova, J. Bosnjak, S. Dal Pont, V. Dao, D. Dauti, F. Dehn, R. Felicetti, I. Hager, R. Hela, T. Hozjan, M. Juknat, U.-M. Jumppanen, J. Kirnbauer, J. Kolsek, M. Korzen, H. Lakhani, M. Lion, F. Lo Monte, C. Maluk, F. Meftah, M.J. Miah, A. Millard, J.-C. Mindeguia, B. Moreau, Y. Msaad, M. Ozawa, F. Pesavento, D.T. Pham, K. Pistol, I. Rickard, J.P.C. Rodrigues, M. Roosefid, M. Schneider, U.K. Sharma, K. Sideris, L. Stelzner, B. Weber, F. Weise, Recommendation of RILEM TC 256-SPF on fire spalling assessment during standardised fire resistance tests: complementary guidance and requirements, Mater. Struct. 57 (2024) 3. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02248-z>.
- [11] L.T. Phan, Pore pressure and explosive spalling in concrete, Mater. Struct. Constr. 41 (2008) 1623–1632.
- [12] R. Felicetti, F. Lo Monte, P. Pimienta, A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating, Cem. Concr. Res. 94 (2017) 13–23.
- [13] R. Jansson, L. Boström, Fire Spalling – the Moisture Effect, in: 1st Int. Work. Concr. Spalling Due to Fire Expo. - From Real Life Exp. to Pract. Appl. to Lab-Scale Investig. Numer. Model., Leipzig, Germany, 2009: pp. 120–129.
- [14] K. Mróz, Assessment of spalling risk in concrete subjected to fire, Cracow University of Technology, 2020.
- [15] K. Mróz, I. Hager, Causes and mechanism of concrete spalling under high temperature caused by fire, Cem. Wapno Bet. 6 (2017) 445–456.