

dr inż. **Bartosz Zegardło**¹
st. kpt. dr inż. **Paweł Ogrodnik**²

Przyjęty/Accepted/Принята: 30.06.2015;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 21.02.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2016;

Analiza destrukcyjnego wpływu nasączenia wodą na parametry wytrzymałościowe betonów poddanych warunkom pożarowym³

An Analysis of the Destructive Influence of Water Saturation on the Durability of Concrete Exposed to a Fire

Анализ деструктивного воздействия воды на параметры устойчивости бетона, который подвергается влиянию огня

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu było przedstawienie wyników badań betonu skomponowanego z użyciem odpadów ceramiki sanitarnej, jako kruszywa w aspekcie odporności na działanie wysokich temperatur. Znormalizowane próbki betonowe zostały poddane wstępnemu nasączeniu wodą a następnie wygrzane zgodnie z założonym rozkładem „temperatura-czas”. Autorzy artykułu opierając się na wcześniejszych doświadczeniach uzyskali beton o podwyższonej odporności na warunki pożarowe jednocześnie odporny na zjawisko eksplozyjnego odpryskiwania.

Metody: Próbki betonowe do badań wytrzymałościowych zostały zaprojektowane w oparciu o cement glinowy i kruszywo na bazie stłuczki ceramicznej. Pierwszą serią próbek poddano nasączeniu poprzez całkowite zanurzenie w wodzie na okres 5 minut po wyjęciu poddano je wstępnemu osuszeniu przez 10 minut. Próbki drugiej serii przebywały zanurzone całkowicie w wodzie przez okres 12 godzin a następnie jak poprzednie zostały wstępnie osuszone. Tak przygotowane próbki umieszczono w średniotemperaturowy piec komorowy typu PK 1100/1 a następnie rozpoczęto proces grzewczy zgodnie z założonym rozkładem „temperatura-czas” aż do osiągnięcia temperatury 1000°C. Badania wytrzymałościowe próbek prowadzono po 30 dniach od ich wygrzewania.

Wyniki: Uzyskane wyniki badań potwierdziły znaczący wpływ warunków wilgotnościowych w jakich przebywały próbki betonowe a następnie oddziaływania wysokiej temperatury na ich wytrzymałość. Beton porowaty zaprojektowany w oparciu o doświadczenia projektowania betonów ogniotrwałych po poddaniu wygrzewaniu symulującemu warunki pożarowe cechował się wytrzymałością na ściskanie rzędu 27 MPa. Ten sam beton po zanurzenie w wodzie na okres 5 minut a następnie wygrzaniu uzyskał średnią wytrzymałość 6,42 MPa. Natomiast beton poddany nasączeniu przez okres 12 godzin posiadał średnią wytrzymałość na ściskanie równą 5,79 MPa. Pomimo tego że próbki poddawane były tym samym zabiegom wytwórczym i pielęgnacyjnym z powodu ich niestandardowej porowatej struktury jak pokazało ważenie wchłaniały różne porcje wody. Przyczynę takiego stanu rzeczy upatruje się w stosunkowo dużej nasiąkliwości samego kruszywa ceramicznego. Jednocześnie podczas wygrzewania do temperatury 1000°C we wszystkich przebadanych próbkach nie zaobserwowano eksplozyjnego odpryskiwania betonu porowatego.

Wnioski: Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą jak bardzo destrukcyjnym czynnikiem może być wilgotność dla betonu, który poddany jest warunkom pożarowym. Jako przyczynę tej sytuacji upatruje się zjawisko naruszania struktury kompozytu przez zawartą w porach wodę, która zwiększa swoją objętość podczas nagrzewania. Szczególnym wnioskiem z przeprowadzonych badań jest fakt konieczności każdorazowej oceny parametrów wytrzymałościowych elementów betonowych które poddane były oddziaływaniu pożaru. Elementy takie bowiem pomimo zachowania swoich cech zewnętrznych, spistości niezmienną struktury i postaci mogą posiadać znacząco niższe parametry wytrzymałościowe co można jedynie określić podczas badań laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: beton żaroodporny, temperatury pożarowe, ceramika sanitarna

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

ABSTRACT

Aim: The purpose of this paper is to present the results of a study involving concrete, containing sanitary ceramic waste as an aggregate, in context of resistance properties to high temperatures. Standardized concrete specimens were subjected to initial saturation with water and subsequently exposed to a heating process according to a predefined “temperature-time” schedule. Based on the previous experiments, the authors obtained a concrete with increased resistance to the effect of fire and, simultaneously, resistant to effects of thermal spalling.

Methods: Concrete specimens used for strength studies were developed using alumina cement mixed with sanitary ceramics waste aggregate. The first batch of specimens were saturated by complete submersion in water for a period of 5 minutes. Subsequently, the removed specimens were dried for 10 minutes. A second batch of specimens was fully submerged for 12 hours, and similarly to the first batch, the specimens were dried. Next, the prepared specimens were placed in a PK 1100/1 type medium range temperature furnace. The heating process was initiated at

¹ Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach / Siedlce University of Natural Sciences and Humanities; e-mail: bart.z@wp.pl;

² Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie / The Main School of Fire Service, Warsaw, Poland;

³ Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w powstanie artykułu / The authors contributed equally to this article;

a predefined “temperature-time” schedule, until a temperature of 1000°C was achieved. Durability tests were performed 30 days after heating.

Results: The derived test results verified the significant impact of moist conditions, in which concrete specimens were placed and secondly, the high temperature impact on the specimen durability. A porous concrete prepared based on the design experiences of refractory concrete after heating, which simulated fire conditions, was characterised by a compressive strength of 27 MPa. For the same concrete after submersion in water for 5 minutes and heating, the average strength value was 6.42 MPa. While for the concrete saturated for 12 hours the obtained compressive strength value was 5.79 MPa. Although specimens were subjected to the same manufacturing treatments and care, they absorbed different amounts of water. This was revealed by weighing and is attributable to their non-standard porous structure and significantly high absorption level of ceramic aggregate. The specimens were heated to 1000°C and no thermal spalling was observed for all tested specimens.

Conclusions: Study results reveal the destructive impact that moisture can have on concrete, when exposed to the influence of fire. The cause of such a development is perceived to stem from the disturbance caused to the composite structure by the ingress of water, which increases in volume during the heating process. From a performed experiment it is evident that there is a need to conduct an evaluation of durability for all concrete elements, which are exposed to the influence of fire. Such elements, despite constancy associated with their external features, apparent invariable structure and form, in fact can have significantly lower durability parameters, which can only be revealed during laboratory tests.

Keywords: refractory concrete, fire temperatures, sanitary ceramics

Type of article: original scientific article

АННОТАЦИЯ

Цель: Цель данной статьи – представить результаты исследований бетона, состоящего из отходов санитарной керамики с точки зрения устойчивости крошки к воздействию высоких температур. Стандартизированные бетонные образцы предварительно насыщались водой, а затем нагревались, в соответствии с заранее определенным распределением „температура-время”. На основе предыдущих опытов авторы статьи получили бетон повышенной устойчивости к огню, в то же время, устойчивый к явлению взрывного откалывания.

Методы: Образцы бетона для испытаний на прочность были разработаны на основе глиноземистого цемента и крошки из керамических отходов. Первая серия образцов была подвергнута замачиванию путем полного погружения в воду в течение 5 минут. После того они были предварительно осушены в течение 10 минут. Образцы второй серии оставались полностью погружены в воду в течение 12 часов, а затем, как и предыдущие, были предварительно высушены. Таким образом подготовленные образцы были помещены в среднетемпературную камерную печь типа РК 1100/1. Затем продолжался процесс нагревания в соответствии с установленным распределением „температура-время” до тех пор, пока температура не достигла 1000°C. Испытания прочности образцов проводились по истечении 30 дней после выгревания.

Результаты: Полученные результаты подтвердили существенное влияние условий влажности, в которых оставались бетонные образцы, а затем высокой температуры на их прочность. Несмотря на это, образцы подвергались таким же процессам производства и обработки, в связи с их нестандартной пористой структурой, как показало их взвешивание, они поглощали неодинаковые порции воды. Причина этого состояния заключается в относительно высокой абсорбционной способности керамической крошки. В то же время в процессе нагревания до температуры 1000°C во всех опытных образцах не появилось явление взрывного откалывания.

Выводы: Результаты данного исследования показывают насколько разрушительным фактором для бетона, который подвергается влиянию пожара, может быть влажность. В качестве причины такого состояния рассматривается нарушение составной структуры из-за содержащейся в порах воды, объем которой увеличивается во время нагрева.

Из проведенного эксперимента следует, что каждый раз после возникновения воздействий пожара, необходимо оценить показатели прочности бетонных элементов. Это связано с тем, что такие элементы, несмотря на сохранение их всех внешних характеристик, неизменную монолитность структуры и формы, могут иметь значительно низкие показатели прочности, а это можно определить только в ходе лабораторных исследований.

Ключевые слова: жаростойкий бетон, пожарные температуры, санитарная керамика

Вид статьи: оригинальная научная статья

1. Wstęp

Przenoszenie obciążeń przez materiały konstrukcyjne w warunkach wysokich temperatur to zagadnienie wnikliwie analizowane przez szereg zespołów badawczych. Doświadczenia naukowe obierają dwa bliskie sobie kierunki. Z jednej strony poszukuje się materiałów, które mogą bezawaryjnie pracować w środowisku o stale zwiększonej temperaturze, z drugiej strony bada się zachowanie materiałów, dla których obciążenie wysoką temperaturą stanowi jedynie sytuację awaryjną (wyjątkową). Na rynku betonów towarowych znajduje się szereg kompozytów spełniających pierwsze kryterium. Betony ogniotrwałe i żaroodporne znajdują wiele zastosowań na przykład jako obudowy pieców hutniczych, posadzki w odlewniach stali, elementy kominów czy pieców grzewczych. Kompozyty te, dzięki zastosowaniu w ich produkcji specjalnych składników, mogą pracować bezawaryjnie w temperaturach sięgających nawet 1500°C. Pomimo tego, że w przypadku pożarów zakres występujących temperatur jest znacznie niższy, specyficzne warunki sprawiają, że wciąż trudno jest otrzymać kompozyty betonowe, które posiadałyby zdolność do bezawaryjnej pracy pod tego typu obciążeniem.

Autorzy artykułu opierając się na wcześniejszych doświadczeniach przedstawionych w pracach [1], [2], [3], uzyskali beton z dodatkiem recyklingowych kruszyw ceramicznych odporny na warunki pożarowe. Kompozyt ten cechowała niezmiennosc postaci oraz stosunkowo zadowalające parametry wytrzyma-

łościowe po obciążeniu temperaturami symulującymi warunki pożaru. Artykuł przedstawia wyniki kolejnych prób badawczych prowadzonych na wymienionym kompozycie. Zaprojektowany beton został poddany oddziaływaniu wysokich temperatur oraz wcześniejszemu procesowi nasączenia wodą, co symulowało naturalne warunki dla betonów pracujących w stale zawilgoconych obiektach takich jak piwnice lub tunele komunikacyjne. Wpływ nadmiernej wilgoci okazał się znacząco niekorzystny. Wnioski z wyników eksperymentu mogą stanowić ważne spostrzeżenia zarówno w świetle bezpieczeństwa ekip ratowniczych, jak i późniejszej bezpiecznej eksploatacji obiektów, które w warunkach wilgotnych poddane zostały działaniu pożaru.

2. Projektowanie betonów żaroodpornych i ogniotrwałych

2.1. Betony z cementu portlandzkiego

Podczas projektowania betonu odpornego na wysokie temperatury najważniejszy jest odpowiedni dobór składników. Dla spoiwa z cementu portlandzkiego maksymalna bezpieczna temperatura wynosi 250°C [4]. Betony pracujące w wyższych temperaturach zalicza się do betonów specjalnych i uznaje się, że do ich otrzymywania cement portlandzki nie powinien być stosowany. Rozróżnia się betony żaroodporne – przeznaczone do

pracy w podwyższonych temperaturach (wyższych niż 250°C) i ogniotrwałe – pracujące w wysokich temperaturach (nawet 1000°C i większych). Nie istnieje ścisła granica temperaturowa pomiędzy żaroodpornością a ogniotrwałością betonów. Spotyka się różne wartości takie jak 1000°C [4], 1200°C [5] lub nawet 1500°C.

Graniczna temperatura stosowania cementów portlandzkich w wysokich temperaturach wynika z szeregu procesów zachodzących podczas wygrzewania. Stan ten regulują następujące zjawiska fizykochemiczne zachodzące podczas nagrzewania stwardniałego zaczynu [5-6]:

- w temperaturze ok. 100°C następuje odparowanie wolnej wody,
- w temperaturze ok. 180°C następuje usunięcie wody związanej fizycznie (wysychanie żelów C-S-H),
- w temperaturze ok. 500°C w wyniku przejścia wodorotlenku wapnia, wchodzącego w skład utworzonej podczas wiązania sieci krystalicznej w wolne wapno zdolne do samoczynnego powtórnego wiązania, zostaje usunięta woda związana chemicznie ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$),
- w temperaturze 570°C następuje przemiana (topnienie) kwarcu,
- w temperaturze 700°C następuje rozkład węgla wapnia na tlenek wapnia i dwutlenek węgla ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Podczas wygrzewania zmienia się wytrzymałość betonu. Jest to związane z opisanymi wyżej przemianami wody wolnej i związanej chemicznie oraz procesami zachodzącymi pomiędzy zaczynem cementowym a kruszywem. Typowa jest utrata wytrzymałości (o około 50%) postępująca do około 550°C, kiedy następuje oddzielenie się wody związanej chemicznie. Po osiągnięciu tej temperatury wytrzymałość betonu wzrasta o 5-10% wraz z pojawieniem się wiązań ceramicznych.

W odniesieniu do betonów zawierających w swym składzie duże ilości Ca(OH)_2 procesem szczególnie niekorzystnym jest usunięcie wody związanej chemicznie. Pomimo tego, że reakcja ta nie wywołuje bezpośredniej destrukcji kompozytu, okazuje się, że w sposób szczególnie niekorzystna jest powrotna ekspozycja na wilgoć atmosferyczną, która powoduje ponowne wiązanie wody ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$). Reakcji tej towarzyszy wzrost objętości związków wapnia o około 40%, co sprawia, że beton ulega znacznemu pękaniu, tracąc swoją nośność i wytrzymałość. Zjawiska te nie zachodzą jednak bezpośrednio w czasie wygrzewania, lecz z pewnym opóźnieniem. Co więcej

są długotrwałe, a ich efekt widoczny jest po kilku tygodniach.

2.2. Betony z cementu glinowego

Bardziej odporne na wysokie temperatury niż cementy portlandzkie są tzw. cementy glinowe zawierające w swym składzie znaczne ilości tlenku glinu Al_2O_3 . Eliminacja obecności wodorotlenku wapnia – Ca(OH)_2 , którego głównym źródłem są alit i belit oraz wymiana na wiążące tlenki glinu sprawia, że cementy glinowe nie ulegają wymienionym destrukcyjnym reakcjom zachodzącym w wysokich temperaturach. Odporność tak przygotowanych betonów na działanie wysokich temperatur zależy od zawartości tlenku glinu. Przykładowo cementy wysokoglinowe o zawartości 80% Al_2O_3 mogą pracować nawet w temperaturach wyższych niż 1800°C.

2.3. Kruszywa do betonów odpornych na wysokie temperatury

Podczas projektowania betonów odpornych na wysokie temperatury równie istotny jest odpowiedni dobór kruszywa. Odporność kruszywa na wysokie temperatury podobnie jak w przypadku spoiwa zależy głównie od jego składu chemicznego. Warunkuje to ten sam szereg procesów, który zachodzi w stwardniałym zaczynie cementowym. Zakresy temperaturowe zastosowań różnych kruszyw oraz ich opis przedstawia tabela 1. Innymi czynnikami, które dyktują możliwość stosowania kruszyw do betonów odpornych na wysokie temperatury są ich cechy fizyczne. Wśród nich wyróżnić można np.: zmianę stanu skupienia pod wpływem wysokiej temperatury – np. topnienie (piaski kwarcowe), czy też odkształcalność termiczną kruszywa, a w szczególności to, w jakim stopniu jest ona zbliżona do odkształcalności zaczynu wiążącego ziarna kruszywa. Większa lub mniejsza odkształcalność termiczna kruszywa niż zaczynu powoduje wewnętrzne naprężenia prowadzące do zniszczenia struktury betonu.

Pobocznymi wytycznymi odnośnie zastosowania konkretnego rodzaju kruszywa do betonu pracującego w wysokiej temperaturze są cechy pośrednie takie jak przewodność cieplna lub odporność na środowiska agresywne. Dotyczy to np. ogniotrwałych betonów izolacyjnych wykorzystywanych jako wykładziny pieców i kominów przemysłowych. Często ich pracy warunki wymagają odporności na wysokie temperatury oraz agresywne chemicznie środowisko.

Tabela 1. Zakresy temperaturowe zastosowań kruszyw wykorzystywanych do betonu [4]

Table 1. Temperature ranges of the applications of aggregates used for the concrete [4]

Kruszywo (Aggregate)	Zastosowanie do temperatury [°C] (Application to temperature) [°C]	Opis i własności (Description and properties)
Piasek (Sand)	350	W wyższej temperaturze ulega topieniu (Melts at higher temperature)
Wapień (Limestone)	650	W wyższej temperaturze traci swoje właściwości (In higher temperature loses its properties)
Bazalty, Andezyt, Diabaz (Basalts, andesite, diabase)	800	W wyższej temperaturze traci swoje właściwości (In higher temperature loses its properties)
Spiekane gliny, żuźle, keramzyt (Sintered clay, slag, ceramsite)	1400	Stosowane do betonów izolacyjnych pracujących w wysokich temperaturach (Applied for insulating concretes operating in high temperatures)
Szamot (Chamottebrick)	1400	Jedno z najczęściej stosowanych kruszyw. Uzyskuje się go przez wypalanie kaolinu lub innych glin ogniotrwałych. (One of the most commonly used aggregates. It is obtained by burning kaolin or other refractory clay)
Chromit (Chromite)	1900	Minerał z grupy tlenków, zaliczany do grupy spineli chromowych (Mineral from oxides group, included in the group of chrome spinels)

Kruszywo (Aggregate)	Zastosowanie do temperatury [°C] (Application to temperature)[°C]	Opis i własności (Description and properties)
Korund (Corundum)	1950	Posiada dużą wytrzymałość mechaniczną oraz odporność na środowisko agresywne chemicznie. Zawiera Al_2O_3 (Has a high mechanical strength and resistance to chemical aggressive conditions. Contains Al_2O_3)
Magnezyt spiekany (Sintered magnesite)	2000	Posiada duży współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz przewodność cieplną (Has a high coefficient of thermal expansion)
Fosteryt (Forsterite)	2000	Uzyskiwany przez spiekanie fosterytu naturalnego (Obtained by sintering of natural forsterite)
Karbokorund (Karbokorund)	Powyżej 2000	Uzyskiwany przez spiekanie piasku z koksem. Wysoka wytrzymałość mechaniczna, wysoka odporność na środowisko agresywne chemicznie. (Obtained by sintering of sand with coke. High mechanical resistance, high resistance to chemical aggressive conditions)

3. Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywa do betonu odpornego na wysokie temperatury

Jednym z priorytetowych kierunków rozwoju nauki jest poszukiwanie sposobów utylizacji substancji odpadowych. Szczególnie skomplikowanym zagadnieniem jest utylizacja odpadów, które nie podlegają biodegradacji. Przykładem takiego wyrobu są materiały ceramiczne. Ich rozkład naturalny szacuje się na około cztery tysiące lat. Stosunkowo nowym trendem w przypadku tego typu materii odpadowej jest jej wykorzystanie w przemyśle betonowym [3], [7], [8-11].

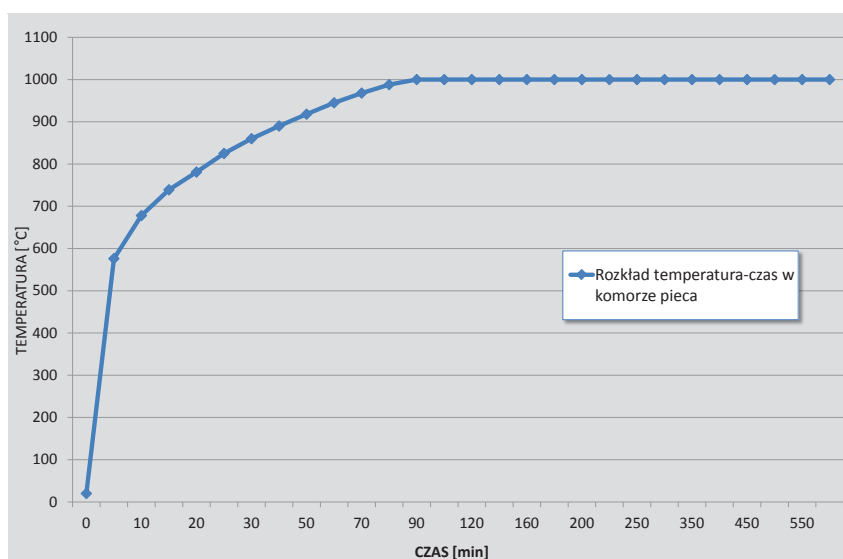
Wcześniejsze prace autorów artykułu ukazują próby podejmowane w kierunku wtórnego wykorzystania odpadowych wyrobów ceramiki sanitarnej, które uwzględniają specyficzne cechy tych kruszyw [1], [2], [3]. Jak wykazują badania laboratoryjne kruszywo takie posiada szereg cech szczególnych, które przewyższają pod wieloma względami kruszywa tradycyjne. Odkształcalność termiczna ceramiki sanitarnej jest bliska tej, jaką wykazuje stwardniały zaczyn cementowy. Ceramika jest znacznie bardziej odporna na czynniki agresywne, duże znaczenie odgrywają również jej wysokie parametry wytrzymałościowe. Analizując skład chemiczny wymienionych odpadów [2], stwierdzono natomiast, że zawierają znaczne ilości związków glinowych, podobnie jak wykorzystywany w betonach żaroodpornych cement glinowy. Podobną bliskość chemiczną ceramiki sanitarnej oraz cementu

glinowego można zauważyć w stosunkowo niskiej zawartości tlenu wapnia. Powyższe skłoniło autorów do zaprojektowania betonu żaroodpornego opartego na bazie cementu glinowego i kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej. Projektowanie składu betonu przedstawiono bliżej w pracy [3]. Uzyskane wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że beton na kruszywie ceramicznym i cemencie glinowym posiada bardzo wysokie parametry wytrzymałościowe, które klasyfikują go jako beton wysokowartościowy. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu na kruszywie ceramicznym wynosiła 90,54 MPa, a na rozciąganie 9,56 MPa.

4. Projektowanie betonu odpornego na warunki pożarowe

Pozytywne wyniki testów temperaturowych prowadzonych na kompozycie betonowym, którego skład oparto o cement glinowy i recyklingowe kruszywo ceramiczne skłoniły autorów artykułu do próby obciążenia betonu warunkami symulującymi pożar.

Podczas badań wstępnych [12] próbki betonowe obciążone zostały temperaturami wzrastającymi zgodnie z założonym rozkładem normowym „temperatura-czas” symulującym warunki rzeczywistego pożaru. Podstawowym elementem stanowiska badawczego był piec komorowy typu PK1100/1. Rozkład temperatury w czasie badań został przedstawiony na rycinie 1.

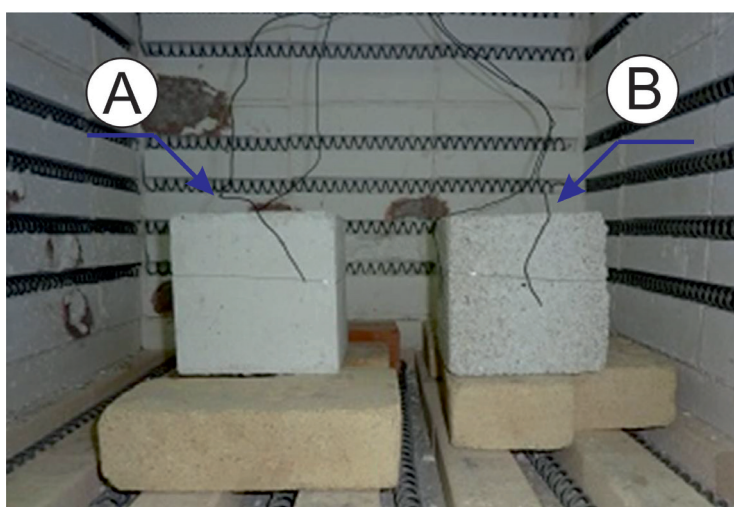


Ryc. 1. Rozkład temperatury w komorze pieca w czasie badań wstępnych [12]
Fig. 1. Temperature distribution in furnace chamber during preliminary studies [12]

Proces grzewczy rozpoczęto od temperatury 20°C, następnie po uruchomieniu pieca w czasie 120 minut komora osiągnęła temperaturę 1000°C, która była utrzymywana przez kolejne 480 minut. Próbki były pozostawione w piecu przez kolejne 24 godziny aż do ich ostygnięcia.

Próbkę do badań wstępnych przygotowano w formie prostopadłościenną o wymiarach 15x15x15 cm o składzie odpowiadającym betonom żaroodpornym (jak podano w [3]). Jako próbkę porównawczą przygotowano próbkę tych samych rozmiarów z betonu na bazie odpadów ceramiki sanitarnej oraz cementu glinowego, przy czym założono, że beton będzie porowaty tj. w jego przestrzeni znajdować się będą celowo wprowadzone pory powietrzne. Po rozformowaniu próbki poddano ją pielęgnacji wilgotnościowej poprzez umieszczenie jej w szczelnie zamkniętym opakowaniu foliowym z niewielką ilością wody, w której próbki zanurzone były do 1/5 swojej wysokości. Po 7 dniach próbki wyjęto z opakowania. Próbkę przeprowadzono po 30 dniach od zaformowania – do tego

zawierała porów uległa uszkodzeniu podczas badania na skutek zjawiska spallingu tj. termicznego odpryskiwania fragmentów betonu. Części próbki o wymiarach około 3x3x5 cm na skutek wzrostu objętości i prężności pary wodnej wewnątrz elementu oderwały się i wbiły w okładzinę pieca na głębokość około 1 cm. Porowata próbka porównawcza pozostała nienaruszona, zachowała kształt i spójność, jaką wykazywała przed badaniem. Wynik tego doświadczenia skłonił autorów do zaprojektowania betonu porowatego opartego na składnikach wyżej przedstawionego betonu ogniotrwałego. Projektowanie przeprowadzono metodą doświadczalną – znanego zaczynu. Składniki komponowanego betonu były jednakowe jak w betonach prezentowanych w [3]. Skład ziarnowy kruszywa wynikał z technologii pracy kruszarki, którą wytwarzano kruszywo. Doświadczalne próby dozowania zaczynu tak, aby nie wypełniał szczelnie przestrzeni pomiędzy kruszywem doprowadziły do uzyskania receptury. Ostatecznie otrzymany skład przedstawiono w tabeli 2.



Ryc. 2. Próbkę prostopadłościenną w komorze pieca
A) beton szczelny, B) beton porowaty [17]

Fig. 2. Rectangular specimens in the furnace chamber
A) dense concrete B) porous concrete [17]

czasu próbki dojrzewały nieosłonięte w warunkach normalnych w temperaturze 20°C. Próbkę umieszczoną w piecu przed badaniem przedstawiono na rycinie 2.

Po włożeniu próbek do pieca typu PK1100/1 przystąpiono do wygrzewania zgodnie z założonym rozkładem. Próbkę pozostawiano w piecu przez 240 min, w tym czasie po około 200 min nastąpiło eksplozyjne oderwanie kawałka próbki szczelnej. Wybuch był na tyle silny, że badanie przerwano. Z obserwacji próbek po badaniu można było stwierdzić, że szczelna próbka, która nie

Z betonu o takich proporcjach przygotowano próbki w formie walców o średnicy 10 cm i wysokości 20 cm – odpowiadających próbkom normowym. Średnia gęstość tak uzyskanego betonu po wysuszeniu do stałej masy wynosiła ok. 1795 kg/m³. Część próbek poddano badaniom w temperaturze normalnej 20°C, pozostałe natomiast zostały wygrzane zgodnie z założonym rozkładem temperatura-czas identycznie jak podczas badań wstępnych. Widok próbek betonowych umieszczonych w piecu przedstawiono na rycinie 3.

Tabela 2. Skład betonu odpornego na warunki pożarowe sporządzonego na bazie odpadowego kruszywa z ceramiką
Tabela 2. Composition of fire resistant concrete based on ceramic waste aggregate

Składnik (Component)	Ilość składnika [kg/m ³] (Component volume [kg/m ³])
Cement glinowy (Alumina cement)	225,18
Kruszywo frakcji 0-4 mm (Aggregate fraction 0-4 mm)	1217,22
Kruszywo frakcji 4-8 mm (Aggregate fraction 4-8 mm)	486,89
Woda (Water)	142,22

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 3. Próbkę z betonu porowatego umieszczone w piecu PK1100/1
Fig. 3. Specimens of porous concrete placed in PK1100/1 furnace

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w tabeli 3. Pomimo spodziewanego spadku (o ok. 31%) wytrzymałość próbek porowatych po wygrzaniu zachowała się na stosunkowo wysokim poziomie - około 27 MPa. Próbkę pomimo szybkiego wzrostu temperatur nie uległy zjawisku spallingu, zachowały kształt i spójność, a otrzymane po wygrzewaniu wyniki wytrzymałości na ściskanie odpowiadały wartościom betonów konstrukcyjnych.

5. Analiza wpływu zawilgocenia na parametry wytrzymałościowe porowatego betonu odpornego na warunki pożarowe

Kolejna próba badawcza prowadzona na porowatym betonie miała na celu określenie wpływu nasączenia wodą betonu poddawanego oddziaływaniu pożaru. Do badań przygotowano próbki z betonu porowatego, którego skład przedstawiono w tabeli 3. Próbkę przygotowano w formie walca o średnicy 10 cm i wysokości 20 cm. Plan eksperymentu zakładał nasączenie próbek betonowych wodą w dwóch konfiguracjach. Próbkę serii pierwszej zanurzono całkowicie w wodzie na czas 5 minut, po czym pozostawiono na 10 min do wstępnego osuszenia. Próbkę serii drugiej przebywały całkowicie zanurzone w wodzie przez 12 godzin, po czym również przed włożeniem do pieca zostały

wstępnie częściowo osuszone przez 10 minut w celu odsączenia wody znajdującej się pomiędzy porami.

Tak przygotowane próbki umieszczono w piecu, a następnie rozpoczęto proces grzewczy zgodnie z założonym rozkładem „temperatura-czas”, który został przedstawiony na rycinie 1. Wyjęte z pieca i studzone przez 24 godziny próbki nie posiadały wyraźnych uszkodzeń – jedynie na jednej zaobserwowano dość wyraźne pęknięcia, które jednak nie wpłynęło na zwięźłość całej próbki. W czasie wygrzewania pomimo dużego zawilgocenia, w obydwu seriach nie wystąpiło zjawisko termicznego odpryskiwania betonu (spallingu). Próbkę dzięki porowatej strukturze pozostały zwarte. Badania wytrzymałościowe próbek prowadzono po 30 dniach od ich wygrzania. Do badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową LaboTest 6.100SP.1-2-2300, której oprzyrządowanie pozwoliło na określenie dla każdej z próbek parametrów takich jak: siła niszcząca, wytrzymałość na ściskanie, a także moduł Younga. Ostatni parametr określany był na podstawie elektronicznego pomiaru całkowitych odkształceń próbek ściskanych oraz ich przeliczenia przez zestaw sterujący. Ze względu na fakt długości pomiarowej równej całej długości próbki wyniki badania modułu sprężystości podano jako poglądowe i nie komentowano ich w szczegółowej analizie. Stanowisko badawcze do badań wytrzymałościowych przedstawiono na rycinie 4. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 4 oraz na rycinie 5.

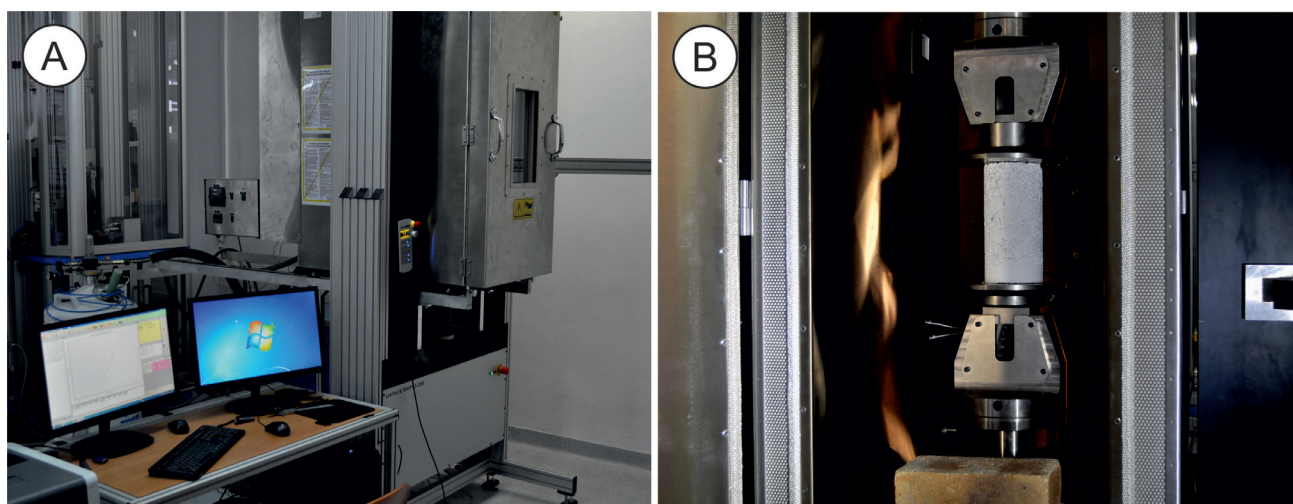
Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałościowych próbek z betonu porowatego o wilgotności naturalnej z kruszywem ceramicznym po wygrzewaniu w warunkach pożarowych

Table 3. Strength test of porous concrete specimens in natural humidity with ceramic aggregate after heating in fire conditions

Numer próbki/ Specimen's number	Wytrzymałość i-tej próbki, [MPa] / Durability of i-specimen [MPa]	Wytrzymałość średnia, [MPa] / Average durability [MPa]	Odchylenie standardowe, [MPa] / Standard deviation [MPa]	Wskaźnik zmienności [%]/ Variability rate [%]
Wytrzymałość na ściskanie próbki porowatej bez wygrzewania Compression strength of porous specimen without heating				
1	38,85	39,92	0,97	2,4
2	40,12			
3	40,76			
Wytrzymałość na ściskanie próbki porowatej po wygrzewaniu Compression strength of porous specimen after heating				
1	26,11	27,39	1,27	4,6
2	27,39			
3	28,66			

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 4. Stanowisko do badań wytrzymałościowych LaboTest 6.100SP.1-2-2300

A) widok stanowiska B) próbka umieszczona na stanowisku

Fig. 4. Research stand for strength studies LaboTest 6.100SP.1-2-2300

A) stand's view B) sample located in the stand

W świetle uzyskanych wyników badań można stwierdzić znaczący wpływ warunków wilgotnościowych, w jakich beton poddawane są oddziaływaniu pożaru. Beton zaprojektowany w oparciu o doświadczenia w projektowaniu betonów ogniotrwałych, przy zastosowaniu porów i poddaniu go obciążeniom symulującym warunki pożarowe, cechował się stosunkowo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi. Taki beton pod wpływem temperatur pożarowych i dojrzewaniu w warunkach naturalnych cechował się wytrzymałością na ściskanie rzędu 27 MPa. Ten sam beton po zanurzeniu w wodzie, a następnie wygrzaniu, posiadał znacznie niższe parametry. Przy zanurzeniu na 5 minut jego średnia wytrzymałość po wygrzewaniu wynosiła 6,42 MPa, natomiast po

zanurzeniu w wodzie na 12 godzin 5,79 MPa. Pomimo tego że próbki poddawane były tym samym zabiegom wytwórczym i pielęgnacyjnym, z powodu ich niestandardowej porowatej struktury, jak pokazały kolejne ważenia, wchłaniały różne porcje wody. Przyczynę takiego stanu rzeczy upatruje się w stosunkowo dużej nasiąkliwości samego kruszywa ceramicznego oraz (pomimo intensywnego zagęszczania mieszanki betonowej) różnej wielkości powstałych porów. Wskutek nasączenia wodą otwartych porów kruszywa, wszystkie próbki ulegały różnemu zawilgoceniu. W tej przyczynie upatruje się wyjaśnienie stosunkowo wysokich współczynników zmienności dla przeprowadzonych prób.

Tabela 4. Wyniki badań wytrzymałościowych próbek z betonu porowatego z kruszywem ceramicznym po nawilgoceniu i wygrzewaniu symulującym warunki pożarowe

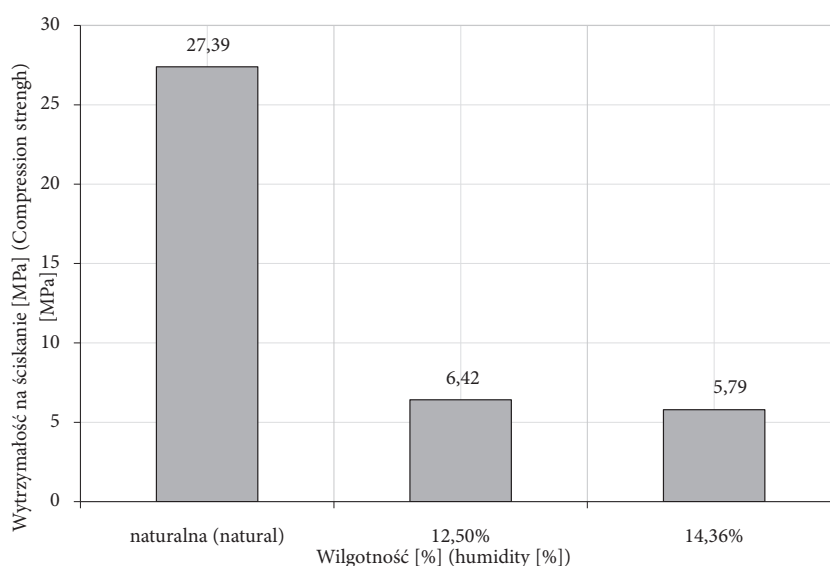
Table 4. Strength results of studied specimens of porous concrete with ceramic aggregate after saturation and heating in simulated fire conditions

Numer próbki (Specimen number)	Waga po zawilgoceniu [kg] (Weight after saturation [kg])	Waga po wygrzaniu [kg] (Weight after heating [kg])	Siła niszcząca [kN] (Destructive force [kN])	Wytrzymałość i-tej próbki, [MPa] (Strength of i-specimen, [MPa])	Moduł i-tej próbki [MPa] (Modulus of i-specimen [MPa])	Wilgotność średnia [%] (Average humidity [%])	Wytrzymałość średnia, [MPa] (Average strength, [MPa])	Oddchylenie standardowe, [MPa] (Standard deviation, [MPa])	Wskaźnik zmienności Wytrzymałości [%] (Strength rate variability [%])
SERIA 1 – warunki średniego zawilgocenia (SERIES 1 – medium level moisture conditions)									
1	3,190	2,830	48,60	6,19	565,30	12,5%	6,42 MPa	1,19 MPa	18,48%
2	3,130	2,805	39,80	5,08	474,10				
3	3,165	2,855	64,37	8,20	661,76				
4	3,290	2,785	50,67	6,45	590,10				
5	3,155	2,860	47,44	6,04	678,15				
6	3,135	2,855	44,02	5,61	554,40				
7	3,225	2,670	43,55	5,55	579,52				
8	3,005	2,895	64,60	8,23	664,73				

Numer próbki (Specimen number)	Waga po zawilgoceniu [kg] (Weight after saturation [kg])	Waga po wygrzaniu [kg] (Weight after heating [kg])	Siła niszcząca [kN] (Destructive force [kN])	Wytrzymałość i-tej próbki, [MPa] (Strength of i-specimen, [MPa])	Moduł i-tej próbki [MPa] (Modulus of i-specimen [MPa])	Wilgotność średnia [%] (Average humidity) [%]	Wytrzymałość średnia, [MPa] (Average strength, [MPa])	Odchylenie standardowe, [MPa] (Standard deviation, [MPa])	Wskaźnik zmienności Wytrzymałości [%] (Strength rate variability [%])
SERIA 2 – warunki silnego zawilgocenia (SERIES 2 – high moisture level conditions)									
1	3,140	2,765	45,30	5,77	555,10	14,36%	5,79 MPa	1,05 MPa	18,22%
2	3,230	2,815	56,60	7,21	584,84				
3	3,160	2,770	39,35	5,01	504,30				
4	3,320	2,845	37,97	4,84	559,90				
5	3,155	2,760	47,98	6,11	485,30				
6	3,145	2,955	36,97	4,71	378,90				
7	3,360	2,925	40,97	5,22	540,87				
8	3,255	2,695	58,28	7,42	661,44				

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 5. Wyniki badań wytrzymałościowych próbek z betonu porowatego z kruszywem ceramicznym po nawilgoceniu i wygrzewaniu symulującym warunki pożarowe – schemat graficzny

Fig. 5. Strength results for studied specimens of porous concrete with ceramic aggregate after saturation and heating simulating in fire conditions – graphical view

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

6. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań dowodzą, jak destrukcyjnym czynnikiem dla betonu poddanego warunkom wysokich temperatur odpowiadających pożarowi, może być jego wilgotność. Pomimo zaprojektowania betonu, dla którego w warunkach suchych obciążenie temperaturami pożarowymi nie było destrukcyjne (wytrzymałość na ściskanie po wygrzewaniu symulującym zjawisko pożarowe wynosiła ok. 27 MPa) ten sam beton w warunkach dużego zawilgocenia po wygrzewaniu cechował się znacząco niższymi parametrami (wytrzymałość na ściskanie ok. 6 MPa). Zawilgocenie kompozytu wynoszące ok. 13% spowodowało spadek wytrzymałości materiału aż o ok. 78%, pomimo poddawania próbek

tym samym warunkom badawczym. Przyczyną takiej sytuacji jest zjawisko naruszania struktury samego kompozytu przez zawartą w porach wodę, która zwiększa swoją objętość podczas nagrzewania – niszcząc strukturę materiału w skali mikroskopijnej niewidocznej dla oka ludzkiego.

Zaprojektowany beton, w przeciwieństwie do betonów szczelnych, nie cechował się termicznym odpryskiwaniem. Próbki zarówno po wyjęciu z pieca, jak i po 30 dniach w momencie badania posiadały zwartą strukturę oraz nie posiadały innych cech, które pozwalałyby przypuszczać, że nastąpił tak znaczny spadek parametrów wytrzymałościowych. Szczególnym więc wnioskiem z przeprowadzonych badań jest fakt konieczności każdorazowej oceny parametrów wytrzymałościowych elementów obiektów betonowych, które poddane

były działaniu pożaru. Elementy takie bowiem pomimo zachowania swoich cech zewnętrznych, spoiwości i niezmiennych postaci mogą posiadać zaniżone parametry wytrzymałościowe, które można jedynie określić podczas badań laboratoryjnych. Sytuacja ta w związku z zachodzącymi procesami wodnymi następuje już podczas wrzenia wód kapilarnych tj. gdy temperatury sięgają 100°C i więcej. Jeśli procesy te i wzrosty temperatur następują w sposób szybki i gwałtowny, naruszenie struktury kompozytów następuje już w sytuacji pożarowej, co może być przyczyną znacznej utraty parametrów wytrzymałościowych podczas trwania pożaru. W takim przypadku, szczególnie w odniesieniu do betonów zawilgoczonych, konstrukcje mogą tracić swoje pierwotne zdolności do przenoszenia obciążeń, co należy brać również pod uwagę w stosunku do bezpieczeństwa ekip prowadzących działania ratownicze.

Literatura

- [1] Halicka A., Zegardło B., *Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywo do betonu*, „Przegląd Budowlany” Issues 7-8, 2011, pp. 50-55.
- [2] Ogrodnik P., Zegardło B., Halicka A., *Wstępna analiza możliwości zastosowania odpadów ceramiki sanitarnej w funkcji kruszywa do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur*, BiTP Vol. 25 Issue 1, 2012, pp. 49-56.
- [3] Halicka A., Ogrodnik P., Zegardło B., *Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate*, “Construction and Building Materials” Vol. 48, 2013, pp. 295-305.
- [4] Jamroży Z., *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [5] Montgomery R., *Advanced Concrete Technology*, Elsevier 2006.
- [6] Kowalski R., *Mechanical properties of concrete subjected to high temperature*, “Architecture Civil Engineering Environment” Issue 2, 2010, pp. 49-56.
- [7] Niemiecka norma budowlana DIN 4163. Beton ze skruszonymi cegłami – specyfikacja produkcji i użycia, 1951.
- [8] De Brito A., Pereira J., Correia R., Oliviera C., *Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates*, “Cement and Concrete Composites” Vol. 27, 2005, pp. 429-433.
- [9] Senthamarai RM., Devadas M., Manoharan P., Gobinath D., *Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties*, “Construction and Building Materials” Vol. 25, 2001, pp. 2413-2419.
- [10] Lopez V., Llamas B., Juan A., Moran J., *Eco-efficient Concretes: Impact of the Use of White Ceramic Powder on the Mechanical Properties of Concrete*, “Biosystems Engineering” Vol. 96 Issue 4, 2007, pp. 559-564.
- [11] Guerra I., Vivar I., Llamas B., Juan A., Moran J., *Eco-efficient concretes: The effect of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete*, “Waste management” Issue 29, 2009, 643-646.
- [12] Ogrodnik P., Zegardło B., *Ekologiczne betony na kruszywach odpadowych w zagadnieniach bezpieczeństwa ekip ratowniczych w warunkach pożarowych*, „Logistyka” Issue 4, 2014.

* * *

dr inż. Bartosz Zegardło – absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (kierunek: budownictwo). Do 2008 roku inżynier budownictwa pełniący funkcję kierownika budowy oraz projektanta. W 2008 roku rozpoczął pracę jako wykładowca. W 2012 roku uzyskał uprawnienia budowlane do kierowania robotami budowlanymi bez ograniczeń, a w 2014 roku uprawnienia budowlane do projektowania bez ograniczeń. W 2014 roku obronił rozprawę doktorską pt. *Zastosowanie odpadów ceramiki sanitarnej jako kruszywa do betonów specjalnych*.

st. kpt. dr inż. Paweł Ogrodnik – absolwent Wydziału Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej Politechniki Lubelskiej (kierunek: budownictwo). W 2001 roku rozpoczął pracę w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarnej. W 2006 roku obronił rozprawę doktorską pt. *Wpływ temperatur występujących w czasie pożaru na przyczepność pomiędzy stalą a betonem*.