

Dr inż. Lucyna Domagała, dr inż. Izabela Hager

Politechnika Krakowska, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli

Wpływ wysokiej temperatury na wytrzymałość na ściskanie konstrukcyjnych betonów lekkich

Influence of high temperature on compressive strength of structural lightweight concrete

1. Wstęp

Pożarowi budynku towarzyszy wzrost temperatury do 800–1000°C, natomiast podczas pożaru w tunelu temperatura może osiągnąć nawet 1200°C. Wysoka temperatura płomieni towarzyszących pożarowi powoduje stopniowy jej wzrost obejmujący elementy konstrukcji betonowej i powodujący uszkodzenia betonu. Dzięki stosunkowo niskiemu współczynnikowi przewodności cieplnej proces nagrzewania betonu przebiega powoli, a równocześnie chroni on mniej odporną na działanie wysokich temperatur stal zbrojenio- wą. Równocześnie jednak wzrost temperatury betonu prowadzi do pogorszenia jego właściwości mechanicznych; a mianowicie wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie oraz modułu sprężystości. Główną przyczyną uszkodzeń betonu jest postępująca dehydratacja zaczynu cementowego, która obejmuje wszystkie fazy hydratów. Dehydratacja żelu C-S-H przebiega stopniowo, rozpoczynając się już w temperaturze około 100°C. Wzrost temperatury zaczynu cementowego do 450–500°C powoduje szybki rozkład portlandytu, co ma duży wpływ na osłabienie materiału. Uszkodzenia termiczne betonu wynikają również z powstających naprężeń towarzyszących wiązaniom kurczącego się zaczynu ze zwiększającymi swoją objętość ziarnami kruszywa.

W przypadku lekkich betonów kruszywowych, o mikrostrukturze zwartej, można spodziewać się lepszych wiązań zaczynu z kruszywem podczas ich ogrzewania, w porównaniu do betonów ze skalnych kruszyw, co może prowadzić do mniejszych względnych spadków wytrzymałości na ściskanie. Betony lekkie mają bowiem bardziej jednorodną budowę związaną z większą regularnością kształtów ziaren kruszyw lekkich uzyskanych w procesie produkcyjnym, bardzo dobrą przyczepnością zaczynu do ich porowatej powierzchni oraz bardziej zbliżonymi modułami sprężystości. Ponadto kruszywa lekkie mają niższy współczynnik rozszerzalności cieplnej niż kruszywa skalne, powszechnie stosowane do produkcji betonów. W rezultacie prawdopodobieństwo powstawania rys w betonie lekkim w wyniku działania podwyż-

1. Introduction

During a fire in a building, the temperature can reach ca. 800–1000°C, while in a tunnel it can rise to 1200°C. When subjected to such a temperature the elements of a concrete structure gradually heat up to the point where damage occurs. The materials of relatively low thermal conductivity ensure that the heating process is slow and concrete protects the reinforcement steel against high temperature. However, the increase of concrete temperature affects the mechanical properties, principally strength and modulus of elasticity. Progressive dehydration of the cement paste is the main cause of damage of the concrete and covers all its phases. Dehydration of the CSH gel is progressing gradually and begins already at about 100°C. The increase of temperature to 450–500°C causes a rapid decomposition of portlandite which has a significant influence on material weakening. The thermally induced damage of the concrete is also a result of incompatibility of strain between the shrinking cement paste and expanding aggregates.

In the case of the lightweight concrete with the compact microstructure, a better compatibility of cement paste with aggregate can be expected during heating than that in the concrete with standard aggregate, potentially leading to smaller relative losses of compressive strength. Lightweight concretes are characterised by better uniformity of shape and size in artificially manufactured aggregates, high adhesion of cement paste to their porous surfaces and a greater similarity of the modulus of elasticity. Moreover, lightweight aggregate has a lower coefficient of thermal expansion than the standard aggregate normally used in the production of concrete. As a result the lightweight concrete reveals a lower risk of cracking at high temperature due to a stronger interfacial transition zone, lower concentration of stress in that zone, lower thermal conductivity, lower coefficient of thermal expansion and greater thermal stability of their aggregates burned already during the production process at the temperature range of 1000° to 1350°C.

szanej temperatury jest mniejsze, co wiąże się z bardziej wytrzymałą strefą przejściową, mniejszą koncentracją naprężeń w tej strefie, niższym współczynnikiem przewodzenia ciepła, niższym współczynnikiem rozszerzalności termicznej oraz większą odpornością ogniową kruszyw, prażonych podczas procesu produkcyjnego w temperaturach 1000-1350°C.

W literaturze fachowej można znaleźć wiele opisów badań, na przykład (1-3), potwierdzających większą odporność lekkich betonów kruszywowych na działanie wysokiej temperatury, a także otwartego ognia, w porównaniu z betonami zwykłymi. Różnice spadków wytrzymałości betonów lekkich w stosunku do betonów zwykłych są w głównej mierze zależne od rodzaju zastosowanego kruszywa, wilgotności oraz wytrzymałości betonu. W przypadku betonów lekkich o wysokiej wytrzymałości, wytrzymałość resztkowa po poddaniu działaniu wysokiej temperatury była jedynie nieznacznie wyższa lub porównywalna z betonami wysokiej wytrzymałości z kruszywem skalnym (4, 5), co wiąże się z dużą wytrzymałością matryc cementowych w przypadku obu rodzajów betonów. Natomiast przy szybkim wzroście temperatury według tak zwanej krzywej węglowodorowej, betony lekkie mogą wykazywać niższą odporność i większą podatność na powstawanie eksplozywnych odprysków, połączonych z większymi spadkami wytrzymałości (6). Można to tłumaczyć przypuszczalną większą wilgotnością betonów lekkich.

Czynnikiem, który dodatkowo może mieć duży wpływ na odporność betonów lekkich na działanie wysokiej temperatury może okazać się również wstępna wilgotność kruszywa. Ze względów technologicznych i ekonomicznych powszechnie stosuje się wstępne nawilżanie kruszyw lekkich. W niektórych przypadkach kruszywa lekkie nasycy się całkowicie wodą przed ich zastosowaniem do produkcji betonu. Taka praktyka prowadzi nie tylko do pogorszenia wytrzymałości betonu, ale w jeszcze większym stopniu może przyczynić się do zmniejszenia jego trwałości, w wyniku osłabienia strefy przejściowej, w której występuje zwiększona ilość mikrorys (7).

Celem zrealizowanych badań była ocena wpływu podwyższonej i wysokiej temperatury w zakresie od 200°C do 800°C na zmiany gęstości i wytrzymałości na ściskanie konstrukcyjnych betonów lekkich, z krajowego kruszywa porowatego „pollytag”, produkowanego z popiołu. Równocześnie zastosowano najbardziej niekorzystne jego wstępne pełne nasycenie wodą. W związku z tym brak było możliwości wchłaniania wody wolnej z zaczynu przez kruszywo lekkie, w mieszance betonowej. Natomiast objęte badaniami betony lekkie charakteryzowały się takim samym składem objętościowym jak betony z kruszywa skalnego, a uzyskane wyniki były przedmiotem publikacji w Przeglądzie Budowlanym (8).

2. Badane betony

Badaniami objęto dwa betony lekkie LC1 i LC2 o różnej wytrzymałości i gęstości, uzyskanymi w wyniku zastosowania zróżnicowanych wskaźników wodno-cementowych wynoszących: 0,60 i 0,27. W przypadku obu betonów zastosowano stałe proporcje kruszywa

Many papers can be found (1-3) that confirm better performance of the lightweight concrete at high temperature and fire contact in comparison with the ordinary one. Differences in the rate of strength losses between the two types of concrete have primarily depended on the temperature, aggregate, moisture content and initial strength. The high strength lightweight concrete only displayed minor superiority in residual strength, or none at all, when exposed to high temperature compared to the high strength concrete made of standard aggregate (4, 5). This is the result of high strength of the cement matrix used in both types of concrete. The lightweight concrete may display lower resistance to heat, greater susceptibility to explosive spalling and greater loss of strength (6), when they are exposed to a rapid temperature increase, such as during hydrocarbon fire tests. This fact may be probably explained by the possible higher moisture content of the lightweight concrete.

Another factor that may have a significant influence on the resistance of the lightweight concrete to high temperature is the initial water content of the aggregate. Due to technological and economic requirements lightweight aggregates are soaked in water prior to the production of concrete and in some cases the aggregate is fully saturated. This not only reduces the strength of the product, but can also contribute to further losses of durability due to the weakening of the structure of the interfacial transition zone that is characterised by increased microcracks (7).

The objective of this research was to assess the influence of temperature, ranging from 200 to 800°C on the density and compressive strength of the lightweight concrete manufactured with water pre-saturated lightweight aggregate, produced from fly ash. The goal of aggregate water saturation was to prevent it from sorption of water and cement paste from the concrete mixture. Such a treatment resulted in the lightweight concrete of identical volumetric compositions as the concrete with standard aggregate, which was subjected to similar high temperature resistance tests (8).

2. Concrete properties

The two lightweight concretes were tested, namely LC1 and LC2, of different strength and density, due to different water/cement ratios of 0.60 and 0.27, respectively. Both concretes had the same content of “Pollytag” sintered fly ash aggregate 6/12 mm and cement matrix, and were made of natural sand. Prior to concrete making, the lightweight aggregate was fully saturated with water (23%). The compositions and mean values of some properties of both concretes are shown in Table 1. The superplasticizer was added to the LC2 concrete to ensure the same consistency class (V3) as for LC1. The cubes of 100 mm dimensions were prepared from both concretes.

3. Test results

The tests started after the concrete cubes had been cured for 90 days in standard conditions. These cubes were heated in a labora-

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY I WŁAŚCIWOŚCI WYKONANYCH BETONÓW LEKKICH

COMPOSITION AND PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETES

Beton lekki Concrete	Składniki/Components, kg/m ³						Właściwości/Properties, after 90 days		
	"Pollytag" ¹⁾	Piasek Sand	Cement CEM I 42,5R (C)	Woda Water (W)	w/c	Agg Paste	Wilgotność Moisture, %	f _{cm} , MPa	D _m , ³⁾ kg/m ³
LC1	603	623	322	193	0.60	45/55	6.5	37.8	1660
LC2	603	623	478	129	0.27	45/55	5.6	51.3	1850

¹⁾ kruszywo w stanie suchym / dry aggregate

²⁾ proporcje objętościowe kruszywa grubego do zaprawy cementowej %/% / volumetric proportions of coarse aggregate to cement paste %/%

³⁾ gęstość betonu w stanie suchym / oven dry density

lekkiego „pollytag” 6/12 mm i zaprawy cementowej z piaskiem naturalnym. Kruszywo lekkie, przed sporządzaniem betonu, nasycano w pełni wodą, której zawartość wyniosła 23%. Skład, średnia wytrzymałość oraz gęstość i zawartość wilgoci betonów lekkich, po 90 dniach ich dojrzewania przedstawiono w tablicy 1. Ponadto w przypadku betonu LC2 zastosowano domieszkę upłynniającą, w ilości która zapewniła tę samą klasę konsystencji (V3), co w przypadku betonu LC1.

3. Wyniki badań

Badania wytrzymałości na ściskanie betonów lekkich prowadzono na próbkach kostkowych o boku 100 mm, które wygrzewano w piecu laboratoryjnym w temperaturach od 200°C do 800 °C. Badania rozpoczęto po 90 dniach dojrzewania betonu w warunkach normowych. W każdej z zastosowanych temperatur wygrzewano 3 próbki betonu. Przyrost temperatury w trakcie wygrzewania betonów następował ze stałą prędkością 1°/min. Po osiągnięciu końcowej maksymalnej temperatury T = 200, 400, 600 i 800°C, utrzymywano ją na stałym poziomie przez 4 godziny, w celu uzyskania równomiernego rozkładu temperatury w całej objętości próbki. Po wystudzeniu próbek do temperatury 20°C określano gęstość betonu (D), a następnie próbki obciążano aż do zniszczenia w maszynie wytrzymałościowej, w celu oznaczenia wytrzymałości na ściskanie (f_{CT}). Dla celów porównawczych zbadano również gęstość (D_{20°C}) i wytrzymałość (f_{c20°C}) próbek betonu nie poddanego ogrzewaniu.

Na rysunku 1 pokazano wyniki pomiarów gęstości (rysunek 1a), resztkowej wytrzymałości na ściskanie (rysunek 1b), oraz względnej zmiany wytrzymałości na ściskanie (rysunek 1c) w funkcji temperatury wygrzewania w całym badanym zakresie, to jest od 200° do 800°C. Wyniki uzyskane na próbkach betonu dojrzewających w temperaturze 20°C przypisano materiałowi niewygrzewanemu.

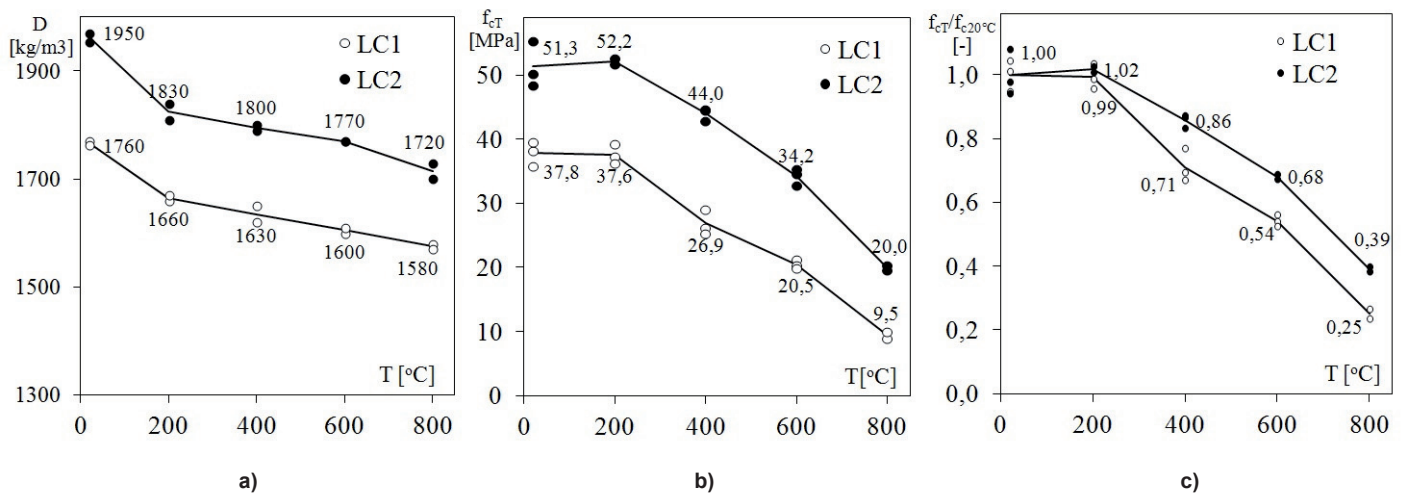
Jak pokazały wyniki badań, ogrzewanie próbek obu betonów lekkich LC1 i LC2 do temperatury 200°C nie spowodowało obniżenia wytrzymałości na ściskanie. Spadek wytrzymałości badanych betonów zaobserwowano dopiero po poddaniu ich działaniu temperatury 400°C. Po wygrzewaniu próbek w wyższych temperaturach następowała dalsza redukcja obu zmierzonych właściwości

tory kiln within the temperature range of 200 to 800°C. A constant heating rate of 1°/min was used. When the target temperature T (T = 200, 400, 600 or 800°C) was achieved, it was maintained for four hours in order to obtain uniform temperature distribution in the sample volume. The samples were then cooled to 20°C, and their properties were tested, i.e. density (D) and residual compressive strength (f_{CT}). Three samples were not heated and density (D_{20°C}) and compressive strength (f_{c20°C}) were also measured for comparison.

The changes of density, residual compressive strength and relative change in compressive strength as a function of temperature between 200 and 800°C are shown in Fig. 1. Samples desiqued as 20°C were unheated.

No reduction of compressive strength at 200°C for both lightweight concretes (LC1 and LC2) was observed. Compressive strength starts changing at the heating temperature of 400°C. For the higher temperature both density and compressive strength (f_c and D) decrease in a quasi-linear manner. When the temperature achieved 800°C, the LC1 and LC2 strength were 9.5 MPa and 20 MPa respectively. It means that the compressive strength decrease, was lower by 75% and 61% respectively (Fig. 1c) . The density decrease at this temperature was by 10% found for LC1 and 12% for LC2.

The results for the lightweight concrete were compared with similar tests for the concrete made of natural graved aggregate and having the same share of components in the coarse aggregate as in the case of the lightweight concretes obtained by one of the authors (8). The concrete with standard aggregate heated at 800°C showed a comparable decrease of strength by about 80%, for the ordinary concrete with the standard strength of 49.9 MPa (w/c = 0.60) and of 55% for the high-performance concrete with strength equal 97.6 MPa (w/c = 0.27). However, the comparison of two concretes: lightweight LC2 (f_{cm} = 51.3 MPa, w/c = 0.27) and ordinary concrete BZ (f_{cm} = 49.9 MPa, w/c = 0.60) shows that the lightweight concrete has a higher residual compressive strength after heating at 800°C (61% loss of strength to 20 MPa) than the ordinary concrete (80% loss of strength to 9.7 MPa).



Rys. 1. Wpływ temperatury wygrzewania próbek betonu na zmiany: a) gęstości, b) resztkowej wytrzymałości na ściskanie, c) względnej wytrzymałości na ściskanie

Fig. 1. The influence of concrete samples heating temperature on changes of: a) density, b) compressive strength, c) relative compressive strength to the specimens without thermal treatment

(f_c i D). W rezultacie w zakresie temperatur 200–800°C spadek zarówno gęstości, jak i wytrzymałości na ściskanie ma przebieg quasi liniowy. Ostatecznie po wygrzewaniu w temperaturze 800°C wytrzymałość resztkowa wyniosła w przypadku LC1 9,5 MPa, a LC2 i 20 MPa, co oznacza spadek wytrzymałości odpowiednio o 75 % i 61 %. Natomiast zmniejszenie gęstości betonów wygrzewanych w tej temperaturze wyniosło odpowiednio 10% i 12%.

Dla porównania można podać, że wygrzewanie betonów z naturalnego kruszywa otoczkowego (8), o składzie wykazującym takie same proporcje składników w stosunku do kruszywa grubego co badane betony lekkie, w temperaturze 800°C, spowodowało porównywalny spadek wytrzymałości wynoszący około 80% w przypadku betonu zwykłego o wytrzymałości początkowej 49,9 MPa ($w/c = 0,60$) i 55% w przypadku BWW o wytrzymałości początkowej 97,6 MPa ($w/c = 0,27$). Natomiast porównanie betonów o zbliżonej wytrzymałości: lekki LC2 ($f_{cm} = 51,3$ MPa, $w/c = 0,27$), zwykły opisany wyżej ($f_{cm} = 49,9$ MPa, $w/c = 0,60$) wskazuje na znacznie wyższą odporność betonu lekkiego na działanie temperatury 800°C - spadek wytrzymałości o 61%, do 20 MPa, a w przypadku betonu zwykłego BZ, spadek wytrzymałości o 80%, do 9,7 MPa.

Należy zaznaczyć, że żadna próbka badanych betonów lekkich, nie wykazała podczas ogrzewania odpadania warstw powierzchniowych, pomimo stosunkowo dużej wilgotności betonu [tablica 1]. W związku z tym, na powierzchni próbek po wygrzewaniu nie było widocznych rys ani ubytków.

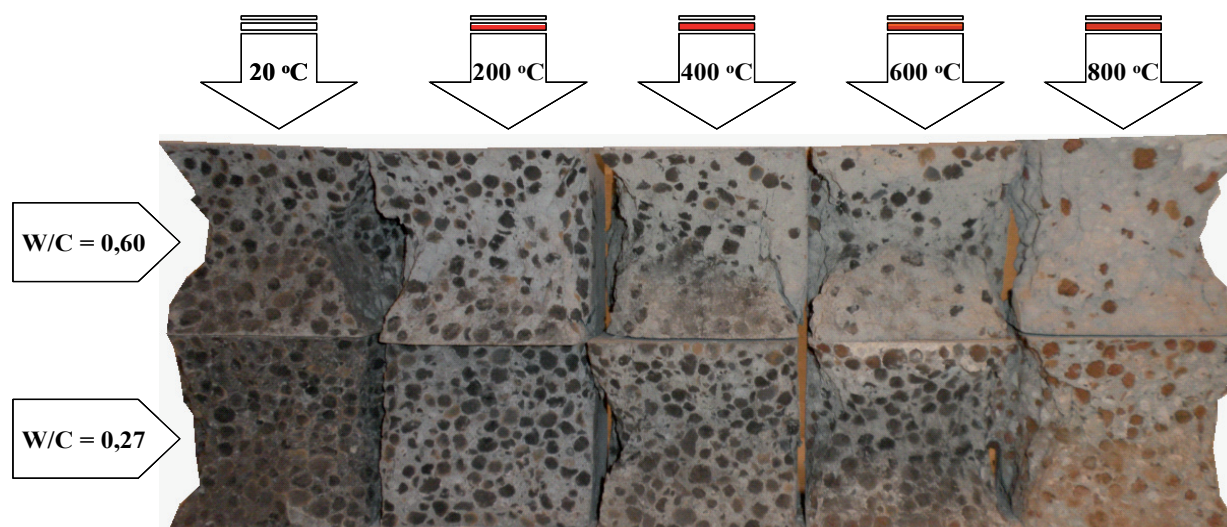
Na rysunku 2 pokazano przełamy próbek betonów lekkich po wygrzewaniu w różnych temperaturach i po badaniu wytrzymałości na ściskanie. Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania obserwuje się nie tylko zmianę barwy kruszywa popiołowego z ciemno szarej lub brunatnej na ceglastą [wyższy stopień utlenienia Fe], ale również inny obraz zniszczeń w próbkach. W przypadku obu betonów w próbkach nie poddawanych wygrzewaniu, propagacja pęknięć następowała poprzez ziarna kruszywa lekkiego, co świad-

It should be mentioned that none of the lightweight concrete samples presented the dropping of surface layers, despite their relatively high moisture content. Also there were no visible cracks or defects on their surfaces.

In Fig. 2 the fractured surfaces of lightweight concrete samples, after heat treatment and compressive strength test, are presented. The higher the temperature at which the sample was heated, the greater the change in colour (turning from dark grey or brown to brick-red) and another picture in the damage of concrete. In the case of the samples of both concretes without heat treatment, the cracks propagation occurred through the grains of the lightweight aggregate, which indicates its lower strength than that of the cement matrix. In the samples heated to higher temperature there is an increasing share of cracks propagation along the surface of the aggregate, in the interfacial transition zone. This was particularly apparent in LC1 samples with the weaker one of the two cement matrixes ($w/c = 0,60$); which heated at 800°C the majority of aggregate grains became detached from the cement matrix and only very few of them were cracked. This fact may be probably explained to be a result of cement matrix weakening at a high temperature and ITZ with high porosity, which in lightweight concrete with water pre-saturated aggregate was found by one of the author (7).

4. Conclusions

The study of the impact of high temperature, ranging from 200 to 800°C, on the strength of the lightweight concrete with aggregates fully saturated with water showed strength losses that were comparable to those observed in the concrete with standard aggregate and identical cement matrix. In the case of low cohesion of cement matrix with lightweight aggregate, in the lightweight concretes tested, their strength depended primarily on the quality of the matrix. For this reason lower strength losses were recorded in both the lightweight and normal concrete made of cement matrixes



Rys. 2. Przelamy próbek betonów lekkich po wygrzewaniu i badaniu wytrzymałości na ściskanie

Fig. 2. The fractures of lightweight concretes after heat treatment and compressive strength test

czy o mniejszej jego wytrzymałości od zaczynu. Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania obserwuje się zwiększoną liczbę przypadków, w których pęknięcia biegą po powierzchni kruszywa, a więc w strefie przejściowej. Przypadki te występują szczególnie w betonie LC1, o słabszej matrycy cementowej ($w/c = 0,60$), w którym po wygrzewaniu w 800°C pęknięcia przebiegały jedynie poprzez nieliczne ziarna kruszywa, większość pęknięć biegła wokół tych ziaren. Można to prawdopodobnie tłumaczyć znacznym osłabieniem matrycy cementowej w podwyższonej temperaturze, zwłaszcza słabej strefy przejściowej o dużej porowatości, która w przypadku betonów lekkich z kruszywem wstępnie nasyconym wodą, została stwierdzona przez jedną z autorek (7).

4. Wnioski

Analiza wpływu działania wysokich temperatur w zakresie $200\text{--}800^{\circ}\text{C}$ na wytrzymałość betonów lekkich, z kruszywem w pełni nasyconym wodą, wskazuje na spadek wytrzymałości porównywalny z betonami z kruszyw skalnych, o identycznych matrycach cementowych. Przy braku dobrej przyczepności zaczynu do kruszywa lekkiego, o odporności betonu w głównej mierze decyduje szczelność matrycy cementowej. Z tego powodu w przypadku badanych betonów lekkich, a także betonów o normalnej gęstości z kruszywem otoczkowym, mniejsze spadki wytrzymałości wykazywały betony z matrycami cementowymi o niższym wskaźniku wodno-cementowym. Natomiast, przy tym samym poziomie wytrzymałości początkowej, w porównaniu do betonu zwykłego beton lekki, nawet pomimo wstępnego nasycenia kruszywa wodą, wykazuje większą odporność na działanie wysokich temperatur, jednak w przypadku mniejszego w/c .

Spadek wytrzymałości na ściskanie betonów lekkich wygrzewanych w wysokich temperaturach spowodowany jest zapewne dehydratacją żelu C-S-H i rozkładem wodorotlenku wapniowego oraz dodatkowo możliwą propagacją mikrorys, występujących w strefie

with a low w/c ratio. Where the initial compressive strength was the same in the lightweight and in the normal concrete, the lightweight concrete showed a higher resistance to high temperature, despite the initial water saturation of the lightweight aggregate, but with a lower w/c ratio.

The loss of lightweight concrete compressive strength after heat treatment is probably mainly due to the dehydration of the C-S-H gel and the calcium hydroxide decomposition and, additionally, due to the possible propagation of microcracks formed earlier in the ITZ of this concrete, made of water pre-saturated aggregates.

It should be expected that the decrease of initial moisture of lightweight aggregate will cause lower porosity of ITZ which will increase the durability of the lightweight concrete exposed to high temperature. The confirmation of this hypothesis needs further studies.

przejściowej betonów lekkich, wytwarzanych z kruszywa wstępnie nasyconego wodą.

Należy oczekiwać, że ograniczenie wstępnej wilgotności kruszywa lekkiego, zmniejszy porowatość strefy przejściowej, co przyczyni się do zwiększenia odporności betonu lekkiego na działanie wysokich temperatur. Potwierdzenie tego przypuszczenia wymaga przeprowadzenia odpowiednich badań.

Literatura / References

1. S. Chandra, L. Berntsson, Lighthweight aggregate concrete, Noyes Publications, New York 2003.
2. J. Clarke, Structural lightweight aggregate concrete, Chapman & Hall, London 1993.
3. A. M. Neville, Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
4. J. Jensen at all, Congress on Structural Lightweight Aggregate Concrete, 192, Sandefjord 1995.
5. U. Diederichs at all, Congress on High Strength Concrete, 1046, Lillehammer 1993.
6. M. Sandvik, T. Hammer, Congress on Structural Lightweight Aggregate concrete, 617, Sandefjord 1995.
7. L. Domagała, Cement Wapno Beton, 78, 101 (2011).
8. I. Hager, T. Tracz, Przegląd Budowlany, 6, 45 (2010).