

Dr inż. Izabela Hager, dr inż. Tomasz Tracz

Politechnika Krakowska

## Wpływ wysokiej temperatury na wybrane właściwości betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych

## Influence of elevated temperature on selected properties of high performance concrete modified with the addition of polypropylene fibres

### 1. Wprowadzenie

Zachowanie się betonów wysokowartościowych (BWW) w warunkach działania wysokiej temperatury może stanowić poważne ograniczenie ich stosowania w budownictwie. Betony te poddane działaniu wysokiej temperatury, mogą wykazywać skłonność do eksplozyjnego zachowania powodując odsłonięcie wrażliwej na działanie temperatury stali zbrojeniowej, stwarzając tym samym poważne zagrożenie dla nośności i stateczności elementu konstrukcyjnego.

Eksplozyjne zachowanie się betonu, według różnych źródeł (2, 6, 8, 10) wywołuje kombinacja dwóch zjawisk zachodzących równoległe w ogrzewanym betonie: termomechanicznego i ciepło-wilgotnościowego. Działanie temperatury powoduje wystąpienie ciśnień gazu i cieczy zawartej w porach materiału, towarzyszących szybkiemu odparowaniu wilgoci w powierzchniowej strefie ogrzewanego betonu (efekt ciepło-wilgotnościowy). Dodatkowo w ogrzewanym materiale daje o sobie znać zróżnicowanie współczynników odkształcalności termicznej warstw betonu o różnej temperaturze (efekt termomechaniczny), a nagromadzona energia może zostać uwolniona w gwałtowny sposób prowadząc do eksplozji. Te dwa, nakładające się na siebie zjawiska powodują powstanie niekorzystnego stanu naprężeń w betonie. W przypadku, gdy naprężenia przekroczą granicę wytrzymałości betonu na rozciąganie, eksplozyjne zniszczenie betonu staje się możliwe. Jak dowiodły liczne badania (3, 4, 7, 9, 11) włókna polipropy-

### 1. Introduction

The behaviour of high performance concrete HPC at elevated temperatures may be a major limitation for its use in the construction industry. HPC may be prone to explosive spalling at elevated temperature which can result in exposure of reinforcement. This will create a vulnerability to load-bearing capacity and the durability of the structural element.

According to various sources (2, 6, 8, 10), the explosive behaviour of concrete is caused by two phenomena occurring parallel in heated concrete: the thermo-mechanical and the hydro-thermal effects. With temperature the pressure of gas in concrete pores is increased and accompanied with rapid moisture vaporization from the surface of heated concrete (the hydro-thermal effect). Additionally, the difference of thermal strains in the concrete layers of different temperatures (the thermo-mechanical effect) become apparent in the heated material, and the accumulated energy is released violently, resulting in so-called explosive spalling. These two simultaneous effects cause the unfavourable stresses in concrete. In case when these stresses exceed the tensile strength of concrete, the explosive spalling may appear. As numerous tests have shown (3, 4, 7, 9, 11) polypropylene fibres improve the behaviour of HPC at elevated temperature. At temperatures near to 170°C the fibres melt, creating a network of open pores, which contributes to higher permeability, and consequently the reduction of internal pressure in heated concrete.

lenowe polepszają trwałość BWW w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury. Włókna w takich temperaturach topią się i pozostawiają po sobie sieć otwartych porów, przyczyniając się do zwiększenia przepuszczalności, a dzięki temu do obniżenia ciśnienia wewnętrznego w ogrzewanym betonie.

## 2. Rodzaje i charakterystyka badanych betonów wysokowartościowych

Badania dotyczyły dwóch BWW, o identycznym składzie ilościowym i jakościowym, z wyjątkiem dodatku włókien polipropylenowych lub ich braku.

Włókna polipropylenowe stosowane w celu ograniczenia eksplozyjnego zachowania się betonu w wysokiej temperaturze, dodawane są najczęściej w ilości 0,1÷0,2 % objętości betonu (6, 9, 10, 11). Włókna te topią się w temperaturze około 170°C, a więc w temperaturze niższej niż temperatura wystąpienia maksymalnego ciśnienia pary wodnej w betonie [190-260°C (9)]. Po stopieniu polipropylem częściowo wchłaniany jest przez matrycę cementową (9). W temperaturze 350°C polipropylem ulega spalaniu, przechodząc w CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano włókna polipropylenowe Harbourite o długości 12 mm, w ilości 1,8 kg/m<sup>3</sup>. Według danych producenta temperatura topnienia stosowanych włókien wynosi 163°C, a temperatura zapłonu 360°C. Są to włókna fibrilowane, o ciężarze właściwym równym 0,91 g/cm<sup>3</sup>.

Zarówno ilość jak i rodzaj włókien, zostały tak dobrane, aby ich wpływ był wystarczająco widoczny w przeprowadzonych doświadczeniach, a jednocześnie nie powodował zmiany składu mieszanek betonowych. W celu zapewnienia odpowiedniej urabialności oraz koniecznego otulenia warstwą zaczynu cementowego stosowanych włókien, mieszanki betonowe posiadały stosunkowo dużą zawartość zaczynu cementowego. Zgodnie ze stosowaną powszechnie praktyką (5) ilość zaczynu w mieszankach z włóknami została powiększona o około 10% w stosunku do normalnej zawartości, wynikającej z powierzchni oraz jamistości stosu okruszowego kruszywa.

Składy badanych BWW wraz z ich oznaczeniami zamieszczono w tablicy 1.

## 2. Types and characteristics of tested high performance concrete

The tests were carried out on two types of HPC with identical composition, except of the polypropylene fibres content.

The polypropylene fibres used to reduce the risk of concrete explosive spalling at elevated temperature are usually added in the quantity of 0.1÷0.2 % of the concrete volume (6, 9, 10, 11). These fibres melt at the temperature which is lower than the temperature range where the highest internal pressure in concrete appears [190-260°C (9)]. The melted polypropylene is then partly absorbed by the cement matrix (9). At the temperature of 350°C, the polypropylene burns, with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O formation.

In the tests Harbourite polypropylene fibres with a length of 12 mm added to concrete in quantity of 1.8 kg/m<sup>3</sup> were used. According to the manufacturer, the melting point of those fibres is 163 °C, and the flash point is 360°C. They are fibrillated fibres with the density of 0.91 g/cm<sup>3</sup>.

Both the type of fibres and their quantity, were selected to assure the noticeable effect during the tests, but simultaneously the composition of concrete mix was not changed. In order to provide appropriate workability and warp lagging of the fibres with a layer of cement paste, the concrete mixes had a relatively high content of cement paste. According to common practice (5), the content of cement paste in the mixes with fibres were increased by approxi-

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY BETONÓW BWW BEZ I Z DODATKIEM WŁÓKNIEN POLIPROPYLENOWYCH  
COMPOSITION OF HPC SAMPLES WITH AND WITHOUT POLYPROPYLENE FIBRES

| Oznaczenie betonu<br>Concrete labels                            | Jedn.<br>Unit                   | B100<br>(bez włókien)<br>(without fibres) | B100/1.8/12<br>(z włóknami)<br>(with fibres) |
|---|---------------------------------|---|--|
| Rodzaj składnika<br>Type of component                           |                                 |   |  |
| Cement CEM I 42,5   | kg/m <sup>3</sup>               | 490                                       |  |
| Woda/Water  | kg/m <sup>3</sup>               | 145                                       |  |
| Piasek/Sand Niwka 0/2 mm  | kg/m <sup>3</sup>               | 611                                       |  |
| Grys bazaltowy/Basalt aggregates Gracze 2/8 mm                  | kg/m <sup>3</sup>               | 712                                       |  |
| Grys bazaltowy/Basalt aggregates Gracze 8/16 mm                 | kg/m <sup>3</sup>               | 712                                       |  |
| Włókna/Fibres Fibermesh Harbourite length 12 mm                 | kg/m <sup>3</sup>               | –   | 1.8  |
| Plastyfikator/Plasticizer Basf Liquol BV 18                     | % mc                            | 0.9                                       | 0.9  |
| Superplastyfikator<br>Superplasticizer Basf Glenium SKY 591     | % mc                            | 2.0                                       | 2.8  |
| Dane uzupełniające/Complementary data                           |                                 |   |  |
| Wskaźnik wodno-cementowy/Water-cement ratio                     | -                               | 0.30                                      |  |
| Zawartość zaczynu/Cement paste content                          | dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | ≈ 310                                     |  |
| Zawartość zaprawy/Mortar content                                | dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 514                                       |  |
| Zawartość cząstek < 0,125 mm<br>Content of < 0,125 mm particles | dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 161                                       |  |

Projektowanie składu mieszanek betonowych przeprowadzono metodą doświadczalną.

Właściwości tak zaprojektowanych mieszanek betonowych bez i z dodatkiem włókien były bardzo podobne, i tak, opad stożka wynosił około 70 mm, a zawartość powietrza około 2% objętościowych.

### 3. Wyniki przeprowadzonych badań

Celem prowadzonych badań była ocena wpływu temperatury wygrzewania na następujące właściwości betonu: wytrzymałość na ściskanie, ubytek masy próbek w trakcie ich wygrzewania, przepuszczalność mierzona przepływem azotu oraz nasiąkliwość powierzchniowa. Ostatnie dwie właściwości, opisują zdolność do transportu mediów ciekłych lub gazowych przez porowatą strukturę materiału. Cechy te są więc najbardziej odpowiednie do ilościowej oceny efektywności stosowania włókien polipropylenowych jako dodatku do BWW. Wszystkie badania przeprowadzono po 90 dniach dojrzewania betonów.

Wzrost temperatury betonu odbywał się z prędkością 1°C/min, a następnie po osiągnięciu zakładanej temperatury, wygrzewano je przez dwie godziny w stałej temperaturze. Kolejnym etapem było swobodne chłodzenie próbek do temperatury pokojowej. Metodę taką stosowano w odniesieniu do wszystkich badanych próbek. Wszystkie badania prowadzono na próbkach o temperaturze pokojowej.

#### 3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Ocenę wpływu temperatury wygrzewania na wytrzymałość na ściskanie przeprowadzono na próbkach kostkowych o wymiarze boku 100 mm. Próbki ogrzewano do temperatury 100, 120, 160, 200, 400 i 600°C, a następnie, po ich ochłodzeniu poddano je badaniom wytrzymałości na ściskanie.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki zmian względnej wytrzymałości na ściskanie, czyli stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek nie wygrzewanych do wytrzymałości próbek wygrzewanych.

Z krzywych przedstawionych na rysunku wynika, iż początkowo wytrzymałość próbek jest mniejsza po ogrzewaniu w temperaturach 120 i 160°C, natomiast po wygrzewaniu w temperaturze 250°C osiąga ponownie taką samą wytrzymałość jak próbka nie poddana wpływowi temperatury. Wygrzewanie w wyższych temperaturach powoduje systematyczne obniżenie wytrzymałości, co spowodowane jest między innymi: dehydratacją żelu CSH, rozkładem portlandytu oraz zniszczeniem

matery 10% in comparison to the normal demands arising from the surface and the void content of the aggregate scielaton.

The compositions of HPC and their designations are given in Table 1.

The composition of concrete mixes was designed on the basis of experimental method. The properties of designed concrete mixes with and without fibres, were very similar, the cone slump was about 70 mm, and the air content was about 2%.

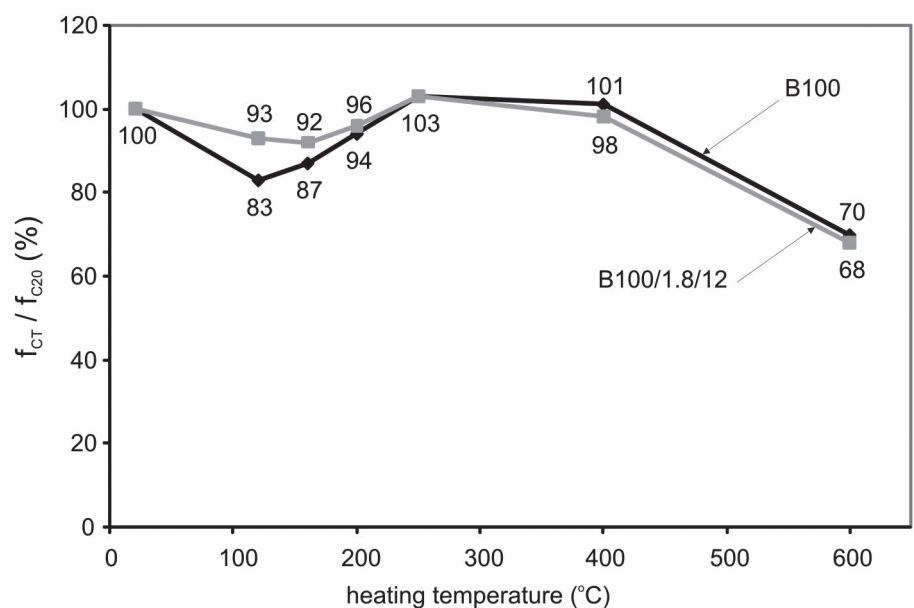
### 3. Results of experiments

The goal of the tests was to examine the influence of temperature on the following properties: compressive strength, mass loss of the samples during heating, nitrogen permeability BET surface and water absorption. The last property defines the transport ability of liquids and gases through a porous material. These properties are the best for quantitative assessment of the effectiveness of polypropylene fibres addition to HPC. All the tests concerned the concrete after 90 days of curing.

The concrete was heated with the rate of 1°C/min and after reaching the chosen value, the temperature was held at a constant level for two hours. Then the samples were cooled in air to the room temperature. This procedure was applied to all the samples, which were tested at room temperature.

#### 3.1. Compressive strength

The influence of heating temperature on concrete compressive strength was tested on cubes of 100x100x100 mm. The samples were heated to the following temperature: 100, 120, 160, 200, 400



Rys. 1. Wpływ temperatury wygrzewania na względną wytrzymałość na ściskanie, beton bez włókien (B100) i z włóknami (B100/1,8/12)

Fig. 1. Influence of temperature on the relative compressive strength of concrete samples with (B100/1.8/12), and without fibres (B100)

strefy kontaktowej na skutek różnicy współczynników rozszerzalności termicznej zaczynu i kruszywa (5).

Beton bez włókien wykazał największy spadek względnej wytrzymałości wynoszący 17% i wystąpił on w temperaturze 120°C. Natomiast w przypadku betonu zawierającego dodatek włókien polipropylenowych największy spadek wytrzymałości rejestrowano w temperaturze 160°C i wynosił on tylko 8% w stosunku do wytrzymałości próbek niewygrzewanych. Z krzywych na rysunku 1 wynika, iż beton bez włókien wykazuje wyraźnie większe względne spadki wytrzymałości w temperaturach 120 i 160°C niż beton z włóknami.

### 3.2. Przepuszczalność

Pomiar przepuszczalności prowadzono metodą RILEM-Cembureau (12), badając przepływ azotu. Badania obejmowały serię 3 próbek o średnicy 150 mm i wysokości 50 mm, wyciętych z normowych walców 150/300 mm. Dla każdej serii oznaczano wyjściową przepuszczalność (zgodnie z zaleceniami metody (12) po wysuszeniu do stałej masy w temperaturze 105°C). Następnie próbki wygrzewano w temperaturach od 120 do 200°C i ponownie

Tablica 2 / Table 2

WYNIKI BADAŃ WPŁYWU TEMPERATURY WYGRZEWANIA BETONÓW NA ICH PRZEPUSZCZALNOŚĆ  
THE INFLUENCE OF HEATING TEMPERATURE ON THE PERMEABILITY OF THE SAMPLES

| Temp.<br>Heating temp.<br>$T_i$ , °C | B100 (bez włókien)/(no fibres) |                            |                   | B100/1.8/12 (z włóknami)/(with fibres) |                            |                   |
|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------|--|----------------------------|-------------------|
|                                      | $k_{105}$ , m <sup>2</sup>     | $k_{T_i}$ , m <sup>2</sup> | $k_{T_i}/k_{105}$ | $k_{105}$ , m <sup>2</sup>             | $k_{T_i}$ , m <sup>2</sup> | $k_{T_i}/k_{105}$ |
| 120                                  | 3.004E-17                      | 2.878E-17                  | 0.96              | 7.286E-17                              | 6.481E-17                  | 0.89              |
| 140                                  | 3.096E-17                      | 3.380E-17                  | 1.09              | 9.550E-17                              | 5.302E-16                  | 5.52              |
| 160                                  | 2.470E-17                      | 3.444E-17                  | 1.39              | 7.047E-17                              | 1.094E-15                  | 15.52             |
| 200                                  | 3.106E-17                      | 5.395E-17                  | 1.74              | 9.111E-17                              | 2.821E-15                  | 30.96             |
| Średnia<br>Mean                      | 2.919E-17                      | –                          | –                 | 8.248E-17                              | –                          | –                 |

określano przepuszczalność. Zakres tych temperatur uległ zmianie w stosunku do badań wytrzymałości na ściskanie, ponieważ przepuszczalność BWW z włóknami wygrzewanego w temperaturze 200°C była zbyt duża aby mogła być określona tą metodą.

Wyniki przeprowadzonych badań, w postaci wartości średnich oraz stosunku przepuszczalności próbek po wygrzewaniu do ich przepuszczalności przed wygrzewaniem, przedstawiono w tablicy 2 oraz na rysunku 2.

Przedstawione wyniki wykazują, iż średnia przepuszczalność początkowa betonu zawierającego dodatek włókien polipropylenowych wynosi 8,248 E-17 m<sup>2</sup> i jest blisko trzykrotnie większa od przepuszczalności betonu bez włókien (2,919 E-17 m<sup>2</sup>). W przypadku betonu bez włókien widoczny jest wzrost przepuszczalności towarzyszący wzrostowi temperatury wygrzewania, jednak jest on bardzo niewielki. Znaczny wzrost przepuszczalności wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania zaobserwowano natomiast w betonie zawierającym dodatek włókien polipropylenowych. Wzrost ten jest tym większy, im wyższa jest temperatura wygrze-

and 600°C, and then, after cooling, their compressive strength was measured.

On Figure 1 the compressive strength of samples is depicted. The results are shown in relation to the strength of non heated concrete samples and presented as percent strength changes in function of temperature.

The results show that the compressive strength of samples heated at temperature 120 and 160°C are lower, but after heating at the temperature of 250°C the strength is equal to non treated sample. Heating at higher temperature causes the systematic decrease of compressive strength which is caused by decomposition of the hydrates and destruction of the interstitial transition zone as a result of the difference in the thermal expansion coefficient of cement paste and aggregate (5).

The highest decrease of compressive strength (17%), showed the sample without fibres heated at the temperature of 120°C. Whereas, for the samples of concrete containing polypropylene fibres the decrease of strength was observed after heating at the temperature of 160°C, and it was only 8% in relation to the strength

of unheated samples. From the results depicted in Fig. 1 it is clear that the samples of concrete without fibres have much greater decrease of compressive strength after heating at the temperature 120°C and 160°C than the concrete with fibres.

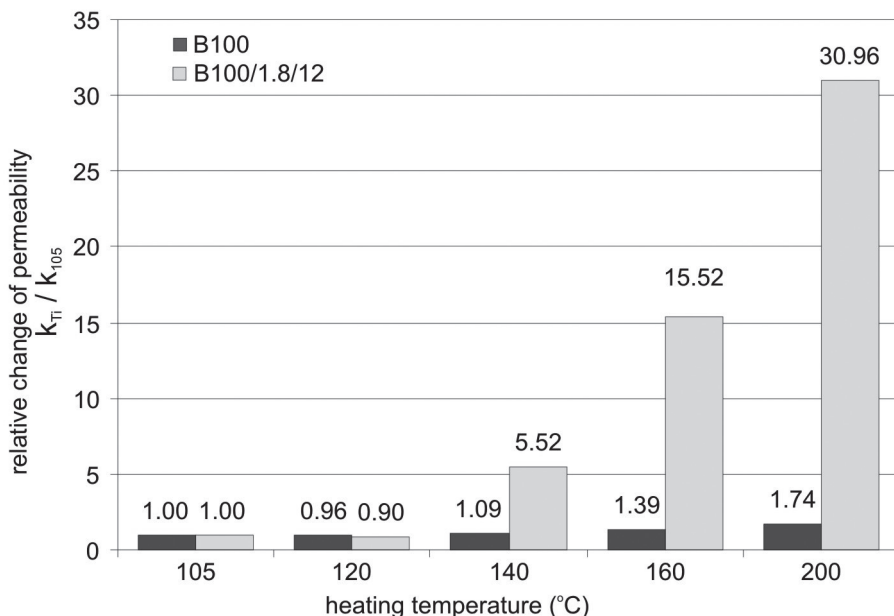
### 3.2. Permeability

The permeability was measured according to the RILEM-Cembureau method (12) using nitrogen. Permeability was examined for the series of 3 samples with a diameter

of 150 mm and a height of 50 mm, cut from standard 150/300 mm cylinders. Initial permeability was determined, according to the standard (12) after drying the samples to the constant mass at a temperature of 105°C. Then the samples were heated at temperature from 120 to 200°C, and the permeability was determined after their cooling. The heating temperatures range changed in comparison to the compressive strength tests because the permeability of samples from HPC with fibres after heating at the temperature of 200°C, was too high to be determined with this method.

The mean values of testing results and the permeability as a ratio of measurements for the samples after heating to the samples before heating are presented in the Table 2 and in Figure 2.

The mean initial permeability of the samples from concrete containing polypropylene fibres is 8.248 E-17 m<sup>2</sup> which is nearly three times higher than the permeability of concrete without fibres (2.919 E-17 m<sup>2</sup>). The increase of permeability caused by heating at different temperature is marginal in concrete without fibres.



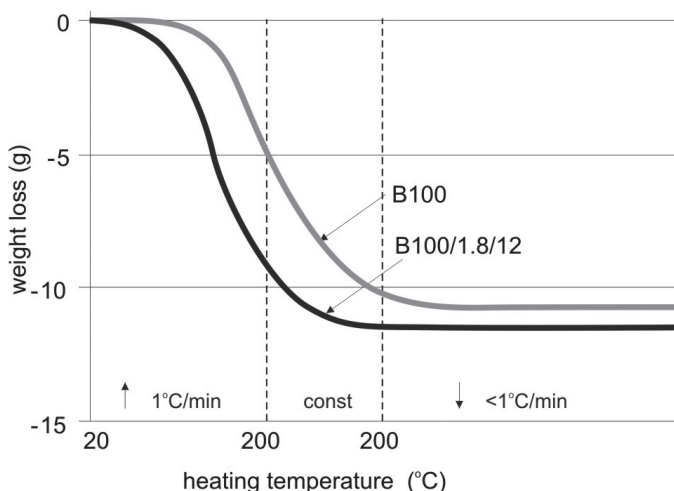
Rys. 2. Względna zmiana przepuszczalności betonów bez i z dodatkiem włókien w zależności od temperatury wygrzewania

Fig. 2. Relative change in the permeability of concrete samples with and without fibres after heating at different temperatures

wania. Od ponad pięciokrotnego w temperaturze 140°C do ponad trzydziestokrotnego w 200°C. Interesujący jest wynik pomiarów wykazujący, że zarówno w przypadku betonu bez jak i z włóknami wygrzewanie w temperaturze 120°C powoduje wprawdzie niewielki, ale jednak spadek przepuszczalności.

### 3.3. Ubytek masy w czasie wygrzewania

W trakcie wygrzewania dokonywano pomiaru ubytku masy próbek. Schemat aparatury pomiarowej pokazano na rysunku 3. Pomiar dokonywano na próbkach przeznaczonych do badania przepuszczalności. Zgodnie z przyjętą metodą oznaczania prze-



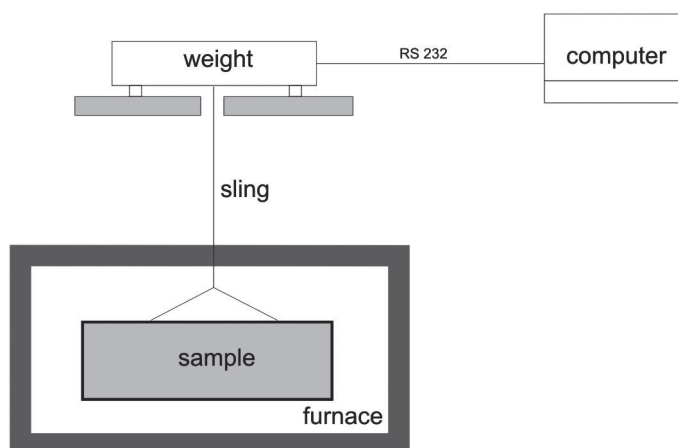
Rys. 4. Przebieg zmiany masy próbek w czasie ogrzewania do temperatury 200°C

Fig. 4. The mass loss change of the samples during heating up to the temperature of 200°C

However, a significant increase with heating temperature was observed in case of concrete containing polypropylene fibres. The higher temperature, the greater is the increase of permeability. There was a five-fold increase at the heating temperature of 140°C and at 200°C the increase was over 30 times higher. It is interesting to mention that heating at the temperature of 120°C results in a slight decrease in permeability of both types of samples of concrete with and without fibres.

### 3.3. The mass loss during heating

During heating the mass loss of the samples was measured. The stand for measurements is shown in Figure 3. The samples for measurements underwent then the permeability tests. According to the adopted method for permeability determination, the samples were earlier dried to constant mass. The schedule of mass loss measurements forecasted to repeat them every 60 s during the heating of the concrete samples, with accuracy of



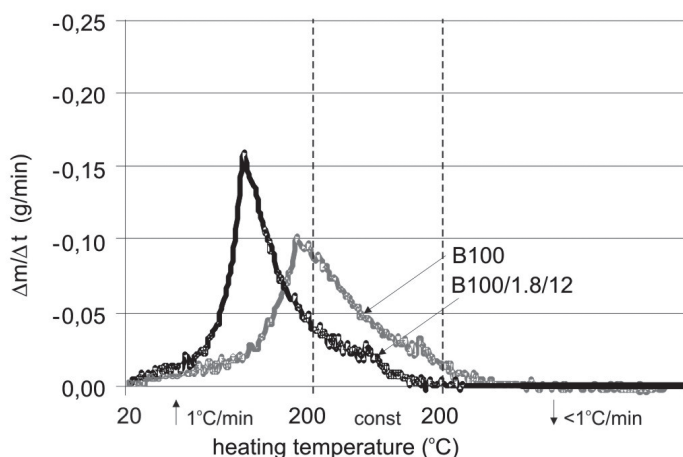
Rys. 3. Schemat stanowiska do pomiaru ubytku masy próbek w trakcie ich wygrzewania

Fig. 3. Stand for the mass lost measuring during heating

±0.01 g.

The results of measurements for one selected temperature of 200°C are presented in Figures 4 and 5.

From the changes of mass loss presented in Fig. 4 it is clear that the content of fibres provides the removal of water from the material, thus increases its transport capacity at elevated temperature. For the heating cycle applied in the tests, the highest intensity of water removal from the concrete samples with fibres occurs earlier and with greater intensity. Moreover, the fibres increase the



Rys. 5. Przebieg zmiany szybkości ubytku masy próbek w czasie ogrzewania do temperatury 200°C

Fig. 5. Rate of mass loss of the samples during heating to the temperature of 200°C

puszczalności, przygotowanie próbek do badań wymagało ich uprzedniego wysuszenia do stałej masy. Pomiaru ubytku masy dokonywano z częstotliwością co 60 s i dokładnością  $\pm 0,01$  g w trakcie wygrzewania betonów.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów dla jednej wybranej temperatury 200°C przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

Z przedstawionego na rysunku 4 przebiegu zmiany masy wyraźnie wynika, że obecność włókien ułatwia usuwanie wody z materiału, a więc zwiększa jego zdolność transportową w wysokiej temperaturze. Dla stosowanego w badaniach cyklu wygrzewania maksimum intensywności usuwania wody z betonu z włóknami występuje wcześniej i jest większe. Ponadto, włókna ułatwiają migrację wody nawet w początkowej fazie wygrzewania w temperaturze nieco niższej od temperatury termicznej degradacji włókien (około 160°C).

### 3.4. Nasiąkliwość powierzchniowa

Nasiąkliwość powierzchniową betonu wyrażaną w  $\text{g}/\text{cm}^2$  określano na próbkach walcowych po badaniu przepuszczalności, a więc na próbkach tylko suszonych do stałej masy w temperaturze 105°C oraz na próbkach wygrzewanych w temperaturach 120, 140, 160 i 200°C. Pomiaru przyrostu masy próbek dokonywano co 60 s i z dokładnością  $\pm 0,01$  g. W czasie badania jedna z powierzchni próbki znajdowała się w stałym kontakcie z wodą. Poziom wody zapewniający ten kontakt był regulowany automatycznie za pomocą pompy. Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rysunku 6.

Na rysunku 7 przedstawiono wpływ zmiany nasiąkliwości powierzchniowej w wyniku wygrzewania badanych betonów w różnych temperaturach.

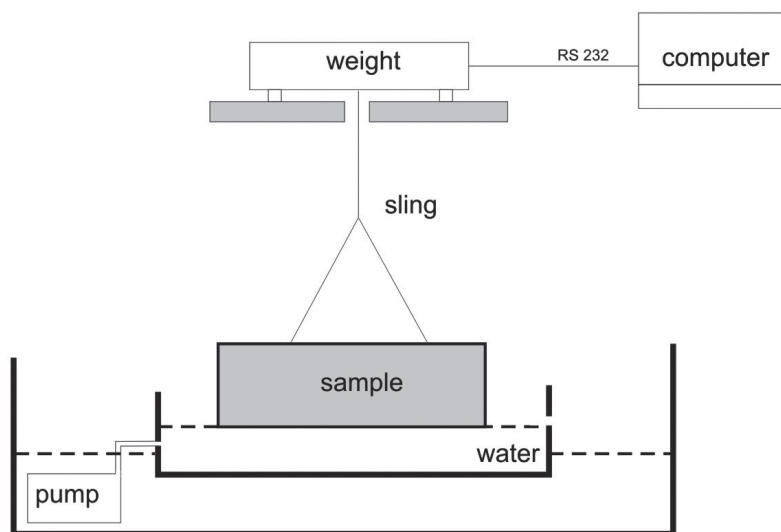
water migration even in the initial stage of heating at a little lower temperature than the fibres melting point (about 160°C).

### 3.4. Surface absorption

Surface absorption of concrete expressed in  $\text{g}/\text{cm}^2$  was determined on cylinder samples after the permeability tests. In one series of measurements the samples were only dried to constant mass at a temperature of 105°C and in second the samples were heated at temperatures of 120, 140, 160 and 200°C. The mass increase of the samples was measured every 60 s with the accuracy of  $\pm 0.01$  g. During the tests, one surface of the sample was in constant contact with water. The water level providing this contact was adjusted automatically with the pump. The testing stand is shown in Figure 6.

The change of surface absorbance of concrete samples in the function of heating temperature is depicted on Figure 7.

The rate of surface absorption of HPC without fibres (Fig. 7a) heated to the temperature of 105, 120 and 140 does not change substantially within about 25 hours of soaking. However, the heating at 160°C, and especially at the temperature of 200°C an increase of surface absorption is observed. The change of the surface absorption of the HPC sample with fibres (Fig. 7b) at temperatures above 120°C has already been demonstrated. The significant increase of surface absorption was found at 140°C.



Rys. 6. Schemat stanowiska do pomiaru zmiany masy próbek w czasie ich nasycania

Fig. 6. Testing stand of water absorbance

The results of these tests fully correspond to the permeability tests, although absorption is not as sensitive to changes in the material structure as permeability.

## 4. Summary

From the experimental results the following conclusions can be drawn:

- HPC with polypropylene fibres (PP), heated at a temperature lower than the melting point of these fibres (163°C), presents

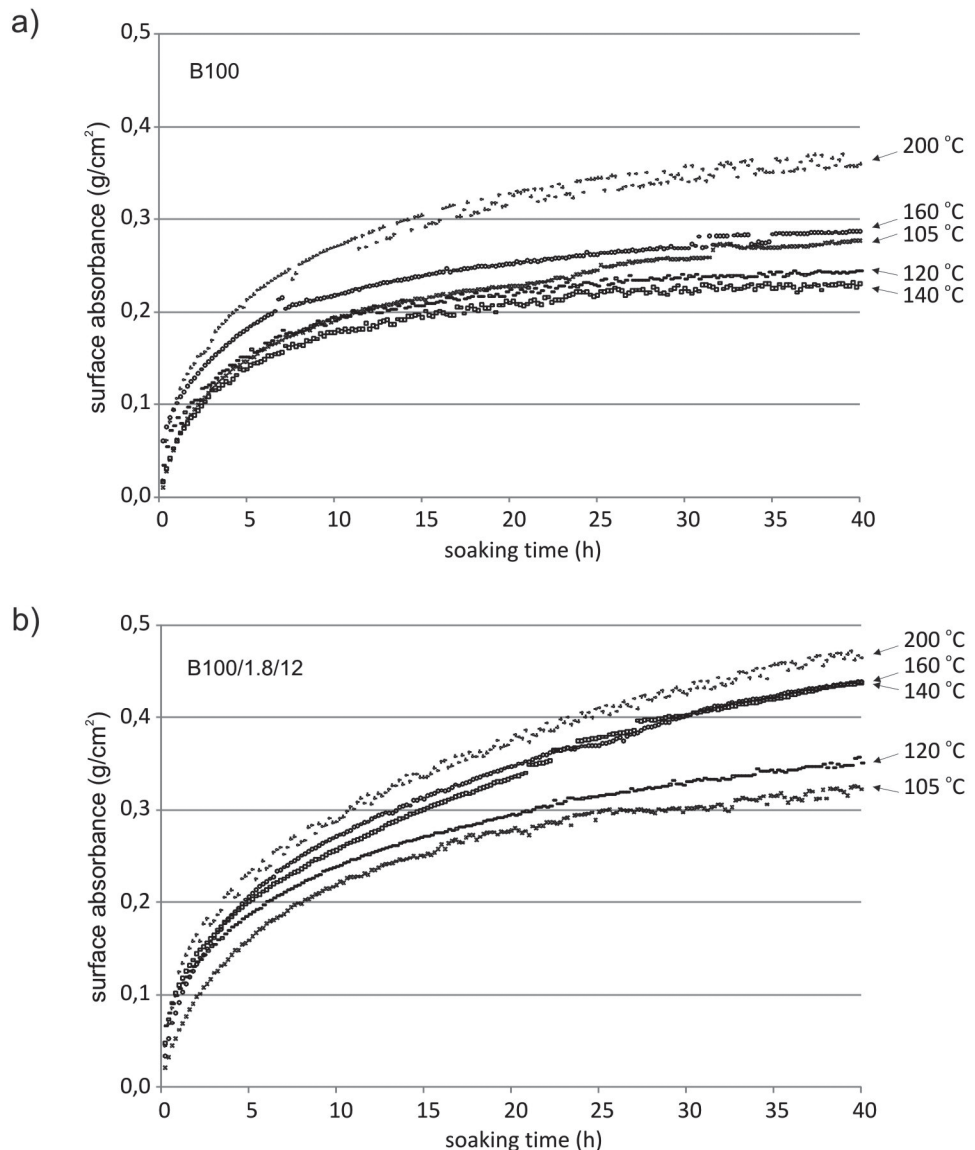
Szybkość wzrostu nasiąkliwości powierzchniowej betonu BWW bez włókien (rys. 7a) wygrzewanych w temp 105, 120 i 140°C nie ulega istotnej zmianie, do około 25 godzin nasycania. Dopiero temperatura 160°C, a w szczególności 200°C wpływa na szybkość wzrostu nasiąkliwości. BWW z włóknami (rys. 7b) wykazywał już w temperaturach przekraczających 120°C zmianę przebiegu nasiąkliwości powierzchniowej, a wyraźny jej wzrost odnotowano w temperaturze 140°C.

Wyniki tych badań w pełni korespondują z wynikami badań przepuszczalności, choć nasiąkliwość nie zależy w tak dużym stopniu od zmiany struktury materiału jak przepuszczalność.

#### 4. Podsumowanie

W oparciu o przedstawione wyniki badań można sformułować następujące wnioski :

- BWW zawierający dodatek włókien polipropylenowych (PP), poddany działaniu temperatury niższej niż temperatura topienia włókien PP (163°C), wykazuje duże zmiany właściwości transportowych mediów ciekłych i gazowych. Względna przepuszczalność azotu wzrasta pięciokrotnie w temperaturze 140°C i trzydziestokrotnie w 200°C. Wyraźny wzrost dynamiki nasiąkliwości powierzchniowej próbek betonu z włóknami PP występuje w temperaturze 140°C.
- BWW z włóknami polipropylenowymi, wykazuje mniejszy spadek względnej wytrzymałości na ściskanie w zakresie temperatur 120 do 250°C w porównaniu z betonami bez ich dodatku.
- Obserwacja przebiegu zmian ubytku masy próbek BWW w trakcie ich wygrzewania, wyraźnie wykazuje w jakiej temperaturze włókna ułatwiają migrację pary wodnej z ogrzewanego betonu.
- Stosowanie włókien polipropylenowych jako dodatku do BWW w celu zwiększenia ich odporności na oddziaływanie wysokich temperatur jest zabiegiem wysoce efektywnym. Dodatek ten wpływa bowiem w znacznym stopniu na zdolność do transportu mediów zarówno gazowych jak również i ciekłych.



Rys. 7a. i 7b Przebieg zmian nasiąkliwości powierzchniowej betonu BWW bez włókien (B100) i z włóknami (B100/1,8/12) wywołana wygrzewaniem w temperaturze 105, 120, 140, 160 i 200°C

Fig. 7a. and 7b. Change of the surface absorption of HPC with (B100/1.8/12) and without fibres (B100) as a function of heating temperature: 105, 120, 140, 160 and 200°C

no substantial changes in transport capacity for liquids and gases up to 25 hours of saturation. The relative permeability of nitrogen is five-folds higher after heating the samples at a temperature of 140°C and at 200°C the increase is over 30 times higher. An increase in the rate of surface absorption for concrete with PP fibres was found at a temperature of 140°C.

- HPC with polypropylene fibres demonstrates a lower decrease in relative compressive strength at the temperature range from 120 to 250°C in comparison with concrete without fibres.
- The change in the rate of mass loss of HPC samples observed during their heating clearly shows at which temperature the fibres increase the water vapour release from the heated concrete.
- Application of polypropylene fibres to HPC in order to increase their resistance to elevated temperature is highly effective. This additionally influences significantly the transport capacity for both gases and liquids.

## Literatura / References

1. EUROCODE 2 – Design of concrete structures. Part 1.2: General rules – Structural fire design.
2. Z. P. Bazant, "Analysis of pore pressure, thermal stresses and fracture in rapidly heated concrete" Int. Workshop on fire performance of high strength concrete, February 1997, NIST Maryland, pp. 13-14.
3. R. Breitenbucher, "Developments and application of high-performance concrete", Materials and Structures, Vol. 31, April 1998, pp. 209-215.
4. I. Hager, P. Pimienta, "Impact of the polypropylene fibres on the mechanical properties of HPC concrete" Proceedings of Sixth Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC), BEFIB 2004, 20-22 September 2004, Varenna, Italy.
5. I. Hager, P. Pimienta, "Wpływ dodatku włókien polipropylenowych na właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych poddanych działaniu wysokiej temperatury" IV Konferencja Naukowo-Techniczna MATBUD'2003, 25-27 czerwca 2003, Kraków, 202-210.
6. K. Hertz, „Limits of Spalling of Fire Exposed Concrete” Fire Safety Journal, Vol. 38, 2003, pp. 103-116.
7. A. Hoff, A. Bilodeau and V. M. Malhorta V.M, „Elevated Temperature, Effects on HSC, Residual Strength” Concrete International, 2000, pp. 41-47.
8. P. Kalifa, F. D. Menneteau, D. Quenard, „Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures” Cement and Concrete Research, August 2000, pp1915-1927.
9. P. Kalifa, G. Chéné, C. Gallé, „High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers: From spalling to microstructure” Cement and Concrete Research, Vol. 31, Issue 10, October 2001, pp. 1487-1499.
10. G. A. Khoury, „Design of concrete for better performance in fire” IMechE 1992, C438/042, pp. 121-127.
11. A. Nishida, N. Yamazaki, H. Inoue, U. Schneider, U. Diederichs, „Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance” Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading, Vol. 2. 1995.
12. RILEM Technical Recommendation: Tests for gas permeability of concrete, TC 116-PCD: Permeability of concrete as criterion of its durability, Materials and Structures, Vol. 32, April 1999, 174-179.