

**Min Li<sup>1,2</sup>, Zhishen Wu<sup>2</sup>, Wei Sun<sup>2</sup>, Chunxiang Qian<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Southeast University, Nanjing, China

<sup>2</sup>Internal Institute for Urban System Engineering, Southeast University, Nanjing, China

## **Badania i analiza mechanizmu zapobiegającego odpryskom w betonie o wysokiej wytrzymałości za pomocą włókien polipropylenowych**

### **Experimental study and mechanism analysis of restraining spalling of high strength concrete with polypropylene micro-fibers**

#### **1. Wprowadzenie**

Beton o wysokiej wytrzymałości (BWW) jest szeroko stosowany do budowy mostów, wysokościowców, w podziemnych pracach inżynierskich, w budowach portowych i morskich ze względu na dużą wytrzymałość, małe odkształcenia i dobrą trwałość. Obecnie wysokościowce i tunele wykonane z BWW są przedmiotem doświadczeń z włóknami. Natomiast w BWW poddanym działaniu ognia łatwiej powstają odpryski niż w zwykłym betonie ze względu na jego mniejszą przepuszczalność (K.D. Hertz i L.S. Sørensen 2005, D. Gawin, F. Pesavento i B. A. Schrefler 2006). Przebiegająca temperatura w trakcie pożaru wynosi 600°C, a wewnętrzna może nawet sięgać 1500°C. Bez zastosowania środków zaradczych elementy konstrukcji z BWW, które zostały narażone na duże naprężenia tracą szybko wytrzymałość po poddaniu działaniu ognia. Odpryski zmniejszają powierzchnie przekroju elementów z BWW i w związku z tym, ograniczają znacznie siłę nośną betonu. Odpryski powodują także odstonięcie stali zbrojeniowej i zmniejszają dopuszczalne obciążenie konstrukcji.

Znaleźć można dużo danych pokazujących, że wpływ organicznych włókien o niskim punkcie topnienia może zapobiec powstawaniu odprysków w BWW, wystawionego na działanie wysokich temperatur (F. Hernández-Olivaresa, G. Barluengab 2004, Hertz K.D 2003, Cheon-Goo Han i in. 2005, I. Hager i P. Pimenta 2003).

#### **1. Introduction**

High strength concrete (HSC) has been applied widely in bridges, high-rise buildings, underground engineering, ports, and ocean engineering because of its high strength, little deformation and good durability. At present, high-rise buildings and tunnels made with HSC are most likely to experience fires. However, HSC exposed to fire has greater tendency for spalling than normal strength concrete due to its low permeability (K. D. Hertz and L. S. Sørensen 2005, D. Gawin, F. Pesavento and B. A. Schrefler 2006). Generally average outdoor flashover temperature is 600°C in a fire, and indoor fire temperatures is up to 1500°C. With no preventive measures, HSC structural elements that endure high stresses will lose resistance quickly when exposed to fire. Spalling minimizes the cross-section area of a HSC elements, consequently reducing the bearing capacity of concrete greatly. Spalling also makes reinforcing steels exposes and reduces the load carrying capacity of structure.

A great deal of data have shown that organic fibers with low melting point may restrain spalling of HSC exposed to high temperature (F. Hernández-Olivaresa, G. Barluengab 2004, Hertz K.D 2003, Cheon-Goo Han et al. 2005, I. Hager and P. Pimenta, 2003). The melting point of polypropylene (PP) micro-fibers is about 150°C -160°C. MAE-W. Ahmed considered that PP fibers are more ef-

Punkt topnienia włókien polipropylenowych (PP) wynosi 150°C -160°C. MAE-W. Ahmed uważał, że włókna PP bardziej efektywnie zapobiegają odpryskom od innych włókien, ponieważ są one nieszkodliwe i ulegają szybko absorpcji przez zaczyn cementowy po stopieniu (MAE-W. Ahmed, T. Ayano i K. Sakata, 2002). Niektórzy badacze omawiają wpływ kształtu, długości i zawartości włókien PP na zapobieganie odpryskom (A. Bilodeau, V.K.R. Kodur and G.C. Hoff 2004; A. Noumowe 2005). Natomiast kanały utworzone w betonie po stopieniu włókien PP umożliwiają migrację wody i zmniejszają wytrzymałość oraz trwałość BWW. Jednak spadek wytrzymałości i trwałości spowodowany tymi kanałami jest mniejszy niż wywołany odpryskami. Tak więc dodatek włókien PP jest skuteczną metodą poprawy odporności na ogień BWW.

Wcześniejsze badania warunków i mechanizmu powstawania odprysków w BWW wystawionego na działanie wysokiej temperatury nie obejmowały wszystkich aspektów tego zjawiska i analiza teoretyczna jest potrzebna. Jest wiele prac wyjaśniających mechanizm zapobiegania odpryskom w BWW za pomocą włókien PP. Obecnie najpopularniejszymi hipotezami są oparte na niezgodności właściwości mechanicznych, naprężeniach termicznych i ciśnieniu pary. Mechanizm oparty na ciśnieniu pary jest najszerzej akceptowaną hipotezą. Mechanizm ten zakłada, że duże ilości pary wodnej powstające w BWW poddanego działaniu wysokiej temperatury, w której to ciśnienie przekracza wartość krytyczną, prowadzi do uszkodzeń w postaci odprysków. Pierre Kalifa i in. mierzyli ciśnienie pary w betonie i potwierdzili słuszność tego mechanizmu (P. Kalifa, G. Chene i Ch. Galle 2001). G. H. A. van der Heijden i in. badali przemiany wody w betonie za pomocą magnetycznego rezonansu jądrowego i opracowali model przesuwającej się, wysychającej warstwy (G. H. A. van der Heijden et al. 2007). Niektóre prace (Gamal N. Ahmed and J. P. Hurst 1999; D. Laverty, A. Nadjai, et al. 2000.; D. Gawin, F. Pesavento, et al. 2003) rozpatrywali modelowanie "odpowiedzi" wysoko temperaturowej betonu. Opracowali oni model matematyczny tej odpowiedzi w przypadku BWW poddanego działaniu ognia.

W tej pracy obliczono ciśnienia powstające w betonie w oparciu o naprężenia wywołane ciśnieniem pary i temperaturą i przeprowadzono doświadczenia badające powstawanie odprysków w BWW z dodatkiem włókien PP.

## 2. Doświadczenia

### 2.1. Materiały wyjściowe i skład mieszanki betonowej

W doświadczeniach stosowano cement portlandzki 42,5 P II według normy chińskiej GB175-1999, piasek rzeczny z punktem

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ W kg/m<sup>3</sup> I WYTRZYMAŁOŚĆ PO 28 DNIACH

MIX PROPORTION OF CONCRETE (kg/m<sup>3</sup>) AND COMPRESSIVE STRENGTH AFTER 28 DAYS

Samples	Cement	Water	Sand	Coarse aggregate	Fly ash	Water reducer	Compressive strength after 28 days, MPa
C70	410	146	628	1116	150	4.10	82.3

fective in restraining spalling than all other organic fibers, because PP fiber is innocuous and can be absorbed rapidly by cement paste after melting (MAE-W. Ahmed, T. Ayano, and K. Sakata, 2002). Some researchers have discussed the effect of shape, length and mix quantity of PP fibers on restraining spalling (A. Bilodeau, V. K.R. Kodur and G.C. Hoff 2004; A. Noumowe 2005). Although the channels formed in the concrete when PP fibers melt allow the ingress of water and affect strength and durability of HSC consequently. However, the deterioration degree of strength and durability caused by channels is less than that caused by spalling. So, mixing PP micro-fibers is an effective method to improve fire resistance of HSC.

Previous investigations inconcerning to the conditions and mechanisms of spalling of HSC exposed to high temperature have not been thorough, and more experiments and theoretical analysis is needed. There are many explanations of the mechanisms of restraining spalling of HSC with PP micro-fibers. At present, the favored theories are thermal incompatibility, thermal stress and vapor pressure mechanisms. The vapor pressure mechanism is the most widely accepted hypothesis. The vapor pressure mechanism suggests that large quantities of water vapor develop in HSC exposed to high temperature, and when the vapor pressure exceeds a critical value, damage appears in the form of spalling. Pierre Kalifa et al. tested the vapor pressure in concrete and verified the vapor pressure mechanism (P. Kalifa, G. Chene and Ch. Galle 2001). G. H. A. van der Heijden et al. studied water transformation in concrete by nuclear magnetic resonance spectroscopy, and established the model of a moving desiccation belt (G. H. A. van der Heijden et al. 2007).

Some works (Gamal N. Ahmed and J. P. Hurst 1999; D. Laverty, A. Nadjai, et al. 2000.; D. Gawin, F. Pesavento, et al. 2003) studied the modeling of high temperature response of concrete. They established mathematical model to simulate the thermal response of high-strength concrete subjected to fire.

In this paper, the pressure field of concrete is calculated on the basis of both vapor pressure and temperature stress, and then the experiments and theoretical analysis are developed on restraint of spalling of HSC with PP micro-fibers.

## 2. Experimental study

### 2.1. Raw materials and concrete mix composition

The materials used in this study were 42.5 P II Portland cement according to Chinese standard GB175-1999, river sand with a fineness modulus of 2.60 and a density of 2650 kg/m<sup>3</sup>, crushed

piaskowym 26% i gęstością 2650 kg/m<sup>3</sup>, kruszony bazalt o uziarnieniu w zakresie 5-20 mm, popiół lotny według chińskich norm GB 1596-91, superplastyfikator i włókna PP o gęstości 910 kg/m<sup>3</sup> o średnicy 30 μm i długości 19 mm w ilości 0,5 kg/m<sup>3</sup>; 0,88 kg/m<sup>3</sup> i 1,18 kg/m<sup>3</sup>, oznaczone kolejno V1, V2, V3. Skład mieszanki podano w tabeli 1. Beton bez włókien oznaczono C70.

W doświadczeniach stosowano piec olejowy. Piec ten wraz z krzywą wzrostu temperatury jest opisany w pracy (Min Li, Chunxiang Qian, Wei Sun 2004). Krzywa wzrostu temperatury jest podobna do opisanej w chińskiej normie GB/T 9978-1999. Działaniu wysokiej temperatury poddawano próbki betonu, które uprzednio dojrzewały przez 28 dni w warunkach normowych (temperatura 20 ± 2°C, wilgotność względna 90%). Gdy temperatura w piecu osiągnęła założony poziom próbki przetrzymywano w tej temperaturze jedną godzinę. Następnie zatrzymywano ogrzewanie i próbki chłodzono do temperatury pokojowej w piecu.

## 2.2. Pomiary przepuszczalności wody

Na rysunku 1 pokazano schemat stanowiska pomiarowego oznaczania przepuszczalności wody. Dolna powierzchnia betonu pozostaje w kontakcie z gąbką nasyconą wodą i próbka absorbuje wodę przez tę powierzchnię. Po określonym czasie próbka jest ważona. Zachodzi przybliżona zależność liniowa pomiędzy sumaryczną absorpcją a pierwiastkiem z czasu (F. Vodák, R. Černý, et al. 1997), którą opisuje wzór:

$$I = D_w \sqrt{t}$$

gdzie:  $I$  sumaryczna absorpcja,  $D_w$  współczynnik przepuszczalności, będący nachyleniem prostej. Można w oparciu o tę prostą wyznaczyć współczynnik przepuszczalności próbki betonu.

## 2.3. Próbkę BWW poddane działaniu wysokiej temperatury i ich mikrostruktura pod elektronowym mikroskopem skaningowym

W trakcie doświadczeń z zastosowaniem wysokiej temperatury słychać było odgłosy powstawania odprysków. Próbkę BWW z włóknami PP (C70 PP) poddane działaniu wysokiej temperatury pokazano na rysunku 2.

Na rysunku 2 pokazano częściowe odpryski powstałe na powierzchni próbki C70 poddanej działaniu temperatury wynoszącej 600°C i przekraczającej 600°C. Natomiast nie było odprysków na powierzchni próbki C70 PP. Wykazuje to, że włókna PP skutecznie zapobiegają powstawaniu odprysków. Na rysunku 3 pokazano kanaliki utworzone po stopieniu włókien PP w próbce betonu podgrzanego do 800°C. Temperatura topienia włókien PP wynosi 165°C, a temperatura spalania wynosi 593°C, w związku z tym włókna PP ulegały stopieniu, spalaniu lub zgazowaniu w wysokich temperaturach i utworzyły się kanaliki. W związku z tym, że włókna PP były równomiernie rozmieszczone w betonie pewna ilość poprzecznych przekrojów kanalików, spękań i pustek powstała w wysokiej temperaturze.

basalt with continuous grading and size of 5~20 mm, grade I fly ash according to Chinese standard GB1596-91, high-range water-reducing agent, and PP micro-fibers with a density of 910 kg/m<sup>3</sup>, diameter of 30 μm, and length of 19 mm, and a mix quantity of 0.5 kg/m<sup>3</sup>, 0.88 kg/m<sup>3</sup>, 1.18 kg/m<sup>3</sup>, designated V1, V2, V3 respectively. The mix proportions are listed in Table 1. Concrete without PP micro-fibers is designated as C70.

An oil furnace was used in this experiment. An illustration of the oven and its temperature-time curve is shown in a previous paper (Min Li, Chunxiang Qian, Wei Sun. 2004). The temperature-time curve is similar to that prescribed in Chinese standard GB/T 9978-1999. After the concrete specimens were cured under standard conditions for 28 days (temperature of 20 ± 2°C, relative humidity of 90%), the high temperature experiments were carried out. When the temperature inside the furnace reached the target temperature, the specimens were kept at this temperature for one hour. Then, heating was stopped and the specimens were cooled to room temperature in the furnace.

## 2.2. Testing of the water permeability coefficient

The sketch of testing stand of water permeability coefficient is shown in Figure 1. The lower surface of concrete contacts with the sponge that is filled with water. All the surfaces adjacent to the lower surface are brushed with epoxy resin for isolating with air and water. The concrete absorbs water from the free surface. Samples are weighted at the estimated time. Approximate linearity relation exists between cumulative absorption and root of time (F. Vodák, R. Černý, et al. 1997), which is following:

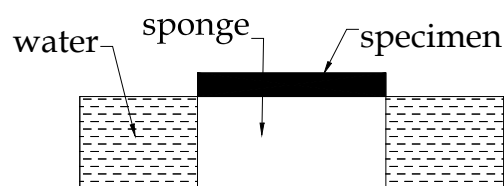
$$I = D_w \sqrt{t}$$

where  $I$  is cumulative absorption;  $D_w$  the water permeability coefficient, is the slope of the fit line of cumulative absorption curve. It is the index of evaluating permeability of concrete.

## 2.3. Specimens of HSC after high temperature treatment and their microstructure under SEM

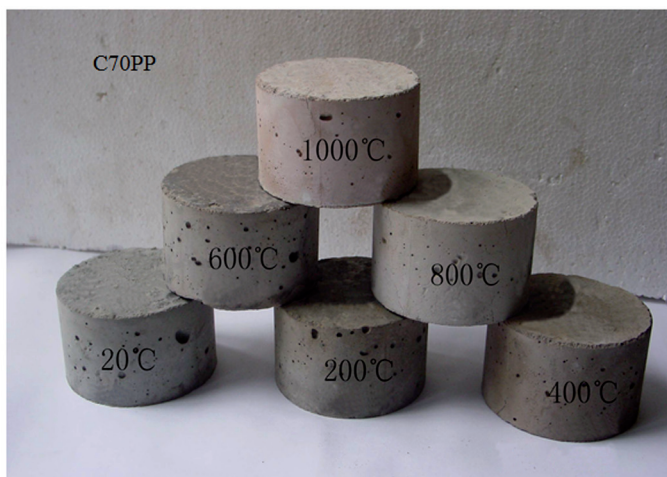
During the high temperature experiments, the sound of spalling was heard. Samples of HSC exposed to high temperature are shown in Fig. 2. Concrete with PP micro-fibers is designated C70 PP.

Figure 2 shows that partial spallings appeared on the exterior of sample C70 exposed at 600°C and over 600°C. However, there was no spalling on the surface of sample C70PP. This indicates that



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczenia współczynnika przepuszczalności wody

Fig. 1. The sketch of testing stand of water permeability coefficient



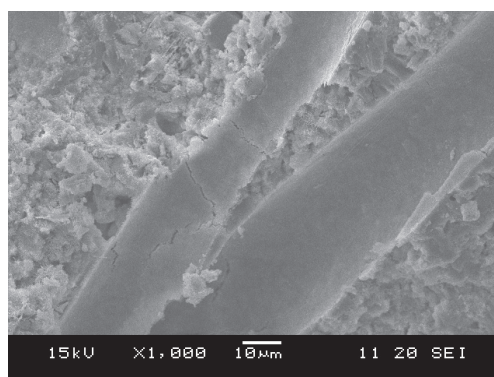
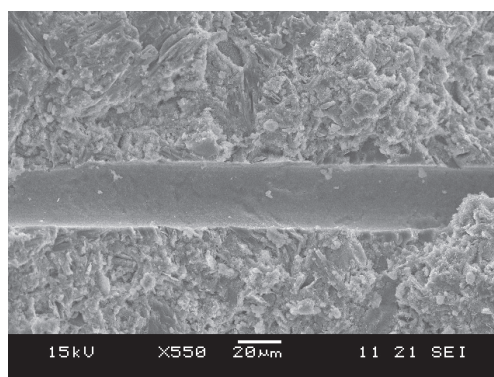
Rys. 2. Próbk BWW poddane działaniu wysokiej temperatury

Fig. 2. Samples of HSC exposed at high temperature

Po poddaniu BWW działaniu wysokiej temperatury woda w betonie uległa odparowaniu. W oparciu o równanie gazu doskonałego można stwierdzić, że ciśnienie pary wodnej wzrasta wraz z temperaturą. Ponieważ mikrostruktura BWW jest zwarta, a porowatość mała, odpryski często powstają, gdy wzrasta ciśnienie pary, przekraczając wytrzymałość na rozciąganie betonu.

Po dodaniu włókien PP do betonu kanaliki utworzone w wysokich temperaturach zwiększają porowatość i objętość porów w BWW w związku z czym ciśnienie pary ulega zmniejszeniu zgodnie z równaniem gazu doskonałego, co zapobiega powstawaniu odprysków.

Na rysunku 4 pokazano mikrostrukturę próbek betonów C70 i C70 PP w 20°C i po ogrzaniu do 800°C. Zaczyn cementowy uległ znacznemu zniszczeniu i powstały w nim pustki oraz pory, które utworzyły na powierzchni mikrostrukturę plastra pszczelego. Odstęp pomiędzy powierzchnią kruszywa i zaczynem jest większy od 50  $\mu\text{m}$ . Mikrostruktura zaczynu cementowego w próbce C70 PP jest nieco bardziej porowata w porównaniu do próbki C70 PP w 20°C, jednak występuje tylko niewiele spękań pomiędzy ziarnami kruszywa a zaczynem. W porównaniu z mikrostrukturą próbki C70 wygrzewanej w 800°C spękania w strefie przejściowej zaczynu z kruszywem w próbce C70 PP, wygrzewanej także w 800°C, są nieliczne i strefa ta jest zwarta. Na rysunku 4 widać, że kanaliki powstałe w wyniku obecności włókien PP w wysokiej temperaturze umożli-



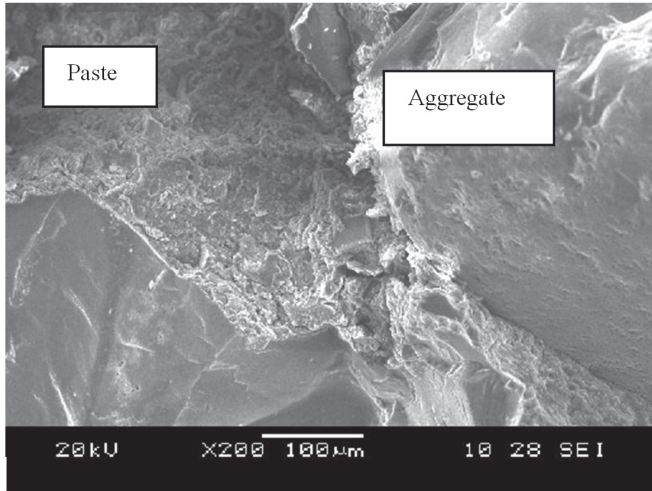
Rys. 3. Kanaliki pozostałe w betonie poddany działaniu wysokiej temperatury, po stopieniu włókien PP

Fig. 3. Channels remaining in concrete exposed at high temperature after melting of PP fibers

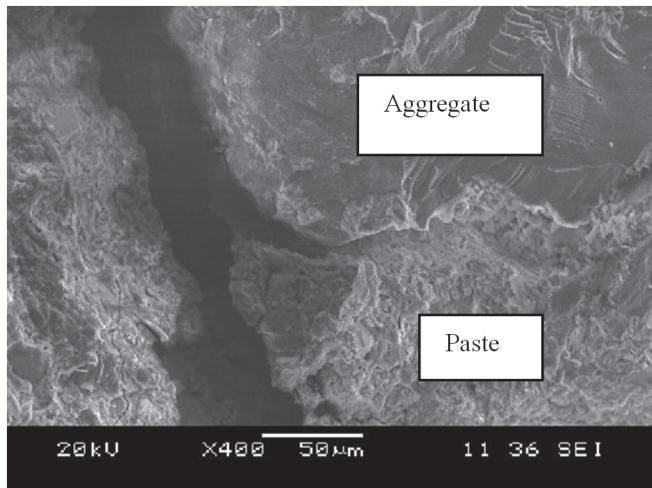
PP micro-fibers can effectively restrain spalling. Figure 3 presents an interior of samples with the channels formed by the PP micro-fibers melting in concrete heated at 800°C. The melting point of PP micro-fibers is 165°C and the combustion point is 593°C, so PP micro-fibers are melted, combusted or gasified completely at high temperature and channels are formed. Because the PP micro-fibers were distributed randomly within the concrete, some cross-cutting channels, cracks and holes were formed at high temperature.

After HSC is heated at high temperature, water in the concrete was vaporized. On the basis of the ideal gas state equation, the pressure of water vapor increases with an increase of temperature. Because the microstructure of HSC is compact and porosity is low, spalling often happens in HSC when the vapor pressure value increases and exceeds the maximum bending strength of HSC. When PP micro-fibers is mixed with concrete, channels formed by the PP micro-fibers at high temperature increase the porosity and pore volume of the HSC, so that water vapor pressure is reduced according to the ideal gas state equation, thereby restraining and postponing spalling.

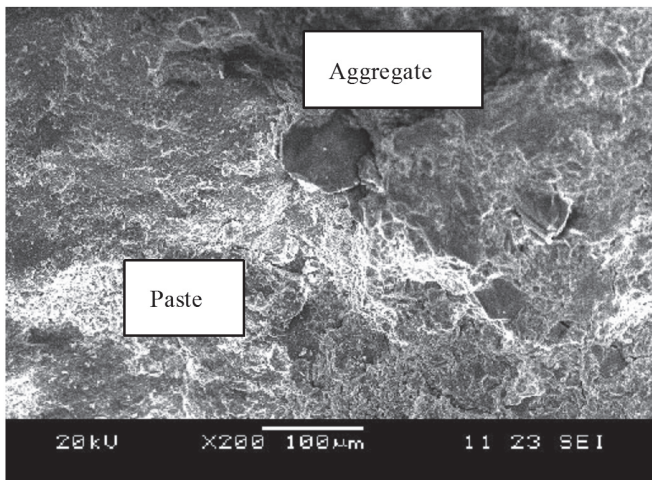
Figure 4 shows the microstructure of samples C70 and C70PP at 20°C and heated at 800°C, respectively. The cement paste in sample C70 is destroyed so badly that a large number of apertures and holes appear in the surface and form a honeycomb microstructure. The width between the aggregate and paste is greater than 50  $\mu\text{m}$ . The cement paste microstructure of sample C70PP has a little higher porosity compared to that of C70PP at



(a) C70 PP podgrzane do 20°C  
(a) C70 PP at 20°C



(b) C70 podgrzane do 800°C  
(b) C70 heated at 800°C



(c) C70 PP podgrzane do 800°C  
(c) C70 PP exposed at 800°C

Rys. 4. Mikrostruktura C70 i C70 PP

Fig. 4. Microstructure of C70 and C70 PP

liwiają obniżenie ciśnienia pary i zmniejszają ilość spękań w strefie przejściowej i skutecznie eliminują prawdopodobieństwo powstawania odprysków.

20°C, however, there are only several small cracks between the cement paste and aggregate. Compared with the microstructure of sample C70 heated at 800°C, cracks in the interfacial zone of sample C70PP heated at 800°C are small and the contact between the aggregate and cement paste is tight. Figure 4 indicates that channels formed by PP micro-fibers at high temperature release water vapor pressure and reduce the degree of cracking within the interfacial zone, and effectively reduce the occurrence probability of spalling.

### 3. Theory analysis of spalling mechanism

#### 3.1. Spalling degree (SD)

In this paper, the spalling degree of HSC is denoted by the average spalling area ratio and spalling ratio. The spalling ratio is defined as the percentage of HSC with spalling when HSCs are heated at high temperature; spalling area ratio is defined as the ratio of spalling area to the heated area of one specimen. Spalling degree (SD) of HSC is given by the product of average spalling area ratio and spalling ratio:

$$\text{Spalling degree(SD)} = \text{average spalling area ratio} \times \text{spalling ratio} \quad [1]$$

#### 3.2. Physical and chemical processes forming water vapor

Free water is vaporized to water vapor, which accelerates hydration of unhydrated cement clinker, and reduces surface energy of C-S-H and the cohesive force between the particles of C-S-H (Pierre-C. Aitcin 1998, Rami H. Haddad, Linda G. Shannis 2004). Accordingly, microcracks form between CH crystals and unhydrated cement particles.

At 200°C~400°C, adsorbed water and chemically combined water start to transgress (L. Powers-Couche 1992). Because the temperature expansion coefficient of hydrated cement particles and unhydrated cement particles is different, stress concentrations occurring in the interface between these particles cause microcracking. Microcracks are also formed between the aggregate and sand. In addition, some CH crystals became dehydrated.

#### 3.3. Calculation of maximum value of vapor pressure

The mass transfer in concrete at high temperature, according to the Darcy equation, is:

$$q = -(k/\mu)(\text{grad}p - \rho g) \quad [2]$$

where:  $q$  is velocity of flow (m/s);  $k$  is permeability, only related to pores (m<sup>2</sup>/s);  $\mu$  is a dynamic coefficient viscosity (Pa·s);  $\rho$  is density(kg/m<sup>3</sup>);  $g$  is acceleration of gravity ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ );  $p$  is pressure (Pa).

When  $k$  and  $\mu$  are variables, the equation is expressed as:

$$q = -\text{grad}(k\rho/\mu) + k\rho g/\mu \quad [3]$$

### 3. Analiza teoretyczna mechanizmu powstawania odprysków

#### 3.1. Udział odprysków

W tej pracy stopień udziału odprysków (UO) w BWW określono jako średni stosunek powierzchni odprysków i stosunek odprysków. Stosunek odprysków jest określony jako udział procentowy próbek BWW z odpryskami gdy betony te zostały ogrzane do wysokiej temperatury. Natomiast stosunek powierzchni zdefiniowano jako stosunek powierzchni odprysków do ogrzewanej powierzchni próbek. Stopień udziału odprysków (UO) jest wynikiem mnożenia średniej powierzchni odprysków i udziału odprysków:

$$\text{stopień udziału odprysków (UO)} = \text{średni stosunek powierzchni odprysków} \times \text{udział odprysków} \quad [1]$$

#### 3.2. Procesy fizyczne i chemiczne powstawania pary wodnej

Woda wolna ulega odparowaniu z utworzeniem pary, co przyspiesza hydratację cementu i zmniejsza energię powierzchniową C-S-H i siły kohezji pomiędzy cząstkami C-S-H (Pierre-C. Aïtcin 1998, Rami H. Haddad, Linda G. Shannis 2004). Powoduje to także utworzenie mikrospękań pomiędzy kryształami C-S-H i bezwodnymi cząstkami cementu. Poczynając od 200°C do około 400°C woda zaadsorbowana i związana chemicznie zaczyna ulegać przemianom (L. Powers-Couche 1992). Ponieważ współczynnik rozszerzalności cieplnej hydratów i nieuwodnionych cząstek cementu mają różną wartość powstaje koncentracja naprężeń na powierzchni tych cząstek, co powoduje powstawanie mikrospękań. Mikrospękania powstają także na granicy ziaren kruszywa i piasku. Niektóre kryształy CH ulegają dehydratacji.

#### 3.3. Obliczenie maksymalnego ciśnienia pary

Wymiana masy w betonie w wysokiej temperaturze, zgodnie z równaniem Darcy'ego ma postać:

$$q = -(k/\mu)(\text{grad}p - \rho g) \quad [2]$$

gdzie:  $q$  – szybkość przepływu, m/s;  $k$  – przepuszczalność zależna tylko od porowatości, m<sup>2</sup>/s;  $\mu$  – współczynnik lepkości dynamicznej Pa·s;  $\rho$  – gęstość, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ;  $p$  – ciśnienie, Pa.

Gdy  $k$  i  $\mu$  są zmienne to równanie przyjmuje postać:

$$q = -\text{grad}(k/\mu) + k\rho g/\mu \quad [3]$$

To równanie jest takie samo jak zależność określająca określony przepływ w izotropowych nasyconych wodą mediach porowatych. Ponieważ wpływ przyspieszenia na parę wodną może być pominięty,  $q$  można wyrazić za pomocą następującej zależności:

$$q = -\text{grad}(k/\mu) + k\rho g/\mu = -(k/\mu)\text{grad}p \quad [4]$$

Dla warunku jedno-wymiarowej przewodności cieplnej mamy:

This equation is the same with steady flow in an isotropic saturated with water porous media. Because gravity action to the water vapor may be omitted,  $q$  can be expressed as the following:

$$q = -\text{grad}(k/\mu) + k\rho g/\mu = -(k/\mu)\text{grad}p \quad [4]$$

For the condition of one-dimension heat conduction, we have:

$$q = -(k/\mu) \frac{\partial p}{\partial x} \quad [5]$$

On the basis of the Taylor formula,  $p_{max}$  can be found as the following:

$$p_{max} = p_0 + x \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{x^2}{2!} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \dots \quad [6]$$

If the partial derivatives of higher order are omitted, the following equation is obtained from Eq. [6]:

$$p_{max} = \frac{q\mu}{k}x + p_0 \quad [7]$$

Where:  $p_0$  is ambient pressure value, Pa;  $p_{max}$  is the maximum vapor value, Pa.

It can be seen from Eq. [7] that, if  $x$  is a fixed value,  $p_{max}$  is smaller when  $k$  is larger. Therefore, it increases porosity and penetrability of HSC that PP micro-fibers is mixed into concrete. Consequently,  $p_{max}$  drops and spalling does not occur easily.

#### 3.4. Results and analysis of vapor pressure field

The vapor pressure field is a function of temperature and moisture content. Under ideal conditions, the vapor pressure field is reduced to a one-dimensional condition. The outcome is shown in Eq. [8]:

$$\frac{\partial B}{\partial t} p + \frac{\partial p}{\partial t} B = D \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} p + 2 \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} B \right) + \frac{\partial D}{\partial x} \left( \frac{\partial B}{\partial x} p + \frac{\partial p}{\partial x} B \right) \quad [8]$$

where  $B = M/RT$ ,  $M$  is molecular mass (for water vapor,  $M$  is 0.018 kg/mol);  $R$  is ideal gas constant ( $R$  is 8.31 J/mol);  $T$  is temperature (°C);  $t$  is time (s);  $x$  is the distance from the surface of concrete;  $D$  is effective diffusion coefficient (m<sup>2</sup>/s).

Eq. [8] is calculated by the finite difference method and the results are shown in Figure 5. Some variables used to calculate the values in Figure 5 are defined (B. F. Johannesson 2002). The density of concrete  $\rho$  is 2350 kg/m<sup>3</sup>; the effective diffusion coefficient  $D_0$  is  $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . The thermal conductivity of concrete is expressed as:

$$\lambda = 2 - 0.24 \cdot T/120 + 0.012 \cdot (T/120)^2$$

The specific heat of concrete is expressed as:

$$C = 900 + 80 \cdot T/120 - 4 \cdot (T/120)^2$$

Figure 5 shows that at a certain time, there is definite vapor pressure distribution in the concrete in a one-dimensional direction; moreover, the vapor pressure distribution changes with increasing heating time. There is a peak value of vapor pressure in the vapor

$$q = -(k/\mu) \frac{\partial p}{\partial x} \quad [5]$$

W oparciu o wzór Taylora  $p_{max}$  można znaleźć ze wzoru:

$$p_{max} = p_0 + x \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{x^2}{2!} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \dots \quad [6]$$

W przypadku pominięcia pochodnych wyższego rzędu otrzymuje się następujące równanie z równania [6]:

$$p_{max} = \frac{q\mu}{k} x + p_0 \quad [7]$$

gdzie:  $p_0$  – jest ciśnieniem otoczenia, Pa;  $p_{max}$  – jest maksymalnym ciśnieniem pary Pa.

Z równania [7] wynika, że jeżeli  $x$  ma stałą wartość  $p_{max}$  maleje ze wzrostem  $k$ . Z tego względu zwiększa to porowatość i migrację do BWW w przypadku dodatku włókien PP do betonu.  $p_{max}$  ulega zmniejszeniu i odpryski nie powstają już tak łatwo.

### 3.4. Wyniki i analiza pola ciśnienia pary

Pole ciśnienia pary jest funkcją temperatury i zawartości wilgoci. W idealnych warunkach pole ciśnienia pary ulega ograniczeniu do jedno-wymiarowego. Wynik ten pokazuje równanie [8]:

$$\frac{\partial B}{\partial t} p + \frac{\partial p}{\partial t} B = D \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} p + 2 \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} B \right) + \frac{\partial D}{\partial x} \left( \frac{\partial B}{\partial x} p + \frac{\partial p}{\partial x} B \right) \quad [8]$$

gdzie:  $B = M/RT$ ,  $M$  – molowa masa (dla wody  $M = 0,018$  kg/mol);  $R$  – stała gazowa ( $R = 8,31$  J/mol);  $T$  – temperatura, °C;  $t$  – czas, s;  $x$  – odległość od powierzchni betonu;  $D$  – efektywny współczynnik dyfuzji pary, m<sup>2</sup>/s.

Wynik rozwiązania równania [8] za pomocą metody skończonych elementów pokazano na rysunku 4. Pewne zmienne zastosowane w celu obliczenia wartości pokazanych na rysunku 4 zostały zdefiniowane przez Johannessona (B. F. Johannesson 2002). Gęstość betonu  $\rho$  przyjęto jako 2350 kg/m<sup>3</sup>, efektywny współczynnik dyfuzji  $D_0 = 2,5 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. Przewodność ciepła betonu można wyrazić wzorem:

$$\lambda = 2 - 0,24 \cdot T/120 + 0,012 \cdot (T/120)^2$$

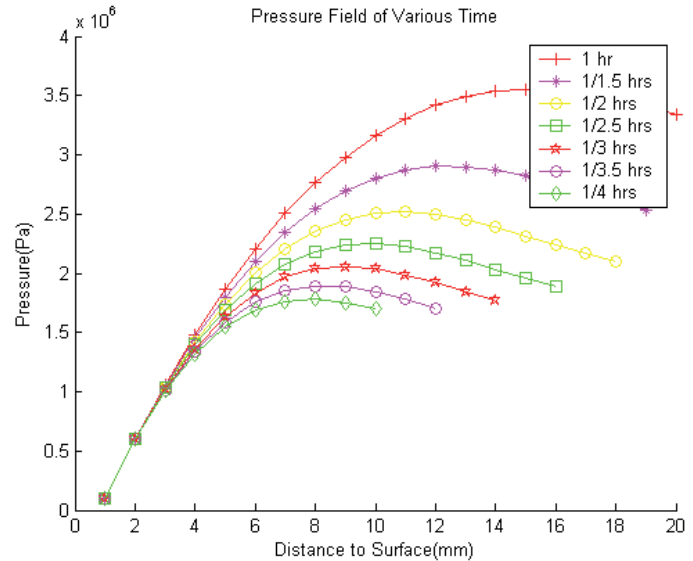
Ciepło właściwe betonu można wyrazić wzorem:

$$C = 900 + 80 \cdot T/120 - 4 \cdot (T/120)^2$$

Tablica 2 / Table 2

MAKSIMUM CIŚNIENIA PARY I ODPOWIADAJĄCA MU TEMPERATURA W FUNKCJI CZASU WYGRZEWANIA  
VAPOR PRESSURE PEAK VALUE AND THE CORRESPONDING TEMPERATURE AS A FUNCTION OF TIME

Time / min	15	17.1	20	24	30	45	60
Vapor pressure peak value / MPa	1.7812	1.8946	2.0563	2.2509	2.5165	2.9011	3.5362
Corresponding temperature / °C	137.61	153.21	141.93	136.61	138.71	151.20	142.72



Rys. 5. Pole ciśnienia pary w BWW wygrzewanego w 600°C

Fig. 5. Vapor pressure field in HSC heated at 600°C temperature

pressure field at a given time, which increases with prolonged heating time. Furthermore, the position of the peak value transfers away from heating surface, as shown in Figure 5.

The vapor pressure peak value and the corresponding temperature at the depth of the vapor pressure peak value at each time are given in Table 2. Although peak values of vapor pressure increase almost linearly with time, the corresponding temperatures are all about 150°C which is very close to the melting point of PP micro-fibers. This is why PP micro-fibers improve the resistance to spalling. At a certain temperature, a peak pressure forms within the concrete. This will cause spalling. PP micro-fibers melt before the peak pressure is achieved, and thus many interconnected channels are formed. In this way, vapor pressure is released, and spalling is avoided.

Figure 5 shows that the peak value of vapor pressure is about 3.5532 MPa after concrete is exposed to 600°C for one hour. According to the vapor pressure theory, hypothesis occurs if concrete can not endure 3.5532 MPa. Residual bending strengths of sample C70 mixed with PP micro-fibers heated at 600°C are listed in Table 3. The bending strengths are in the range of 4.25 ~ 4.94 MPa, which is consistent with the peak value. This result indicates the contribution of PP micro-fibers to resist-spalling of HSC.

The water permeability coefficient of HSC exposed to high temperature was tested according to the method put forward by previ-

Tablica 3 / Table 3

WSPÓŁCZYNNIK PRZEPUSZCZALNOŚCI WODY, CIŚNIENIE PARY, RESZTKOWA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE I STOPIEŃ UDZIAŁU ODPRYSKÓW PRÓBKII C70 PP WYGRZEWANEJ W 600°C

WATER TRANSFER PERMEABILITY COEFFICIENT, VAPOR PRESSURE, RESIDUAL BENDING STRENGTH, AND SPALLING DEGREE OF C70 AND C70PP HEATED AT 600°C

Próbki/Samples	C70	C70PPV1	C70PPV2	C70PPV3
Współczynnik przepuszczalności wody Water permeability coefficient $D_w$ , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$	0.0733	0.0956	0.1132	0.1391
Ciśnienie pary Vapor pressure $P$ , MPa	1.52	1.01	0.68	0.29
Resztkowa wytrzymałość na zginanie Residual bending strength, MPa	4.25	4.94	4.76	4.73
Stopień udziału odprysków Spalling degree, SD	12.98	1.13	0.96	0.33

Z rysunku 5 wynika, że w pewnym czasie występuje określony zakres ciśnienia pary w betonie w jedno-wymiarowym kierunku. Równocześnie zakres zmienności ciśnienia ulega zmianie ze wzrostem czasu ogrzewania. Dodatkowo, położenie maksymalnej wielkości ciśnienia oddala się od powierzchni, jak to wynika z rysunku 5.

Maksymalną prężność pary i odpowiadającą jej temperaturę w tej samej odległości od powierzchni dla różnych czasów podano w tabelicy 2. Aczkolwiek maksymalna prężność pary rośnie prawie liniowo w funkcji czasu, odpowiadająca jej temperatura wynosi około 150°C, co jest bardzo blisko punktu topnienia włókien PP. Jest to powód, dla którego włókna PP poprawiają odporność na powstawanie odprysków. Po pewnym czasie maksymalne ciśnienie powstaje wewnątrz betonu. To powoduje powstawanie odprysków. Włókna PP ulegają stopieniu przed dojściem ciśnienia pary do maksimum i powstaje wiele połączonych wzajemnie kanalików, w związku z tym ciśnienie pary spada i odpryski nie powstają.

Z rysunku 5 wynika, że maksymalne ciśnienie pary wynosi około 3,5532 MPa, gdy próbka betonu była wygrzewana w temperaturze 600°C przez jedną godzinę. Zgodnie z hipotezą ciśnienia pary, odpryski powstają jeżeli beton nie może przenosić naprężenia wynoszącego 3,5532 MPa. W tabelicy 3 podano resztkową wytrzymałość na zginanie próbki C70 z włóknami PP, poddanej wygrzewaniu w 600°C. Wytrzymałość na zginanie leży w zakresie od 4,25 do 4,94 MPa co jest zgodne z maksymalnym ciśnieniem pary. Porównanie tych wyników wyjaśnia dlaczego w BWW z dodatkiem włókien PP nie powstają odpryski.

Współczynnik przepuszczalności wody BWW poddanego działaniu wysokiej temperatury oznaczono stosując metodę zaproponowaną przez [9].

Tablica 4 / Table 4

WSPÓŁCZYNNIK PRZEPUSZCZALNOŚCI WODY PRÓBEK C70, C70 PP WYGRZEWANYCH W 400°C

THE WATER PERMEABILITY COEFFICIENT OF C70 AND C70 WITH PP MICRO-FIBERS HEATED AT 400°C

Próbki/Samples	C70	C70PPV1	C70PPV2	C70PPV3
Współczynnik przepuszczalności wody Water permeability coefficient $D_w$ , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$	0.073	0.095	0.1132	0.1391

ous studies (R. Černý, J. Drchalová 1995). The relation of vapor pressure and water transfer permeability coefficient is:

$$P = -1.09022 + 5.313870 e^{(-9.69033D_w)} \quad [9]$$

The vapor pressure in concrete heated at 600°C is calculated from Eq. [9] and listed in Table 3.

We tested the water permeability coefficient. The results are listed in Table 4. Table 4 indicated that the increase in porosity by adding PP micro-fibers is responsible for increasing the permeability.

After C70 is mixed with PP micro-fibers and heated at 600°C, the value of vapor pressure drops and the spalling degree(SD) drops dramatically. In particular, when C70 is mixed with PP micro-fibers with a volume of 0.58  $\text{kg}/\text{m}^3$ , SD drops from 12.98 to 1.13. Moreover, the vapor pressure in concrete and the spalling degree falls with an increase of fibres PP quantity, in the mixture and the occurrence of spalling is reduced consequently.

#### 4. Conclusions

The mechanism of restraining spalling of HSC with PP micro-fibers was studied by both experiment and theoretical analysis. The micro-structure of HSC mixed with PP micro-fibers exposed to high temperature was analyzed. After HSC is exposed to high temperature, physical and chemical changes occur in the interior of the concrete, and water vapor forms. The transfer of water vapor forms pore pressure, which varies with temperature, position, and time. The vapor pressure field, a function of temperature and water content, is formed in the concrete, and the peak pressure



nowaną przez Černego (R. Černý, J. Drchalová 1995). Zależność ciśnienia pary i współczynnika przepuszczalności wyraża wzór:

$$P = -1.09022 + 5.313870 e^{(-9.69033D_w)} \quad [9]$$

Ciśnienie pary w betonie wygrzewanym w 600°C obliczone z równania 9 podano w tabelicy 3.

Zbadaliśmy współczynnik przepuszczalności wody. Wyniki podano w tabelicy 4. Wyniki te pokazują, że wzrost porowatości spowodowany dodatkiem włókien PP pociąga za sobą zwiększenie przepuszczalności.

Po dodaniu do mieszanki C70 włókien PP i wygrzewaniu w 600°C ciśnienie pary zmniejszyło się i stopień udziału odprysków spadł bardzo znacznie. Szczególnie, gdy do C70 dodano włókien w ilości 0,58 kg/m<sup>3</sup> UO zmniejszył się z 12,98 do 1,13. Ponadto ciśnienie pary w betonie i stopień udziału odprysków zmniejszył się wraz ze zwiększeniem włókien PP w mieszance co spowodowało spadek odprysków.

#### 4. Wnioski

Mechanizm zmniejszenia odprysków w BWW z dodatkiem włókien PP zbadano doświadczalnie i przeprowadzono analizę teoretyczną. Zbadano mikrostrukturę BWW zawierającego włókna PP poddanego działaniu wysokich temperatur. W BWW poddanym działaniu wysokich temperatur zachodzą fizyczne i chemiczne zmiany, wraz z powstawaniem pary wodnej. Powstawaniu pary wodnej towarzyszy ciśnienie, które zmienia się z temperaturą, odległością od powierzchni betonu oraz z czasem. Pole ciśnienia pary będące funkcją temperatury i zawartości wody, powstaje w betonie i tworzy się maksymalne ciśnienie w pewnej odległości od powierzchni. Powstawanie odprysków zachodzi gdy maksymalne ciśnienie przekroczy naprężenie pęknięcia betonu. Wnioski z tej pracy są następujące:

- 1) Maksymalne ciśnienie pary jest zbliżone z wytrzymałością na zginanie BWW, gdy został on poddany działaniu wysokich temperatur, w ciągu jednej godziny. Temperatura odpowiadająca maksymalnemu ciśnieniu wynosiła we wszystkich przypadkach około 150°C, co leży bardzo blisko punktu topnienia włókien PP. Potwierdza to udział włókien PP w zmniejszeniu ciśnienia pary i jest zgodne z mechanizmem, przyjmującym że ciśnienie pary powoduje powstawanie odprysków w betonie.
- 2) Maksymalne ciśnienie pary można opisać za pomocą następującego wzoru:

$$p_{max} = \frac{q\mu}{k}x + p_0$$

Jest ono odwrotnie proporcjonalne do przepuszczalności betonu. Dodatek włókien do BWW zwiększa jego przepuszczalność, co zmniejsza ciśnienie maksymalne i zapobiega powstawaniu odprysków.

exists in a certain position. Spalling occurs when the peak pressure exceeds the cracking stress of concrete. The conclusions of this work are the following:

- 1) The peak value of vapor pressure is consistent with the bending strength of HSC after HSC is exposed to high temperature for one hour. The temperature corresponding to the peak pressure was about 150°C in all cases, which is very close to the melting point of PP micro-fibers. This validates the contribution of PP fibres in reducing the vapor pressure and the mechanism assuming that vapor pressure cause the spalling of concrete.
- 2) The peak value of water vapor can be described by the following formula:

$$p_{max} = \frac{q\mu}{k}x + p_0$$

It is inversely proportional to the permeability of concrete. Mixing PP micro-fibers into HSC raises the permeability of HSC, so the peak pressure is reduced and spalling is restrained.

#### Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge financial support for this research from Major State Basic Research Development Program of China (973Program) (2009CB623203), the National Natural Science Foundation of China (50808042) for youth, and Six Projects Sponsoring Talent Summits of Jiangsu Province (1112000053), the Project-sponsored by SRF for ROCS, SEM. and Key laboratory for concrete and prestressed concrete of Ministry of Education, Southeast University.

#### Literatura / References

1. A. Bilodeau, V. K. R. Kodur, G. C. Hoff, "Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire", *Cem. Concr. Compos.*, 26 (2), 163-174 (2004).
2. M. Yabuki, MAE-W. Ahmed, T. Ayano, et al., "Fire resistance of polypropylene fiber reinforce concrete", *J. Soc. Mater. Sci.*, 51(10), 1123-1128 (In Japanese) (2002).
3. A. Noumowe, "Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200°C", *Cem. Concr. Compos.* 35 (11), 2192-2198 (2005).
4. B. F. Johannesson, "Prestudy on diffusion and transient condensation of water vapor in cement mortar", *Cem. Concr. Res.*, 32, 955-962 (2002).
5. Cheon-Goo Han, Yin-Seong Hwang, Seong-Hwan Yang and N. Gowripalan, "Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement", *Cem. Concr. Res.*, 35 (9), 1747-1753 (2005).
6. D. Gawin, F. Pesavento, et al., "Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation", *Comput. Method Appl. M.*, 192 (13), 1731-1771 (2003).
7. D. Gawin, F. Pesavento, B. A. Schrefler, "Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi-phase porous media model of concrete", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 195 (41), 5707-5729 (2006).
8. D. Lavery, A. Nadjai, et al., "Modeling of Thermo-Structural Response of Concrete Masonry Walls Subjected to Fire", *J. Appl. Fire Sci.*, 10(1), 3-19 (2000).
9. F. Hernández-Olivaresa, G. Barluengab, "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete". *Cem. Concr. Res.*, 34 (1), 109-117 (2004).

10. F. Vodák, R. Černý, et al., "Thermophysical properties of concrete for nuclear-safety related structures", *Cem. Concr. Res.*, 27, 415-426 (1997).
11. G. H. A. van der Heijden, R. M. W. van Bijnen, L. Pel, H. P. Huinink "Moisture transport in heated concrete, as studied by NMR, and its consequences for fire spalling", *Cem. Concr. Res.*, 37 (6), 894-901 (2007).
12. Gamal N. Ahmed, James P. Hurst, "Modeling Pore Pressure, Moisture, and Temperature in High-Strength Concrete Columns Exposed to Fire", *Fire. Tech.*, 35(3), 232-262 (1999).
13. I. Hager, P. Pimenta, "Effect of polypropylene fibres on mechanical properties of HPC at high temperature", *Cement Wapno Beton*, 70, 263-266 (2003).
14. K. D. Hertz, "Limits of spalling of fire-exposed concrete", *Fire. Saf. J.*, 38 (2), 103-116 (2003).
15. K. D. Hertz, L. S. Sørensen, "Test method for spalling of fire exposed concrete", *Fire. Saf. J.*, 40(5), 466-476 (2005).
16. Min Li, Chunxiang Qian, Wei Sun, "Mechanical properties of high-strength concrete after fire", *Cem. Concr. Res.*, 34, 1001-1005 (2004).
17. Pierre-C. Aïtcin, *High Performance Concrete*, E & FN Spon, London 1998.
18. Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle, "High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure", *Cem. Concr. Res.*, 31 (10), 1487-1499 (2001).
19. L. Powers-Couche, *Fire damaged concrete-up close*, *Concrete Repair Digest*, 1, 241-8 (1992).
20. R. Černý, J. Drchalová, "Measuring the moisture diffusivity of board materials", *Proc. of the CIB W40 Meeting*, University of Porto, 147-156 (1995).
21. Rami H. Haddad, Linda G. Shannis, "Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel", *Constr. Build. Mater.*, 18, 425-435 (2004).