

Dr inż. Izabela Hager, mgr inż. Radosław Kiwit

Politechnika Krakowska, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli

Ocena uszkodzeń pożarowych betonu na podstawie głębokości zagłębienia łącznika wstrzeliwanego osadzką prochową

The assessment of heat damaged concrete based on the penetration depth of probes fired with gunpowder tool

1. Wprowadzenie

Podstawowym założeniem diagnostycznych metod penetracyjnych (m.in. sonda Windsor [1]) jest stwierdzenie, iż głębokość zakotwienia wstrzeliwanego w podłoże betonowe stalowego łącznika zależy będzie od jakości betonu i będzie tym większa, im klasa betonu będzie niższa. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki doświadczeń sprawdzających możliwość wykorzystania osadzaka prochowego Hilti DX 460, narzędzia stosowanego do szybkiego montażu różnych elementów budowlanych, jako urządzenia diagnostycznego pozwalającego na ocenę stanu betonu uszkodzonego działaniem wysokiej temperatury. Pierwotnym zastosowaniem osadzaka prochowego jest usprawnienie i przyspieszenie przytwierdzania elementów drewnianych, płyt termoizolacyjnych, lub profili metalowych do konstrukcji nośnej betonowej lub stalowej, za pomocą łączników metalowych. Jak wykazały doświadczenia istnieje zależność między głębokością zakotwienia łącznika wstrzeliwanego za pomocą osadzaka Hilti DX 460 i wytrzymałością na ściskanie betonu, a jej przebieg ma charakter quasi liniowy. Proponowaną metodę, ze względu na penetrację metalowego elementu do betonu, można zaliczyć do grupy metod częściowo niszczących. W wyniku przeprowadzonych badań tylko warstwa powierzchniowa betonu zostaje uszkodzona, wskutek wniknięcia metalowego łącznika na pewną głębokość. Łącznik ten można usunąć przez wyrwanie wraz z niewielkim fragmentem powierzchni betonu – ubytek ten może być uzupełniony cementową masą naprawczą. Niewątpliwą zaletą proponowanej metody jest możliwość wykonania wielu prób w krótkim czasie, a tym samym uzyskanie wyników szybko i małym nakładem pracy.

2. Opis metody badawczej

W doświadczeniach stosowano osadzak prochowy Hilti DX 460 (rysunek 1), wyposażony w magazynek MX umożliwiający seryjne stosowanie łączników, połączonych za pomocą plastikowej

1. Introduction

The main principle of penetration methods [e.g. Windsor probe (1)] is that the penetration depth of probe fired with gunpowder tool is higher for a poor quality concrete. The goal of this paper is to examine the application of a Hilti DX 460 tool for gunpowder firing of probes to assess the quality of concrete, damaged by high temperature. The Hilti tool genuine application is for quick and efficient direct fastening of various elements - wooden, insulating or metal profiles to load-bearing concrete or steel element, using metal nails. The recent research (2) has shown a relation between the penetration depth (d) of a probe fired with the Hilti DX 460 tool and the concrete compressive strength (f_c). The experimentally determined relationship $f_c(d)$ is a quasi-linear function (2). The testing procedure and material damage involved in the proposed method qualify it to be semi-destructive. The firing of the probe affects only a shallow and limited area of the concrete element and the sampler can be pulled-out afterwards. The damage can then be patched with mortar, thus regardless of the method of damage repair, any effects of testing can be quickly removed. The main advantage of the method is the possibility of several tests to be carried out in a short time, thus providing results quickly and in a relatively simple way.

2. Method and materials

A Hilti DX 460 tool (Fig. 1) has a MX magazine equipped with four types of colour-coded cartridges of different power and additionally a knob which allows the explosion power to be regulated within the range from 1 to 4. After preliminary tests (2), the 52 mm probes were chosen, together with a high-power red cartridge. In all subsequent tests the tool was adjusted to the power level of 3.

Six concretes were tested, all produced from “Dwudniaki” gravel (2) and their composition (BZ 1) is given in Table 1. The calibration

taśmy. Łączniki wstrzeliwuje się do betonu dzięki ładunkom prochowym, przy czym osadzak DX 460 jest wyposażony w cztery ładunki, o różnej energii oraz ma dodatkowo możliwość regulacji zastosowanej mocy wstrzeliwania łączników. Na podstawie prób wstępnych wybrano łączniki o długości 52 mm, oraz ładunki o dużej mocy, a warunki te były utrzymywane we wszystkich doświadczeniach (2). Doświadczenia te objęły sześć betonów różnych klas, z kruszywem otoczkowym. Na podstawie uzyskanych głębokości zakotwienia (d) i wytrzymałości na ściskanie, określonej na próbkach kostkowych (f_c), wyznaczono korelację $f_c(d)$ dla betonów o $f_c < 50$ MPa:

$$f_c(d) = -1,632d + 90,176$$

Linia prosta, opisana równaniem korelacyjnym w układzie współrzędnych: głębokość zakotwienia [d] i wytrzymałość na ściskanie [f] pozwala na szybkie wyznaczenie poszukiwanej wartości f_c dla uzyskanego doświadczenia d . Należy podkreślić, że zależność ta jest słuszna dla podanych warunków doświadczalnych (długość łącznika, moc ładunku prochowego).

3. Badane betony

Beton wykonano z kruszywa otoczkowego, z kopalni Dwudniaki. Wytrzymałość na ściskanie wynosząca 43,4 MPa została określona na próbkach sześciennych, o długości boku 150 mm, zgodnie z normą PN - EN 12390-4. Skład badanego betonu, oznaczo-



a)



b)

Rys. 1. a) Osadzak prochowy Hilti DX 460; b) łącznik osadzony w betonie

Fig. 1. a) Powder actuated tool Hilti DX 460; b) fastened nail

curve was established from the measurements of the penetration depth (d) while the compressive strength (f_c) for all six concretes was derived from the experimental results. The following correlation can be written:

$$f_c(d) = -1,632d + 90,176; \text{ for concretes with } f_c < 50 \text{ MPa}$$

The proposed correlation line drawn in the coordinate system, i.e. penetration depth and compressive strength, allows for quick determination of the f_c value from d found experimentally. However, the correlation formula is valid only for input parameters, i.e. the probe dimension and the tool power used.

3. Testing programme

The compressive strength of the cube 150 mm samples were tested according to PN - EN 12390-4 standard. The compressive strength of the concrete cured for 28 days was 43.4 MPa. For the penetration depth (d) test the slabs 0.305 x 0.305 x 0.150 m were used. Three slabs were prepared, denoted: P1, P2 and P3. Sample P1 was tested without heat treatment. Specimens P2 and P3 for heating were mounted in the place of the door of Nabertherm laboratory furnace (Fig. 2). In this condition the temperature gradient can be formed in the slab which reproduces to some extent the temperature conditions during the building fire. The kiln was programmed to reach the temperature $T = 1100^\circ\text{C}$ during one hour and then to maintain it. This steep heating profile proved to be impossible to achieve, as the slab had been mounted in the place of door, eliminating two heating elements of the kiln, leaving only four operational elements. In the Fig. 3 the programmed heating profile of the kiln and the temperature profile measured with the thermocouples, located in the heated slab are shown. These thermocouples were embedded in the slab centre at the depths of 1, 3, 5, 7, 9 and 11 cm during casting. This enabled continuous temperature measurement using LUMEL KD7 data acquisition device. All signals were recorded at one-minute intervals, providing the temperature development data, in the function of time. Specimen P2 was heated until the temperature of its surface reached 750°C . The heating of P3 slab lasted till its surface reached 900°C . During the test the maximum temperature measured at the depth of 1 cm was 510°C and 770°C , for P2 and P3 respectively.

After cooling down the specimen, probes were fired to their surface from the distance of 8 cm of their edges and about 7 cm between them. The probes penetration depth, as the difference between their length and section above the concrete surface (D) $d = 52 - D$ [mm], was found. All probes bent during fastening were eliminated from the measurements.

4. Results

On the basis of continuous temperature measurements of slab surface and at the depth of 1, 3, 5, 7, 9 and 11 cm the temperature profiles in time were obtained (Fig. 3). In Fig. 4 the peak temperatures recorded at all six depths of heated concrete specimens were

nego BZ1, podano w tablicy 1. Doświadczenia głębokości penetracji łącznika (d) prowadzono na betonowych płytach o wymiarach 30,5 x 30,5 x 15 cm. Wykonano trzy płyty, oznaczone P1, P2 i P3. Płyta P1 nie była ogrzewana, natomiast płyty P2 i P3 ogrzewano w laboratoryjnym piecu Nabertherm, umieszczając je zamiast drzwi (rys. 2). W przekroju wewnętrznym płyty powstawał gradient temperatury zbliżony do warunków jakie powstają podczas pożaru. Program zapewniał nagrzewanie pieca do 1100°C w ciągu 1 godziny i utrzymanie tej temperatury w czasie całego doświadczenia. Montaż płyty w miejscu drzwi wymagał odłączenia części elementów grzejnych, zamontowanych w drzwiach pieca. W konsekwencji komorę ogrzewało tylko 4 z 6 elementów grzejnych, co uniemożliwiło uzyskanie zamierzonego, szybkiego wzrostu temperatury. Podczas ogrzewania temperaturę w przekroju płyty mierzono za pomocą termopar, umieszczonych w betonie w trakcie formowania płyt, w środkowej ich części na głębokościach 1, 3, 5, 7, 9 i 11 cm. Temperaturę zapisywano przy użyciu rejestratora LUMEL KD7, z częstotliwością 1 pomiar/min. Na rysunku 3 pokazano rzeczywisty przebieg temperatury w piecu mierzony za pomocą termopary umieszczonej w pobliżu ogrzewanej powierzchni płyty. Płytę P2 ogrzewano do chwili gdy temperatura mierzona na jej powierzchni wyniosła 750°C. W przypadku płyty P3 ogrzewanie przerwano gdy temperatura powierzchni osiągnęła 950°C. Podczas ogrzewania maksymalna temperatura odnotowana na głębokości 1 cm wyniosła w przypadku płyt P2 i P3 odpowiednio 510°C i 770°C.

Po ochłodzeniu, w ogrzewaną powierzchnię płyty wstrzeliwano łączniki w odległości 8 cm od krawędzi płyty, przy zachowaniu odległości około 7 cm, pomiędzy łącznikami. Po wstrzeleniu łączników w wyznaczone miejsca, odczytywano długości części kolka wystającego ponad powierzchnię próbki w mm (D) i na tej podstawie określano głębokość penetracji łącznika w materiał ($d = 52 - D$ [mm]). W przypadku gdy podczas zderzenia z płytą łącznik ulegał wygięciu wynik ten pomijano.

4. Wyniki badań

Dzięki prowadzonemu podczas ogrzewania ciągłemu pomiarowi temperatury powierzchni płyty, a także na głębokościach 1, 3, 5, 7 i 9 cm możliwe było wyznaczenie przyrostu temperatury w cza-



Rys. 2. Betonowa płyta (P2) umieszczona w piecu

Fig. 2. Slab P2 mounted in the kiln

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD BETONU

CONCRETE MIX COMPOSITION

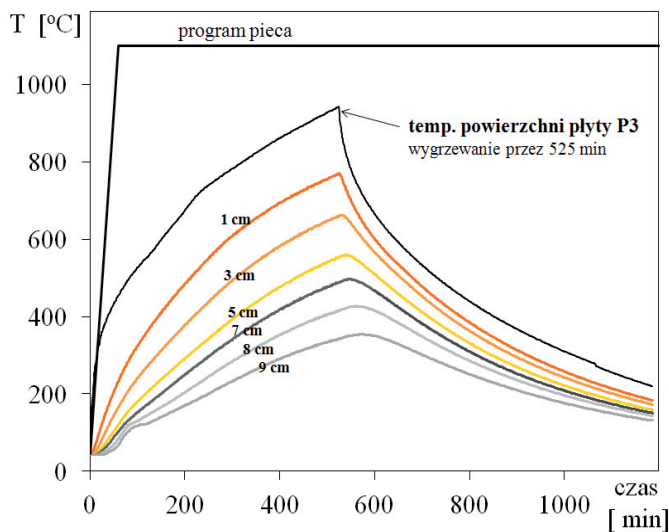
Składnik/Component	Jednostka Unit	BZ 1
cement CEM I 42,5R	kg/m ³	390
Woda / Water	dm ³ /m ³	234
stosunek w/c w/c ratio	–	0,6
piasek/sand, 0-2 mm		825
żwir/gravel Dwudniaki, 2-8 mm	kg/m ³	447
żwir/gravel Dwudniaki, 8-16 mm		409

shown. The temperature gradients calculated for specimens P2 and P3 were 33°C/cm and 43°C/cm respectively.

Six probes were used for each specimen and the average values of d were determined. For the specimen without heat treatment the average penetration was $d_{P1sr} = 27$ mm, and for heated slabs P2 and P3 39 mm and 45 mm were found respectively. The relation that the higher heating temperature, the deeper penetration of the probe into the concrete was observed. The observed increase of penetration depth results from the weakening of the material, because the increase of the temperature leads to progressive dehydration of the C-S-H phase and of portlandite which causes the damage of cement matrix. Moreover, the concrete damage is due to the mismatch of the deformations between the aggregates, which expand, and cement matrix, which undergoes shrinkage. The material, weakened by all these processes presents reduced strength, thus resists less to the probe penetration. It was observed that the variability interval of penetration depth (d) was higher for the concretes heated to higher temperature. This phenomenon was attributed to the increasing strength differences between the aggregate and the weakened cement matrix.

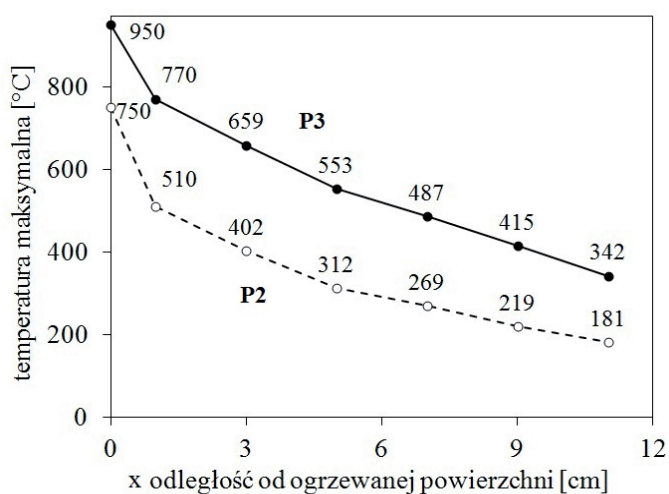
The average penetration depth found in tests (d_{sr}) was a basis for the compressive strength f_c from $f_c(d)$ equation determination (Fig. 5). This gives for the unheated specimen P1 the compressive strength equal 45.7 MPa, nevertheless the strength tested according to PN-EN 12390-4 standard was 43.4 MPa. For the heated specimens according to the aforementioned determination scenario, the observed strength was 26.6 MPa (P2) and 16.9 MPa (P3). At the depth of 1 cm the temperature in specimen P2 reached 510°C and the corresponding loss of strength was 38%, while P3 reached 770°C and lost 62% of its strength, compared to the unheated sample.

The values of f_c found on the basis of d measurements in slab specimens were compared with the curve showing the relative changes of compressive strength with temperature (Fig. 6), found in the earlier work (3) for the ordinary concrete. The results shown in Fig. 6 confirm that for the temperature 510°C and 770°C the relative compressive strength found in this study may be considered to be similar.



Rys. 3. Przyrost temperatury w przekroju ogrzewanej płyty

Fig. 3. Temperature evolution of heated specimen

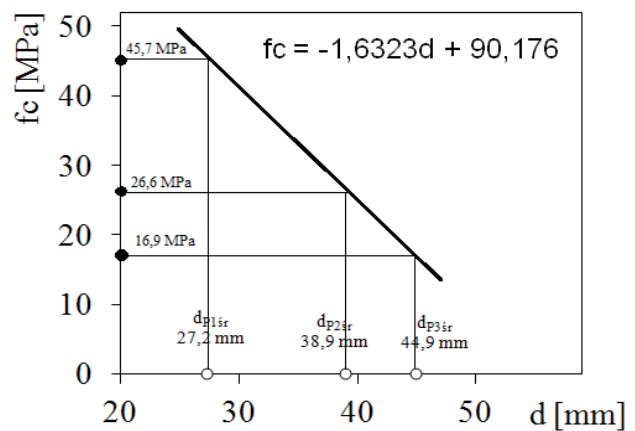


Rys. 4. Maksymalna temperatura w przekroju płyt P2 i P3

Fig. 4. Maximum temperature in the P2 and P3 specimens

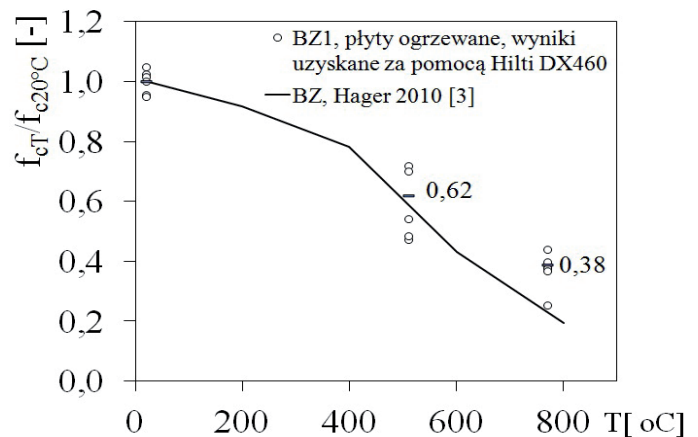
się (rys. 3). Temperaturę maksymalną zmierzoną na głębokościach 1, 3, 5, 7 i 9 cm pokazano na rysunku 4. Podczas ogrzewania płyt P2 i P3 gradient temperatury w elemencie wyniósł odpowiednio 33°/cm i 43°/cm.

W płycie P1 nie poddanej działaniu temperatury oraz w płytach ogrzewanych P2 i P3 zostało wstrzelonych po 6 łączników. Średnia głębokość penetracji łączników wyniosła dla płyty P1 $d_{P1sr} = 27$ mm, a dla płyt ogrzewanych $d_{P2sr} = 39$ mm oraz $d_{P3sr} = 45$ mm. Wraz ze wzrostem temperatury ogrzewanych płyt następował wzrost zagłębienia sondy w materiale. Zależność ta jest zapewne wynikiem uszkodzeń termicznych materiału: postępującej dehydracji zaczynu cementowego i naprężeń spowodowanych brakiem zgodności odkształceń między kurczącym się zaczynem, a zwiększającymi swoją objętość ziarnami kruszywa. Ponadto wystąpiła tendencja do zwiększonego przedziału zmienności zmierzonych głębokości wnikania łącznika (d) w przypadku zniszczonej termicz-



Rys. 5. Określenie f_c betonu na podstawie pomiaru d zależności korelacyjnej $f_c(d)$ (2)

Fig. 5. The method of determining concrete f_c action by measuring d and the use of correlation $f_c(d)$ (2)



Rys. 6. Względne zmiany f_c określone za pomocą DX 460 w porównaniu do wyników uzyskanych dla BZ (3)

Fig. 6. Relative values of f_c determined with DX 460 method and the results obtained for BZ (3)

4. Conclusions

The results of this study confirm that the method of inserting probes in the concrete with the DX 460 tool could be applied to measure the strength of concrete damaged by high temperature. The method allows the quality of a concrete layer to be identified, most affected by the high temperature. The results seem promising for further research and for further development of this testing method. Currently the research project is being carried out to determine $f_c(d)$ relationship for the concretes produced with different aggregates.

The authors wish to acknowledge the support of this study by the Polish Ministry of Higher Education and National Science Centre under Grant N N506 045040.

nie matrycy cementowej. Jest to wynik większego zróżnicowania odporności na udar kruszywa i słabszej matrycy cementowej.

Znaleziona doświadczalnie średnia głębokość penetracji (d_{sr}) posłużyła do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie za pomocą zależności $f_c(d)$ (1). W przypadku płyty, której nie wygrzewano, tak określona wytrzymałość betonu wyniosła 45,7 MPa w porównaniu do zmierzonej normowo wytrzymałości, wynoszącej 43,4 MPa. Płyty poddane obróbce cieplnej, o pierwotnej wytrzymałości 43,4 MPa, wykazały resztkową wytrzymałość na ściskanie (rysunek 5) wynoszącą 26,6 MPa w przypadku płyty P2 i 16,9 MPa dla płyty P3. W przypadku płyty P2, temperatura betonu na głębokości 1 cm wzrosła do 510°C co spowodowało spadek wytrzymałości o 38%. W przypadku płyty P3 temperatura betonu na głębokości 1 cm wzrosła do 770°C, a spadek wytrzymałości wyniósł 62%, w stosunku do materiału nieogrzanego. f_c wyznaczone na podstawie pomiarów d , uzyskanych w poszczególnych próbach, porównano z przebiegiem względnych zmian wytrzymałości betonu zwykłego wykonanego z tego samego kruszywa (3). Porównując znalezione względne zmiany wytrzymałości (rysunek 6) można stwierdzić, że w temperaturach 510°C i 770°C uzyskane wartości są zbliżone do zmierzonych w przypadku betonu tej samej klasy, w porównywanych temperaturach.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zaproponowaną metodę pomiaru wytrzymałości za pomocą osadzaka DX 460 można stosować do oceny uszkodzeń betonu, spowodowanych działaniem temperatury. Jej zastosowanie pozwala na pomiar wytrzymałości warstwy powierzchniowej betonu, w której występują największe uszkodzenia spowodowane wzrostem temperatury. Otrzymane wyniki zachęcają do dalszych badań i wskazują na znaczne możliwości tej metody badawczej. Obecnie prowadzone są badania mające na celu wyznaczenie zależności korelacyjnych $f_c(d)$ dla betonów wytwarzanych z innych niż otoczkowe kruszyw, o zróżnicowanej twardości.

Badania prowadzono dzięki wsparciu finansowemu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach projektu badawczego N N506 045040.

Literatura / References

1. <http://www.ndtjames.com/Windsor-Probe-System-p/z-wp.htm> (26.01.2012)
2. J. Foryś, praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, 2011.
3. I. Hager, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Vol. 276, pp. 307-312, 2011.