

LABORATORYJNA METODA OCENY WPŁYWU WYSOKICH TEMPERATUR NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SYSTEMÓW POŁĄCZEŃ ŻELBETOWYCH

LABORATORY METHOD OF EVALUATION OF INFLUENCE HIGH TEMPERATURES ON MAINTENANCE PARAMETERS OF THE REINFORCED CONCRETE SYSTEMS COMPOUNDS

Artykuł prezentuje wyniki badań wpływu temperatur występujących podczas pożaru na przyczepność stali do betonu oraz oszacowanie tego wpływu na spadek przyczepności pomiędzy stalą zbrojeniową i betonem, w warunkach pożaru oraz po przebytych pożarach. W pracy przedstawiono wyniki badań przyczepności stali gładkiej St3S oraz żebrowanej 18G2 do betonu C16/20 i C40/50 w warunkach popożarowych oraz w trakcie trwania pożaru. We wszystkich przebadanych przypadkach stwierdzono znaczący spadek przyczepności betonu do stali zbrojeniowej na skutek oddziaływania temperatur pożarowych. Przebadano również wpływ wytrzymałości betonu oraz gatunku stali (gładka, żebrowana) na spadek przyczepności w temperaturach pożarowych. Udowodniono, że występują istotne różnice przy badaniu przyczepności po pożarze oraz podczas trwania pożaru, które świadczą o częściowym nawrocie przyczepności. Przedmiot badań jest ściśle związany z bezpieczeństwem konstrukcji budowlanych w czasie trwania pożaru, jak i z oceną ich dalszego użytkowania po przebytych pożarach.

Słowa kluczowe: badanie przyczepności, beton zbrojony, spadek przyczepności w warunkach temperatur pożarowych.

The paper presents results from the research on fire temperature influence on steel-concrete bond and on the bond reduction for both in-fire status and after-fire status. In the paper has been described bond test and results for materials St3S (smooth), 18G2 (ribbed) reinforcement steel and C16/20, C40/50 concrete, both for in the fire and after-fire conditions. A significant reduction of steel-concrete bond was found as the result of fire temperature. Influence of concrete strength and of rebar type (smooth, ribbed) on the bond reduction in fire temperatures was tested. It was proven that significant bond property differences exist between in-fire tests and after-fire tests, which evidence that the bond is regained partially after the fire exposure. The research subject is closely related to the in-fire construction structures safety as well as with the after-fire construction structures usability evaluation.

Keywords: bond test, reinforced concrete, bond reduction in fire temperature.

1. Wstęp

Celem pracy badawczej, której wyniki przedstawiamy w artykule, było określenie charakteru i wielkości spadku przyczepności stali zbrojeniowej do betonu w warunkach termicznych występujących w czasie pożarów normowych opisanych krzywą „temperatura-czas”,

$$T = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

gdzie: T - temperatura [°C], t - czas [min].

oraz krzywą zbliżoną do rozkładu temperatur na powierzchni płyt żelbetowych. Badania przeprowadzono na dwóch grupach próbek w celu porównania otrzymanych wyników.

Badania wykonane w trakcie grzania próbek odpowiadają warunkom występującym w czasie pożaru. W dalszej części artykułu będziemy określać ten rodzaj badań jako badania „na gorąco”. Badania po wstępnej obróbce termicznej w podobnych jak w badaniach „na gorąco” warunkach termicznych przeprowadzono po ostygnięciu próbek w temperaturach pokojowych

1. Introduction

The objective of the research work, the results of which are presented in the article, was to determine the character and size of the bond reduction of reinforced steel – concrete in the thermal conditions occurring during norm fires described by “temperature – time” curve,

$$T = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

where: T - temperature [°C], t - time [mins].

and the curve close to the distribution of temperatures on the surface of reinforced concrete plates. The tests were carried out in the two groups of samples in order to compare the obtained results.

The tests carried out during heating of the samples correspond with the conditions present during the fire. In the foregoing part of the article we will refer to this type of tests as “hot tests”. The tests after introductory thermal treatment in the thermal conditions similar to those of in “hot tests” were performed after cooling down of the samples in ambient temperatures of about 20° C. These tests are further referred to as “cold tests”.

około 20°C. Badania te w dalszej części pracy będą określane jako badania "na zimno".

Celem porównania wyników badań tych dwóch grup próbek było wyjaśnienie, czy wyniki badań spadku przyczepności na skutek oddziaływania wysokich temperatur wykonane w temperaturach pokojowych są miarodajne dla oceny zachowania się konstrukcji żelbetowych w czasie pożaru. Jest to dość ważny czynnik związany z wytrzymałością konstrukcji żelbetowych w czasie pożaru oraz z bezpieczeństwem ratowników. Zauważono, bowiem w czasie akcji ratowniczo-gaśniczych odpadanie otuliny stropów żelbetowych w czasie krótszym niż wskazywałaby na to ich odporność ogniowa.

Należy odnotować interesujące wyniki uzyskane przez badaczy zajmujących się zagadnieniem przyczepności. W badaniach przeprowadzonych przez [5] zastosowano próbki z betonu C50/60. W każdej próbce zatopiono dwa pręty zbrojeniowe ϕ 3mm, przy czym długość osadzenia wynosiła odpowiednio 6 i 8 cm. Następnie został zaprogramowany trójfazowy proces ogrzewania w zakresie temperatur od 240 do 550°C. Autor badań stwierdza, że w miarę wzrostu temperatury ogrzewania próbki przyczepność stali do betonu maleje. Można to już zauważyć dla temperatury 240°C. P. D. Morley, R. Royles [12, 13] wykazali, że dla prętów żebrowanych o średnicy ϕ 16 mm w badaniach popożarowych przyczepność po ogrzaniu próbek w temperaturze 100°C wynosi 80%, a przy temperaturze 200°C ponownie rośnie i wynosi 92% w odniesieniu do przyczepności w temperaturze normalnej (20°C). W badaniach wykonanych przez [8, 9] wykorzystano próbki o wymiarach 100x100x400 mm które zostały wykonane z różnych betonów. Próbki były zbrojone prętami żebrowanymi ϕ 10mm oraz ϕ 20mm a także prętem gładkim ϕ 8mm. Następnie elementy były ogrzewane w zakresie temperatur od 350 do 700°C. Dla wszystkich przebadanych przypadków autorzy stwierdzili istotny spadek przyczepności który w temperaturze 700°C wahał się w zakresie od 60 do 80% w odniesieniu do przyczepności w temperaturze normalnej. W badaniach przedstawionych przez [7, 10, 11] wykazano że spadek siły przyczepności może wynosić nawet 60% przy oddziaływaniu temperatury powyżej 500°C.

Podsumowując aktualny stan wiedzy na podstawie dostępnej literatury dotyczącej przyczepności stali do betonu możemy stwierdzić, że:

- Wszyscy autorzy badań wskazują na spadek przyczepności na skutek oddziaływania wysokich temperatur.
- Stwierdzają, że z powodu zastosowania różnych metod badawczych wyniki badań przyczepności nie dają się w prosty sposób porównać. Jest to również spowodowane rodzajem użytych do badań próbek oraz składem betonu, rodzajem zbrojenia i obróbką jego powierzchni.
- Większość badaczy wskazuje na to, że na spadek przyczepności prętów żebrowanych do betonu na skutek oddziaływania wysokich temperatur wpływa wytrzymałość betonu.

2. Metoda badawcza

Do wykonania próbek wykorzystano beton klasy C16/20 i C40/50 [14]. Wytrzymałość charakterystyczną na ściskanie w 28 dniu określono zgodnie z normą PN-EN 12350-1 [15]. Do zbrojenia zastosowano pręty ze stali St3S gładkiej klasy A-I oraz stali 18G2 żebrowanej klasy A-II o średnicy ϕ 10 mm.

Celem zastosowania do wykonania próbek stali gładkiej oraz żebrowanej było zbadanie wpływu żeber na spadek przy-

The main objective of comparing the results for the two samples was to explain whether the tests results indicating the bond reduction resulting from exposure to high temperatures carried out in ambient temperatures are able to produce relevant outcome sufficient to evaluate the behavior of reinforced concrete constructions during a fire. It is a considerably significant factor connected with the resistance of reinforced constructions in fire conditions as well as with rescuers safety. As it was observed that in the course of rescue and extinguishing actions, cleaving of reinforced concrete floors came off at a shorter time than it is suggested by their fire resistance.

It is necessary to note interesting results obtained by the researchers dealing with the issue of adherence. In the research conducted by [5] the samples of C50/50 concrete were used. In each sample, the two reinforcement bars of 3 mm diameters were drowned, where the length of seating amounted to 6 and 8 cm respectively. Next, the three-stage process of heating was programmed in the temperature range from 240 to 550°C. The author of this research concludes that adherence of steel to concrete decreases with the increase of the temperature of heating. It is easy to notice this process in the temperature as low as 240°C. P.D. Morley, R. Royles [12, 13] showed that in the case of ribbed bars with the diameter of 16 mm in post-fire tests, the bond after heating of the samples in the temperature of 100°C amounts to 80%, and in the temperature of 200°C it again rises and equals 92% in relation to the bond in normal temperature of 20°C. In the research carried out by [8, 9] the samples sized 100x100x400 mm prepared from various types of concrete were used. The samples were reinforced with ribbed bars with diameter of 10 mm and 20 mm as well as with a smooth bar with diameter of 8 mm. Next, the components were heated in the temperature range from 350 to 700°C. In all studied cases, the authors observed a significant increase in adherence, which in the temperature of 700°C oscillated within the range from 60 to 80% in relation to the adherence in normal temperature. In the tests presented by [7, 10, 11] it was revealed that the drop of bond force may be even equal 60% in the temperature exposure of over 500°C.

Summarizing current state of knowledge on the basis of available literature concerning steel-concrete bond it may be stated that:

- All authors point out to the decrease of the bond being the result of exposure to high temperatures.
- The authors state that because of the application of various research methods, the results of bond tests cannot be easily compared. It is also caused by the type of samples used in the tests as well as the composition of concrete, the type of reinforcement and the treatment of its surface.
- Majority of researchers point out to the fact that the reduction of bond of ribbed bars to concrete is affected by concrete resistance.

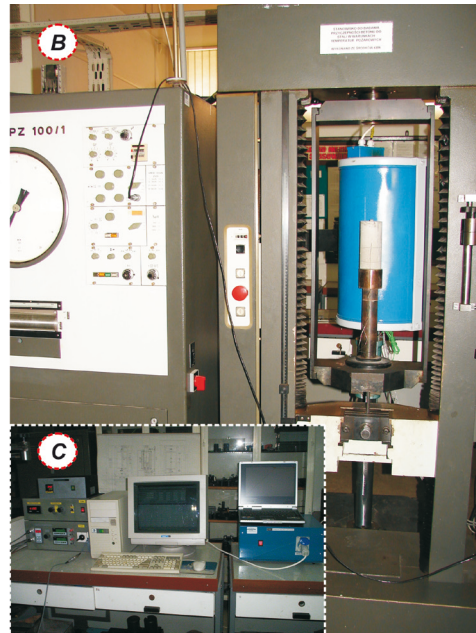
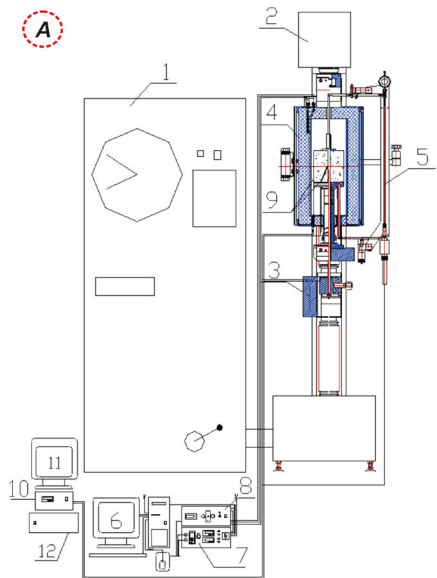
2. Method

Concrete of C16/20 grade and C40/50 grade was used for manufacturing the samples [14]. The characteristic compressive strength on day 28 was determined according to PN-EN 12350-1 [15]. The reinforcement was made of A-I class smooth steel bars St3S and A-II class ribbed steel bars 18G2 both of 10 mm diameter.

The purpose of using both smooth bars and ribbed bars was testing the impact of ribs on the bond reduction under high fire

czepności w temperaturach wysokich pożaru oraz wyjaśnienie mechanizmów tego zjawiska. Próbkę wykonano w pracowni Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Warszawskiej.

Na wyposażenie stanowiska badawczego składa się: piec do wygrzewania próbek wraz ze sterownikiem, maszyna wytrzymałościowa, układ pomiarowy temperatury oraz układ rejestracyjny. Schemat blokowy stanowiska został przedstawiony na rys. 1A.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska do badań „na gorąco”: A) 1 - Szafa sterująca, 2 - Maszyna wytrzymałościowa, 3 - Rama nośna, 4 - Piec, 5 - Układ pomiaru przesunięcia, 6 - Komputer sterujący, 7 - Miernik temperatur, 8 - Sterownik mocą pieca, miernik wydłużeń, 9 - Termopary, 10 - Sterownik pieca typu PSP 1, 11 - Komputer pomiarowy, 12 - Generator mocy; B) Maszyna wytrzymałościowa z piecem; C) Układ sterowania i pomiaru

Fig. 1. The test stand for 'hot experiments': A) 1. Steering box, 2. Testing machine, 3. Carrying frame, 4. Furnace, 5. Transposition measurement system, 6. Computer, 7. Measuring machine, 8. Driver of furnace power, extension meter, 9. Thermoelements, 10. Furnace's driver type PSP 1, 11. Measuring computer, 12. Power oscillator; B) Strength machine with the furnace; C) Control and measurement system

Wykorzystywany w badaniach „na gorąco” piec oznaczony symbolem P1000 został zainstalowany na wysięgniku maszyny wytrzymałościowej FPZ 100/1 (rys.1). Część roboczą pieca tzw. mufłę stanowi komora cylindryczna wykonana ze stali żaroodpornej. W celu ustabilizowania pracy pieca i możliwości jego rozgrzewania do temperatury 1000°C w układzie sterującym został zainstalowany generator mocy. Podstawowym elementem pozwalającym sterować mocą pieca jest Programator PSP 1 wraz z komputerem pomiarowym i oprogramowaniem ThermoPro. Rejestracja mierzonych wartości odbywa się za pomocą komputera klasy PC z karta pomiarową PCL818HG firmy Advantech.

W skład stanowiska do badań „na zimno” zalicza się średnotemperaturowy piec komorowy typu PK 1100/5. Szkielet pieca wykonany jest z rur kwadratowych i nierdzewnej stalowej blachy. Warstwę izolacyjną stanowią kształtki i mata z włókien ceramicznych. Elementy grzejne pieca wykonane zostały z drutu oporowego KANTHAL A1 w kształcie spiral. Układ sterowniczy pieca został wykonany w dwóch szafach połączonych z ramą nośną pieca. Realizują one regulację temperatury oraz transmisję sygnałów termoelektrycznych z trzech czujników pomiarowych. Cały układ pomiarowy połączony jest do komputerem PC wyposażonego w program GENIE. Do bada-

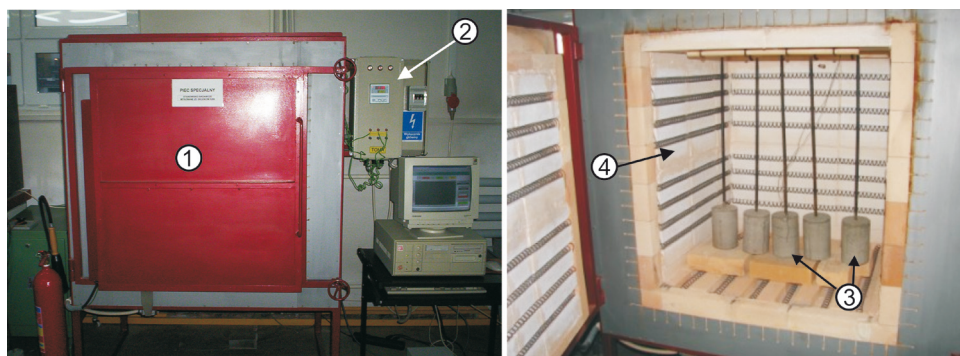
temperatures as well as explaining this phenomenon. Samples were made at The Institute for Construction Structures of the Warsaw Technical University.

The station consists of few elements: furnace, used to heat samples, with a programmer, strength machine, temperature measurement system and recording system. Block scheme of the station has been presented on fig. 1A.

Furnace, used in “hot tests”, marked with a symbol P1000, has been installed on the extension arm of FPZ 100/1 strength machine (fig. 1). Working element of the furnace, so called muffle, is a cylindrical chamber, made of heat resisting steel. In order to stabilize work of the furnace, and to heat the furnace, up to the temperature 1000°C, power generator has been installed in the programming system. The main element, which allow to control the power of the furnace, is PSP 1 Programmer, together with measuring computer, and ThermoPro software. Registration of measured values is done by the means of PC computer which has been equipped with measuring card PCL818HG made by Advantech.

The main part of the station, used to carry out „cold tests”, is an average-temperature chamber furnace type PK 1100/5. Framework of the furnace was make of square pipes and stainless steel metal sheets. Insulation coat was made of moulders and ceramic fiber mate. Heating elements were make of resistance wire KANTHAL A1 with a spiral shape.

Furnace steering system has been made of two boxes, connected with the carrying frame of the furnace. The boxes realize the temperature regulation and transmission of thermo-electrical signals (out of three measurements sensors). The whole system is connected to a PC computer equipped with GENE



Rys. 2. Widok pieca PK 1100/5 wraz z umieszczonymi w środku próbkami do badań: 1 - Piec, 2 - Sterownik temperatury, 3 - Elementy grzejne, 4 - Próbki

Fig. 2. View of the PK 1100/5 furnace with samples placed inside: 1 - Furnance, 2 - Temperature controler, 3 - Heating elements, 4 - Samples

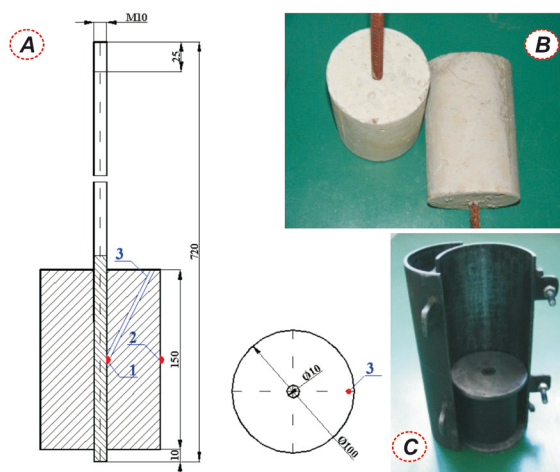
nia przyczepności użyto uniwersalną zrywarkę typu FPZ100/1. Daje ona możliwość wprowadzenia siły rozciągającej i utrzymania jej na stałym poziomie podczas badania. Maszyna posiada cztery zakresy prędkości przesuwu oraz cztery zakresy zadawanych sił rozciągających.

2.1. Badania wykonane „na zimno”

Próbki do badań „na zimno” wykonano w formie walca o średnicy 100 mm i wysokości 150 mm (rys. 3). W środkowej części próbki na styku pręta stalowego i betonu oraz na zewnętrznej powierzchni próbki rozmieszczono termopary. Cienki kanałek do wprowadzania termopary wykonano w próbce w czasie betonowania [1, 2, 3].

Obróbkę termiczną próbek przeprowadzono w piecu z programatorem i sterownikiem temperatur w oparciu o przyjęty rozkład „temperatura - czas”. W badaniach przyjęto rozkład temperatur w płycie betonowej na głębokości 15 mm od powierzchni ogrzewanej podczas normowego pożaru opisanego wzorem (1).

Po osiągnięciu założonej temperatury na przyjętym rozkładzie utrzymywano ją na stałym poziomie przez okres 30 minut (rys. 4). W tym czasie występowało wyrównanie temperatury na powierzchni próbki oraz na styku stali i betonu (rys. 5). Po procesie wygrzewania próbki schładzano przez 24 godziny do osiągnięcia temperatury pokojowej. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej stosując metodę wyciągania pręta z próbki (pull - out bond test). W badaniu wyznaczono maksymalną siłę niezbędną do przesunięcia pręta w betonie.



Rys. 3. Próbki do badań „na zimno”

Fig. 3. Samples in “cold experiments”

program. For the bond test, an universal ripper type FPZ100/1 has been used. It gives possibility to introduce a stretching force and to keep it on the constant level during the test time. The machine has four transposition speed range and four range of distension forces.

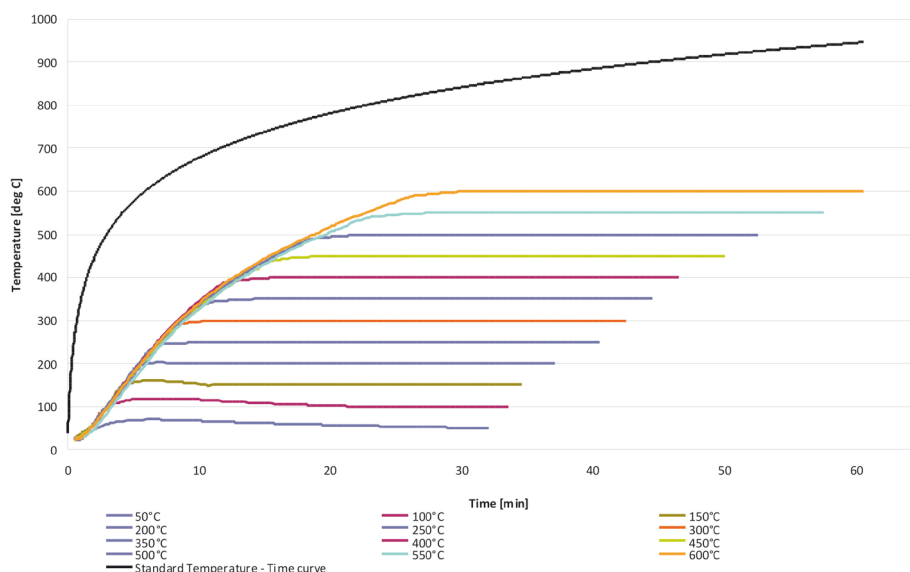
2.1. Cold tests

Cold tests were made as rollers of 100 mm diameter and 150 mm height (fig 3). Thermocouples were located in the sample middle where concrete contacts the rebar as well as on the sample surface. A small-diameter channel for the thermocouple was made in the course of pouring the concrete [1, 2, 3].

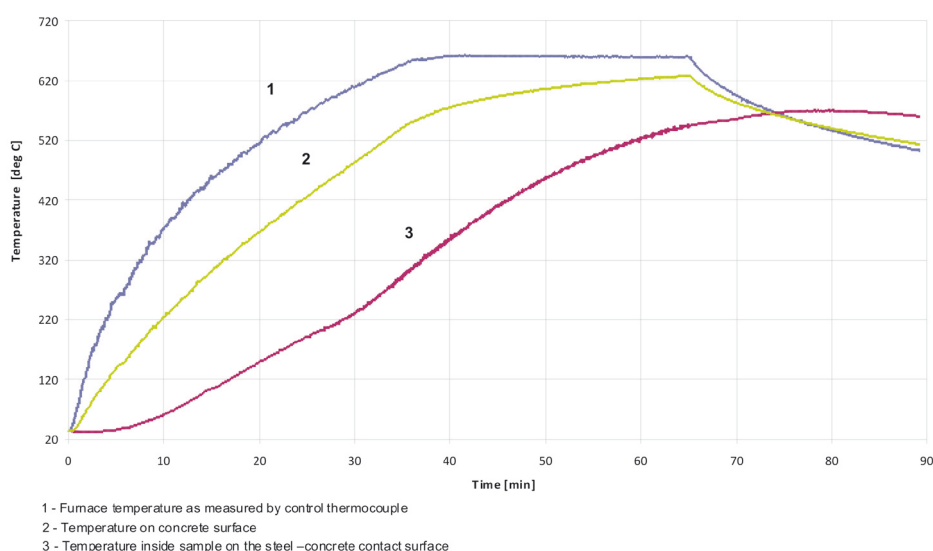
The thermal treatment was carried out in a furnace fitted with a programmer and temperature controller using the temperature - time curve as adopted for tests. The temperature distribution at 15 mm depth from the heated surface inside concrete was assumed as in standard fire according to the formula (1).

After the required temperature had been reached, samples were kept constant at constant temperature for 30 minutes (fig. 4). At the same time, temperatures equalized on the sample surface and on the rebar-concrete contact surface (fig. 5). After the heating, samples were cooled for 24 hours to reach the room temperature. Pull-out bond tests were made using a strength testing machine. The test was used

to determine the maximum force required to move the rebar inside concrete.



Rys. 4. Założony w badaniach „na zimno” rozkład temperatur z oznaczonym czasem osiągnięcia temperatury zadanej
Fig 4. Temperature distribution as assumed for cold tests with reach times for different set temperatures



Rys. 5. Rozkład temperatur uzyskany w testach
Fig 5. Temperature curves obtained in tests

2.2. Badania wykonane w czasie grzania – „na gorąco”

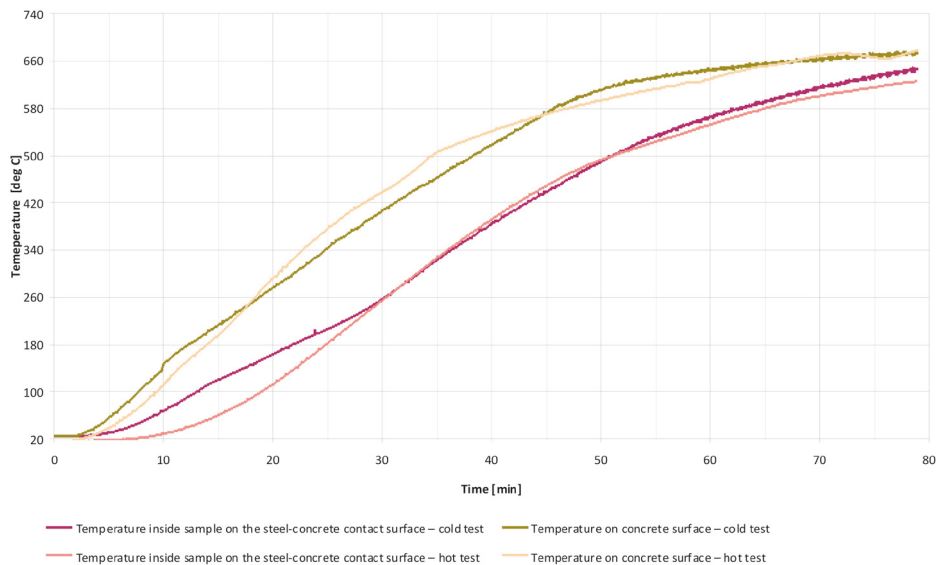
W celu porównania spadku przyczepności w badaniach „na gorąco” oraz „na zimno” w jednakowych warunkach termicznych ustalono, że podstawowym rozkładem temperatur będzie rozkład występujący na styku pręta zbrojeniowego oraz betonu w środkowej części próbki [3, 4, 6].

Dążenie do ujednoczenia rozkładu temperatur na styku stali i betonu doprowadziło do zmniejszenia średnicy próbek w badaniach „na gorąco”. Średnicę zmniejszono o 30 mm zachowując wysokość próbki. Dzięki temu uzyskano bardzo zbliżone rozkłady temperatur uwidocznione na rys.6.

2.2. Hot test

It was decided, that the temperature distribution on the steel-concrete contact surface in the sample middle will be the basic temperature distribution for comparing the bond reduction in hot tests and in cold tests in the same thermal conditions [3, 4, 6].

The trend to equalize the temperature distribution on the steel-concrete contact surface has led to smaller sample diameters for hot tests. The diameter was reduced by 30 mm, the height remained unmodified. This modification allows to obtain temperature distribution curves being very similar to one another as seen in fig. 6.



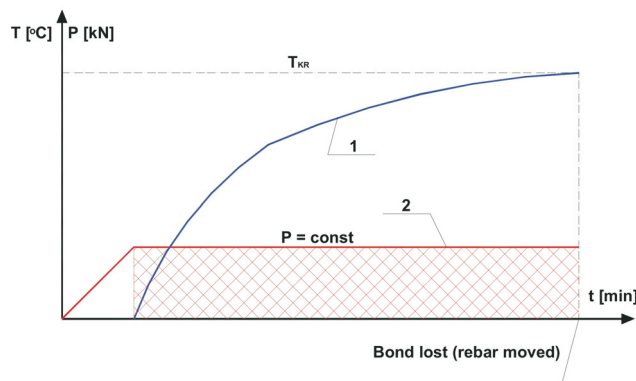
Rys. 6. Porównanie rzeczywistych rozkładów temperatury w obydwu rodzajach wykonanych badań
 Fig. 6. Actual temperature distributions compared for both test types

Badania przyczepności „na gorąco” wykonano zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 7. W czasie badania próbki były obciążone stałą siłą utrzymywaną w czasie próby. Jednocześnie ogrzewano próbkę zgodnie z przyjętym rozkładem „temperatura - czas” mierząc temperaturę na zewnętrznej powierzchni oraz na styku pręta i betonu.

Celem badania było ustalenie temperatury krytycznej T_{kr} , przy której następowała utrata siły przyczepności odpowiadająca stałej sile obciążającej próbkę. Przykładowy przebieg badania przedstawiono na rys. 8. Za moment utraty przyczepności uznawano przesunięcie pręta w stosunku do betonu, które powodowało nagły spadek siły.

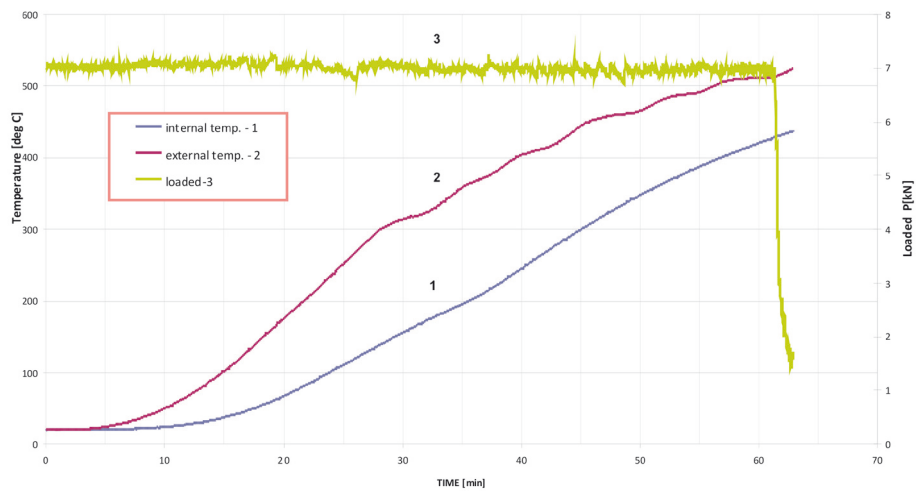
The hot tests were made according to the curve as in fig. 7. Samples were loaded with a constant force over the test time. At the same time, samples were heated according to the temperature - time curve as adopted with the temperature being measured on the sample surface and on the steel-concrete contact surface.

The test objective was to determine the critical temperature, T_{kr} , where the bond force reduction is equal to the sample load. The test example is seen in fig. 8. The bond loss event was defined as the rebar movement with relation to the concrete, which results in a sudden force reduction.



Rys. 7. Schemat przebiegu badania „na gorąco”. Określenia temperatury krytycznej (spadku przyczepności) gdzie: 1 – Rozkład temperatury w miejscu styku betonu z prętem stalowym, 2 – Wykres siły przyłożonej do próbki (wyciągającej pręt z betonu)

Fig. 7. Hot test diagram. Determination of critical temperature for (bond reduction) whereas: 1 – Temperature on the steel-concrete contact surface, 2 – Force applied to the sample (pulling the rebar from the sample)



Rys. 8. Przykładowy przebieg badania „na gorąco”: 1 – Temperatura na styku pręta z betonem, 2 – Temperatura na powierzchni próbki betonowej, 3 – Obciążenie

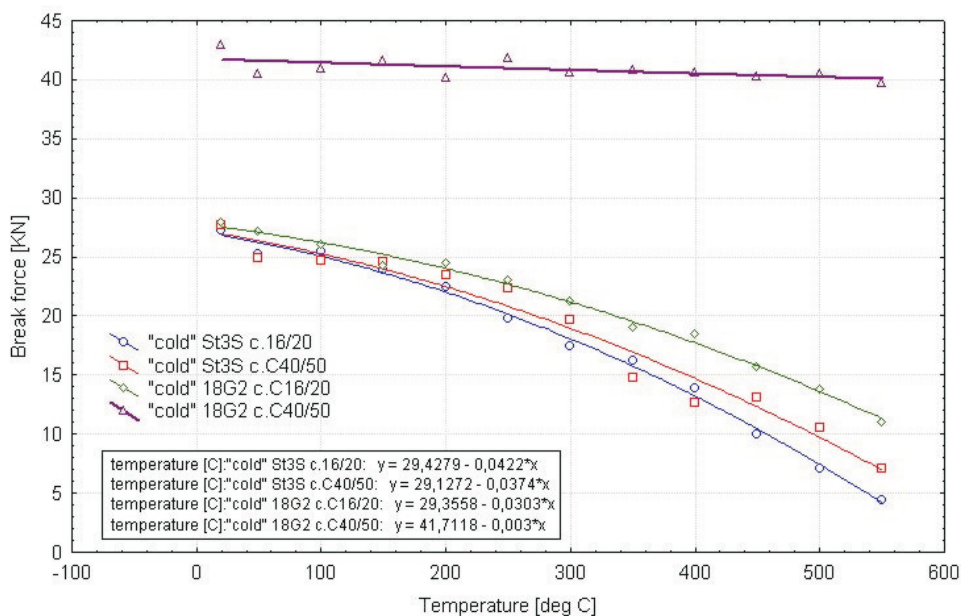
Fig. 8. Hot test example: 1 – Temperature on the steel-concrete contact surface, 2 – Temperature on the sample surface, 3 – Loaded

3. Wyniki badań

Wyniki badań przyczepności „na zimno” oraz „na gorąco” opracowano w postaci wykresów w celu pokazania zależności temperatury krytycznej do utraty przyczepności dla przyjętych w badaniu zmiennych stałych (klasa betonu, gatunek stali). Na rys. 9 przedstawiono wyniki badań uzyskane w teście „na zimno”, natomiast na rys. 10 wyniki badań uzyskane w teście „na gorąco”.

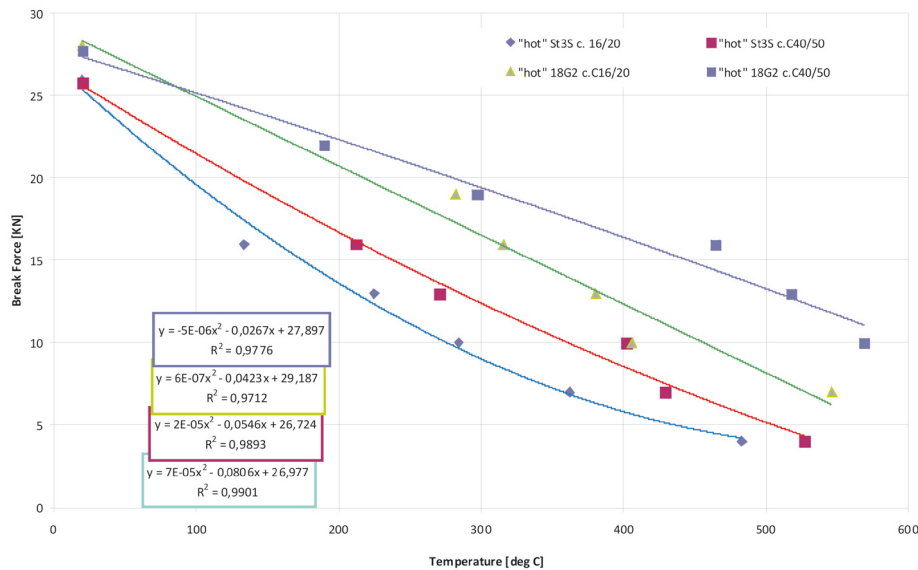
3. The results

The bond “hot” and “cold” tests results were analyzed in the form of charts in order to show the relation between critical temperature and the loss of bond for accepted constant variables (concrete class, type of steel). Illustration 9 shows the tests results obtained in the cold test while illustration 10 presents the results observed in hot test.



Rys. 9. Spadek przyczepności stali do betonu w zależności od temperatury i system żelbetowy (test „na zimno”)

Fig. 9. Decrease of steel-concrete bond in relation to temperature and reinforced concrete system (“cold test”)



Rys. 10. Spadek przyczepności stali do betonu w zależności od temperatury i system żelbetowego (test „na gorąco”)

Fig. 10. Decrease of steel-concrete bond in relation to temperature and reinforced concrete system (“hot test”)

W tabeli 1 przedstawiono parametry statystyczne wyników wytrzymałości dla wszystkich systemów żelbetowych w kolejnych przedziałach temperatury.

Uzyskane wyniki badań zostały poddane analizie. Dokonano statystycznej oceny różnic między średnimi rozkładem *t-Studenta*. Celem analizy było wykazanie różnic w dynamice spadku przyczepności resztkowej stali do betonu.

Podawany w wynikach testu *t* poziom *p* reprezentuje prawdopodobieństwo błędu związanego z przyjęciem hipotezy o istnieniu różnic między średnimi. Inaczej jest to prawdopodobieństwo popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu hipotezy o braku różnicy między średnimi w dwóch badanych kategoriach obserwacji należących do populacji generalnej (reprezentowanych przez badane grupy) w sytuacji, gdy stan faktyczny w populacji jest taki, iż hipoteza ta jest prawdziwa [16]. Założono, że wartość $p \leq 0,05$ wskazuje na istotną różnicę między średnimi, przy większych wartościach istotności *p* hipotezę należy odrzucić.

Znak funkcji *t*, podobnie jak w przypadku zmiennej standaryzowanej wskazuje na ujemne lub dodatnie odchylenie od średniej [18].

W identyfikowanych grupach użyto kodów grupujących charakteryzujących system żelbetowy poprzez gatunek stali i betonu.

W pierwszym teście badano różnice między systemami badanymi „na zimno” dla różnych poziomów obciążenia termicznego. Dla tej populacji użyto testu *t* dla zmiennych zależnych. W tabeli 2 przedstawiono wyniki tego testu.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki oceny różnic między średnimi zagregowanych wyników badanych systemów żelbetowych w teście „na zimno”.

W celu porównania wyników uzyskanych w testach „na zimno” i „na gorąco” użyto testu *t-Studenta* dla prób niezależnych. Jest to spowodowane wykorzystaniem różnych próbek w odmiennych interwałach obciążenia [17].

Test *t-Studenta* dla dwóch niezależnych próbek, jest wykorzystywany do testowania hipotezy odnoszącej się do oceny istot-

Table 1 shows statistical parameters of the test results of all reinforced concrete systems in subsequent temperature ranges.

The obtained test results were analyzed. Statistical evaluation of differences between mean values was made by means of *t-Student* test. The aim of the analysis was to show differences in dynamics of decrease of residual bond between steel and concrete.

Presented in test *t* results level *p*, represents probability of an error, relevant to the assumption of hypothesis about existence of differences between the averages. In another way, it is a probability of making a mistake, based upon rejection of hypothesis about lack of differences between the averages, in both examined categories of observation, which belong to general population (represented by examined groups) in situation, where the actual state in the population cause that the hypothesis is true [16]. It has been assumed that the value of ($p \leq 0,05$) indicates substantial difference between the averages. Hypothesis has to be rejected if the value of *p* importance is greater.

Mark of *t* function, similar like in case of standardize variable, indicates negative and positive deviation from the average [18].

Grouping codes characterizing reinforced concrete system through a type of steel and concrete were used in identified groups.

In the first test the differences between cold tested systems were studied for various levels of thermal load. In this population *t* test was used for dependent variables. Table 2 presents the results of this test.

Table 3 presents the results of evaluation of differences between mean values of the collected results for the studied reinforced concrete systems in “cold test”.

In order to compare differences, between average bond values of steel and concrete, obtained in cold and hot tests, in the second test a *t-Student* test for independent trials was used. It was caused by a usage of different samples in other load intervals [17]. The *t* test for two independent samples, which is employed in a hypothesis testing situation involving two inde-

Tab. 1. Parametry wyników badań

Tab. 1. Parameters of test results

System	Valid N	Mean BF[KN]	Minimum BF[KN]	Maximum BF[KN]	Std.Dev.	Temperature [deg C]
St3S concrete C16/20	5	27,26	26,90	28,30	0,59	20
St3S concrete C16/20	5	25,24	23,40	27,00	1,40	50
St3S concrete C16/20	5	25,46	23,60	27,90	1,67	100
St3S concrete C16/20	5	23,84	22,50	24,60	0,94	150
St3S concrete C16/20	5	22,42	20,00	26,00	2,38	200
St3S concrete C16/20	5	19,78	16,00	24,00	3,09	250
St3S concrete C16/20	5	17,40	14,00	20,20	2,66	300
St3S concrete C16/20	5	16,16	13,60	18,40	2,20	350
St3S concrete C16/20	5	13,82	10,30	16,20	2,21	400
St3S concrete C16/20	5	9,98	5,40	15,20	4,10	450
St3S concrete C16/20	5	9,98	5,40	15,20	4,10	500
St3S concrete C16/20	5	4,46	2,60	6,60	1,54	550
St3S concrete C40/50	5	27,70	26,00	29,60	1,40	20
St3S concrete C40/50	5	24,86	22,80	26,60	1,36	50
St3S concrete C40/50	5	24,72	19,80	26,60	2,85	100
St3S concrete C40/50	5	24,58	22,60	26,00	1,35	150
St3S concrete C40/50	5	23,42	21,90	26,40	1,77	200
St3S concrete C40/50	5	22,36	20,60	24,40	1,47	250
St3S concrete C40/50	5	19,70	15,40	23,40	2,91	300
St3S concrete C40/50	5	14,76	12,80	16,60	1,41	350
St3S concrete C40/50	5	12,60	9,80	15,20	2,38	400
St3S concrete C40/50	5	13,04	10,80	14,20	1,37	450
St3S concrete C40/50	5	10,56	9,00	12,80	1,45	500
St3S concrete C40/50	5	7,06	6,60	7,60	0,38	550
18G2 concrete C16/20	5	27,90	26,80	29,00	0,84	20
18G2 concrete C16/20	5	27,16	26,70	27,60	0,36	50
18G2 concrete C16/20	5	25,96	25,40	26,30	0,38	100
18G2 concrete C16/20	5	24,22	22,50	25,60	1,34	150
18G2 concrete C16/20	5	24,44	22,40	25,90	1,32	200
18G2 concrete C16/20	5	22,96	22,00	24,00	0,77	250
18G2 concrete C16/20	5	21,24	19,90	22,00	0,92	300
18G2 concrete C16/20	5	19,02	18,10	20,30	0,89	350
18G2 concrete C16/20	5	18,46	16,90	20,40	1,44	400
18G2 concrete C16/20	5	15,60	13,40	17,30	1,45	450
18G2 concrete C16/20	5	13,80	12,20	15,40	1,23	500
18G2 concrete C16/20	5	10,98	9,00	12,50	1,52	550
18G2 concrete C40/50	5	42,90	41,00	45,00	1,63	20
18G2 concrete C40/50	5	40,52	38,50	43,50	2,04	50
18G2 concrete C40/50	5	40,90	38,50	44,50	2,25	100
18G2 concrete C40/50	5	41,62	40,50	42,50	0,89	150
18G2 concrete C40/50	5	40,18	39,00	41,10	0,77	200
18G2 concrete C40/50	5	41,78	39,60	44,10	1,86	250
18G2 concrete C40/50	5	40,58	37,50	43,50	2,41	300
18G2 concrete C40/50	5	40,84	39,50	42,50	1,34	350
18G2 concrete C40/50	5	40,62	38,50	43,00	1,76	400
18G2 concrete C40/50	5	40,32	38,60	42,20	1,40	450
18G2 concrete C40/50	5	40,48	38,50	43,10	1,98	500
18G2 concrete C40/50	5	39,70	38,50	41,50	1,30	550

ności różnic między niezależnymi zmiennymi. Test ten bazuje na rozkładzie t . Służy on do porównywania średnich rozkładów wyników pochodzących z dwóch różnych populacji [17]. Wyniki testu przedstawiono w tabeli 4.

pendent samples, is one of a number of inferential statistical test, that are based on the t distribution. In conducting t test for two independent samples, the two samples means are employed to estimate the values of the means of the populations from which the samples are derived [17]. Table 4 presents results of the test.

Tab. 2. Porównanie wartości średnich przyczepności stali do betonu w kolejnych poziomach obciążenia (test „na zimno”) / Tab. 2. Comparison of mean values of steel concrete bond in subsequent levels of load (“cold test”)

Temperature [C]	system 1 vs. system 2												df
	St3S c.16/20 vs. 18G2 c.C16/20		St3S c.16/20 vs. St3S c. C40/50		St3S c.16/20 vs. 18G2 c.C40/50		18G2 c.C16/20 vs. 18G2 c.C40/50		St3S c.C40/50 vs. 18G2 c.C40/50		18G2 c. C16/20 vs. St3S c.C40/50		
	t-value	p	t-value	p	t-value	p	t-value	p	t-value	p	t-value	p	
20	-1,39	0,2	-0,65	0,53	-20,16	0	-18,28	0	-15,84	0	0,27	0,79	8
50	-2,98	0,02	0,44	0,67	-13,81	0	-14,4	0	-14,25	0	3,65	0,01	8
100	-0,65	0,53	0,5	0,63	-12,34	0	-14,67	0	-9,97	0	0,97	0,36	8
150	-0,52	0,62	-1	0,34	-30,67	0	-24,2	0	-23,5	0	-0,42	0,68	8
200	-1,66	0,14	-0,75	0,47	-15,85	0	-23,06	0	-19,38	0	1,03	0,33	8
250	-2,24	0,06	-1,69	0,13	-13,65	0	-20,9	0	-18,29	0	0,81	0,44	8
300	-3,05	0,02	-1,3	0,23	-14,43	0	-16,76	0	-12,36	0	1,13	0,29	8
350	-2,7	0,03	1,2	0,26	-21,46	0	-30,38	0	-29,99	0	5,72	0	8
400	-3,94	0	0,84	0,42	-21,24	0	-21,79	0	-21,17	0	4,71	0	8
450	-2,89	0,02	-1,58	0,15	-15,67	0	-27,43	0	-31,23	0	2,87	0,02	8
500	-4,21	0	-2,12	0,07	-19,26	0	-25,54	0	-27,21	0	3,8	0,01	8
550	-6,74	0	-3,66	0,01	-39,02	0	-32,1	0	-53,69	0	5,6	0	8

Tab. 3. Porównanie wartości średnich przyczepności stali do betonu badanych systemów żelbetowych („na zimno”) / Tab. 3. Comparison of mean values of steel-concrete bond in the studied reinforced concrete systems (“cold test”)

System	Mean	Std.Dv.	t-value	df	p
„cold” St3S c.16/20	17,745	7,610348			
„cold” St3S c.C40/50	18,78	6,828257	-2,0722	11	0,06
„cold” St3S c.16/20	17,745	7,610348			
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812	-4,9464	11	0,00
„cold” St3S c.16/20	17,745	7,610348			
„cold” 18G2 c.C40/50	40,87	0,857162	-11,2802	11	0
„cold” St3S c.C40/50	18,78	6,828257			
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812	-4,1145	11	0,01
„cold” St3S c.C40/50	18,78	6,828257			
„cold” 18G2 c.C40/50	40,87	0,857162	-12,1423	11	0
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812			
„cold” 18G2 c.C40/50	40,87	0,857162	-13,8519	11	0
„cold” 18G2 c.C40/50	40,87	0,857162			
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812	13,8519	11	0

Tab. 4. Ocena różnic między średnimi uzyskanymi w próbach „na zimno” i „na gorąco” / Tab. 4. Independent variables t Test (“hot” vs. “cold”)

No	system 1 vs. system 2	t-value	p	df
1.	„hot” St3S c. 16/20 vs. „cold” St3S c.16/20	-2,08989	0,05	15
2.	„hot” St3S c.C40/50 vs. „cold” St3S c.C40/50	-2,14672	0,05	16
3.	„hot” 18G2 c.C16/20 vs. „cold” 18G2 c.C16/20	-2,83928	0,01	15
4.	„hot” 18G2 c.C40/50 vs. „cold” 18G2 c.C40/50	-6,42555	0,00	20

4. Wnioski

Na podstawie wyników badań należy stwierdzić, że wstępujące w czasie pożarów wysokie temperatury powodują znaczny spadek przyczepności pomiędzy prętami zbrojenia a betonem. Z analizy wyników badań można wnioskować, że spadek przyczepności pręta stalowego do betonu w badaniach „na zimno” (badania stanu przyczepności po przebytych po-

4. Conclusions

It should be stated based on test results that high fire temperatures are the reason for a significant reduction of steel-concrete bond. A conclusion can be drawn from the result analysis that: the bond reduction in cold tests (the bond tested after fire) and in hot tests (the bond tested in fire) are different over the entire temperature range up to 800°C. The bond reduction in

zarze) oraz „na gorąco” (w czasie pożaru) jest zróżnicowany w całym zakresie temperatur (do 800°C) przyjętym w badaniach. Spadek przyczepności „na gorąco” jest zawsze większy niż w badaniach „na zimno”. Świadczy to o częściowym nawrocie przyczepności po ostygnięciu próbki prawdopodobnie w części spowodowanej tarcieniem.

Bardzo istotny wpływ na przyczepność stali do betonu nie tylko w temperaturze normalnej, co jest faktem powszechnie znanym, ale również w temperaturach pożarowych ma rodzaj stali (żebrowana, gładka), co jest związane ze zróżnicowaniem powierzchni styku stali i betonu oraz sposobem przekazywania obciążeń z pręta na beton.

Wpływ wytrzymałości betonu na przyczepność stali do betonu w temperaturach pożarowych jest zróżnicowany, związany z rodzajem stali: w przypadku przyczepności stali gładkiej do betonu ma niewielki wpływ, natomiast w przypadku stali żebrowanej ma istotne znaczenie. Na podstawie badań stwierdzono, że w przypadku stali gładkiej po zniszczeniu przyczepności pręt w temperaturach podwyższonych i wysokich „wyslizguje” się z betonu nie uszkadzając w istotny sposób otaczającego betonu. Natomiast w przypadku stali żebrowanej przed przesunięciem pręta występuje zniszczenie betonu w otoczeniu żeber oraz rysy w betonie poprzeczne lub ukośne do pręta.

W przypadku przyczepności prętów żebrowanych betonu o wyższej wytrzymałości niebezpieczne parametry przyczepności w wyższych temperaturach. W badaniach popożarowych spadek przyczepności stali żebrowanej 18G2 do betonu klasy C40/50 może być praktycznie niezauważalny w zakresie temperatur nie przekraczających 500°C.

5. Podsumowanie

W badaniach popożarowych, analizując przydatność konstrukcji żelbetowych do dalszej pracy należy brać pod uwagę spadek przyczepności pomiędzy stalą a betonem.

Przy określaniu temperatury krytycznej wpływającej na utratę odporności ogniowej elementów żelbetowych, w szczególności stropów żelbetowych, należy brać pod uwagę możliwość odpadania otulin betonowych na skutek utraty przyczepności oraz znaczny wzrost temperatury nieosłoniętego zbrojenia.

Wyniki badań spadku przyczepności w temperaturze pokojowej uzyskane na ochłodzonych po obciążeniach termicznych próbkach nie są miarodajne do oceny spadku przyczepności w czasie pożaru, co wykazano w analizie statystycznej zamieszczonej w artykule.

6. References

1. Bednarek Z, Ogrodnik P. Testing steel-concrete bond In fire conditions. IX International Conference. Modern Building Materials Structures and Techniques. Vilnius, Lithuania 2007.
2. Bednarek Z, Ogrodnik P. Study of the influence of fire temperatures on the fall of the bond between steel and concrete. IV International conference. Safety of Fire Building, Częstochowa 2002.
3. Bednarek Z, Ogrodnik P. Study of the influence of thermal conditions during fire on the bond between steel and concrete. Contemporary problems of fire safety in buildings and environmental engineering, Koszalin – Łazy 2004.
4. Bednarek Z, Ogrodnik P. Study of the influence of high temperatures of the bond between ribbed steel and concrete C40/50. XIX Conference scientifically – technical. Concrete and Prefabrication, Jadwisin 2004.
5. Chih-Hung C, Cho-Liang T. Time – temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure. Cement and Concrete Research 2003; 33: 1651-1654.
6. Czernski Z. Mechanical action of the bond in prestressed reinforced concrete. Engineering and Building 1987; 7.

the hot status is in all cases bigger than in the cold status. This fact is the evidence of a partial return of the bond after the sample was cooled; friction is probably in part responsible for that phenomenon.

The rebar type (smooth or ribbed) has a very significant impact on steel-concrete bond features not only at normal temperatures (room temperatures) – this being a well-known fact, but also at fire temperatures. This is related to the different types of contact surfaces and to the load transfer method from rebars to the concrete.

The concrete strength impact on the steel-concrete bond at fire temperatures is differentiated and related to the steel surface: the impact is small for smooth rebars, whereas it's significant for ribbed rebars. It was determined for smooth rebars based on tests that: after the bond was reduced to zero at higher and high temperatures, rebars “slip out” from concrete without any significant damage to the concrete. For ribbed rebars: before the rebar could be moved, concrete is destroyed around the ribs, and lateral or slant cracks (in relation to the rebar centreline) are created.

For ribbed rebars: high-strength concrete grades tend to increase the bond reduction temperature threshold. In cold tests, the bond reduction for 18G2 ribbed steel – C40/50 concrete is in practice insignificant over the temperature range up to 500°C.

5. Summary

In cold tests, while analysing the applicability of RC structures for further use, a reduction of rebar – concrete bond strength must be considered.

While determining the critical temperature that impacts the fire resistance of RC components (in particular: RC ceilings), the possibility of concrete chipping due to the bond reduction as well as a significantly increased temperature of uncovered rebars should be considered.

The bond reduction tests made at room temperature on samples cooled after fire treatment are not reliable enough to evaluate the bond reduction as caused by fire.

7. Fellingner J H H., Jołop A, Uijl D. Bond of pretensioned strands in fire exposed concrete. Bond in concrete – from research to standards. Budapest, 2002.
8. Haddad R H, Al-Saleh R J, Al-Akhras N M. Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete. Fire Safety Journal 2008; 43: 334-343.
9. Haddad R H, Shannis L. Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel, Construction and Building Materials 2004; 18: 425-435.
10. Jianzhuang X, König G. Study on concrete at high temperature in China—an overview. Fire Safety Journal 2004; 39: 89-103.
11. Moetaz M, El-Hawary A, Sameer A H. Bond shear modulus of reinforced concrete at high temperatures. Engineering Fracture Mechanics 1996; 55: 991-999.
12. Morley P D, Royles R. The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete. Fire Safety Journal 1980; 2: 243-255.
13. Morley P D, Royles R. Response of the bond in reinforcing at normal and high temperature. Magazine of Concrete Research 1983; 123: 67-74.
14. PN-EN 206-1:2003. Concrete. Part I: Requirements, properties production and compatibility (Beton cz. 1: wymagania, właściwości, produkcja i zgodność).
15. PN-EN 12350-1: Study of concrete mix. Part 1. Drawing of samples (Badanie mieszanki betonowej. Część 1. Pobieranie próbek).
16. Hill T, Lewicki P. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry and data mining. StatSoft, 2006.
17. Sheskin D. Parametric and nonparametric statistical procedures. Boca Raton: CRC Press, 1997.
18. Volk W. Statystyka stosowana dla inżynierów. Warszawa: WNT, 1973.

Dr hab. inż. Zoja BEDNAREK, prof. SGSP

Dr inż. Paweł OGRODNIK

Dr inż. Daniel PIENIAK

Szkoła Główna Służby Pożarniczej
w Warszawie

Katedra Techniki Pożarniczej

Zakład Mechaniki Stosowanej

ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa

e-mail: mechanika@sgsp.edu.pl
