

st. bryg. w stanie spocz. dr hab. inż. Zoja BEDNAREK
kpt. dr inż. Paweł OGRODNIK
mf. bryg. dr inż. Renata KAMOČKA-BRONISZ
Zakład Mechaniki Stosowanej, SGSP

BADANIE WPŁYWU SZOKOWEGO CHŁODZENIA NA PRZYCZEPNOŚĆ STALI ŻEBROWANEJ DO BETONU C30/37

W artykule zostały przedstawione wyniki badań doświadczalnych wpływu szokowego ochładzania po pożarze na przyczepność stali zbrojeniowej żebrowanej gatunku B500SP oraz BSt500S do betonu C30/37. Badania realizowano w ramach projektu: „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” POIG.01.01.02-10-106/09-01.

The article presents the results of experimental studies of shock cooling effect on the bond of the reinforcing steel ribbed BSt500S and B500SP to concrete C30/37. Research was carried out under the project: "Innovative measures and effective methods of improving the safety and durability of buildings and transport infrastructure in a sustainable development strategy" POIG.01.01.02-10-106/09-01.

Słowa kluczowe: przyczepność, temperatura pożarowa, szokowe chłodzenie, konstrukcje żelbetowe

Key words: bond, fire temperature, shock cooling, concrete constructions

1. Wstęp

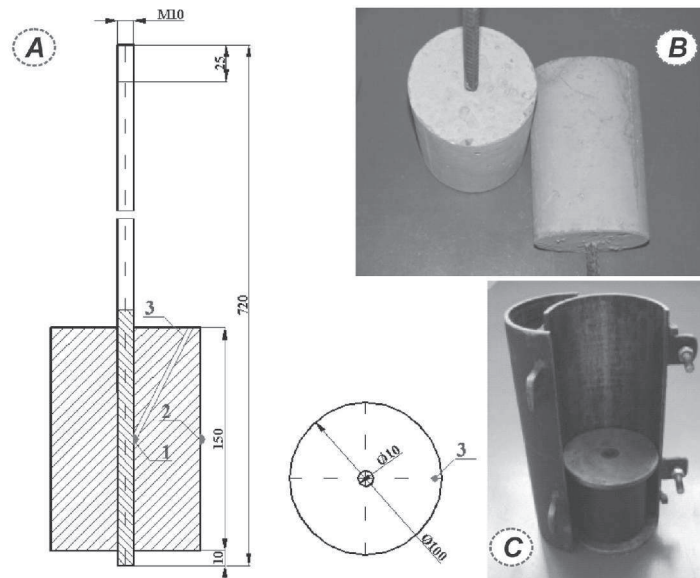
Problemy związane z warunkami współpracy betonu i stali w konstrukcjach żelbetowych były badane i analizowane wielokrotnie. Samo zjawisko przyczepności rozumiane jest jako zespół czynników związanych z przeciwstawianiem się wyciągnięciu lub wciskaniu pręta z betonu [1–6].

Na przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu ma wpływ wiele czynników fizycznych, chemicznych i mechanicznych, w tym tarcie działające na styku obu materiałów [6, 7]. Na przyczepność wpływa również wiele czynników technologicznych. W przypadku prętów żebrowanych bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na siłę tarcia jest zazębienie mechaniczne – tym większe, im większa jest chropowatość powierzchni pręta [5, 8]. Tematem badań wykonywanych w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej jest wpływ warunków termicznych występujących w czasie pożaru na spadek przyczepności stali do betonu. Badany był spadek przyczepności w czasie pożaru, jak również po przebytych pożarze. Wyniki badań przedstawione w artykule dotyczą spadku przyczepności po przebytych pożarze w różnych warunkach stygnięcia konstrukcji. Podstawowym celem badań wykonanych w ramach projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” było zbadanie wpływu szokowego chłodzenia, które często występuje w czasie akcji gaśniczych, na przyczepność stali żebrowanej klasy „B” oraz „C” do betonu C30/37 oraz przeanalizowanie, czy chłodzenie w ten sposób konstrukcji żelbetowych nie powoduje znacznego spadku przyczepności. W tym celu przeanalizowano wyniki badań próbek chłodzonych w sposób opisywany w artykule z próbkami chłodzonymi stopniowo w sposób naturalny.

2. Metodyka wykonania badań

2.1. Wykonanie próbek do badań

Próbki do badań zostały wykonane w formie walca o średnicy 100 mm i wysokości 150 mm w specjalnie do tego celu przygotowanych formach. Po zabetonowaniu próbki wraz z formami umieszczano w komorze kontrolowanej wilgotności 95% i temperaturze 18°C.



Rys. 1A. Przekrój próbki do badań: 1– termopara wewnętrzna, 2 – termopara wewnętrzna, 3 – kanał do wprowadzenia termopary. **B.** Fotografia próbek. **C.** Forma do wykonania próbek.

Źródło: opracowanie własne.

Na przedstawionym rysunku próbki (rys. 1A) w punktach 1 i 2 oznaczono miejsce umieszczenia termoelementów pomiarowych (termopar). Kanał 3 do wprowadzenia termopary został wykonany w czasie betonowania.

Po upływie 48 godzin próbki rozformowywano, a następnie ponownie umieszczano w komorze klimatycznej. Po upływie 28 dni próbki wyjmowano i do czasu przeprowadzenia badań przechowywano w laboratorium w temperaturze normalnej przez trzy miesiące.

Do wykonania próbek zostały użyte dwa różne gatunki stali zbrojeniowej B500SP oraz BSt500S różniące się kształtem powierzchni żebrowanej, co zostało przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Wzór użebrowania stali zbrojeniowej użytej do wykonania próbek
a) Stal B500SP, b) Stal BSt500S

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z Eurokodem 2 [10] stal zbrojeniową gatunku BSt500S można zakwalifikować do klasy „B”, natomiast stal gatunku B500SP – do klasy „C”. Porównanie wymagań normowych dla stali użytych do wykonania próbek podano w tabeli 1.

Tabela 1. Wymagania normowe stali użytej do wykonania próbek

Parametr \ Gatunek stali	BSt500S	B500SP
f_{yk} [MPa]	500	500
f_{yd} [MPa]	420	420
f_{tk} [MPa]	550	575
ε_{uk} [%]	5%	8%
Stosunek f_{tk}/f_{yk} [-]	>1,08	$1,15 \leq f_{tk}/f_{yk} \leq 1,35$
Obciążenia cykliczne	2×10^6 cykli	2×10^6 cykli
Spajalność	Spajalna	Spajalna

Źródło: opracowanie własne.

Przed betonowaniem pręty zbrojeniowe były poddane procesowi oksydowania. Do zabetonowania próbek użyto betonu zwykłego C30/37 na cemencie portlandzkim. Skład mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 2.

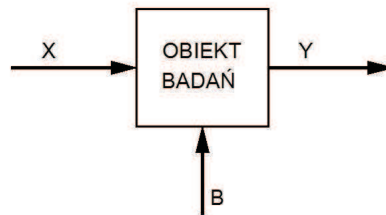
Tabela 2. Skład mieszanki betonowej do wykonania próbek

Rodzaj składnika	Ilość składnika [kg/m ³]
Piasek wiślany (0–2 mm)	989
Cement CEM I35R	335
Żwir (2–8 mm)	1105
Woda	117
Domieszka Chrysto Fluid Premia 190	8

Źródło: opracowanie własne.

2.2. Planowanie badań

Badania przyczepności stali do betonu zostały przeprowadzone według następującego planu eksperymentu (rys. 3).



Rys. 3. Schemat przeprowadzonego eksperymentu

Źródło: opracowanie własne.

X – zmienne wejściowe umożliwiające zmianę przebiegu całego procesu.

- Temperatura nagrzewania próbek T (przebieg osiągnięcia T zgodny z przyjętą krzywą „temperatura–czas”),
- Sposób ochładzania próbki naturalny lub szokowy.

B – zmienne stałe – przyjmowane na stałym poziomie.

- Klasa betonu C30/37,
- Gatunek stali B500SP lub BSt500S.

Y – zmienne wyjściowe – zmienne mierzalne zależne od zmiennych wejściowych i stałych.

- Siła przyczepności stali do betonu.

Temperatura nagrzewania próbek (zmienna X) podczas badań zmieniała się w zakresie od 400°C do 800°C z odstępami wynoszącymi 50°C. W celu porównania wyników badań wykonano badania w temperaturze normalnej (pokojowej) 20°C. Do badań zastosowano metodę bezpośredniego wyciągania pręta (Pullout Bond Test).

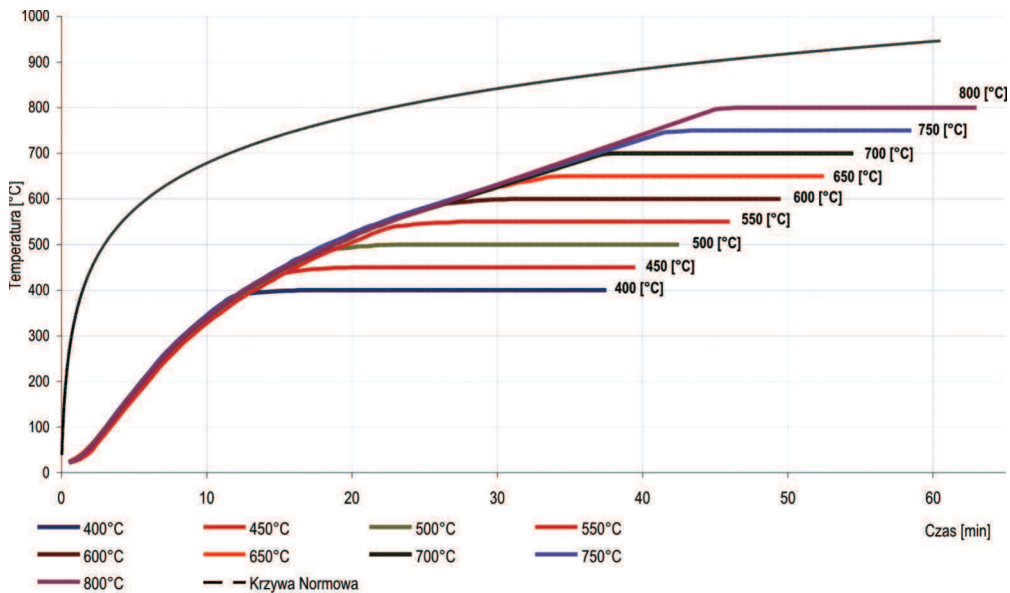
2.3. Warunki termiczne badań

W czasie badań dążono do tego, aby rozkład temperatury w czasie był zbliżony do warunków termicznych standardowego (normowego) pożaru. Dlatego za podstawę przyjęto, że w środowisku otaczającym konstrukcję występuje rozkład normowy „temperatura–czas” według normy PN-EN 1363-1: 2001 [9].

Krzywa standardowa „temperatura–czas” prezentuje rozkład temperatur w środowisku pożaru przyjęty przy określaniu odporności ogniowej elementów budowlanych metodą eksperymentalną. W badaniach służy do przeprowadzenia wstępnej obróbki termicznej próbek [2].

W pracy przyjęto, że osiągnięcie temperatury założone w eksperymencie będzie się odbywać zgodnie z rozkładem „temperatura–czas”, odpowiadającym rozkładowi temperatury w płycie betonowej na głębokości 15 mm (uwzględniając możliwości techniczne pieca) [3].

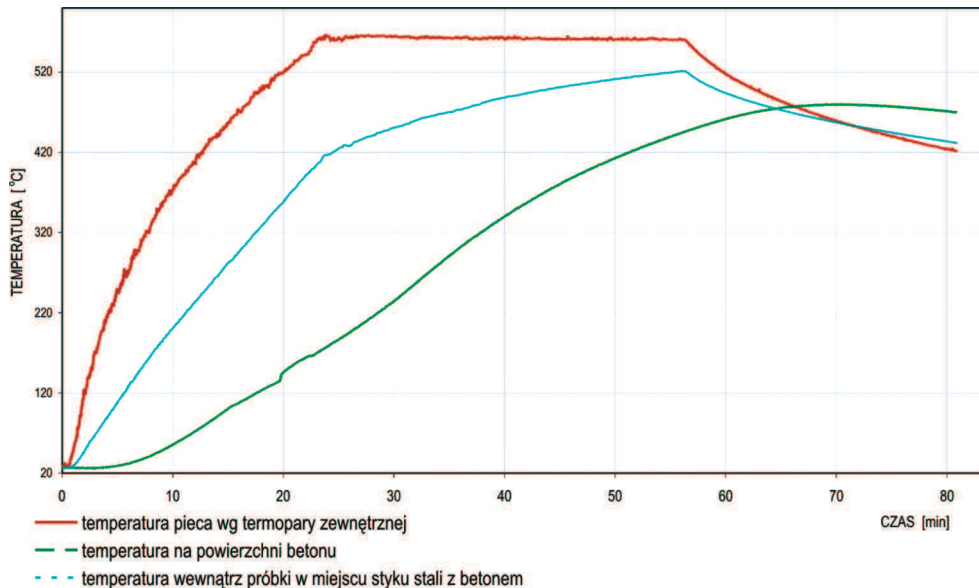
Po osiągnięciu założonej temperatury zgodnej z planem eksperymentu była ona utrzymywana na stałym poziomie przez okres około 30 minut do wyrównania temperatury na zewnątrz i wewnątrz próbki w miejscu styku pręta z betonem. W czasie tym dokonywano pomiaru temperatury na powierzchni próbki oraz na styku pręta z betonem. Założone rozkłady temperatur przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Założony w badaniach rozkład temperatur z zaznaczonym czasem ogrzewania

Źródło: opracowanie własne.

Przykładowy rozkład temperatur w czasie badania przedstawiono na rys. 5. Jak widać, w tym czasie występuje wyrównanie temperatur na powierzchni betonu oraz na styku betonu ze zbrojeniem.



Rys. 5. Przykładowy uzyskany rozkład temperatury

Źródło: opracowanie własne.

2.4. Wykonanie badań

Opisane powyżej próbki w liczbie 5 sztuk w każdej partii zostały umieszczone w elektrycznym piecu typu PK1100/5 (rys. 6), z układem sterowania pieca i temperatury. W czasie badania dokonywano za pomocą termopar pomiaru temperatury w piecu, na zewnętrznej powierzchni próbki oraz na styku stali z betonem w środkowej wysokości próbki. W ostatnim przypadku w czasie betonowania wykonano specjalny kanalik do umieszczenia termopary, widoczny na rys. 1A. Umieszczone w piecu próbki zostały ogrzane do ustalonych temperatur od 400°C do 800°C z odstępami wynoszącymi 50°C zgodnie z rys. 4. Po wyjęciu z pieca część próbek chłodzono w pojemniku z zimną wodą. Druga część próbek po wygrzaniu i utrzymaniu temperatury przez zakładany okres zostawała w piecu przez 48 h do pełnego ostygnięcia. Przygotowane w ten sposób próbki poddawano badaniom wytrzymałościowym (wyciągania pręta z próbki).

Wartość siły powodującej przesunięcie pręta w betonie traktowano jako siłę przyczepności.



Rys. 6. Widok pieca PK 1100/5 wraz z umieszczonymi w środku próbkami do badań
Źródło: opracowanie własne.

3. Analiza wyników badań

W badaniach wykorzystano w sumie 200 próbek po 50 w każdej grupie. Przed przystąpieniem do badań podstawowych przebadano przyczepność stali zbrojeniowych do betonu C30/37 w temperaturze normalnej 20°C. Zgodnie z planem eksperymentu próbki wygrzewano w zakresie temperatur od 400°C do 800°C po 5 próbek w każdym z zakresów temperatury. W tabeli 3 przedstawiono porównanie wyników badań przyczepności stali B500SP do betonu C30/37 po chłodzeniu szokowym oraz naturalnym. W tabeli 4 przedstawiono porównanie wyników badań przyczepności stali BSt500S do betonu C30/37 po chłodzeniu szokowym oraz naturalnym.

Tabela 3. Porównanie wyników badań przyczepności stali B500SP do betonu C30/37 po chłodzeniu szokowym (S) i naturalnym (N)

Temperatura [°C]	N	Siła przyczepności (S) [kN]	Spadek przyczepności (S) [%]	Siła przyczepności (N) [kN]	Spadek przyczepności (N) [%]
20	5	33,32	0,00	33,32	0,00
400	5	33,06	0,78	33,60	+0,84
450	5	32,28	3,12	32,94	1,14
500	5	28,50	14,47	32,54	2,34
550	5	21,20	36,37	26,48	20,53
600	5	13,90	58,28	18,04	45,86
650	5	12,38	62,85	14,12	57,62
700	5	7,40	77,79	9,44	71,67
750	5	5,42	83,73	7,72	76,83
800	5	3,28	90,16	5,80	82,59

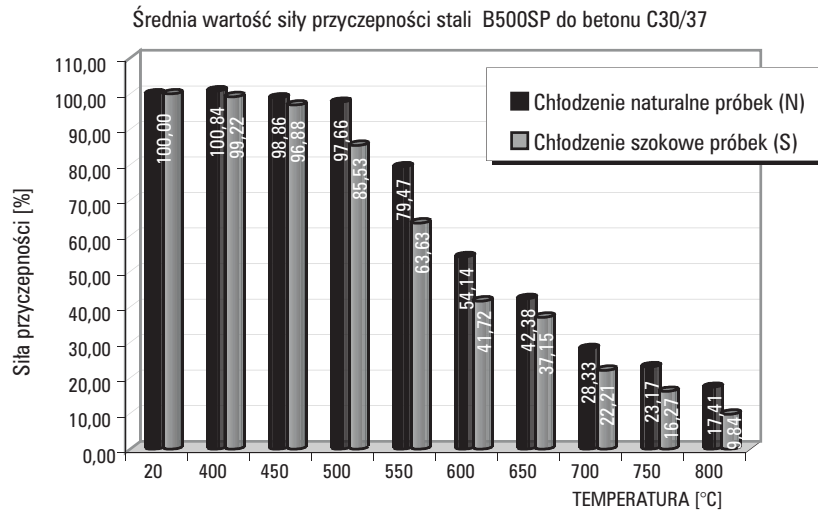
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Porównanie wyników badań przyczepności stali BSt500S do betonu C30/37 po chłodzeniu szokowym (S) i naturalnym (N)

Temperatura [°C]	N	Siła przyczepności (S) [kN]	Spadek przyczepności (S) [%]	Siła przyczepności (N) [kN]	Spadek przyczepności (N) [%]
20	5	32,84	0,00	32,84	0,00
400	5	32,48	1,09	32,62	0,67
450	5	32,20	1,95	32,18	2,01
500	5	27,98	14,8	30,80	6,21
550	5	20,28	38,25	23,76	27,65
600	5	12,24	62,73	16,50	49,76
650	5	11,30	65,59	12,78	61,08
700	5	5,78	82,39	6,88	79,05
750	5	4,60	85,99	5,84	82,21
800	5	2,58	92,14	4,24	87,09

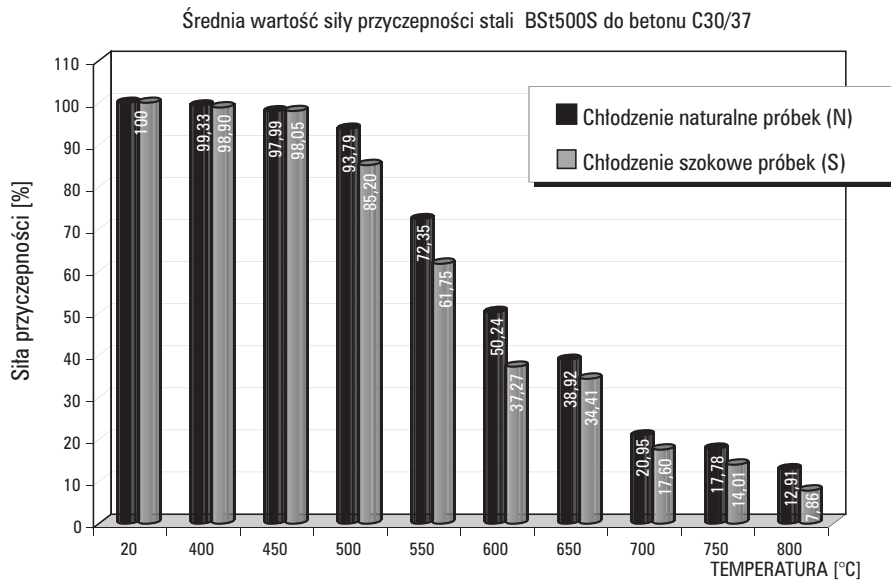
Źródło: opracowanie własne.

Graficzne opracowanie wyników badań przedstawiono na rys. 7 oraz 8. Przedstawiono wartości średnie oraz różnice występujące w obydwu sposobach ochładzania próbek. Procentowy spadek przyczepności liczone w stosunku do badanej przyczepności w temperaturze normalnej (20°C).



Rys. 7. Wykres porównawczy przyczepności stali B500SP do betonu C30/3 po chłodzeniu szokowym(S) i naturalnym(N)

Źródło: opracowanie własne.



Rys.8. Wykres porównawczy przyczepności stali BSt500S do betonu C30/37 po chłodzeniu szokowym (S) i naturalnym(N)

Źródło: opracowanie własne.

4. Podsumowanie i wnioski

- Badania opisane w artykule wykonano w ramach projektu badawczego „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” POIG.01.01.02-10-106/09-01.
- Analiza wyników badań wykazuje występowanie zauważalnego wzmożonego spadku przyczepności na skutek szokowego chłodzenia próbek betonowych.
- Dla próbek ogrzanych do 450°C różnice spadku przyczepności występujące przy szokowym chłodzeniu oraz naturalnym stygnięciu próbek są stosunkowo niewielkie i wynoszą do 0,6% (stal BSt500S) oraz do 1,98% (stal B500SP).
- W temperaturach około 500°C i wyższych występują znaczne różnice spadku przyczepności na skutek szokowego chłodzenia w porównaniu z chłodzeniem naturalnym wynoszącym do ok. 13% (stal BSt500S) oraz do ok. 12,5% (stal B500SP).
- W przypadku stali BSt500S występuje nieco mniejsza przyczepność w porównaniu z B500SP oraz nieco większy spadek przyczepności w temperaturach pożarowych, co niewątpliwie jest związane z kształtem żeberek na powierzchni prętów.
- Badania wpływu warunków chłodzenia w czasie akcji gaśniczych będą kontynuowane w ramach projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” POIG.01.01.02-10-106/09-01.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Bednarek Z., Ogrodnik P., Pieniak D.: Laboratory method of evaluation of influence high temperatures on maintenance parameters of the reinforced concrete systems compounds. *Maintenance and Reliability* 2010, nr 3, s. 33.
- [2] Bednarek Z., Ogrodnik P.: Testing steel-concrete bond in fire conditions. IX International Conference. *Modern Building Materials Structures and Techniques*. Vilnius, Lithuania 2007.
- [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] Chih-Hung C., Cho-Liang T.: Time – temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure. *Cement and Concrete Research* 2003, nr 33, s. 1651–1654.
- [5] Fellingner J.H.H. & Uijl J.A.: Bond of pretensioned strands in fire exposed concrete, W: G.L. Balasz, P.J.M. Bartos, J. Cairns & A. Borosnyoi (red.), Proceedings of the 3rd international symposium Bond in concrete – from research to standards, Budapest, Hungary 2002, s. 308–315.
- [6] Morley P.D., Royles R.: The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete. *Fire Safety Journal* 1980, nr 2, s. 243–255.
- [7] Fu X., Chung D.D.L.: Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar. *Cement and Concrete Research*. 1997, nr 27, s. 1811–1815.
- [8] Auyeung Y., Balaguru P., Chung L.: Bond Behavior of Corroded Reinforcement Bars, *ACI Materials Journal* 2000, nr 97, s. 214–220.
- [9] PN-EN 1363-1: 2001 – Badanie odporności ogniowej. Część 1: Wymagania ogólne.
- [10] PN-EN 1992-1-2: 2008 – Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

S U M M A R Y

st. bryg. w stanie spocz. dr hab. inż. Zoja BEDNAREK
kpt. dr inż. Paweł OGRODNIK
mł. bryg. dr inż. Renata KAMOCKA-BRONISZ

STUDY ON THE INFLUENCE OF COOLING SHOCK RIBBED STEEL BOND TO CONCRETE C30/37

In the paper bond test and results for material classes “B” (BSt500S), “C” (B500SP) reinforcement steel and C30/37 concrete have been described. 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. After the required temperature 400°C to 800°C had been reached, samples were kept constant at constant temperature for 30 minutes. After the heating, the sample was cooled naturally or shocked in water. A significant reduction of steel-concrete bond was found as the result of fire temperature.