

st. bryg. w stanie spocz. dr hab. inż. Zoja BEDNAREK

mł. bryg. dr inż. Renata KAMOCKA-BRONISZ

kpt. dr inż. Paweł OGRODNIK

mł. bryg. mgr inż. Sławomir BRONISZ

Zakład Mechaniki Stosowanej, SGSP

ANALIZA WPŁYWU TEMPERATURY POŻAROWEJ NA PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE STALI B500SP

Opisane w artykule badania realizowano w ramach projektu: „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”.

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury pożarowej na parametry wytrzymałościowe stali B500SP.

The paper presents the results of tests of the effect of fire temperature on the strength parameters of steel B500SP. The studies described in the article, were carried out within the project: “Innovative measures and effective methods of improving the safety and durability of buildings and transport infrastructure in a sustainable development strategy”.

Słowa kluczowe: stal konstrukcyjna, temperatura pożarowa, parametry wytrzymałościowe

Key words: steel construction, fire temperature, strength parameters

1. Wstęp

Przepisy budowlane nakazują, aby budynki i urządzenia z nimi związane były zaprojektowane i wykonane w sposób zapewniający w razie pożaru możliwość bezpiecznej ewakuacji. Spełnienie wymagań co do bezpieczeństwa jest możliwe wyłącznie na podstawie dokładnego prognozowania zachowania się elementów konstrukcyjnych w podwyższonej i wysokiej temperaturze, w tym konstrukcji stalowych i żelbetowych. Szczególne zainteresowanie zespołu badawczego skierowane było na stal B500SP (EPSTAL). Jest to stal zbrojeniowa gorącowałcowana o podwyższonej ciągliwości. Wiadomości o wpływie wysokiej temperatury na parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych ze stali B500SP pojawiły się w czasopiśmie branżowym „Hutnik–Wiadomości Hutnicze” w 2009 r. [5]. Wyniki przedstawione w tym opracowaniu dotyczyły zmian wytrzymałości stali po oddziaływaniu wysokiej temperatury i ostygnięciu próbek. Celem autorów było zbadanie i opisanie wpływu temperatury pożarowej na parametry wytrzymałościowe oraz plastyczność stali zbrojeniowej klasy C o podwyższonej ciągliwości na przykładzie gatunku B500SP w trakcie grzania stali.

Badania zostały przeprowadzone w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej przez autorów posiadających duże doświadczenie w badaniach stali w temperaturach pożarowych [6÷12].

Badania polegały na statycznej próbie rozciągania stali B500SP w warunkach podwyższonej i wysokiej temperatury. W czasie prowadzenia badań monitorowano wartości naprężeń oraz odkształceń pozwalające na wyznaczenie badanych parametrów. Statyczne próby rozciągania wykonano w stałych temperaturach 20°C, 200–500°C, przy zwiększaniu ich co 100°C w celu wyznaczenia zmian parametrów wytrzymałościowych w zależności od temperatury.

Wraz z wejściem w życie norm PN-EN bazujących na ustaleniach Eurokodów projektowanie konstrukcji budowlanych z uwagi na warunki pożarowe stało się domeną projektantów. Otrzymane wyniki badań stali B500SP w polu podwyższonych temperatur umożliwią uwzględnianie w modelach obliczeniowych wpływu temperatury na spadek nośności oraz odkształcenia konstrukcji. Prowadzone badania mają charakter badań podstawowych, zmierzających do udoskonalenia współczesnych metod analizy wytrzymałościowej elementów konstrukcji stalowych i żelbetowych, znajdujących się w stanach awaryjnych pod działaniem stałego pola temperatury. Wyniki tych badań mają również znaczenie aplikacyjne ze względu na możliwość uwzględnienia ich w obliczeniach konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.

2. Charakterystyka badanego gatunku stali B500SP

Stal w gatunku B500SP jest specjalną stalą klasy C według klasyfikacji Eurokodu 2 PN-EN 1992-1-1:2008 [3], zgodną z wymaganiami nowej normy krajowej PN-H-93220:2006 [1].

Charakteryzuje się ona przede wszystkim większą wydłużalnością od powszechnie stosowanych gatunków stali zbrojeniowych. Łączy w sobie dwie najważniejsze zalety stali zbrojeniowej, tj. wytrzymałość i ciągliwość, co wpływa znacząco na bezpieczeństwo konstrukcji stalowych i żelbetowych, szczególnie w stanach awaryjnych przy nagłych nieprzewidywalnych obciążeniach mechanicznych.

Tabela 1. Skład chemiczny stali B500SP [5]

Gatunek	Zawartość pierwiastka %							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
B500SP	0,21	0,92	0,14	0,019	0,035	0,7	0,8	0,22

Według aktualnie obowiązującej normy europejskiej PN-EN-1992-1-1:2008 [3] oraz normy PN-H-93220:2006 [1] ciągliwość stali określana jest na podstawie takich parametrów, jak wydłużenie przy maksymalnej sile ε_{uk} oraz stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności (f_t / f_y). Stal zbrojeniowa według tej klasyfikacji dzieli się na trzy klasy, które oznacza się literami A, B i C.

Tabela 2. Klasyfikacja stali konstrukcyjnej pod względem ciągliwości

Klasa stali	Przykładowe gatunki stali	f_{yk} lub $f_{0,2k}$ [MPa]	$k = (f_t / f_y)_k$	ε_{uk} [%]
A	St3SY-b 500	400 ÷ 600	$\geq 1,05$	$\geq 2,5$
B	RB500W		$\geq 1,08$	≥ 5
C	B500SP		$\geq 1,15 < 1,35$	$\geq 7,5$

Źródło: norma PN-EN 1992-1-1:2005 załącznik C, tablica C.1 [3].

Stal B500SP wykazuje następujące właściwości mechaniczne:

- charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie $f_{tk} = 575$ [MPa],
- charakterystyczna granica plastyczności $f_{yk} = 500$ [MPa],
- obliczeniowa granica plastyczności $f_{yd} = 420$ [MPa],
- stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności $(f_t / f_y)_k = 1,15 \div 1,35$,

- wydłużenie pod maksymalnym obciążeniem $\varepsilon_{ik} > 8$ [%],
 - spajalność $C_{eq} \leq 0,50\%$,
 - moduł sprężystości podłużnej $E = 2 \cdot 10^5$ MPa,
 - wytrzymałość na obciążenia wielokrotnie zmienne: minimum 2 mln cykli rozciągania w zakresie naprężeń $150 \div 300$ MPa z częstotliwością do 200 Hz, bez widocznych pęknięć,
 - wytrzymałość na obciążenia cykliczne: minimum 3 cykle rozciągania na przemian ze ściskaniem, z częstotliwością $0,5 \div 3$ Hz, bez widocznych pęknięć.
- Są to parametry gwarantowane przez znak jakości EPSTAL; właściwości rzeczywiste mogą być takie same lub lepsze [4].

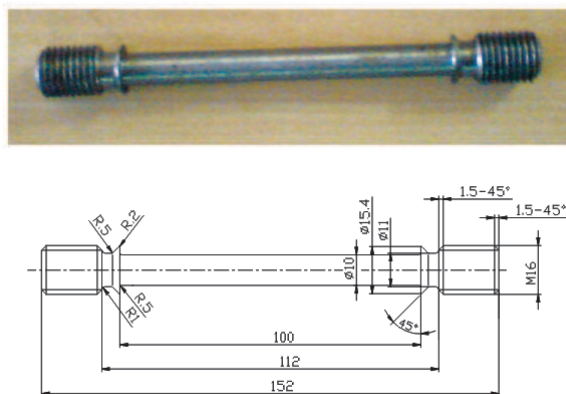
3. Badania wytrzymałościowe

Badania parametrów stali B500SP polegały na wykonaniu statycznych prób rozciągania stali w warunkach wysokiej temperatury. Przeprowadzono je według wytycznych normy PN-EN ISO 6892-2:2011 Próba rozciągania, metoda badania w podwyższonej temperaturze [2].

Podstawowym celem badań była analiza odkształceń $\varepsilon = f(\sigma, T)$ oraz wybranych parametrów wytrzymałościowych stali zbrojeniowej B500SP w przyjętych stacjonarnych warunkach termicznych.

Zbadano odkształcenia stali B500SP przy pięciu poziomach temperatur: 20°C, 200°C, 300°C, 400°C i 500°C. Przebadano 15 próbek, przy określonej temperaturze wykonano 3 powtórzenia pomiarów.

Kształt i wymiary próbek do badań zostały przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Widok oraz wymiary próbki do badań

Źródło: opracowanie własne.

Próbki do badań wyposażone są w gwinty pozwalające na zamocowanie w uchwytach w maszynie wytrzymałościowej. Długość robocza próbek to 100 mm. Jest ona ograniczona kołnierzami o powierzchni stożkowej, na której montuje się uchwyty popychaczy kwarcowych ekstensometru mechanicznego. Przekrój poprzeczny próbek jest okrągły o średnicy początkowej 10 mm, a pole powierzchni przekroju poprzecznego wynosi 78,5 mm².



a)

b)

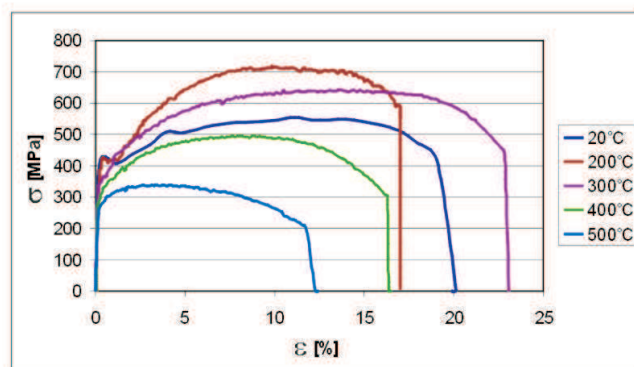
c)

Rys. 2. Widok stanowiska do badań stali w podwyższonej temperaturze a). Widok pieca z układem tensometru b). Rozmieszczenie termopar na próbce c)

Źródło: fotografie autorów.

4. Wyniki badań stali B500SP w podwyższonych i wysokich temperaturach

Wyniki badań w formie wykresów otrzymane dla wybranych poziomów temperatury zestawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wykresy „ $\sigma - \epsilon$ ” dla stali B500SP w podwyższonej temperaturze

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie wyników pomiarów opracowanych w arkuszu kalkulacyjnym EXCEL w formie wykresów wyznaczono i obliczono następujące charakterystyki wytrzymałościowe stali:

f_t – wytrzymałość na rozciąganie,

f_y – granica plastyczności.

Wyznaczono również parametry określające plastyczność stali B500SP:

f_t / f_y – stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności,

ε_{uk} – wydłużenie przy maksymalnej sile odpowiadające wytrzymałości na rozciąganie,

A_{10} – całkowite wydłużenie względne mierzone po zerwaniu,

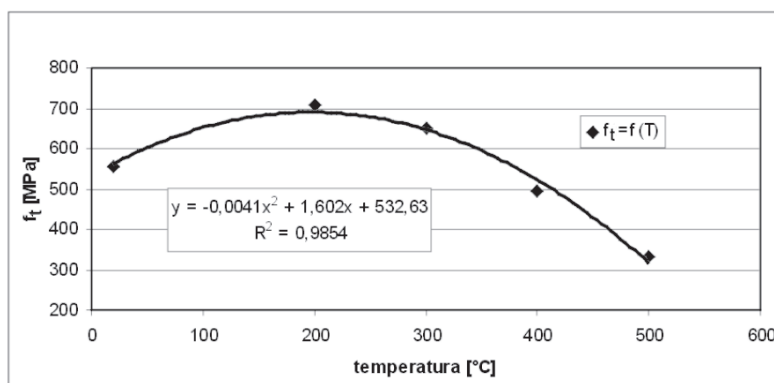
Z – przewężenie mierzone w miejscu zerwania.

Wytrzymałość na rozciąganie (f_t)

Wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie f_t , odczytane z wykresu $\sigma = f(\varepsilon)$ jako największa wartość naprężenia zarejestrowana podczas danej próby, zostały zamieszczone w tabeli 3. Na rys. 4 przedstawiono wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie od temperatury.

Tabela 3. Wartości wytrzymałości na rozciąganie dla poszczególnych poziomów temperatury próby dla stali B500SP

Badany parametr	Wytrzymałość na rozciąganie				
	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C
f_t [MPa]	558	707	644	496	330



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie w funkcji temperatury dla stali B500SP

Źródło: opracowanie własne.

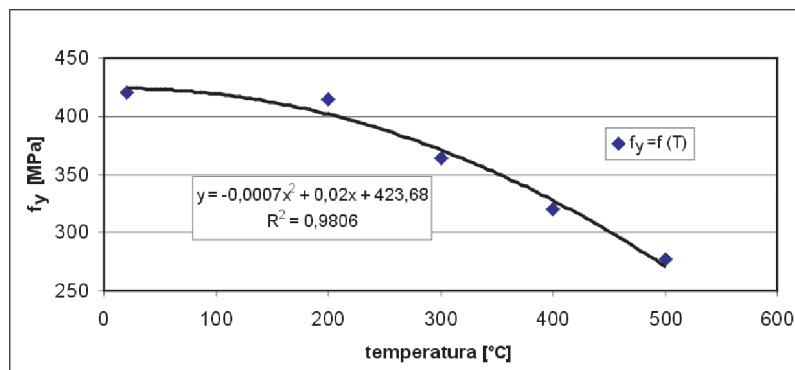
Granica plastyczności (f_y)

Z powodu zaniku wyraźnej granicy plastyczności w podwyższonych temperaturach w pracy została wyznaczona umowna granica plastyczności $f_{y0,2}$, oznaczana dalej f_y .

Wartości średnie granicy plastyczności, odczytane z wykresu $\sigma = f(\varepsilon)$ zarejestrowane podczas danej próby, zostały zamieszczone w tabeli 4. Na rys. 5 przedstawiono wykres zależności granicy plastyczności od temperatury.

Tabela 4. Wartości granicy plastyczności dla poszczególnych poziomów temperatury próby dla stali B500SP

Badany parametr	Granica plastyczności				
	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C
f_t [MPa]	420	414	365	320	276



Rys. 5. Granica plastyczności dla stali B500SP w funkcji temperatury

Źródło: opracowanie własne.

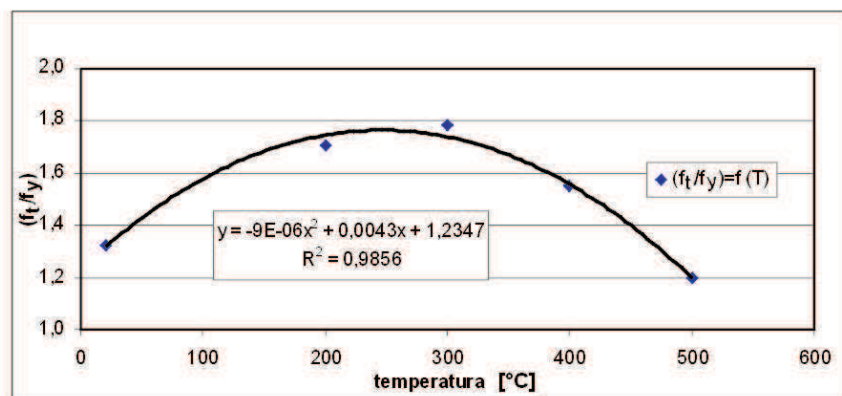
Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności (f_t / f_y)

Wartości średnie stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności f_t / f_y zostały zamieszczone w tabeli 5. Na rys. 6 przedstawiono wykres zależności stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności od temperatury.

Tabela 5. Wartość stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności dla poszczególnych poziomów temperatury próby dla stali B500SP

Badany parametr	Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności				
	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C
f_t / f_y	1,32	1,7	1,78	1,55	1,2

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności w funkcji temperatury dla stali B500SP

Źródło: opracowanie własne.

Wydłużenie przy maksymalnej sile (ε_{uk})

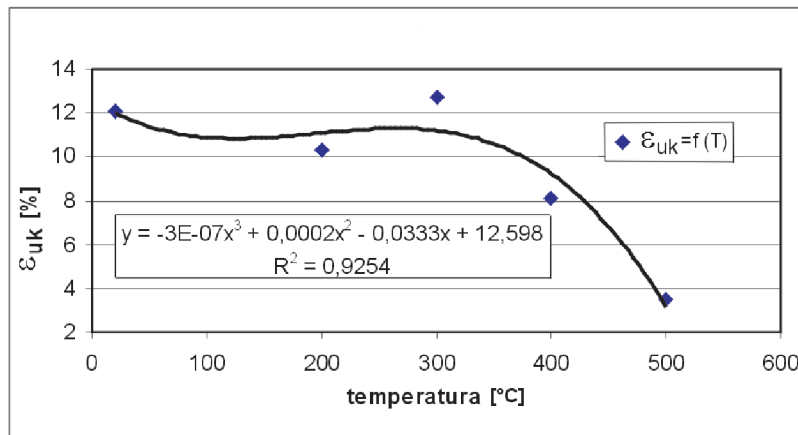
Wydłużenie przy maksymalnej sile ε_{uk} [%] jest to wartość odkształcenia odpowiadająca największej zanotowanej sile (wytrzymałości na rozciąganie).

Wartości średnie wydłużenia przy maksymalnej sile ε_{uk} zostały zamieszczone w tabeli 6. Na rys. 7 przedstawiono wykres zależności wydłużenia przy maksymalnej sile ε_{uk} od temperatury.

Tabela 6. Wartość wydłużenia przy maksymalnej sile dla poszczególnych poziomów temperatury próby dla stali B500SP

Badany parametr	Wydłużenie przy maksymalnej sile				
	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C
ε_{uk} [%]	12,1	10,3	12,7	8,11	3,45

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7. Wydłużenie przy maksymalnej sile w funkcji temperatury dla stali B500SP

Źródło: opracowanie własne.

Moduł sprężystości podłużnej (Moduł Younga) E

Wartość modułu Younga można odczytać jako tangens kąta α nachylenia wykresu $\sigma = f(\epsilon)$ w zakresie odkształceń sprężystych, gdzie występuje liniowa zależność między naprężeniami i odkształceniami.

Wartość modułu Younga dla każdej próby została obliczona na podstawie zależności:

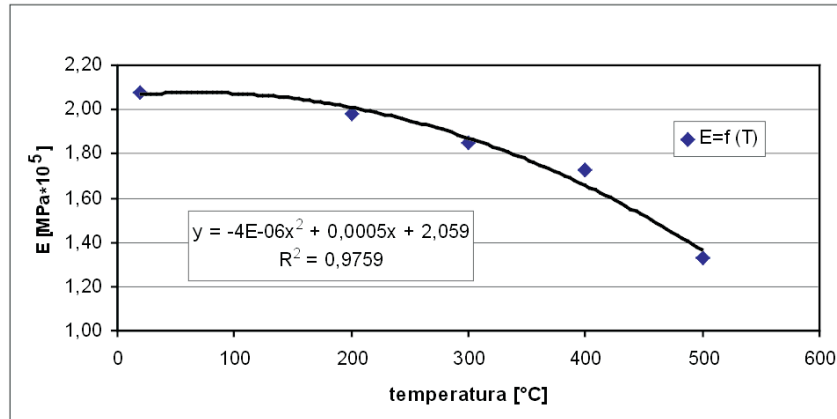
$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}.$$

Wartości średnie modułu sprężystości podłużnej E zostały zamieszczone w tabeli 7. Na rys. 8 przedstawiono wykres zależności modułu sprężystości podłużnej od temperatury.

Tabela 7. Wartość dla poszczególnych modułów sprężystości podłużnej E dla poszczególnych poziomów temperatury próby dla stali B500SP

Badany parametr	Moduł sprężystości podłużnej E				
	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C
E [MPa]	2,08	1,98	1,85	1,73	1,33

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Moduł sprężystości podłużnej w funkcji temperatury dla stali B500SP

Źródło: opracowanie własne.

4. Współczynniki redukcyjne badanych parametrów w podwyższonych temperaturach

Współczynniki redukcyjne badanych parametrów zostały wyznaczone w celu zobrazowania zmiany badanych parametrów w podwyższonej temperaturze względem ich wartości w temperaturze otoczenia. Wartości współczynników redukcyjnych zamieszczono w tabeli 8. Przebieg zmiany współczynników redukcyjnych został przedstawiony na rys. 9.

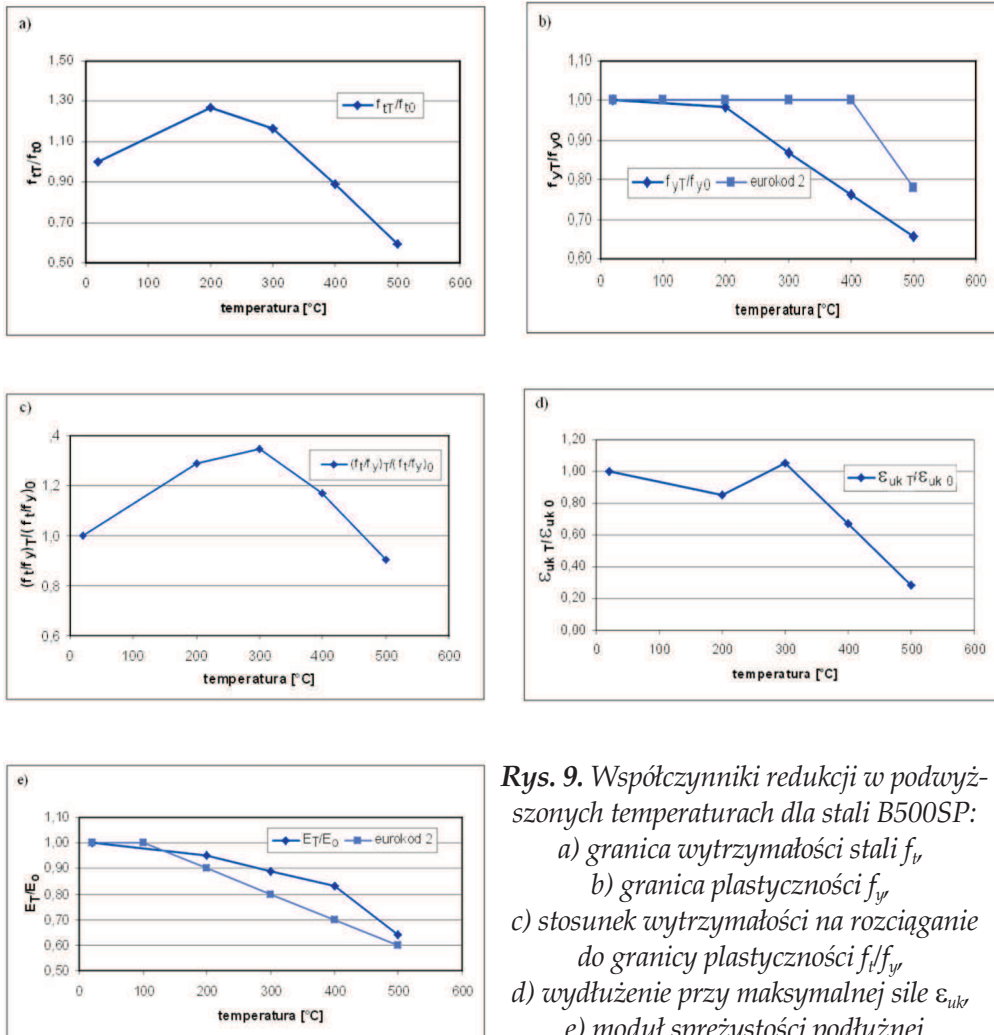
Ponadto na rys. 9b oraz 9e porównano otrzymane z badań wartości współczynników redukcyjnych granicy plastyczności oraz modułu sprężystości podłużnej z wartościami normowymi podanymi w tablicy 3.2a normy PN-EN1992-1-2 [3].

Tabela 8. Zmiana charakterystyk mechanicznych stali B500SP w funkcji poziomu temperatury

Temperatur a [°C]	f_{tT} / f_{t0}	f_{yT} / f_{y0}	$(f_t / f_y)_T / (f_t / f_y)_0$	$\varepsilon_{uk,T} / \varepsilon_{uk,0}$	E_T / E_0
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,27	0,98	1,29	0,85	0,95
300	1,17	0,87	1,34	1,05	0,89
400	0,89	0,76	1,17	0,67	0,83
500	0,59	0,66	0,9	0,29	0,64

Oznaczenia w tabeli 8:

- f_t – wytrzymałość na rozciąganie dla temperatury próby,
- f_{t0} – wytrzymałość na rozciąganie dla temperatury 20°C,
- f_{yT} – granica plastyczności dla temperatury próby,
- f_{y0} – granica plastyczności dla temperatury 20°C,
- $\varepsilon_{uk,T}$ – wydłużenie przy maksymalnej sile dla temperatury próby,
- $\varepsilon_{uk,0}$ – wydłużenie przy maksymalnej sile dla temperatury 20°C,
- E_T – moduł sprężystości podłużnej dla temperatury próby,
- E_0 – moduł sprężystości podłużnej dla temperatury 20°C.



Rys. 9. Współczynniki redukcji w podwyższonych temperaturach dla stali B500SP:
 a) granica wytrzymałości stali f_T
 b) granica plastyczności f_y
 c) stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności f_T/f_y
 d) wydłużenie przy maksymalnej sile ε_{uk}
 e) moduł sprężystości podłużnej

5. Podsumowanie i wnioski

- Przedstawione w pracy badania stali B500SP wykonano 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.
- Badania nad oceną parametrów wytrzymałościowych stali B500SP w temperaturach pożarowych przeprowadzone w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej wykazały, że temperatura jest istotnym czynnikiem wpływającym na wszystkie analizowane w pracy parametry wytrzymałościowe i plastyczne badanej stali B500SP.
- Prowadzone badania mają znaczenie poznawcze dla wybranego zakresu oddziaływania temperatury na stal B500SP oraz znaczenie aplikacyjne, gdyż na ich podstawie zostały określone współczynniki redukcji badanych charakterystyk mechanicznych, stanowiących podstawę do wyznaczenia wytrzymałości konstrukcji w temperaturach pożarowych.
- W temperaturze 200°C zaobserwowano wzrost wytrzymałości stali f_v , f_y przy wyraźnym (około 15%) spadku odkształceń (wzrost kruchości).
- W temperaturze 300°C widoczny jest wzrost plastyczności stali. Osiągane są zdecydowanie większe odkształcenia przy maksymalnej sile. Zniszczenie próbki nie następuje w tak gwałtowny sposób, jak miało to miejsce w temperaturze 200°C. Następuje spadek granicy plastyczności f_y .
- W temperaturach 400°C i 500°C następuje wyraźny spadek parametrów wytrzymałościowych. Przebieg wykresów rozciągania (rys. 3) ukazuje spadek wytrzymałości na rozciąganie.
- Zniszczenie próbki w temperaturach 400°C i 500°C następuje przy mniejszych odkształceniach niż w temperaturze normalnej, a więc pojawia się kruchość niekorzystna z punktu widzenia stanu granicznego zniszczenia konstrukcji.
- Wartość modułu sprężystości podłużnej E do temperatury 200°C nie ulega znaczącej zmianie w stosunku do temperatury pokojowej, a w temperaturze powyżej 200°C następuje wyraźny spadek E .
- Stal zbrojeniowa B500SP wykazuje większą ciągliwość w temperaturach normalnych i temperaturze około 300°C, natomiast w wysokich temperaturach pożaru wykazuje zniszczenie kruche, niebezpieczne dla konstrukcji.

PIŚMIENNICTWO

- [1] PN-H-93220:2006 Stal B500SP o podwyższonej ciągliwości do zbrojenia betonu – Pręty i walcówka żebrzana.
- [2] PN-EN ISO 6892-2:2011 Metale. Próba rozciągania. Część 2: Metoda badania w podwyższonej temperaturze.
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [4] Gałęcki M.: Stal zbrojeniowa klasy „C” ze znakiem EPSTAL. *Inżynier Budownictwa* 2006, nr 9, s. 43–45.
- [5] Koczurkiewicz B.: Analiza wpływu podwyższonych temperatur na własności wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych ze stali B500SP. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 2009, nr 8, s. 598–600.
- [6] Bednarek Z., Krodkiewski R.: Wytrzymałość materiałów z przykładami. Zagadnienia cieplne. SGSP, Warszawa 1987.
- [7] Bednarek Z.: Studium wpływu nieustalonych warunków termicznych na stosowane przy ocenie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji parametry wytrzymałościowe stali budowlanych. Monografia, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1996, s. 1–203.
- [8] Bednarek Z.: O wyznaczaniu odkształceń i naprężeń termicznych w warunkach pożaru. *Inżynieria i Budownictwo* 1994, nr 10.
- [9] Bednarek Z., Kamocka R.: Analiza odkształceń termicznych stali budowlanych w zmiennym polu temperatur. *Inżynieria i Budownictwo* 2003 nr 8.
- [10] Bednarek Z., Kamocka R.: Analysis of Thermal Strain of Structural Steels in Variable Thermal Field, *Journal of Civil Engineering and Management* 2004, t. X, supl. 1, s. 19–22.
- [11] Bednarek Z.: Character and Mechanism of Metals Failure in High Fire Temperatures, *Statyba* 1996, 1(5), Vilnius.
- [12] Bednarek Z., Kamocka-Bronisz R.: Analysis of Fire Temperature Distribution Influence on Strength Parameters of Steel Structures, *Vilnius Gediminas Technical University Publishing House „Technika”* 2010, s. 1199–1202.

S U M M A R Y

st. bryg. w stanie spocz. dr hab. inż. Zoja BEDNAREK

mł. bryg. dr inż. Renata KAMOCKA-BRONISZ

kpt. dr inż. Paweł OGRODNIK

mł. bryg. mgr inż. Sławomir BRONISZ

ANALYSIS OF FIRE TEMPERATURES ON STRENGTH PARAMETERS OF STEEL B500SP

The paper presents the results of tests of the effect of fire temperature on the strength parameters of steel B500SP. The tests were performed on a test stand equipped with testing machine with resistance furnace built in Applied Mechanics Institute of the Main School of Fire Service. The tests were conducted in constant temperatures of 20, 200, 300, 400 and 500°C. The force and elongation values were recorded. On their basis, tensile strength, the proof stress, strength to yield ratio and elongation with maximum force were derived as a function of temperature. The studies described in the article, were carried out within the project: "Innovative measures and effective methods of improving the safety and durability of buildings and transport infrastructure in a sustainable development strategy" under the Innovative Economy Operational Programme 2007–2013.