

Modelowanie procesów wytrzymałościowych stali S235JR w podwyższonej temperaturze Modelling of strength processes of S235JR steel in increased temperature

Wojciech Skowroński, Agata Włóka, Rafał Chmiel

*Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji
Instytut Budownictwa
pl. Grunwaldzki 24, 50-365 Wrocław
e-mail: wojciech.skowronski@up.wroc.pl*

*Wrocław University of Environmental and Life Sciences
Faculty of Environmental Engineering and Geodesy
Institute of Building
pl. Grunwaldzki 24, 50-365 Wrocław
e-mail: wojciech.skowronski@up.wroc.pl*

Streszczenie

W pracy podjęto temat bezpieczeństwa pożarowego budowlanych konstrukcji stalowych. Przy tym przedstawiono genezę badań właściwości stali w aspekcie obciążenia wyjątkowego pożarem oraz zaprezentowano odpowiednie stanowisko badawcze. Ponadto podano wyniki badań laboratoryjnych stali S235JR w podwyższonej temperaturze wraz z weryfikacją statystyczną opisu charakterystyk wytrzymałościowych. Sformułowano wnioski w nawiązaniu do potrzeb wynikających z procedur projektowania konstrukcji stalowych ogarniętych pożarem.

Abstract

The article discusses the issue of fire safety of construction steel structures. At the same time it presents the origins of steel properties analysis in the aspect of the extraordinary fire load and a corresponding research position. Results of laboratory tests of steel S235JR at elevated temperature are presented, along with the statistical verification of the description of strength characteristics. Conclusions were drawn with reference to the needs that result from the procedures of structural fire design.

*Słowa kluczowe: stal, konstrukcja, budynek, pożar, podwyższona temperatura
Keywords: steel, structure, building, fire, elevated temperature*

1. Wstęp

Zagrożenie pożarowe wynika z możliwości zapalenia się różnego rodzaju materiałów w obrębie budynku oraz podtrzymania procesu palenia. Istotne znaczenie mają: intensywność tego procesu oraz produkty spalania, na przykład dymy i gazy. Ogólny poziom zagrożenia w budynku ogarniętym pożarem określa zespół wskaźników, takich jak: temperatura gazów pożarowych, geometria płomieni, stężenie produktów toksycznych i drażniących, stopień zadymienia (zasięg widzialności) oraz korozyjność produktów spalania. W analizie konstrukcji budynku ogarniętego pożarem główne znaczenie ma dynamika zmian temperatury gazów pożarowych.

Od temperatury (konstrukcji stalowej ogarniętej pożarem) zależy nośność konstrukcji – parametr, który można określić znając właściwości stali w podwyższonej temperaturze [1 - 6]. Podstawowym sposobem określenia właściwości stali zarówno w temperaturze otoczenia jak i temperaturach podwyższonych jest statyczna próba rozciągania.

1. Introduction

Fire threat results from the possibility of ignition of various materials within the building and supporting the combustion process. The following are essential: the intensity of the process and the products of combustion, such as smoke and gases. The general level of threat in a building on fire is determined by a set of indicators, including: the temperature of fire gases, the geometry of the flames, the concentration of toxic and irritating substances, the intensity of smoke (visibility range) and the corrosiveness of the combustion products. The key element in the analysis of a structure of a building on fire is the dynamics of change in the temperature of fire gases.

The temperature (of a steel structure on fire) determines the carrying capability of the structure – a parameter that may be determined if the properties of steel at elevated temperature are known [1 - 6]. The main way of determination of steel properties both at room temperature and at elevated temperatures is static tensile testing.

2. Metodyka badań

Statyczne próby rozciągania w podwyższonych temperaturach przeprowadzone zostały w laboratorium Instytutu Budownictwa Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Do badań wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową Instron/Satec KN 600, wyposażoną w specjalny piec do badań wysokotemperaturowych (Rys. 1) oraz zestawy ekstensometrów do pomiaru odkształceń zarówno w temperaturze otoczenia jak i w temperaturach podwyższonych.

Badania laboratoryjne stali S235JR w podwyższonej temperaturze przeprowadzone zostały na próbkach wykonanych ze zwykłej stali konstrukcyjnej typu S235JR (próbkach przygotowanych zgodnie z wytycznymi podanymi w normach PN-EN ISO 6892-1:2009 oraz PN-EN ISO 6892-2:2011). Badania zostały przeprowadzone w temperaturach 20, 100, 300, 500, 700°C. W każdej z temperatur wykonano badania na seriach próbek o liczebności 6 szt.



Rys. 1. Piec do badań wysokotemperaturowych.
Fig. 1. Furnace for high-temperature testing.

3. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano zależności naprężenie – odkształcenie, dla badanej stali w różnych temperaturach a na ich podstawie określono właściwości mechaniczne takie jak: wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość przy zerwaniu, granica plastyczności, moduł sprężystości. Przykładowe krzywe pomiarowe przedstawiono na Rys. 2.

4. Analiza wyników badań

Analizę statystyczną wyników badań laboratoryjnych przeprowadzono zgodnie z załącznikiem D „Projektowanie wspomagane badaniami” do Eurokodu PN – EN 1990.

Wartości charakterystyczne badanych wielkości (wytrzymałości, granic plastyczności itp.) przy założeniu *normalnego* rozkładu wyników wyznaczono z zależności:

$$X_k = m_x (1 - k_a \cdot V_x) \quad (1)$$

2. Methodology of the tests

Static tensile testing at elevated temperatures was conducted at the laboratory of the Institute of Building of Wrocław University of Environmental and Life Sciences. The tests were conducted with use of the universal materials testing machine Instron/Satec KN 600, equipped with a special high temperature furnace (Fig.1) and sets of extensometers to measure the extension both at room temperature and at elevated temperatures.

Laboratory tests of steel S235JR at elevated temperature were conducted on samples made from regular construction steel type S235JR (samples prepared in compliance with guidelines specified in standards PN-EN ISO 6892-1:2009 and PN-EN ISO 6892-2:2011).

The tests were conducted at temperatures: 20, 100, 300, 500, 700°C. At each of the temperatures tests were carried out on a series of samples consisting of 6 pieces.

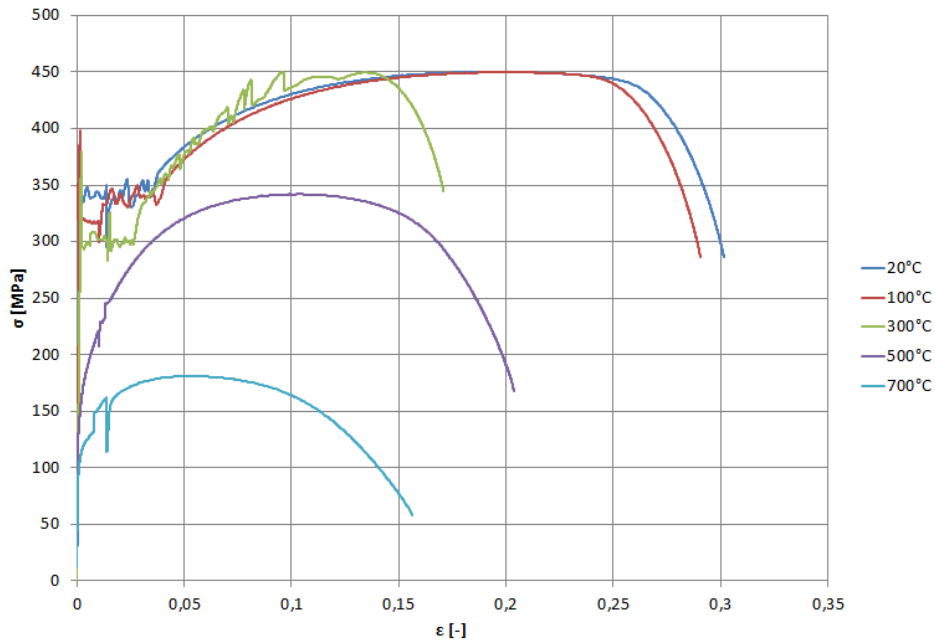
3. Results of the tests

As a result of the conducted tests the stress-strain curves were obtained for the tested steel at various temperatures. They constituted the basis for the determination of such mechanical properties as: tensile strength, proof strength, yield strength, modulus of elasticity. Sample measurement curves are presented in Fig. 2.

4. Analysis of the test results

Statistical analysis of the laboratory test results was conducted in compliance with Annex D "Design assisted by testing" to the Eurocode PN – EN 1990.

Characteristic values of the analysed parameters (strength, yield strength etc.) were determined basing on the assumed *normal* distribution of results, from the following relations:



Rys. 2. Przykładowe krzywe pomiarowe stali S235JR w różnych temperaturach.
 Fig. 2. Sample measurement curves of S235JR steel at various temperatures.

gdzie :
 - współczynnik zmienności:

where:
 - coefficient of variation:

$$V_x = \frac{s_x}{m_x} \tag{2}$$

- odchylenie standardowe:

- standard deviation:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} \tag{3}$$

Wartości charakterystyczne przy założeniu logarytmiczno-normalnego rozkładu wyników wyznaczono z zależności:

Characteristic values were determined, basing on the assumed log-normal distribution of results, from the following relations:

$$X_k = \exp(m_y - k_n \cdot s_y) \tag{4}$$

gdzie:

where:

$$m_y = \frac{\sum \ln(x_i)}{n} \tag{5}$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum (\ln(x_i) - m_y)^2}{n-1}} \tag{6}$$

m_x - średnia z próby n wyników,

m_x - mean of the n sample results

k_n - współczynnik obliczeniowy, przypisany kwantylowi wartości charakterystycznej,

k_n - characteristic fractile factor

m_i - wartości poszczególnych wyników uzyskanych podczas badań danej wielkości,

k_n - values of individual results obtained during the analysis of the selected value,

n - liczba zbadanych prób.

n - number of tested samples.

Przykładowe obliczenia charakterystycznych parametrów wytrzymałościowych stali S235JR dla temperatury 300°C przedstawiono w tabeli 1.

Sample results of the calculations of characteristic strength parameters of steel S235JR for the temperature of 300°C are presented in Table 1.

5. Wnioski

5. Conclusions

Wyniki badań laboratoryjnych próbek ze stali S235JR skłaniają do następujących wniosków:

The results of laboratory tests of samples made from steel S235JR allow us to draw the following conclusions:

Tabela 1. Przykładowe obliczenia charakterystycznych parametrów wytrzymałościowych stali S235JR dla temperatury 300°C
 Table 1. Sample results of the calculations of characteristic strength parameters of steel S235JR for the temperature of 300°C

| Nr. Próby | R _{eH} [MPa] | R _{eL} [MPa] | R _m [MPa] | R _z [MPa] | E _m [GPa] |
|--|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 29/1 | 375,155 | 281,160 | 476,196 | 354,689 | 203 |
| 30/2 | 360,186 | 284,090 | 511,943 | 352,276 | 190 |
| 32/4 | 361,335 | 281,170 | 472,031 | 349,344 | 217 |
| 33/5 | 379,390 | 283,280 | 449,897 | 342,095 | 183 |
| 34/6 | 398,127 | 288,770 | 489,283 | 352,045 | 208 |
| 35/7 | 333,065 | 281,250 | 474,179 | 400,765 | 239 |
| min | 333,06 | 281,16 | 449,90 | 342,09 | 183,00 |
| max | 398,13 | 288,77 | 511,94 | 400,76 | 239,00 |
| średnia | 367,88 | 283,29 | 478,92 | 358,54 | 206,67 |
| Rozkład normalny – Normal distribution | | | | | |
| s _x | 21,975 | 2,962 | 20,580 | 21,139 | 20,027 |
| V _x | 0,060 | 0,010 | 0,043 | 0,059 | 0,097 |
| X _{kn} | 319,97 | 276,83 | 434,06 | 312,45 | 163,01 |
| Rozkład logarytmiczno – normalny – Log-normal distribution | | | | | |
| s _v | 0,060 | 0,010 | 0,043 | 0,057 | 0,096 |
| V _v | 5,906 | 5,646 | 6,171 | 5,881 | 5,327 |
| X _{kn} | 322,03 | 276,92 | 435,94 | 316,47 | 167,17 |

1. W zakresie temperatury do 300°C wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie oraz współczynnik sprężystości nie wykazują istotnych spadków a spadek wartości granicy plastyczności nie jest duży.

2. W zakresie od 300°C do 700°C obserwuje się spadek wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności, rosną wartości odkształcenia stali.

Przedmiotowe badania trwają. Biorąc pod uwagę literaturę przedmiotu należy sądzić, że w temperaturze przekraczającej 400°C stal ulega odkształceniu termicznie aktywowanemu, które obejmuje efekty jakościowych i ilościowych zmian spowodowanych wzrostem temperatury. Zmiany ilościowe mają swoje odzwierciedlenie w pogarszających się charakterystykach właściwości mechanicznych; zmiany jakościowe natomiast wynikają ze zjawiska pełzania.

1. In the temperature range up to 300°C the tensile strength, extension and modulus of elasticity do not show significant decreases and the decrease in the value of yield strength is quite small.

2. In the range from 300°C to 700°C a decrease in the value of tensile strength and yield strength is observed and the values of steel extension increase.

The discussed studies are still in progress. Taking into account the literature of the subject, one should believe that at temperatures exceeding 400°C steel is subject to thermally activated deformations that encompass the effects of qualitative and quantitative changes caused by the increased temperature. The quantitative changes are reflected in the deteriorating characteristics of the mechanical properties, while the qualitative changes result from the phenomenon of creep.

Tabela 2. Wyniki obliczeń charakterystycznych parametrów wytrzymałościowych stali S235JR badanej w różnych temperaturach
 Table 2. Sample results of the calculations of characteristic strength parameters of steel S235JR tested at various temperatures

| Temp.[°C] | R _{eH} [MPa] | R _{eL} [MPa] | R _m [MPa] | R _z [MPa] | E _m [GPa] |
|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 20 | 336 | 281 | 441 | 277 | 215 |
| 100 | 346 | 278 | 425 | 276 | 202 |
| 300 | 320 | 277 | 434 | 312 | 163 |
| 500 | 167 | 167 | 305 | 154 | 144 |
| 700 | 86 | 86 | 136 | 20 | 55 |

Literatura • References

1. Kowal Z., Malec M., (1989), *Koncepcja szkieletowej konstrukcji nośnej przystosowanej do transportu masy i ciepła*, XXXV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica '89, Referaty T. 3 „Konstrukcje metalowe”, Wrocław-Krynica, 1989, s. 69-74.
2. Murzewski J., (2000), *Bezpieczeństwo konstrukcji budynków w sytuacji pożaru*, Zeszyty Naukowe, Politechnika Opolska, Budownictwo Z. 44, Nr 260/2000, Opole, 2000, s. 319 – 334.
3. Benedetti A., (2003), *Approximate optimal design of fire resisting beams and columns*, Journal of Constructional Steel Research, 59, 2003, pp. 1251-1266.
4. Huang Z. F., Tan K.H., (2003), *Rankine approach for fire resistance of axially-and-flexurally restrained steel columns*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, No. 12, 2003, pp. 1553 – 1571.
5. Skowroński W., (1989), *Material characteristics in the analysis of heated steel beams*, Fire and Materials an International Journal, Vol. 14, No. 3, 1989, pp. 107 - 116.
6. Skowroński W., (1997), *Plastic load capacity and stability of frames in fire*, Engineering Structures, Vol. 19, No. 9, 1997, pp. 764 – 771.