

WOJCIECH SKOWROŃSKI¹
AGATA WŁÓKA²
RAFAŁ CHMIEL³

Wrocław University of Environmental and Life Sciences
The Faculty of Environmental Engineering and Geodesy

¹e-mail: wojciech.skowronski@up.wroc.pl,

²e-mail: agata.solecka@up.wroc.pl,

³e-mail: rafal.chmiel0@gmail.com

MODELLING OF STRENGTH PROCESSES OF S235JR STEEL AT INCREASED TEMPERATURE

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.

Keywords: steel, structures, building, fire, elevated temperature

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 [1, 2, 4, 5] 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 [8-10]. The main way of determination of steel properties both at room temperature and at elevated temperatures is static tensile testing [3, 6, 7].

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. The test site is presented in Figure 2.

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.



Fig. 1. Furnace for high-temperature testing.

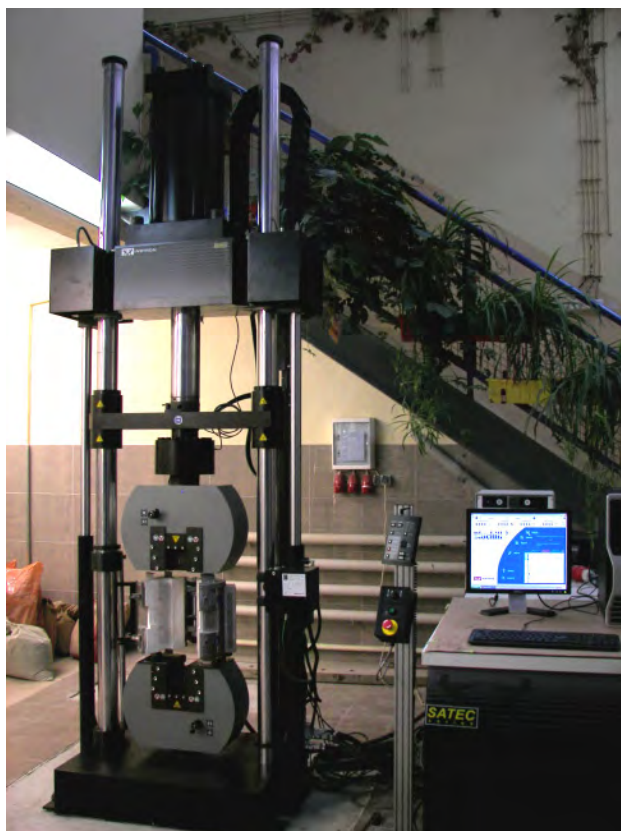


Fig. 2. The test site

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 Figure 3.

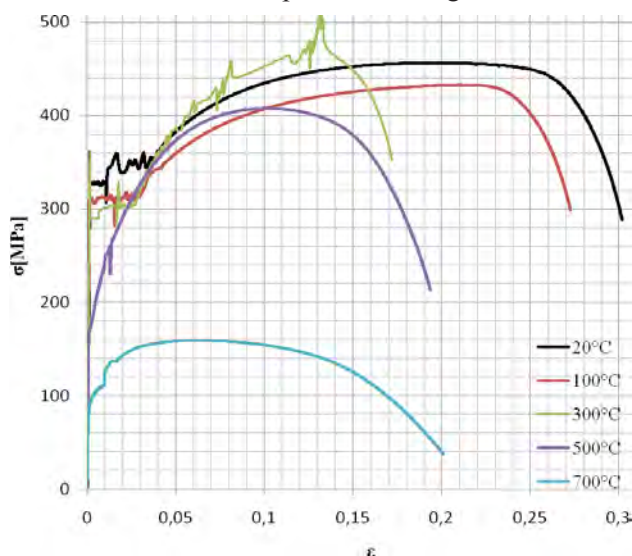


Fig. 3. Sample measurement curves of S235JR steel at various temperatures

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:

$$X_k = m_x(1 - k_n V_x) \tag{1}$$

Where:

– coefficient of variation:

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

– standard deviation:

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

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

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

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 – mean of the n sample results,
 k_n – characteristic fractile factor,
 x_i – values of individual results obtained during the analysis of the selected value,
 n – number of tested samples.

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

The PN-EN 1993-1-2: 2005 standard foresees the necessity to reduce specific mechanical properties of steel with use of reducing coefficient $k_{i,\theta}$. For verification purposes, the authors decided to compare the reducing coefficients presented in the EC3 standard with the dependencies obtained basing on conducted laboratory tests (Table 3).

The first comparison (Fig. 4) compares the diagram representing the determined $E_T/E_{20^\circ C}$ ratio to the diagram of the course of the reducing coefficient $k_{E,\theta}$. The courses of both diagrams are very similar.

Differences between the courses of both diagrams do not exceed the deviation of 4% – 5%.

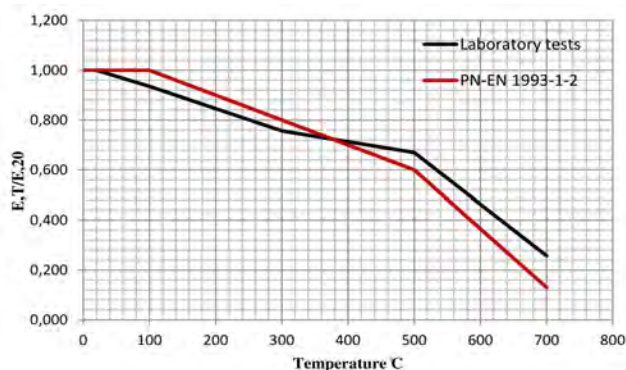


Fig. 4. Comparison $E_T / E_{T,20}$ with the recommended reducing coefficients $k_{E,0}$

The second comparison (Fig. 5) compares the diagram representing the determined $R_{e,H} / R_{e,H,20}$ ratio to the diagram of the course of the reducing

coefficient $k_{y,0}$. Up to 300°C the diagrams are quite similar. Significant differences requiring verification occur above 300°C, where the results obtained during the tests presented herein show that a higher reduction of strength values than recommended by Eurocode is required. It should be added that after heating the steel to the temperature of 400°C rheological effects are very likely to occur – time-dependant effects (creeping of steel). In general, these effects result from the physical non-linearity of steel at increased temperature.

Due to that, it should be added that the Eurocode points out the issue of irregularity several times, e.g. at point 5.1.4 EN-1990: “The models of mechanical behaviour of structural members at elevated temperatures should be non-linear”. The introduction of non-linear issues makes the problem of fire safety assessment much more complicated but at the same time the results of analysis become more objective.

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

No of sample	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
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
Log-normal distribution					
s_y	0.060	0.010	0.043	0.057	0.096
V_y	5.906	5.646	6.171	5.881	5.327
X_{kn}	322.03	276.92	435.94	316.47	167.17

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

Table 3. Ratios of steel properties in increased temperature (in relation to room temperature)

Temp. [°C]	R _e [MPa]	E _m [GPa]	Test results		Regulations of PN-EN 1993-1-2	
			R _{e,T} /R _{e,20°C}	E _T /E _{20°C}	R _{e,T} /R _{e,20°C}	E _T /E _{20°C}
20	336	215	1.000	1.000	1.000	1.000
100	346	202	1.031	0.935	1.000	1.000
300	320	163	0.952	0.756	1.000	0.800
500	167	144	0.497	0.670	0.780	0.600
700	86	55	0.256	0.257	0.230	0.130

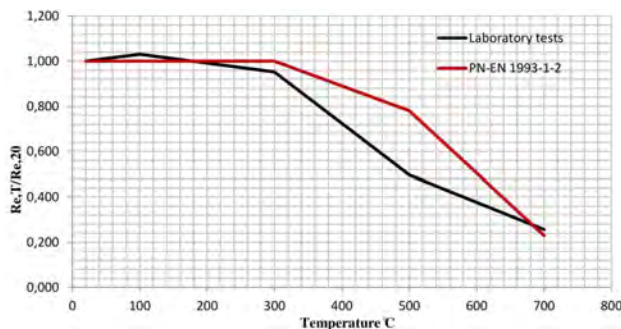


Fig. 5. Comparison of R_{e,H}/R_{e,H,20°C} with the recommended reducing coefficients k_{y,θ}.

5. Conclusions

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

1. In the temperature range of 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.

References

[1] Kowal Z., Malec M.: *Koncepcja szkieletowej konstrukcji nośnej przystosowanej do transportu masy i ciepła*, Proc. of XXXV Conf. KILiW PAN i KN PZITB, Krynica’89, Referaty T. 3 „Konstrukcje metalowe”, Wrocław-Krynica, 1989, s. 69–74.
 [2] Benedetti A.: *Approximate optimal design of fire resisting beams and columns*, “Journal of Constructional Steel Research”, 59 (2003), pp. 1251–1266.

[3] Chen J., Young B.: *Stress strain curves of stainless steel at elevated temperatures*. “Engineering Structures”, Vol. 28 (2006), pp. 229–239.
 [4] Huang Z.F., Tan K.H.: *Rankine approach for fire resistance of axially-and-flexurally restrained steel columns*, “Journal of Constructional Steel Research”, Vol. 59, 12 (2003), pp. 1553–1571.
 [5] Murzewski J.: *Bezpieczeństwo konstrukcji budynków w sytuacji pożaru*, Zeszyty Naukowe, Politechnika Opolska, Budownictwo z. 44, 260 (2000), Opole, 2000, s. 319–334.
 [6] Outinen J.: *Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down*. Fire and Materials Conference, San Francisco, USA, InterscienceCommunications Limited UK, 2006.
 [7] Skowroński W.: *Material characteristics in the analysis of heated steel beams*, “Fire and Materials an International Journal”, Vol. 14, 3 (1989), pp. 107-116.
 [8] Skowroński W.: *Plastic load capacity and stability of frames in fire*, Engineering Structures, Vol. 19, 9 (1997), pp. 764–771.
 [9] Torić N., Peroš B., Boko I.: *Reliability of steel structures under fire conditions*, Proc. of 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. 11–16 April 2010, Leeds, UK.
 [10] Yang K.C., Lee H.H.: *Experimental study on ultimate strength of steel columns under fire load*, Proc. of 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 17–20 March 2004, Daegu, Korea, pp. 354–361.

Wojciech Skowroński
Agata Włóka
Rafał Chmiel

Modelowanie procesów wytrzymałościowych stali S235JR w podwyższonej temperaturze

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 [1, 2, 4, 5] 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 [8-10]. Podstawowym sposobem określenia właściwości stali, zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturze podwyższonej jest statyczna próba rozciągania [3, 6, 7].

2. Metodyka badań

Statyczne próby rozciągania stali 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 temperaturze podwyższonej. Stanowisko badawcze pokazano na rysunku 2.

Badania laboratoryjne stali S235JR w podwyższonej temperaturze przeprowadzone zostały na próbkach wykonanych ze zwykłej stali konstrukcyjnej typu S235JR (na próbkach przygotowanych zgodnie z wytycznymi podanymi w normach PN-EN ISO 6892-1:2009 oraz PN-EN ISO 6892-2:2011). Bada-

nia zostały przeprowadzone w temperaturze: 20, 100, 300, 500, 700°C. W każdej z temperatur wykonano badania na seriach próbek o liczebności 6 sztuk.

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 rysunku 3.

4. Analiza wyników badań

Analizę statystyczną wyników badań laboratoryjnych przeprowadzono zgodnie z załącznikiem D „Projektowanie wspomaganie badaniami” do Eurokodu PN – EN 1990. Wartości charakterystyczne badanych wielkości (wytrzymałość, granica plastyczności itp.) – przy założeniu normalnego rozkładu wyników – wyznaczono z zależności (1).

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

Norma PN-EN 1993-1-2: 2005 zakłada konieczność redukcji poszczególnych właściwości mechanicznych stali, przy użyciu współczynników redukcyjnych $k_{i,0}$. Postanowiono, w celu weryfikacji, porównać współczynniki redukcyjne wykazane w normie EC3 z zależnościami otrzymanymi na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych (tab. 3).

W pierwszej kolejności (rys. 4) wykreślono wykres odpowiadający wyznaczonemu stosunkowi $E_T/E_{20^\circ\text{C}}$ oraz wykres przebiegu redukcyjnego współczynnika $k_{E,0}$. Kształt przebiegu obu wykresów jest bardzo zbliżony. Różnice występujące w przebiegu obu wykresów nie przekraczają odchylenia 4% - 5%.

W drugiej kolejności (rys. 5) wykreślono wykres stosunku $R_{e,H}/R_{e,H,20^\circ\text{C}}$ oraz wykres przebiegu redukcyjnego współczynnika $k_{y,0}$. Do 300°C wykresy kreują się podobnie. Znaczące różnice wymagające wery-

fikacji pojawiają się powyżej 300°C, gdzie otrzymane podczas przedstawionych tu badań wyniki wskazują na potrzebę większej redukcji wartości wytrzymałości, aniżeli zaleca Eurokod. Dodać należy, że po ogrzaniu stali do temperatury 400°C bardzo prawdopodobne jest pojawianie się efektów reologicznych – efektów zależnych od czasu (pełzania stali). Generalnie rzecz biorąc są to efekty fizycznej nieliniowości stali w podwyższonej temperaturze.

W związku z tym dodać należy, że w wielu miejscach Eurokodu zwraca się uwagę na nieliniowość zagadnienia – np. w punkcie 5.1.4. EN-1990 podano: „Zaleca się, aby modele mechanicznego zachowania się konstrukcji w warunkach pożaru były nieliniowe”. Wprowadzenie zagadnień nieliniowych znacznie komplikuje problem oceny bezpieczeństwa pożarowego, ale czyni wyniki analizy bardziej obiektywnymi.

5. Wnioski

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

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.