

4. TEMPERATURE IN STEEL SECTIONS

If the same profile is fire protected with gypsum board encasement with a thickness of $d_p = 15$ mm, the temperature development is shown in Fig. 4.18.

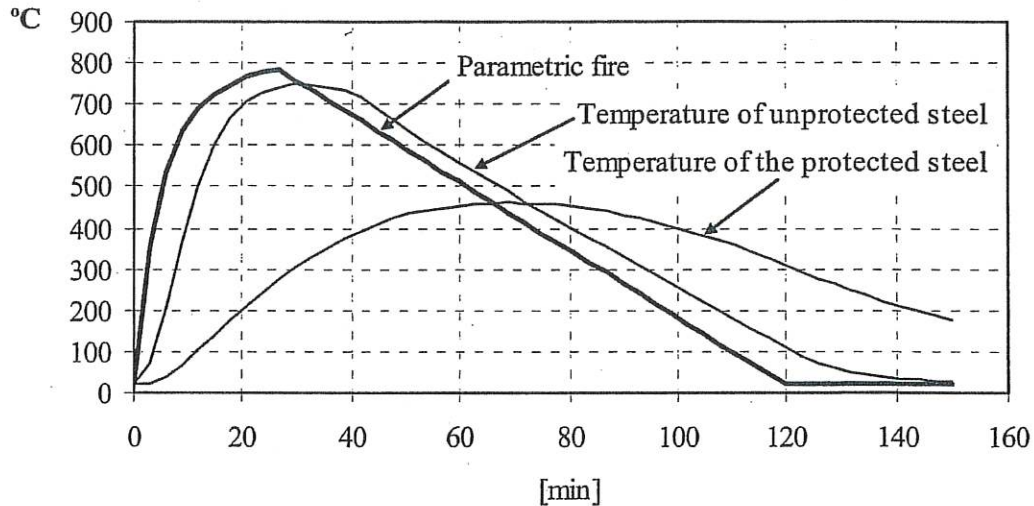


Fig. 4.18: Temperature of a HE 220 A heated by the parametric fire of example 3.3

Example 4.1: What is the temperature of an unprotected rectangular bar with a cross section of 200×50 mm² after 30 minutes of standard fire exposure on four sides?

The section factor of this convex section takes the value:

70

$$A_m/V = \frac{2 \times (b+t)}{b \times t} = \frac{2 \times (0.2 + 0.05)}{0.2 \times 0.05} = 50 \text{ m}^{-1}$$

As the section is convex, $k_{sh} = 1$, and the modified section factor is

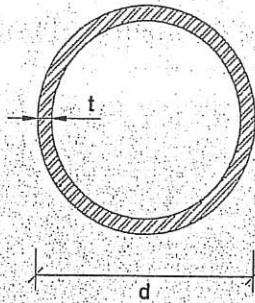
$$k_{sh}[A_m/V] = 1.0 \cdot 50 = 50 \text{ m}^{-1}$$

With this section factor and by interpolation in Table A.4, a temperature of 678.5 °C is obtained.

If Eq. (4.19) is used with the program Elefir-EN, a value of the temperature of 690 °C is obtained.

Example 4.2: What is the temperature of an unprotected circular hollow section with a diameter of $d = 220$ mm and a thickness of $t = 5$ mm after 60 minutes of standard fire exposure?

4.6. TEMPERATURE OF PROTECTED STEELWORK EXPOSED TO FIRE



The external perimeter is

$$P = \pi \cdot d = 691.15 \text{ mm}$$

The area of the cross section is

$$A = \frac{\pi}{4} [d^2 - (d - 2t)^2] = 3377.21 \text{ mm}^2$$

The section factor is

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P}{A} = 0.2047 \text{ mm}^{-1} = 204.7 \text{ m}^{-1}$$

According to Annex A.2, the section factor is given by:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P}{A} = \frac{d}{(d - t)t} \approx \frac{1}{t} = 200 \text{ m}^{-1}$$

71

As the section is convex, $k_{sh} = 1$, and the modified section factor, using the later value of the section factor, is

$$k_{sh} [A_m / V] = 200 \text{ m}^{-1}$$

Table A.4 from Annex A gives the temperature of 942 °C.

Example 4.3: What is the temperature of an unprotected HE 200 A profile after 30 minutes of standard fire exposure on four sides?

The section factor for an HE 200 A is:

$$A_m / V = 211 \text{ m}^{-1}$$

4. TEMPERATURE IN STEEL SECTIONS

The HE 200 A has the following geometric characteristics:

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 190 \text{ mm}$$

$$A = 53.83 \text{ cm}^2$$

and the box value of the section factor $[A_m/V]_b$ takes the value

$$[A_m/V]_b = \frac{2 \times (b + h)}{A} = \frac{2 \times (0.2 + 0.19)}{53.83 \times 10^{-4}} = 144.9 \text{ m}^{-1}$$

The shadow factor, k_{sh} is given by:

$$k_{sh} = 0.9[A_m/V]_b / [A_m/V] = 0.9 \cdot 144.9 / 211 = 0.618$$

Taking into account the shadow effect, the modified section factor has the value

$$k_{sh}[A_m/V] = 0.618 \cdot 211 = 130.4 \text{ m}^{-1}$$

This value should be obtained without evaluating k_{sh} , using Eq. (4.18a):

$$k_{sh}[A_m/V] = 0.9[A_m/V]_b = 0.9 \cdot 144.9 = 130.4 \text{ m}^{-1}$$

Interpolating in Table A.4 yields a temperature of 786 °C.

If Eq. (4.16) is used, a temperature of 802 °C is obtained.

Example 4.4: What is the thickness of fibre-cement board encasement for a IPE 300 heated on three sides to be classified as R90 if the critical temperature is 654 °C?

The following thermal properties of the fibre-cement are defined in Annex A.6:

$$\lambda_p = 0.15 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

$$c_p = 1200 \text{ J/(kgK)}$$

$$\rho_p = 800 \text{ kg/m}^3$$

The massivity factor for the IPE 300 with hollow encasement heated on three sides is:

In Table 5.8 the meaning of the symbols are as follows:

- $k_{E,\theta}$ Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range
- $k_{0.2p,\theta}$ Reduction factor (relative to f_y) for proof strength
- $k_{u,\theta}$ Reduction factor (relative to f_u) for tensile strength
- $k_{2\%,\theta}$ Factor for determination of the yield strength $f_{y,\theta}$
- $k_{y,\theta}$ Reduction factor (relative to f_y) for “effective” yield strength

5.8. DESIGN EXAMPLES

In this section, several design examples, covering most of the possible load cases, are presented, with full details. The default value of 1.0 proposed in Eurocode has been adopted for the partial safety factors γ_{M0} and $\gamma_{M,fi}$.

Example 5.1: Member in tension

Consider a HE 200 A profile in S275 grade steel that was designed at normal temperature for an axial tension load $N_{Ed} = 1200$ kN. The unprotected member is heated on all four sides and is part of an office building with a required fire resistance time to the standard fire of $t_{req} = 30$ minutes (R30).

Verify the fire resistance of the member:

- a) in the temperature domain;
- b) in the time domain;
- c) in the resistance domain.

Solution:

The cross-sectional area of an HE 200 A is $A = 5380$ mm². The temperature in the section exposed on 4 sides after 30 min of standard fire ISO 834 exposure is 802 °C (see example 4.3).

Assuming a reduction factor for the load in a fire situation of, $\eta_{fi} = 0.65$, the axial load in fire situation is given by

$$N_{fi,Ed} = \eta_{fi} N_{Ed} = 0.65 \times 1200 = 780 \text{ kN.}$$

a) Verification in the temperature domain

5. MECHANICAL ANALYSIS

The degree of utilisation takes the value:

$$\mu_0 = \frac{E_{f,d}}{R_{f,d,0}} = \frac{N_{f,Ed}}{A f_y / \gamma_{M,f}} = \frac{780000}{5380 \cdot 275 / 1.0} = 0.572$$

Using Eq. (5.85), the value of the critical temperature is:

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 = 576.1^\circ\text{C}$$

After 30 minutes of standard fire ISO 834 exposure, the temperature is

$$\theta_d = 802^\circ\text{C}$$

This temperature is greater than the critical temperature and so the member doesn't fulfil the fire resistance criterion R30.

b) Verification in the time domain

The time needed to reach the critical temperature can be obtained by double interpolation of the values given in Table A.4 for a modified section factor

$$k_{sh}[A_m/V] = 0.618 \cdot 211 = 130.4 \text{ m}^{-1}$$

It is found that the critical temperature is reached at

$$t_{f,d} = 14.08 \text{ min}$$

leading to the conclusion that the member is not safe.

c) Verification in the resistance domain

After 30 minutes of standard fire exposure, the temperature is $\theta_d = 802^\circ\text{C}$.

Interpolating for this temperature in Table 5.2 leads to the reduction factor for the yield strength of

$$k_{y,\theta} = 0.109$$

And the resistance of the member after 30 minutes is

$$N_{f,Rd} = A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,f} = 5380 \cdot 0.109 \cdot 275 \times 10^{-3} / 1.0 = 161.2 \text{ kN}$$

which is less than the applied load in fire situation, $N_{f,Ed} = 780 \text{ kN}$.

**A.4. TABLES AND NOMOGRAMS FOR EVALUATING THE TEMP. IN UNPROTECTED STEEL
MEMBERS SUBJECTED TO THE STANDARD FIRE CURVE ISO 834**

**A.4. TABLES AND NOMOGRAMS FOR EVALUATING THE
TEMPERATURE IN UNPROTECTED STEEL MEMBERS
SUBJECTED TO THE STANDARD FIRE CURVE ISO 834**

Temperature of unprotected steel in °C, exposed to the ISO 834 fire curve

for different values of $k_{sh} \frac{A_m}{V}$, [m⁻¹]

Time [min.]	10 m ⁻¹	15 m ⁻¹	20 m ⁻¹	25 m ⁻¹	30 m ⁻¹	40 m ⁻¹	60 m ⁻¹	100 m ⁻¹	200 m ⁻¹	300 m ⁻¹	400 m ⁻¹
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
1	21	22	23	24	24	26	29	34	48	61	73
2	25	27	29	31	33	38	46	62	100	133	162
3	29	33	37	41	45	53	68	97	161	214	259
4	33	40	46	52	59	71	94	136	226	296	351
5	39	48	57	65	74	90	122	178	291	373	430
6	45	57	68	79	90	111	151	221	354	441	494
7	51	66	80	94	108	133	181	265	413	498	545
8	58	76	93	110	126	156	213	308	466	545	584
9	65	86	106	126	144	180	245	351	512	583	615
10	73	97	120	142	164	204	277	392	552	614	640
11	80	108	134	159	183	229	309	432	587	640	660
12	88	119	149	177	204	253	340	469	616	662	678
13	97	131	164	195	224	278	372	503	641	680	693
14	105	143	179	213	244	303	402	535	663	695	705
15	114	155	194	231	265	328	432	565	682	708	716
16	122	167	210	249	286	353	460	591	697	718	725
17	131	180	225	268	307	377	487	615	710	727	732
18	140	193	241	286	328	401	513	638	721	733	736
19	150	206	257	305	348	425	538	658	729	737	743
20	159	218	273	323	369	448	561	676	734	743	754
21	168	232	289	342	389	470	583	692	738	754	767
22	178	245	305	360	409	491	604	706	744	767	780
23	188	258	321	378	429	512	623	717	754	780	790

A. THERMAL DATA FOR CARBON AND STAINLESS STEEL SECTIONS

Temperature of unprotected steel in °C, exposed to the ISO 834 fire curve

for different values of $k_{sh} \frac{A_m}{V}$, [m⁻¹] (continued)

Time [min.]	10 m ⁻¹	15 m ⁻¹	20 m ⁻¹	25 m ⁻¹	30 m ⁻¹	40 m ⁻¹	60 m ⁻¹	100 m ⁻¹	200 m ⁻¹	300 m ⁻¹	400 m ⁻¹
24	197	271	337	396	448	532	641	726	767	791	799
25	207	284	353	414	467	552	658	732	780	801	807
26	217	298	369	432	485	570	674	735	792	809	813
27	227	311	385	449	503	588	688	739	803	816	820
28	237	324	401	466	521	604	701	746	813	823	826
29	247	338	416	482	538	621	712	756	821	829	831
30	257	351	431	498	554	636	721	767	828	835	837
31	267	364	446	514	570	651	728	780	835	840	842
32	277	377	461	530	585	665	733	793	841	845	847
33	288	391	476	545	600	678	736	805	846	850	852
34	298	404	490	559	614	690	740	816	851	855	856
35	308	416	504	574	628	701	745	827	856	860	861
36	318	429	518	587	641	711	753	836	861	864	865
37	329	442	532	601	654	719	763	844	866	868	870
38	339	454	545	614	666	726	774	852	870	873	874
39	349	467	558	626	677	731	786	859	874	877	878
40	359	479	570	638	688	734	798	865	878	881	882
41	369	491	582	650	698	737	810	871	882	884	885
42	379	503	594	661	707	740	822	876	886	888	889
43	389	514	606	672	716	746	832	881	890	892	893
44	399	526	617	683	722	752	842	885	893	895	896
45	409	537	628	692	728	761	852	889	897	899	900
46	419	548	639	701	732	771	860	894	900	902	903
47	429	559	650	709	735	781	868	897	904	906	906
48	439	570	660	717	737	792	875	901	907	909	910
49	449	580	670	723	740	803	882	905	910	912	913
50	458	590	679	728	744	814	888	908	914	915	916

**A.4. TABLES AND NOMOGRAMS FOR EVALUATING THE TEMP. IN UNPROTECTED STEEL
MEMBERS SUBJECTED TO THE STANDARD FIRE CURVE ISO 834**

Temperature of unprotected steel in °C, exposed to the ISO 834 fire curve
for different values of $k_{sh} \frac{A_m}{V}$, [m⁻¹] (continued)

Time [min.]	10 m ⁻¹	15 m ⁻¹	20 m ⁻¹	25 m ⁻¹	30 m ⁻¹	40 m ⁻¹	60 m ⁻¹	100 m ⁻¹	200 m ⁻¹	300 m ⁻¹	400 m ⁻¹
51	468	600	688	732	750	825	894	911	917	918	919
52	477	610	697	734	757	835	899	915	920	921	922
53	487	620	704	736	765	845	904	918	923	924	925
54	496	629	711	739	774	854	908	921	926	927	928
55	505	638	718	743	784	863	913	924	928	930	930
56	514	648	723	747	794	872	917	927	931	932	933
57	523	656	728	753	804	880	920	930	934	935	936
58	532	665	731	760	814	887	924	933	937	938	938
59	541	673	734	768	825	894	927	935	939	940	941
60	549	681	736	777	834	901	931	938	942	943	944
61	558	689	738	786	844	907	934	941	944	946	946
62	566	696	741	796	853	912	937	943	947	948	949
63	574	703	744	805	862	917	940	946	949	950	951
64	583	709	749	815	871	922	942	948	952	953	953
65	591	715	755	824	879	927	945	951	954	955	956
66	598	720	761	834	887	931	948	953	957	958	958
67	606	725	769	843	894	935	950	956	959	960	960
68	614	728	776	852	901	939	953	958	961	962	963
69	622	731	785	861	907	943	955	960	963	964	965
70	629	734	793	869	914	946	958	963	966	967	967
71	636	735	802	877	919	949	960	965	968	969	969
72	644	737	811	885	925	953	963	967	970	971	971
73	651	739	820	893	930	956	965	969	972	973	973
74	658	742	829	900	935	958	967	971	974	975	975
75	665	745	837	906	939	961	969	973	976	977	977
76	671	750	846	913	944	964	972	975	978	979	979
77	678	755	855	919	948	966	974	978	980	981	981
78	684	760	863	925	952	969	976	980	982	983	983

A. THERMAL DATA FOR CARBON AND STAINLESS STEEL SECTIONS

Temperature of unprotected steel in °C, exposed to the ISO 834 fire curve

for different values of $k_{sh} \frac{A_m}{V}$, [m⁻¹] (continued)

Time [min.]	10 m ⁻¹	15 m ⁻¹	20 m ⁻¹	25 m ⁻¹	30 m ⁻¹	40 m ⁻¹	60 m ⁻¹	100 m ⁻¹	200 m ⁻¹	300 m ⁻¹	400 m ⁻¹
79	690	767	871	930	955	971	978	982	984	985	985
80	696	773	879	935	959	974	980	984	986	987	987
81	702	780	886	940	962	976	982	985	988	989	989
82	707	788	893	945	966	978	984	987	990	991	991
83	712	795	900	949	969	980	986	989	992	992	993
84	716	803	907	954	972	983	988	991	993	994	995
85	720	811	914	958	974	985	990	993	995	996	996
86	724	819	920	961	977	987	992	995	997	998	998
87	727	827	926	965	980	989	993	997	999	1000	1000
88	730	835	931	969	982	991	995	998	1001	1001	1002
89	732	843	937	972	985	993	997	1000	1002	1003	1003
90	734	851	942	975	987	995	999	1002	1004	1005	1005

5. MECHANICAL ANALYSIS

Table 5.2: Reduction factors for carbon steel for the design at elevated temperatures

Steel Temperature θ_a	Reduction factors at temperature θ_a relative to the value of f_y or E_a at 20°C			
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$	Reduction factor (relative to f_y) for the design strength of hot rolled and welded thin walled sections (Class 4) $k_{0.2p,\theta} = f_{0.2p,\theta} / f_y$
20 °C	1.000	1.000	1.000	1.000
100 °C	1.000	1.000	1.000	1.000
200 °C	1.000	0.807	0.900	0.890
300 °C	1.000	0.613	0.800	0.780
400 °C	1.000	0.420	0.700	0.650
500 °C	0.780	0.360	0.600	0.530
600 °C	0.470	0.180	0.310	0.300
700 °C	0.230	0.075	0.130	0.130
800 °C	0.110	0.050	0.090	0.070
900 °C	0.060	0.0375	0.0675	0.050
1000 °C	0.040	0.0250	0.0450	0.030
1100 °C	0.020	0.0125	0.0225	0.020
1200 °C	0.000	0.0000	0.0000	0.000

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

108

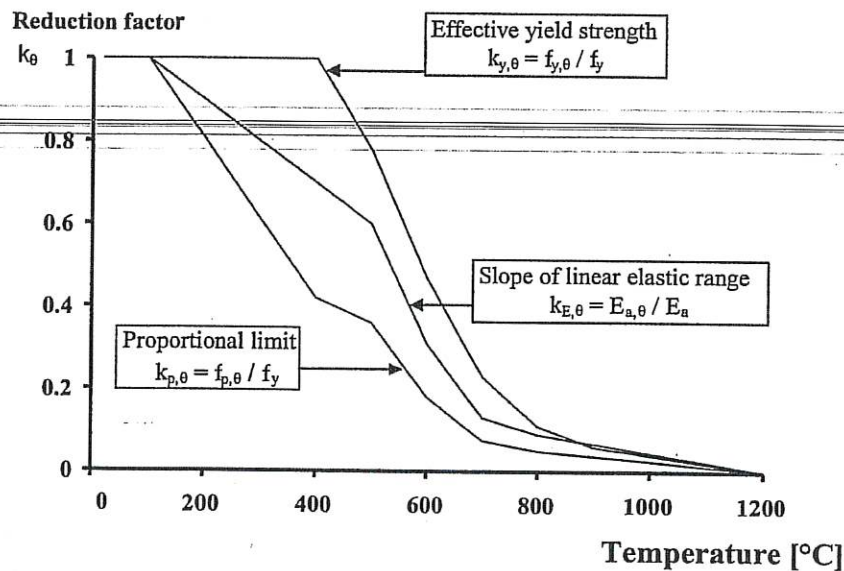


Fig. 5.6: Reduction factors for the stress-strain relationship of carbon steel at elevated temperatures (see Fig. 3.2 from EN 1993-1-2)

4.5. TEMPERATURE OF UNPROTECTED STEELWORK EXPOSED TO FIRE

shadow effect may be determined from:

$$k_{sh} = 0.9[A_m/V]_b/[A_m/V] \quad (4.17a)$$

where

$[A_m/V]_b$ - is the box value of the section factor. The box value of the section factor of a steel section is defined as the ratio between the exposed surface area of a notional bounding box to the section and the volume of steel, as shown in Table 4.5, $[m^{-1}]$.

In all other cases, the value of k_{sh} shall be taken as:

$$k_{sh} = [A_m/V]_b/[A_m/V] \quad (4.17b)$$

Ignoring the shadow effect (i.e., $k_{sh}=1$) leads to conservative solutions.

Instead of using the modified section factor, $k_{sh}[A_m/V]$, in Eq. (4.16), one can use

$$k_{sh}[A_m/V] = 0.9[A_m/V]_b \quad (4.18a)$$

if the correction factor for the shadow effect is given by Eq. (4.17a) or

$$k_{sh}[A_m/V] = [A_m/V]_b \quad (4.18b)$$

if the correction factor for the shadow effect is given by Eq. (4.17b).

In both cases only the box value of the section factor, $[A_m/V]_b$, is needed.

Annex E presents tables (Vila Real *et al.*, 2009a) with values of the section factor for unprotected (A_m/V) and protected (A_p/V) I and H European hot rolled steel profiles as well as values of the modified section factor ($k_{sh}A_m/V$) including the correction factor for the shadow effect (k_{sh}) in accordance with EN 1993-1-2.

An iterative procedure must be used to solve the simplified heat conduction equation (4.16) because the specific heat c_a and the net heat flux $\dot{h}_{net,d}$ are both temperature dependent.

1.2. Przeznaczenie i zakres stosowania

Poradnik dotyczy zasad projektowania elementów konstrukcji stalowych z uwagi na wymagania odporności ogniowej. Poradnik może być także pomocny przy ocenie odporności ogniowej konstrukcji w fazie ich odbioru i eksploatacji. Podstawę do opracowania poradnika stanowiły normy PN-EN 1993-1-2 [23], PN-EN 1991-1-2 [19], PN-EN 13381-4 [34, 35], PN-EN 13381-8 [36] i inne.

Poradnik jest przeznaczony dla projektantów i wykonawców konstrukcji budowlanych oraz rzeczoznawców budowlanych i do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych, a także dla osób i instytucji zajmujących się odbiorem i utrzymaniem właściwości użytkowych budynków.

Opracowanie dotyczy elementów stalowych projektowanych z uwzględnieniem oddziaływania wyjątkowego pożaru standardowego, określonego normą PN-EN 1991-1-2 [19].

Jego zakres obejmuje elementy konstrukcji stalowych ujęte w normie [23], zaprojektowane i skonstruowane zgodnie z PN-EN 1993-1-1 [22] oraz normami zawierającymi reguły uzupełniające do wyżej wymienionej, tj. PN-EN 1993-1-3 [24] (kształtowniki i blachy profilowane na zimno), PN-EN 1993-1-4 [25] (konstrukcje ze stali nierdzewnych), PN-EN 1993-1-5 [26] (blachownice), PN-EN 1993-1-8 [27] (węzły), PN-EN 1993-1-11 [28] (konstrukcje cięgnowe).

1.3. Powołania normatywne

Norma PN-EN 1993-1-2 [23] przywołuje inne normy związane zawsze w formie niedatowanej. W związku z tym niniejszy poradnik oparto o najnowsze wydania norm (wraz z ich zmianami i poprawkami), które również przywołano w formie niedatowanej. W celach informacyjnych w bibliografii zawarto pozycje datowane.

2. PODSTAWY PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI Z UWAGI NA WARUNKI POŻAROWE

2.1. Oddziaływanie termiczne pożaru na konstrukcje

Podstawowe zasady dotyczące oddziaływań termicznych i mechanicznych na konstrukcje w warunkach pożaru oraz kryteriów R, E, I odporności ogniowej (zwanych również, zgodnie z PN-EN 13501-2 [31], charakterystykami skuteczności działania), wynikających z funkcji elementów w budynku, przedstawiono w punkcie 2.2. Właściwości materiałowe najbardziej istotne dla zachowania konstrukcji stalowych w warunkach pożarowych scharakteryzowano w rozdziale 3.

Odporność ogniową określa się przy podstawowych scenariuszach pożaru rozwiniętego, zwanych pożarami nominalnymi, zdefiniowanymi w PN-EN 1991-1-2 [19]. Norma PN-EN 13381-8 [36] definiuje również tzw. krzywą powolnego nagrzewania, mającą zastosowanie przy ocenie skuteczności ogniochronnej aktywnych materiałów ogniochronnych, gdy zachodzi prawdopodobieństwo, iż skuteczność ogniochronna materiału podczas oddziaływania tłącego się pożaru mogłaby być zasadniczo gorsza niż przy nagrzewaniu według krzywej standardowej.

Krzywe temperatury gazu w strefie pożarowej opisują następujące zależności:

– krzywa standardowa (N)
$$\theta_g = 345 \log_{10} (8t + 1) + 20 \quad (1)$$

– krzywa węglowodorowa (H)
$$\theta_g = 1080 \left(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t} \right) + 20 \quad (2)$$

– krzywa „zewnątrzna” (E)
$$\theta_g = 660 \left(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t} \right) + 20 \quad (3)$$

– krzywa „powolnego nagrzewania” (S), przez pierwsze 20 minut
$$\theta_g = 154\sqrt{t} + 20 \quad (4)$$

następnie według zależności:

$$\theta_g = 345 \log_{10} [8(t - 20) + 1] + 20 \quad (5)$$

gdzie:

θ_g – temperatura gazu w strefie pożarowej [°C],

t – czas [min].

Norma PN-EN 1993-1-2 [23] wskazuje, iż przy ocenie nośności ogniowej R konstrukcje stalowe powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby ich funkcja nośna była utrzymana podczas określonego czasu nagrzewania według krzywej standardowej. Kryteria odkształceniowe należy stosować, gdy wymaga się rozpatrzenia deformacji konstrukcji nośnej – np. przy ocenie skuteczności ogniochronnej zabezpieczeń lub projektowaniu elementów oddziaływających.

W odniesieniu do elementów stalowych ocenianych przy nagrzewaniu według krzywej węglowodorowej stosuje się te same kryteria co przy nagrzewaniu według krzywej standardowej, przy czym dla odróżnienia warunków ekspozycji należy stosować oznaczenie HC (np. R 30 HC). Często spotyka się też formę opisową, np. „klasa odporności ogniowej R 30 przy nagrzewaniu według krzywej węglowodorowej”.

2.3. Obciążenia w warunkach pożarowych

Zgodnie z PN-EN 1990 [17] pożar należy traktować jako sytuację wyjątkową, a konstrukcję, wykorzystując następującą kombinację wyjątkową obciążeń:

$$\sum G_{k,j} + (\psi_{1,i} \text{ lub } \psi_{2,i}) Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} + A_d(t) \quad j \geq 1, i \geq 1 \quad (6)$$

gdzie:

- $G_{k,i}$ – wartość charakterystyczna oddziaływań stałych,
- $Q_{k,1}$ – wartość charakterystyczna podstawowego oddziaływania zmiennego,
- $Q_{k,i}$ – wartość charakterystyczna pozostałych oddziaływań zmiennych,
- $A_d(t)$ – wartość obliczeniowa oddziaływań spowodowanych pożarem, tj. oddziaływań pośrednich i dodatkowych,
- ψ_1, ψ_2 – współczynniki do określania wartości reprezentatywnych obciążeń (wartości częste i wartości prawie stałe), które zależą od typu i kategorii obciążenia zmiennego i wynoszą $\psi_1 = 0,2$ do $0,9$ oraz $\psi_2 = 0$ do $0,8$.

Zgodnie z załącznikiem krajowym do PN-EN 1991-1-2 [19] zaleca się przyjmowanie współczynnika kombinacyjnego podstawowego oddziaływania zmiennego $Q_{k,1}$ równego ψ_1 (wartość częsta).

W sytuacji, gdy nie zachodzi konieczność uwzględnienia pośrednich oddziaływań pożaru, norma PN-EN 1991-1-2 [19] dopuszcza uproszczone sposoby określania obciążeń konstrukcji, w których:

- uwzględnia się kombinację obciążeń (6) przy założeniu $t = 0$, tj. oddziaływania traktuje się jako niezmiennie w czasie trwania pożaru,
- efekt oddziaływań w sytuacji pożarowej ustala się według wzoru:

$$E_{d,fi} = \eta_f E_d \quad (7)$$

gdzie:

E_d – wartość obliczeniowa odpowiednich sił wewnętrznych i reakcji w temperaturze normalnej, wyznaczana dla podstawowej kombinacji obciążeń, zgodnie z PN-EN 1990 [17],

η_f – współczynnik redukcyjny dla obliczeniowego obciążenia w przypadku pożaru, którego wartość wynosi:

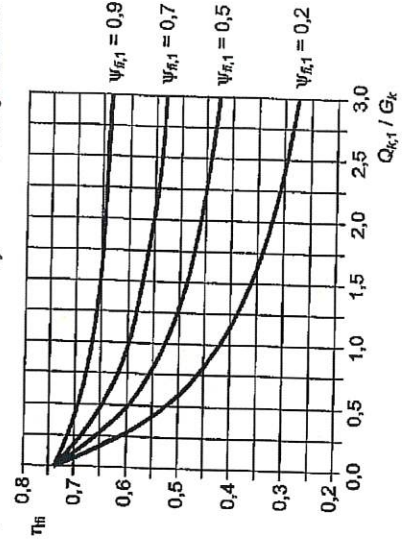
$$\eta_f = \frac{G_k + \psi_f Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}} \quad (8)$$

$$\eta_f = \frac{G_k + \psi_f Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}} \quad (9)$$

$$\eta_f = \frac{G_k + \psi_f Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (10)$$

Wzór (8) stosuje się, jeśli kombinacja podstawowa była wyznaczana według wzoru (6.10) z PN-EN 1990 [17], jeśli zaś wyznaczono ją na podstawie wzorów (6.10a) i (6.10b), zgodnie z zaleceniem załącznika krajowego NB do normy [17], stosuje się wartość mniejszą spośród otrzymanych z wzorów (9) i (10).

Wartość η_f zależy od stosunku podstawowego oddziaływania zmiennego $Q_{k,1}$ do obciążeń stałych G_k , współczynników częstotliwości γ_G i $\gamma_{Q,1}$ dla obciążeń stałych i podstawowego oddziaływania zmiennego przy projektowaniu w temperaturze normalnej oraz od kombinacyjnego współczynnika obciążeń zmiennych ψ_f , który może być przyjmowany jako $\psi_{1,1}$ lub $\psi_{2,1}$ (zgodnie z załącznikiem krajowym do PN-EN 1991-1-2 [19] zaleca się przyjmowanie współczynnika kombinacyjnego $\psi_f = \psi_{1,1}$, tj. w kontekście wartości odniesionej do kombinacji częstej). Przykładowy przebieg zależności $\eta_f(\xi)$, dla kilku wartości ψ_f ukazano na rysunku 2.



Rys. 2. Zmienność współczynnika redukcyjnego obciążeń w warunkach pożarowych

Norma PN-EN 1991-1-2 [19], przy ustalaniu oddziaływań na konstrukcje stalowe w warunkach pożaru, dopuszcza jako bezpieczne przyjmowanie z pominięciem dokładniejszej analizy współczynnika redukcyjnego obciążenia o wartości $\eta_f = 0,65$, z wyjątkiem obciążenia zmiennego należącego do kategorii E według PN-EN 1991-1-1 [18] (powierzchnie wykorzystywane do składowania towarów wraz z miejscami dostępu do tych obszarów), kiedy zaleca się przyjmowanie wartości $\eta_f = 0,70$.

Należy pamiętać, iż współczynniki częściowe γ_G i γ_Q dla obciążeń stałych i zmiennych uzyskują wartości według Eurokodu, tj. $\gamma_G = 1,35$ oraz $\gamma_Q = 1,50$. Wartości współczynników ψ_1 lub ψ_2 podane są w normie PN-EN 1990 [17] (tabl. A.1.1). Wartości te, w zależności od kategorii i sposobu użytkowania obiektu, zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zalecane wartości współczynników ψ_0 , ψ_1 i ψ_2 dla budynków

Oddziaływania	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Obciążenie zmienne w budynkach (patrz PN-EN 1991-1-1 [18])			
Kategoria A: powierzchnie mieszkalne	0,7	0,5	0,3
Kategoria B: powierzchnie biurowe	0,7	0,5	0,3
Kategoria C: miejsca zebrań	0,7	0,7	0,6
Kategoria D: powierzchnie handlowe	0,7	0,7	0,6
Kategoria E: powierzchnie magazynowe	1,0	0,9	0,8
Kategoria F: powierzchnie ruchu pojazdów (pojazdy ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Kategoria G: powierzchnie ruchu pojazdów (30 kN < ciężar pojazdu ≤ 160 kN)	0,7	0,5	0,3
Kategoria H: dachy	0	0	0
Obciążenie budynków śniegiem (patrz PN-EN 1991-1-3 [20])			
Miejscowości położone na wysokości $H > 1000$ m n.p.m.	0,70	0,50	0,20
Miejscowości położone na wysokości $H \leq 1000$ m n.p.m.	0,50	0,20	0
Oddziaływanie wiatrem (patrz PN-EN 1991-1-4 [21])	0,60	0,20	0

Sposób ustalenia wielkości oddziaływań w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej i współczynnika redukcji obciążeń w warunkach pożarowych zilustrowano w przykładzie 1.

PRZYKŁAD 1. OBCIĄŻENIE PŁATWII DACHOWEJ IPE 200 W BUDYNKU O PRZEZNACZENIU HANDLOWYM ($H < 1000$ M)

Zestawienie obciążeń

1. Ciężar własny belki IPE 200 $G_{k,1} = 0,22$ kN/m
2. Ciężar własny konstrukcji dachu $G_{k,2} = 2,10$ kN/m
3. Obciążenie śniegiem $Q_{k,1} = 1,83$ kN/m
4. Oddziaływanie wiatru $Q_{k,2} = 0,39$ kN/m

Uproszczona analiza obciążeń

Współczynnik redukcyjny obciążeń w warunkach pożarowych:

$$\eta_{f,a} = \frac{G_k + \psi_{f,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}} = \frac{2,32 + 0,2 \times 1,83}{1,35 \times 2,32 + 1,50 \times 0,50 \times 1,83} = 0,60$$

$$\eta_{f,b} = \frac{G_k + \psi_{f,2} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} = \frac{2,32 + 0,2 \times 1,83}{0,85 \times 1,35 \times 2,32 + 1,50 \times 1,83} = 0,50$$

$$\eta_f = \eta_{f,b} = 0,50$$

Dokładna analiza obciążeń

Kombinacje podstawowe (warunki normalne):

$$E_{d,a} = \sum \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$E_{d,b} = \sum \xi \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$E_{d,a} = 1,35 \times (0,22 + 2,10) + 1,50 \times 0,50 \times 1,83 + 1,50 \times 0,60 \times 0,39 = 4,86$$

$$E_{d,b} = 1,35 \times 0,85 \times (0,22 + 2,10) + 1,50 \times 1,83 + 1,50 \times 0,60 \times 0,39 = 5,76$$

Obciążenie obliczeniowe w warunkach normalnych wynosi:

$$E_d = E_{d,b} = 5,76 \text{ kN/m}$$

Kombinacje wyjątkowe (warunki pożarowe):

$$E_{d,f} = \sum G_{k,i} + \psi_{f,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{f,i} Q_{k,i}$$

Obciążenie obliczeniowe w warunkach pożarowych:

$$E_{d,f} = 2,32 + 0,20 \times 1,83 + 0,00 \times 0,39 = 2,69 \text{ kN/m}$$

Współczynnik redukcyjny obciążeń w warunkach pożarowych (dokładna analiza obciążeń):

$$\eta_f = \frac{E_{d,f}}{E_d} = \frac{2,69}{5,76} = 0,47$$

Warto zauważyć, iż współczynnik redukcyjny obciążeń w powyższym przykładzie ($\eta_R = 0,47$) jest istotnie niższy od tego, który należałoby przyjąć bez dokonywania analizy obliczeniowej ($\eta_R = 0,65$). Dotyczy to większości projektowanych konstrukcji. W konsekwencji wyznaczona temperatura krytyczna stali będzie wyższa, co pozwoli na łatwiejsze spełnienie kryteriów nośności ogniowej niezabezpieczonych elementów konstrukcji albo dobranie mniejszej grubości izolacji ogniochronnej.

2.4. Obliczeniowe właściwości materiałów

Analiza zachowania i ocena nośności konstrukcji $R_{d,f}$ w warunkach pożarowych wymaga znajomości właściwości termicznych i mechanicznych stali w wysokich temperaturach. Obliczenia mechaniczne i wytrzymałościowe konstrukcji w warunkach pożarowych przeprowadza się dla wartości obliczeniowych właściwości mechanicznych stali, zdefiniowanych następująco:

$$X_{d,f} = \frac{k_{\theta} X_k}{\gamma_{M,f}} \quad (11)$$

gdzie:

- X_k – wartość charakterystyczna właściwości w temperaturze normalnej,
- k_{θ} – współczynnik redukcyjny zależny od temperatury,
- $\gamma_{M,f}$ – częściowy współczynnik bezpieczeństwa w warunkach pożarowych.

Zalecana wartość współczynnika bezpieczeństwa, zarówno dla właściwości mechanicznych, jak i termicznych, wynosi $\gamma_{M,f} = 1,0$. Oznacza to, iż nośność elementów stalowych określa się, wykorzystując wartości charakterystyczne wytrzymałości stali.

3. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW

3.1. Stal węglowa

3.1.1. Właściwości mechaniczne

Do wyznaczania nośności przy rozciąganiu, ściskaniu, zginaniu i ścinaniu stosuje się następujące współczynniki redukcyjne podane w PN-EN 1993-1-2 [23]:

- stosunek efektywnej granicy plastyczności do granicy plastyczności w temperaturze 20°C,

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (12)$$

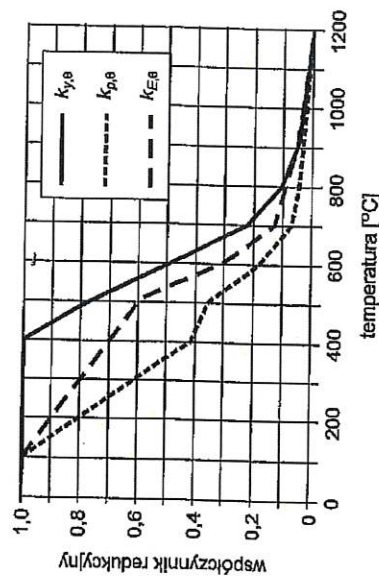
– stosunek granicy proporcjonalności do granicy plastyczności w temperaturze 20°C,

$$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y} \quad (13)$$

– stosunek modułu sprężystości liniowej do modułu sprężystości w temperaturze 20°C.

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \quad (14)$$

Zależności powyższe przedstawiono na rysunku 3 i w tablicy 2. Ponadto na rysunku 4 i w tablicy 3 przedstawiono zależności naprężenie-odkształcenie stali węglowej w podwyższonych temperaturach.



Rys. 3. Współczynniki redukcyjne w zależności naprężenie-odkształcenie stali węglowej w podwyższonych temperaturach