

Konstrukcje metalowe

Wykład VII

Zabezpieczenie antykorozyjne

Zabezpieczenie przeciwpożarowe

Spis treści

Korozja stali → #t / 3

Stal w pożarze → #t / 44

Aluminium → #t / 87

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 95

Korozja stali

Definicja → #t / 4

Proces → #t / 5

Powody → #t / 7

Wygląd → #t / 16

Ochrona → #t / 20

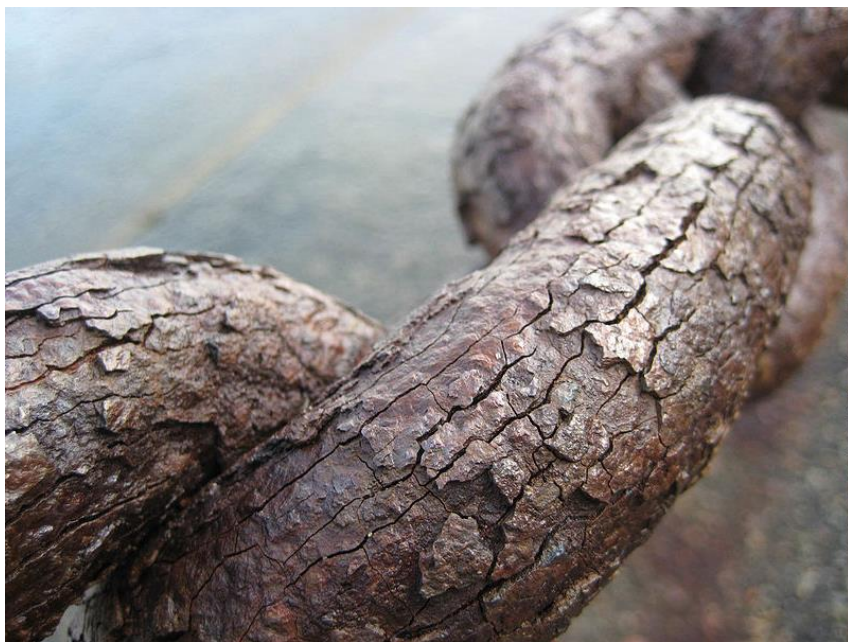
Klasyfikacja środowisk → #t / 32

Stal nierdzewna → #t / 39

Awarie i katastrofy → #t / 41

Korozja – stopniowa destrukcja materiału w skutek reakcji chemicznych (lub fizycznych*) wywołanych przez środowisko.

* Według różnych źródeł erozja jest traktowana jako forma korozji lub odrębny proces



Rys: wikipedia

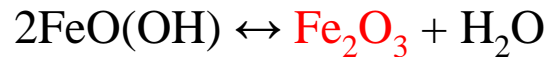
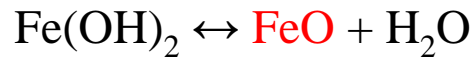
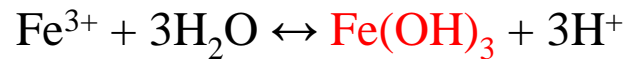
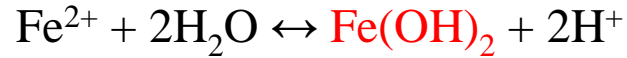
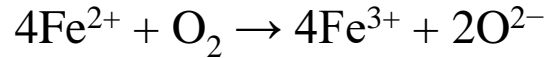
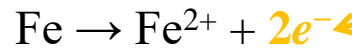
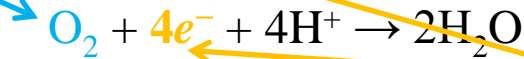


Rys: wikipedia

Korozja – proces chemiczny:

Tlen z powietrza i wody

Zawilgocenie, woda



Rozkład chemiczny wody, elektrolity (zanieczyszczenia chemiczne, brud), woda morska, wpływ wysokiej temperatury, drugorzędne wpływy naprężenia, potencjał bimetaliczny (kontakt dwu różnych metali)

Rys: wikipedia



Rys: wikipedia



Rys: wikipedia



$\text{FeO}(\text{OH})$

Rys: jpimpex.com



Rys: wikipedia

Korozja – powody:

biologiczna

chemiczna

elektrochemiczna (w obecności elektrolitów)

termochemiczna (bez elektrolitów; wysoka temperatura))

fizyczna

korozja naprężeniowa

korozja zmęczeniowa

korozja-erozja

erozja eoliczna*

abrazja*

wpływ niskich temperatur*

* Według różnych źródeł erozja jest traktowana jako forma korozji lub odrębny proces

Biologiczna (grzyby i algi rozwijające się w obecności wilgoci) – konstrukcje drewniane, murowe, betonowe, ale nie metalowe

Rys: obud.pl



Rys: drewno.pl



Rys: tynki.info.pl

Elektrochemiczna

- morze
- deszcz
- zanieczyszczenia chemiczne (przede wszystkich chlorki i siarczany)
- chemikalia w zakładach przemysłowych
- sól drogowa

Narażone są wszystkie rodzaje konstrukcji, najbardziej wrażliwe są betonowe i stalowe.



Rys: korbet.pl

Rys: Autor



Termochemiczna

- wysoka temperatura + tlen (zendra))



Rys: centrevilletrailer.com

Naprężenie, zmęczenie

różne wartości naprężeń w różnych punktach materiału → różny poziom energii wewnętrznej → różnica potencjałów elektrycznych, → ukierunkowany przepływ elektronów → korozja → pękanie



Rys: nitty-gritty.it

Korozja-erozja

- erodowanie osłabionych przez korozję fragmentów konstrukcji (wewnątrz rur z cieciami, w urządzeniach hydrotechnicznych)

Konstrukcje stalowe i betonowe



Rys: drizoro-polska.pl



Rys: amteccorrosion.co.uk

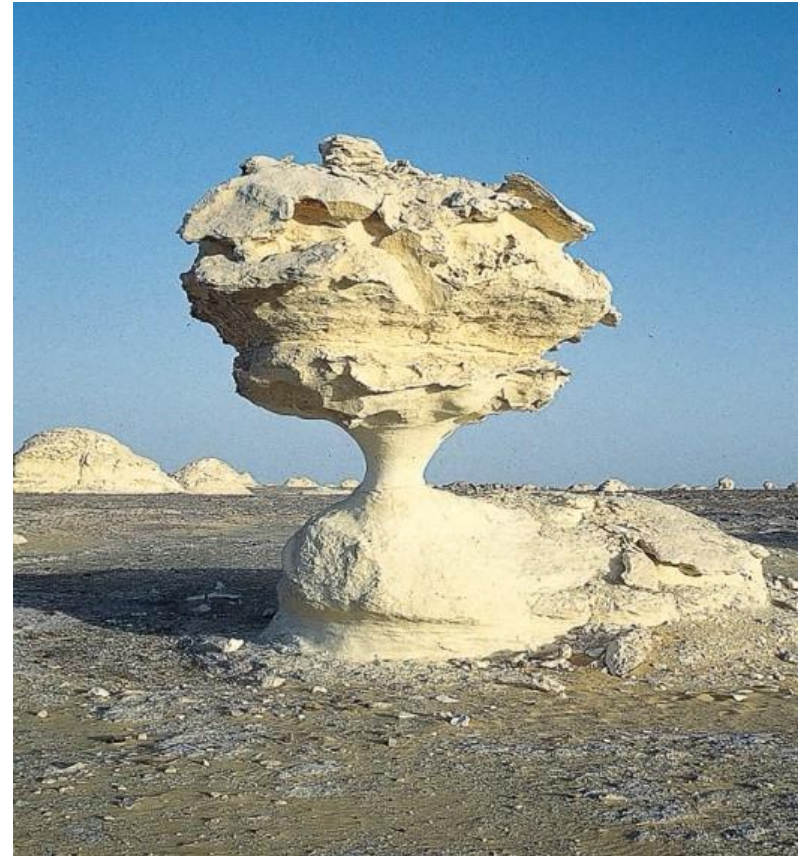
Erozja eoliczna

- ścierane przez wiatr niosący ziarna piasku lub kryształki lodu

Konstrukcje betonowe w warunkach pustynnych lub arktycznych



Rys: wiking.edu.pl



Rys: geomorfologia.w.interiowo.pl

Abrazja

- erozja przez materiał skalny niesiony przez nurt

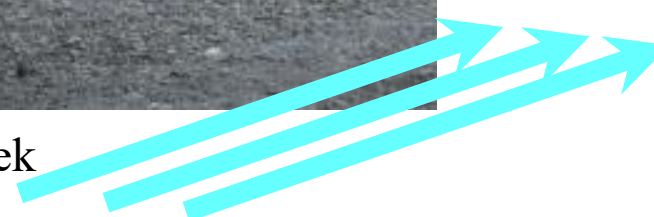
Betonowe konstrukcje hydrotechniczne

Rys: Autor



Atak rumoszu skalnego w czasie powodzi

Położenie i kierunek rzeki



Zniszczenie przez niską temperaturę

- cykliczne zamarzanie i rozmarzanie wody w porach materiału rozsadza jego strukturę

Konstrukcje betonowe i murowe



Rys: Mechanizm powstawania uszkodzeń mrozowych zawilgoconych elementów konstrukcji murowych o kapilarnoporowatej strukturze, Partyka J., Przegląd Budowlany 3 / 2015



Rys: civildigital.com

Korozja (wygląd)

Wygląd skorodowanej powierzchni zależy od warunków użytkowania, rozwiązań technicznych i czynników agresywnych.

Powierzchniowa

Wżerowa

Szczelinowa

Kontaktowa

Selektywna

Międzykrystaliczna

Powierzchniowa



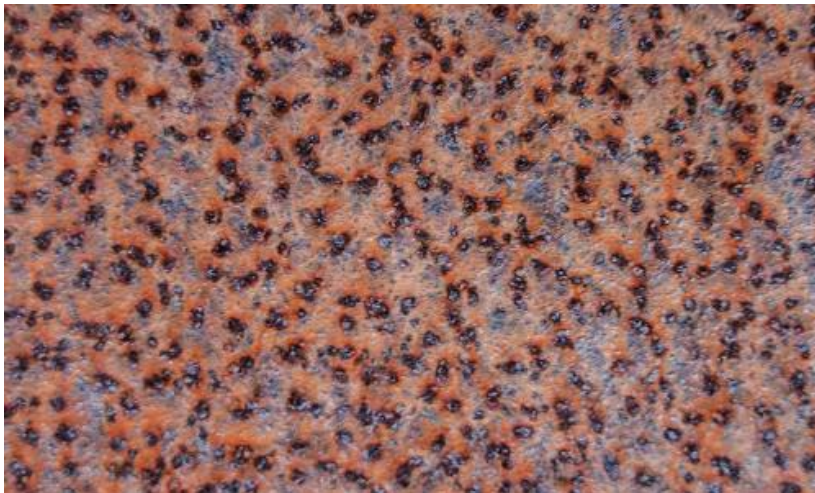
Rys: pg.gda.pl

Mało agresywne środowisko, brak ochrony antykorozyyjnej



Rys: Autor

Głęboka korozyja w miejscach uszkodzenia powłok antykorozyyjnych



Rys: Autor

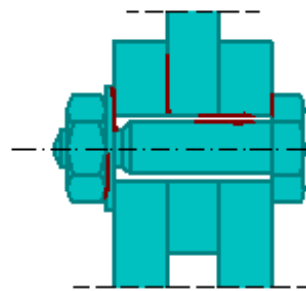
Wżerowa

Rys: efficientplantmag.com

Szczelinowa

Rys: epg.science.cmu.ac.th

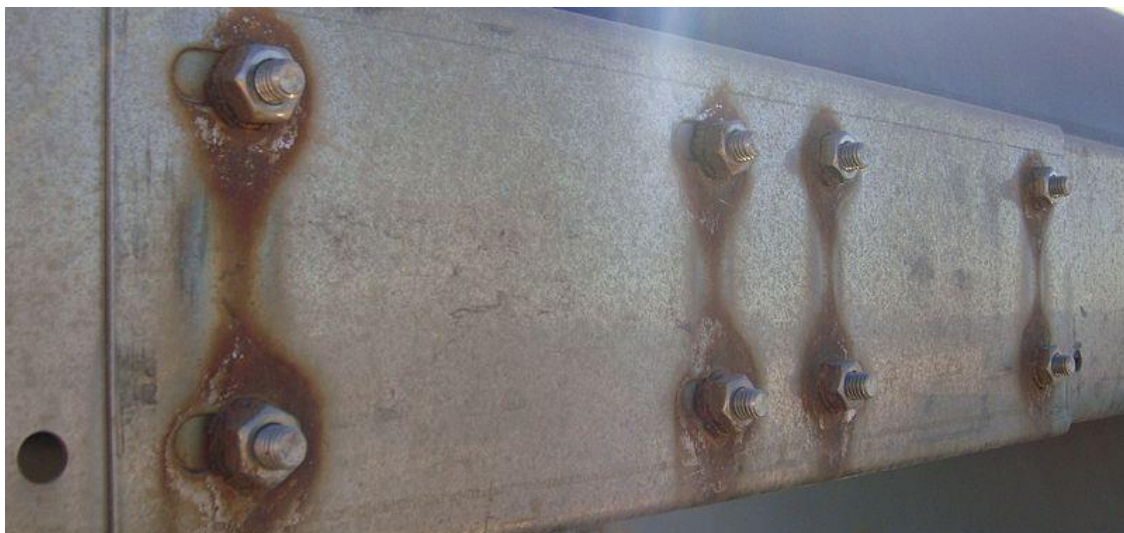
Rys: Autor



Ograniczona cyrkulacja powietrza i ograniczony dostęp tlenu, nierównomierne rozmieszczenie trudno i łatwo rozpuszczalnych soli na powierzchni szczeliny, zwiększona agresywność środowiska wewnątrz szczeliny

Kontaktowa (bimetaliczna; dwa różne metale lub dwa różne stopy): ogniwo galwaniczne w przypadku obecności wody / elektrolitu

Rys: wikipedia

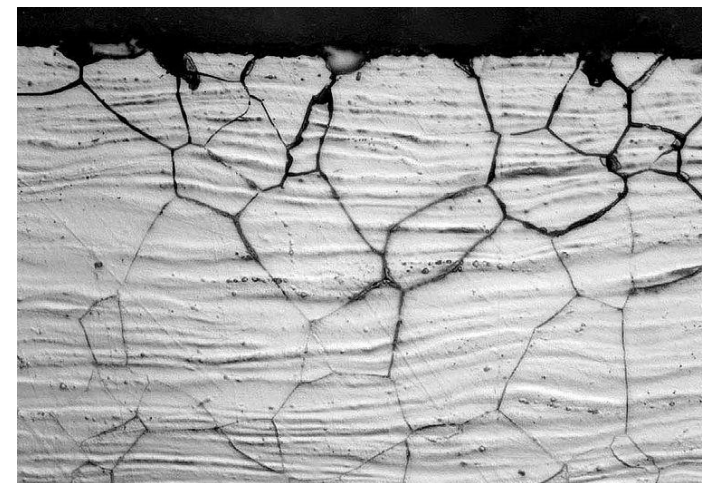


Selektywna (dwie różne domieszki stopowe);
podobna do bimetalicznej

Rys: cdcorrosion.com



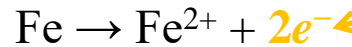
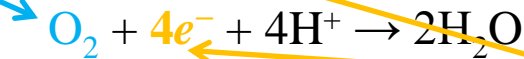
Międzykrystaliczna (pomiędzy kryształami tego samego materiału - na skutek naprężenia lub zmęczenia i różnicy energii wewnętrznej). Korozja niszczy granice pomiędzy mikrokryształami i cały materiał rozpada się na proszek.



Rys: wikipedia

Ochrona

Tlen z powietrza i wody



Zawilgocenie, woda

Rozkład chemiczny wody, elektrolity (zanieczyszczenia chemiczne, brud), woda morska, wpływ wysokiej temperatury, drugorzędne wpływy naprężenia, potencjał bimetaliczny (kontakt dwu różnych metali)

- Kształtowanie konstrukcji: zapobieganie gromadzeniu się brudu i wilgoci (najprostsze, najtańsze);
- Pokrycia niemetaliczne;
- Powłoki metaliczne (pasywna ochrona katodowa);
- Powłoki duplex;
- Aktywna ochrona katodowa: „kontrola ruchu swobodnych **elektronów**” (najdroższa);

Bariera między stalą a środowiskiem (**tlen**, **wilgoć**, **woda**)

Kształtowanie konstrukcji

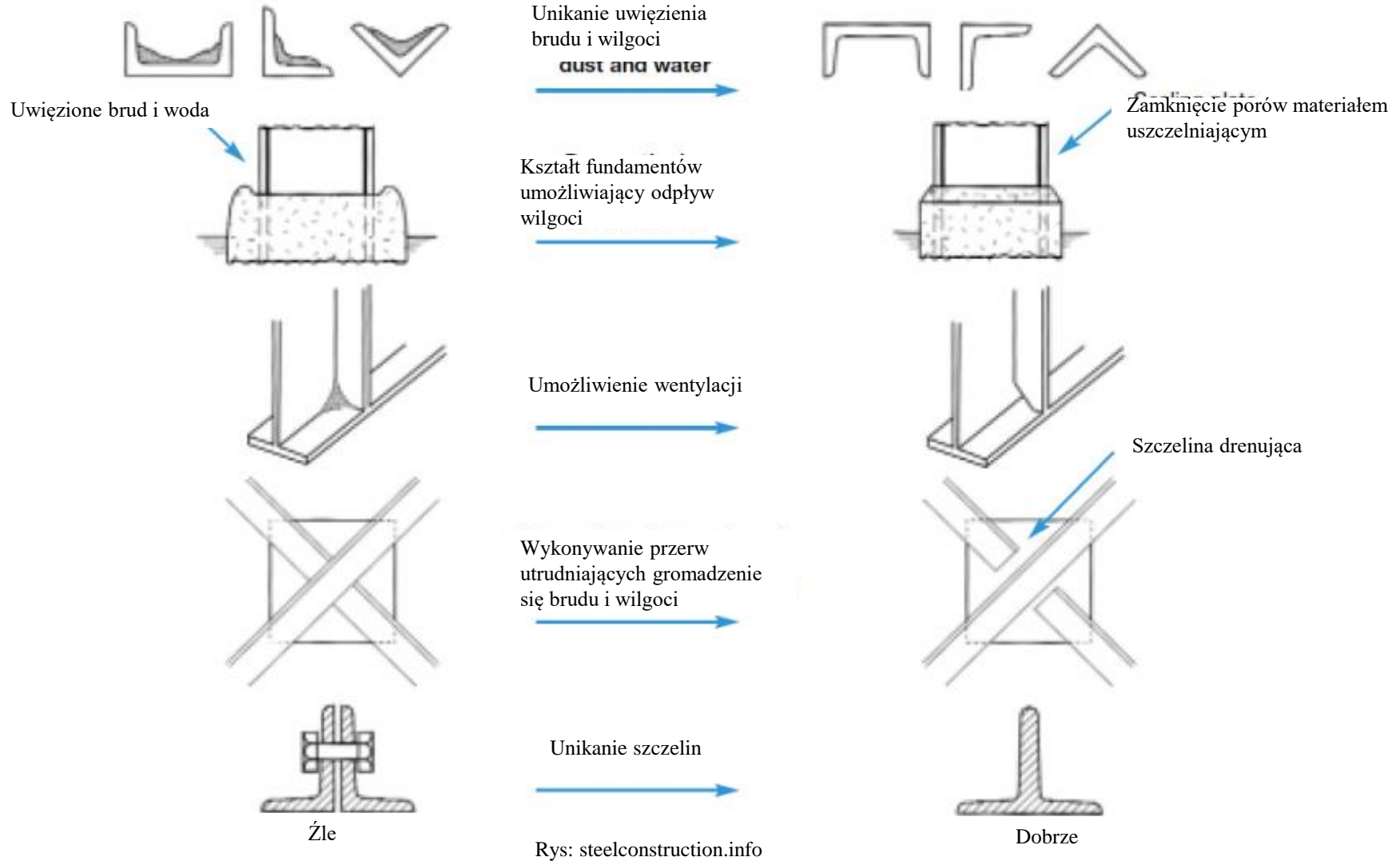
Specyficzne ukształtowanie konstrukcji może przyspieszyć lub spowolnić korozję.
Szczegółowe informacje podaje norma

EN ISO 12 944 - 3

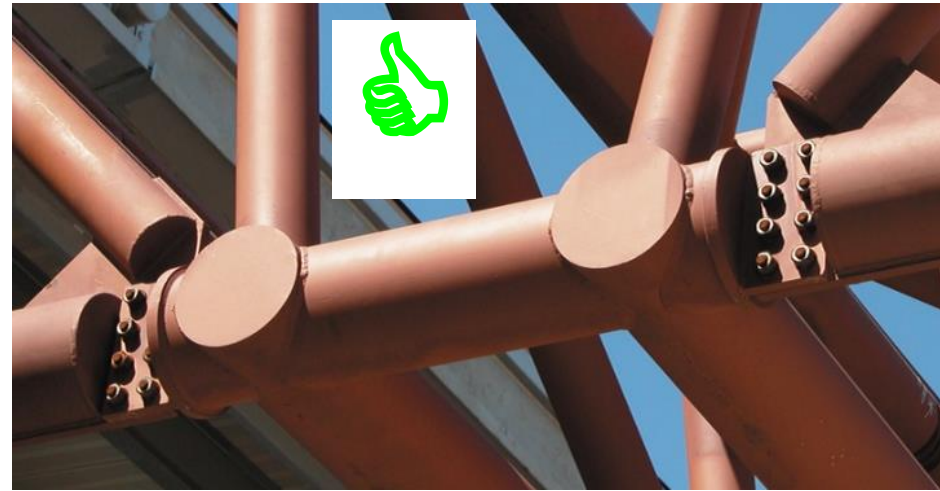
Farby i lakiery - Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich - Zasady projektowania

Dodatkowo, zalecane jest wiele rozwiązań wynikających z doświadczenia.

Szczegóły konstrukcyjne zalecane w EN ISO 12 944 - 3



Zawsze w przypadku zastosowania rur musimy hermetycznie zamknąć ich końce. Zapobiega to powstawaniu korozji wewnątrz rur. Korozja wewnętrzna może niepostrzeżenie doprowadzić do zniszczenia konstrukcji bez widocznych znaków ostrzegawczych.



Rys: Błędy wykonawcze podczas realizacji konstrukcji stalowych, Litwin M, Górecki M, *Budownictwo i Architektura 4* (2009) 63-72

Pokrycia niemetaliczne

- farby antykorozyjne
- metoda tania
- powłoki nietrwałe
- konieczność regularnego odnawiania



Photo: sklep.idachy.com

Rys: renowacje.net.pl

Powłoki metaliczne

Należy przeanalizować szereg elektrochemiczny (szereg napięciowy metali), definiujący szlachetność metali:

nieszlachetne:

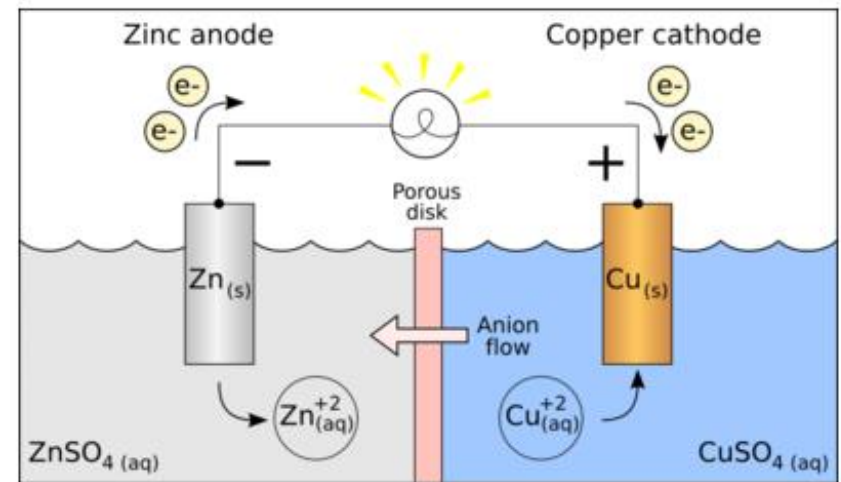
szlachetne:

Li K Na Ca Mg Al Zn Cr Fe Cd Co Ni Sn Pb H Sb Bi Cu Ag Hg Pt Au

Poziomem odniesienia jest wodór H.

Kontakt dwu różnych metali + obecność wody, wilgoci, odczynników chemicznych, soli itp. → ogniwo.

Metal mniej szlachetny podlega korozji, szlachetny nie.



Rys: wikipedia

Pokrycie stali przez metal mniej szlachetny (najczęściej cynk):

Pokrycie hermetyczne, trwałe, drogie



Rys: Autor



Uszkodzenie powłoki → cynk koroduje, stal nie. Tlenki cynku tworzą warstwę hermetyczną, odcinającą dostęp tlenu → bardzo powolna korozja.

Pokrycie stali przez metal szlachetniejszy (na przykład miedź):

Pokrycie hermetyczne, trwałe, drogie

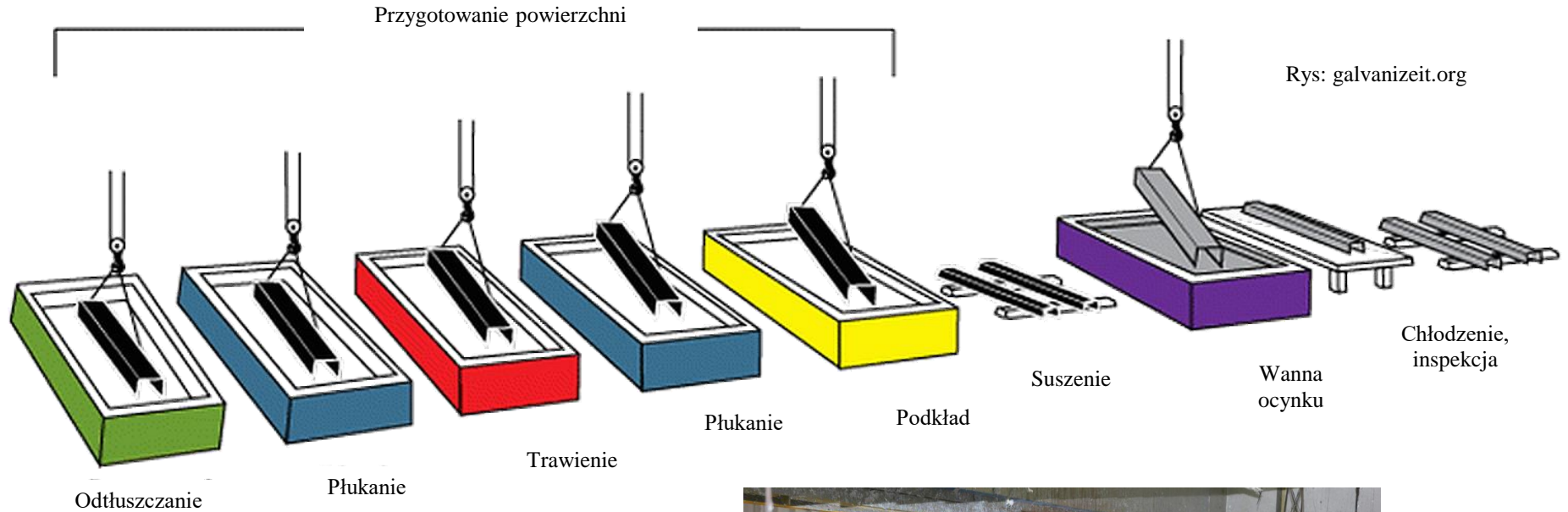


Rys: Autor



Uszkodzenie powłoki → stal koroduje, miedź nie.
Tlenki żelaza nie tworzą hermetycznej warstwy, są higroskopijne (wiążą wilgoć) → przyspieszona korozja stali.

Najpopularniejszą metodą cynkowania jest cynkowanie ogniowe: proces powlekania elementu poprzez zanurzenie go w kąpeli ze stopionego cynku(420 °C). Powierzchnia musi być odpowiednio przygotowana

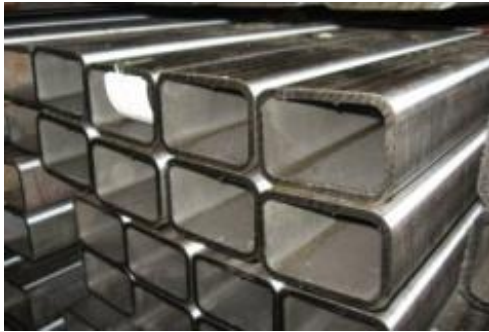


Zwykle grubość ocynku wynosi $50 \div 80$ μm ($0,05 \div 0,08$ mm)

Rys: ocynkowniadebica.pl



W przypadku profili RHS/CHS i profili skrzynkowych spawanych, cynkowanie należy przeprowadzić ze szczególną starannością. Temperatura ciekłego cynku wynosi 420 °C. Jeżeli wewnątrz elementu jest hermetycznie zamknięte, temperatura wytworzy wewnętrzne nadciśnienie wynoszące ok ~45 kPa, związane z rozszerzalnością cieplną powietrza. Należy to wziąć pod uwagę przy projektowaniu przekroju - w przeciwnym razie element musi mieć otwory, aby umożliwić ucieczkę powietrza.



Rys: wggstal.pl



Rys: mtshireandsales.com



Rys: encinnati-crane.com

Nie wszystkie gatunki stali można cynkować. Stal nierdzewna ma bardzo specyficzny skład chemiczny. Kontakt z ciekłym cynkiem drastycznie zwiększa skłonność takiej stali do pękania.

Powłoki duplex

Ocynkowanie + malowanie proszkowe. Specjalna farba proszkowa: proszek, który „przykleja się” do konstrukcji dzięki siłom elektrostatycznym. Następnie element zostaje nagrany (140-200 °C) w specjalnym piecu; proszek spieka się, tworząc hermetyczną powłokę.



Rys: steelfabservices.com.au

Hermetyczna, droga, trwała

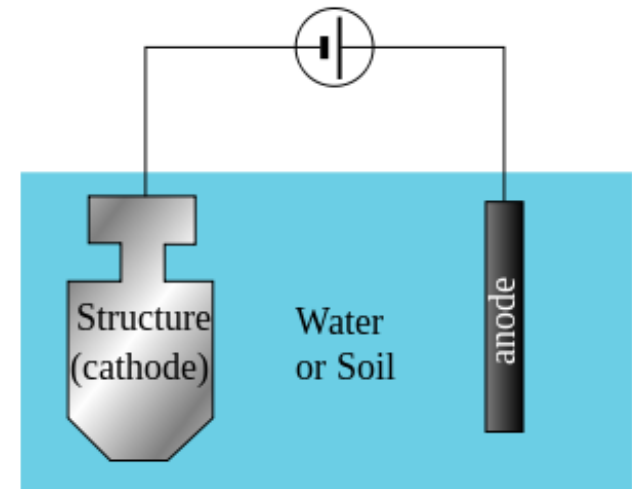
Rys: malarniacelkab.pl



Ochrona katodowa

- dla rurociągów i zbiorników podziemnych;
- dla rurociągów podmorskich;
- wymaga dodatkowego zasilania;
- katoda chroniona, anoda bardzo szybko koroduje i musi być uzupełniana

Ochrona polega na wymuszeniu ruchu elektronów „w kierunku odwrotnym” niż w przypadku „normalnej” korozji. Skutkuje to ochroną konstrukcji kosztem szybkiego zużycia się anody



Rys: wikipedia

Klasyfikacja środowisk

Metody ochrony antykorozyjnej (jak na przykład różne rodzaje farb antykorozyjnych) przeznaczone są dla różnych sytuacji. Wybór metody dokonywany jest na podstawie analizy warunków pracy konstrukcji, w tym środowiska, w którym pracuje. Klasyfikacja rozmaitych środowisk przedstawiona została w:

EN ISO 12 944-2

Farby i lakiery - Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich - Klasyfikacja środowisk

EN ISO 12 944-2 tab. 1 – korozja atmosferyczna

Klasa korozyjności	Ubytek masy na jednostkę powierzchni / ubytek grubości (po pierwszym roku ekspozycji)				Przykłady środowisk typowych dla klimatu umiarkowanego	
	Stal niskowęglowa		Cynk		Na zewnątrz	Wewnątrz
	Ubytek masy g / m ²	Ubytek grubości µm	Ubytek masy g / m ²	Ubytek grubości µm		
C1 Bardzo mała	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Ogrzewane budynki z czystą atmosferą np. biura, sklepy, szkoły, hotele.
C2 Mała	10 – 200	1,3 – 25	0,7 – 5	0,1 – 0,7	Atmosfery w małym stopniu zanieczyszczone. Głównie tereny wiejskie.	Budynki nieogrzewane, w których może mieć miejsce kondensacja, np. magazyny, hale sportowe.
C3 Średnia	200 – 400	25 – 50	5 – 15	0,7 – 2,1	Atmosfery miejskie i przemysłowe, średnie zanieczyszczenie SO ₂ . Obszary przybrzeżne o małym zasoleniu.	Pomieszczenia produkcyjne o dużej wilgotności i pewnym zanieczyszczeniu powietrza, np. zakłady spożywcze, pralnie, browary.

EN ISO 12 944-2 tab. 1 – korozja atmosferyczna

Klasa korozyjności	Ubytek masy na jednostkę powierzchni / ubytek grubości (po pierwszym roku ekspozycji)				Przykłady środowisk typowych dla klimatu umiarkowanego	
	Stal niskowęglowa		Cynk		Na zewnątrz	Wewnątrz
	Ubytek masy g / m ²	Ubytek grubości µm	Ubytek masy g / m ²	Ubytek grubości µm		
C4 Duża	400 – 650	50 – 80	15 – 30	2,1 – 4,2	Obszary przemysłowe i obszary przybrzeżne o średnim zasoleniu	Zakłady chemiczne, pływalnie, stocznie remontowe statków i łodzi.
C5 Bardzo duża	650 – 1 500	80 – 200	30 – 60	4,2 – 8,4	Obszary przemysłowe o wysokiej wilgotności i agresywnej atmosferze oraz obszary przybrzeżne o wysokim zasoleniu.	Budowle lub obszary z prawie ciągłą kondensacją i dużym zanieczyszczeniem.
CX Ekstremalna	1 500 – 5 500	200 – 700	60 – 180	8,4 – 25	Obszary przybrzeżne i oddalone od brzegu w głąb morza o dużym zasoleniu i obszary przemysłowe o ekstremalnej wilgotności i agresywnej atmosferze oraz atmosfera subtropikalna i tropikalna	Obszary przemysłowe o ekstremalnej wilgotności i agresywnej atmosferze

EN ISO 12 944-2 tab. 2 – korozja w wodzie i glebie

Kategoria	Środowisko	Przykład
IM1	Woda słodka	Instalacje rzeczne i elektrownie wodne
IM2	Woda słona lub słonawa	Konstrukcje zanurzone bez ochrony katodowej (np. tereny portowe, śluzy lub mola)
IM3	Gleba	Konstrukcje zakopane, stalowe pale i rury
IM4	Woda morska lub słonawa z ochroną katodową	Konstrukcje zanurzone z ochroną katodową (np. konstrukcje morskie)

EN ISO 12 944-1 4.4 – Trwałość powłok antykorozyjnych

Okres trwałości	Czas
Krótki (L)	< 7 lat
Średni (M)	7 – 15 lat
Długi (H)	15 – 25 lat
Bardzo długi (VH)	> 25 lat

Systemowe zabezpieczenie antykorozyjne – testy; **EN ISO 12 944-6**, **EN ISO 12 944-9**

Klas. koroz.	Trwałość			
	L	M	H	VH
C1	Nie ma potrzeby testowania			
C2	b ⁴⁸ ;	b ⁴⁸ ;	b ¹²⁰ ;	b ²⁴⁰ ; c ⁴⁸⁰ ;
C3	b ⁴⁸ ; c ¹²⁰ ;	b ¹²⁰ ; c ²⁴⁰ ;	b ²⁴⁰ ; c ⁴⁸⁰ ;	b ⁴⁸⁰ ; c ⁷²⁰ ;
C4	b ¹²⁰ ; c ²⁴⁰ ;	b ²⁴⁰ ; c ⁴⁸⁰ ;	b ⁴⁸⁰ ; c ⁷²⁰ ;	b ⁷²⁰ ; c ^{1 440} ; d ^{1 680}
C5	b ²⁴⁰ ; c ⁴⁸⁰ ;	b ⁴⁸⁰ ; c ⁷²⁰ ;	b ⁷²⁰ ; c ^{1 440} ; d ^{1 680}	d ^{2 688}
CX	e ^{4 200} ; f ^{4 200} ; g ^{4 200}			
IM1	Trwałość niezalecana		a ^{3 000} ; b ^{1 440}	a ^{4 000} ; b ^{2 160}
IM2			a ^{3 000} ; c ^{1 440}	a ^{4 000} ; c ^{2 160}
IM3			a ^{3 000} ; c ^{1 440}	a ^{4 000} ; c ^{2 160}
IM4	e ^{4 200} ; f ^{4 200} ; g ^{4 200}			

(rodzaj testu)(ile godzin trwa test)

4 200 h = 175,0 dni

EN ISO 12 944-6	EN ISO 12 944-9
<ul style="list-style-type: none"> • a – Zanurzenie w wodzie, zgodnie z ISO 2 812-2 • b – Kondensacja wody, zgodnie z ISO 6 270-1 • c – Test mgły solnej, zgodnie z ISO 9 277 • d – Cykliczne starzenie, zgodnie z ISO 12 944-6 app. B 	<ul style="list-style-type: none"> • e – Cykliczne starzenie, zgodnie z ISO 12 944-9 app. B • f – Odspojenie katodowe, zgodnie z ISO 12 711 metoda A • g – Zanurzenie w wodzie słonej, zgodnie z ISO 2 181-2

Rodzaj badania jest „proporcjonalny” do kategorii korozyjności lub środowiska;

Czas trwania testu jest proporcjonalny do trwałości.

Fakt obiektywy:
środowisko pracy
konstrukcji.

	L	M	H	VH
C1	Zabezpieczenie spełniające warunki testu			
C2				
C3				
C4				
C5				
CX				
IM1				
IM2				
IM3				
IM4				

Indywidualna decyzja
projektanta.

Okres gwarancji <
trwałość
zabezpieczenia

Okres gwarancji określony jest w umowie na montaż konstrukcji/wykonanie powłok. Jest to wynik negocjacji pomiędzy Inwestorem a Wykonawcą.

Okres gwarancji dotyczy jakości powłoki (99,9% problemów wynikających z niskiej jakości wykonania ujawnia się w ciągu 3 lat).

Okres trwałości odnosi się do stopniowego zużywania się powłoki w trakcie użytkowania.

Nie ma jasnych wytycznych, jak przyjąć okres trwałości w zależności od rodzaju konstrukcji.

Stal nierdzewna

Najczęstsze powody zastosowania stali nierdzewnej to:

- agresywne odczynniki chemiczne (korozja wewnętrzna w rurociągach i zbiornikach);
- wysoka kategoria korozyjności (korozja zewnętrzna);
- estetyka.

Stale nierdzewne są opisane w odrębnym Eurokodzie

EN 1993-1-4

Projektowanie konstrukcji stalowych - Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych.



Rys: exaktglass.com

Ale „nierdzewna” nie oznacza „o nieskończonej odporności na korozję”.

Rys: amteccorrosion.co.uk



Znaczy to tylko „znacznie odporniejsza niż zwykła stal”.

Awarie i katastrofy

Silver Bridge, Ohio River, USA;

15 XII 1967 – runięcie, korozja zmęczeniowa i naprężeniowa w linach nośnych;

46 osób zabitych, 9 rannych

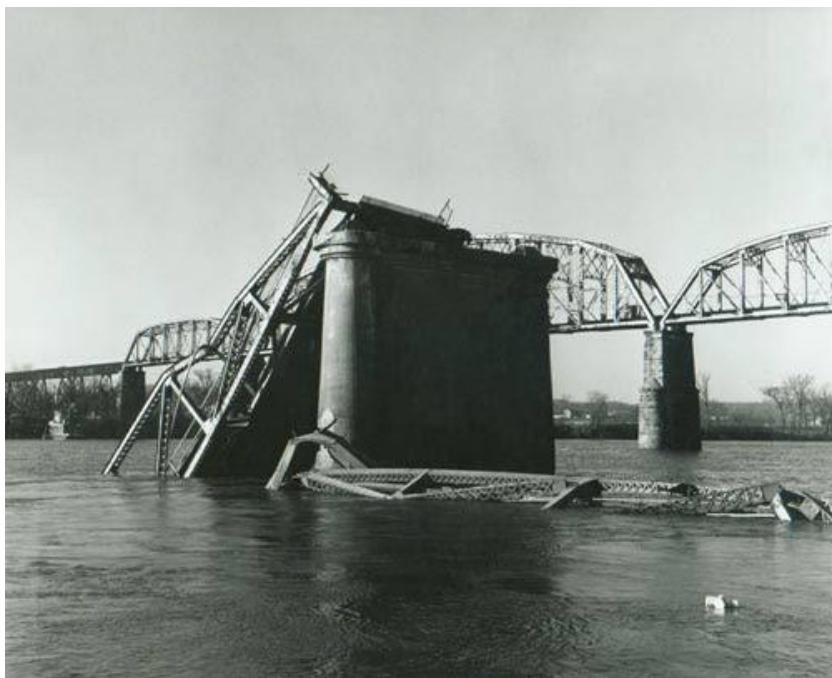


Rys: appalachianlady.wordpress.com

Rys: wikipedia



Rys: toledoblade.com



Kinzua Bridge, Kinzua Creek, USA; 21 VII 2003 - runięcie, korozja śrub i silny wiatr; bez ofiar w ludziach

Rys: dailyhike.net



Rys: piximus.net



Rys: stateparks.com



Rys: allwidewallpapers.com



No corrosion (Mass loss = 0.0%)



Light corrosion (Mass loss = 0.19%)



Pitting (Mass loss = 1.26%)



Heavy Pitting (Mass loss = 2.72%)



Cross section loss (Mass loss = 8.38%)



Fracture (Mass loss = 21.34%)



Globalna produkcja stali (2021) 1 952 mil T

Szacunkowe globalne straty spowodowane
korozją 25 mil T

Koszty strat (szacunkowo) 2 500 000 000 000 \$

(Okolo 4x PKB Polski)

Rys: Corrosion damage estimation in multi-wire steel strands using guided ultrasonic waves, A. Farhidzadeh, A. Ebrahimkhanlou, S. Salamone, Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure, IV 2015

Stal w pożarze

Obliczenia przedstawione w Eurokodach → #t / 45

Przepisy prawne → #t / 57

Ochrona p-poż → #t / 69

Katastrofy → #t / 77

Obliczenia przedstawione w Eurokodach

Dla konstrukcji stalowych w warunkach pożaru ważne są trzy Eurokody:

EN 1990

EN 1991-1-2

EN 1993-1-2

Wynikiem obliczeń jest ustalenie czasu od początku pożaru do chwili zawalenia się konstrukcji. Czas ten musi być dłuższy od czasu potrzebnego na ewakuację ludzi.

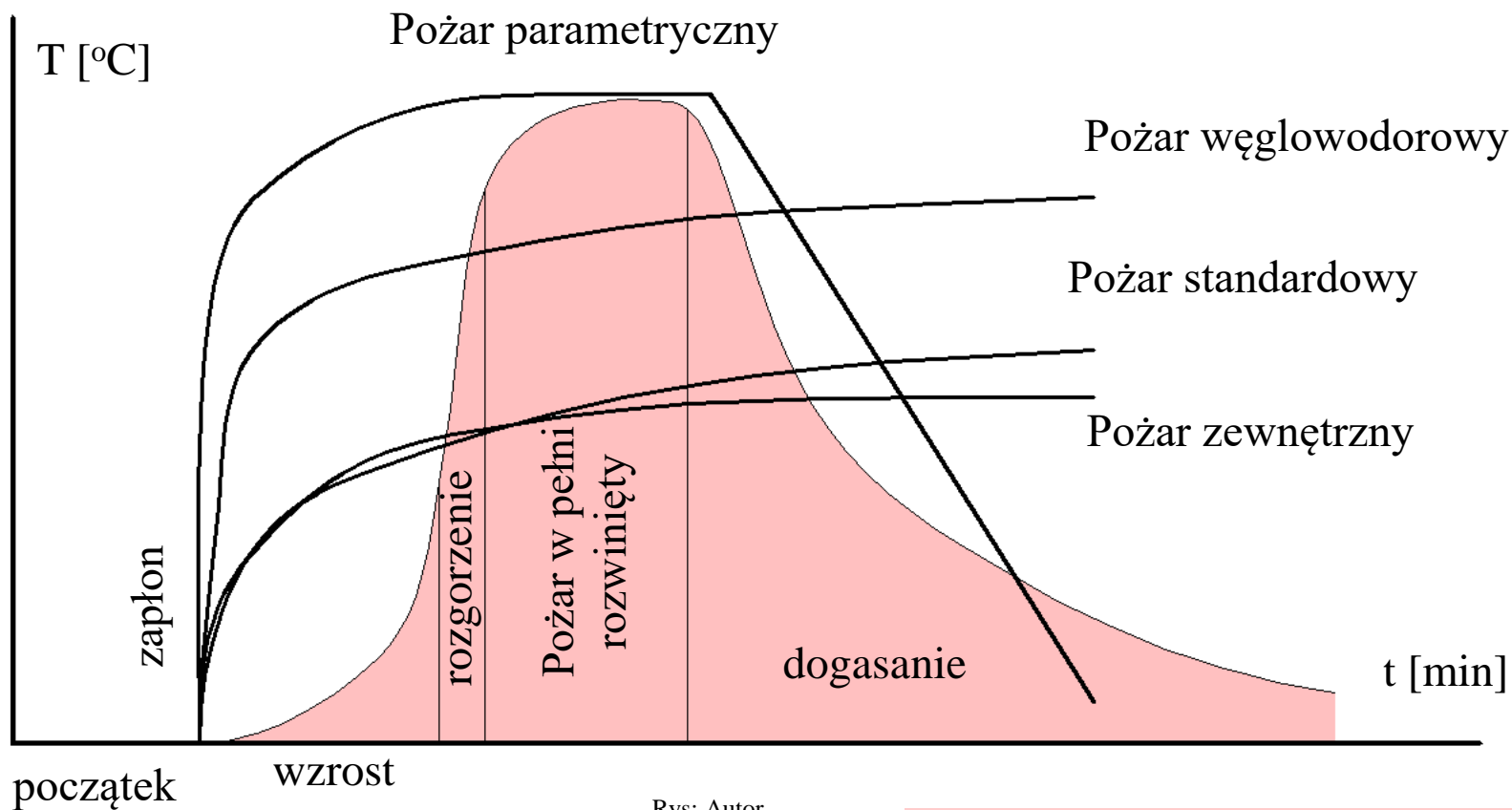
Obliczenia obejmują trzy aspekty:

Związek $T(t)$ (temperatura-czas) → EN 1991-1-2

Specyficzne kombinacje obciążeń dla sytuacji pożaru → EN 1991-1-2 4 ; EN 1990 ; EN 1993-1-2 2.2, 2.3 → $E_{fi, d}$

Spadek wartości parametrów mechanicznych stali (f_y , E) wraz ze wzrostem temperatury → EN 1993-1-2

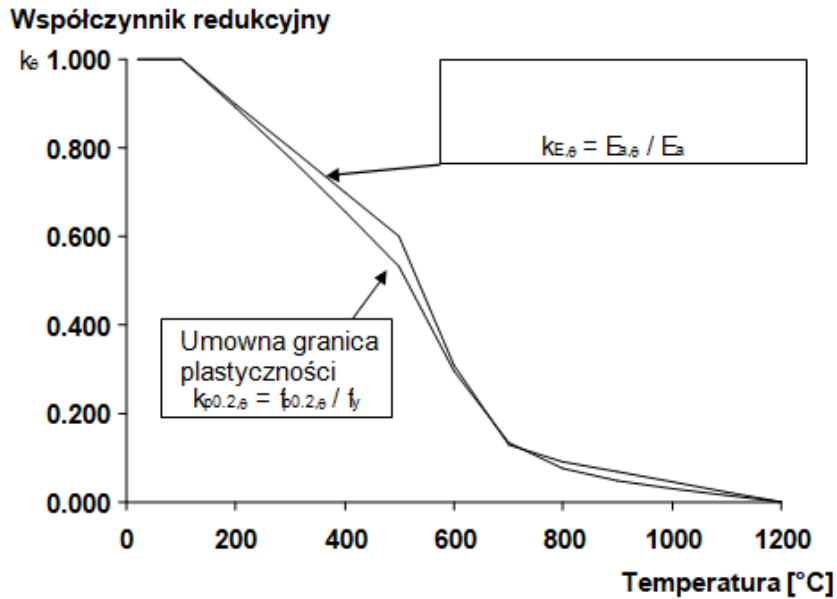
Modele pożaru (zależność $T(t)$), przedstawione w EN 1991-1-2



Rys: Autor

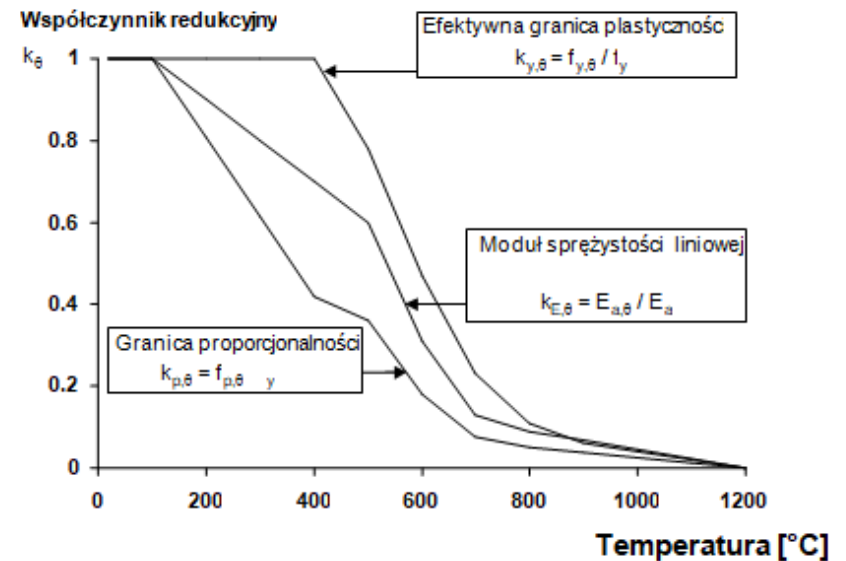
Pożar rzeczywisty (testy, eksperymenty, obserwacje, statystyki)

Spadek wartości parametrów mechanicznych stali (f_y , E) wraz ze wzrostem temperatury jest przedstawiony w EN 1993-1-2



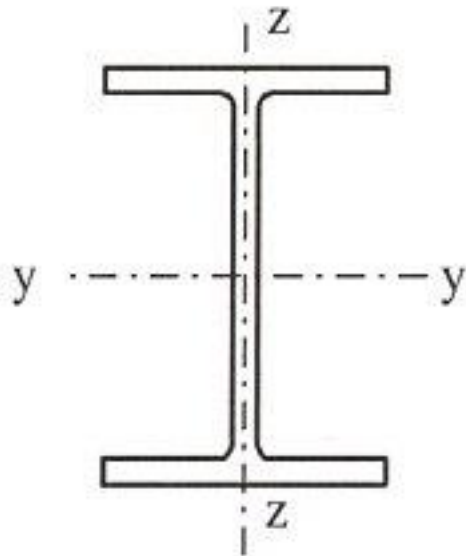
Rys: EN 1993-1-2 fig E.2

Rys: EN 1993-1-2 fig 3.2



→ #3 / 75

Na poziomie przekroju:



F – charakterystyka geometryczna

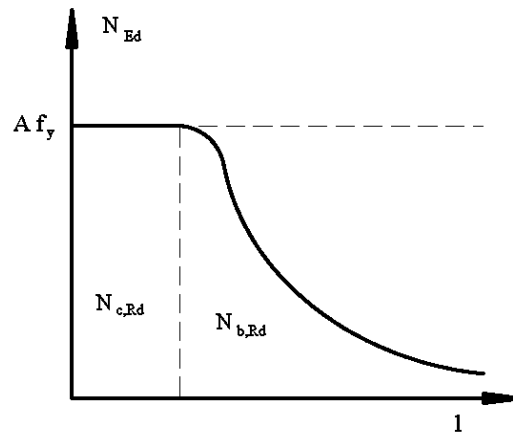
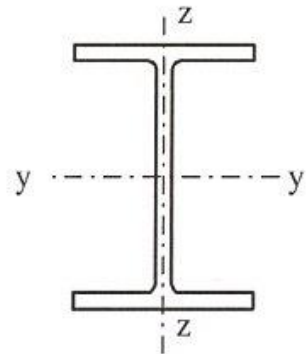
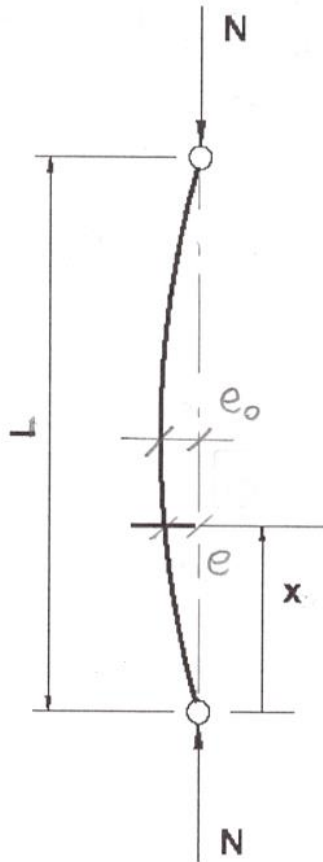
$$R = F f_y$$

$$E / R \leq 1,0$$

Rys: Autor

Elementy i węzły, gdy zagadnienie stateczności nie jest istotne; śruby, nity, sworznie

Na poziomie elementu:



Rys: Autor

F – charakterystyka geometryczna
 χ – współczynnik stateczności (zależy od długości elementu i sposobu podparcia)

$$R = \chi F f_y$$

$$E / R \leq 1,0$$

Węzły i elementy w warunkach utraty stateczności

Różnica między nośnością przekroju i elementu jest opisana przez dwa odmienne symbole R:

$$R_{critical} = R \chi$$
$$\chi \leq 1,0 \rightarrow R_{critical} \leq R$$

Współczynnik niestateczności χ zależy od, między innymi, modułu Younga. Nośność przekroju jest funkcją geometrii przekroju i wytrzymałości stali:

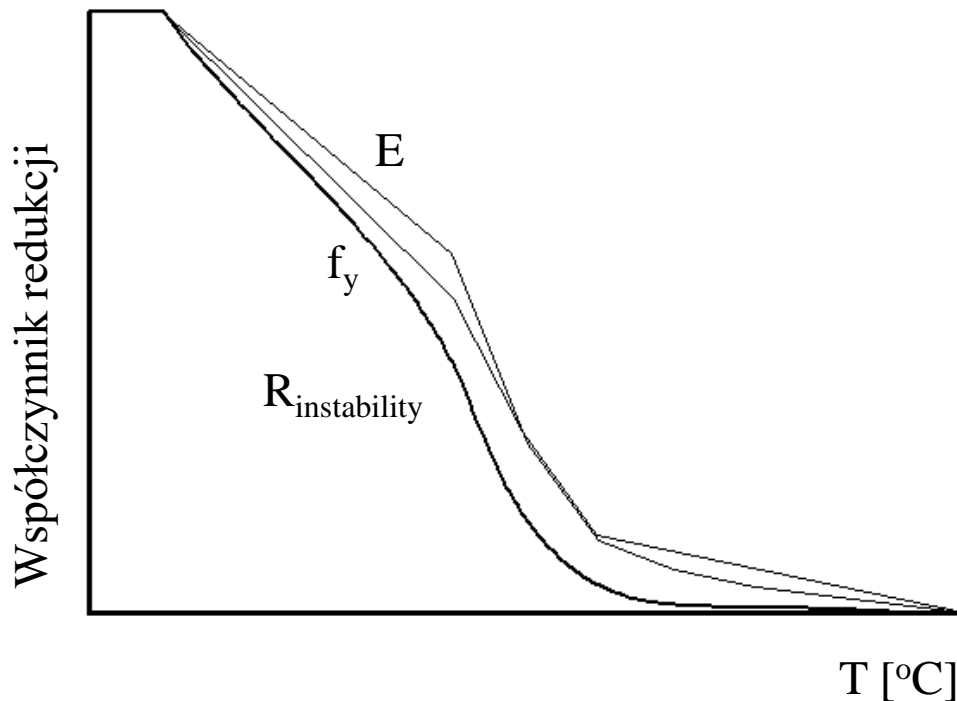
$$R = F f_y$$

Wartość obu parametrów: E oraz f_y maleje wraz ze wzrostem temperatury.

$$f_y = f_y(T) \rightarrow R = X f_y(T)$$

$$E = E(T) \rightarrow \chi = \chi(E) = \chi[E(T)]$$

$$R_{critical} = X f_y(T) \chi[E(T)] = R_{critical} (T)$$

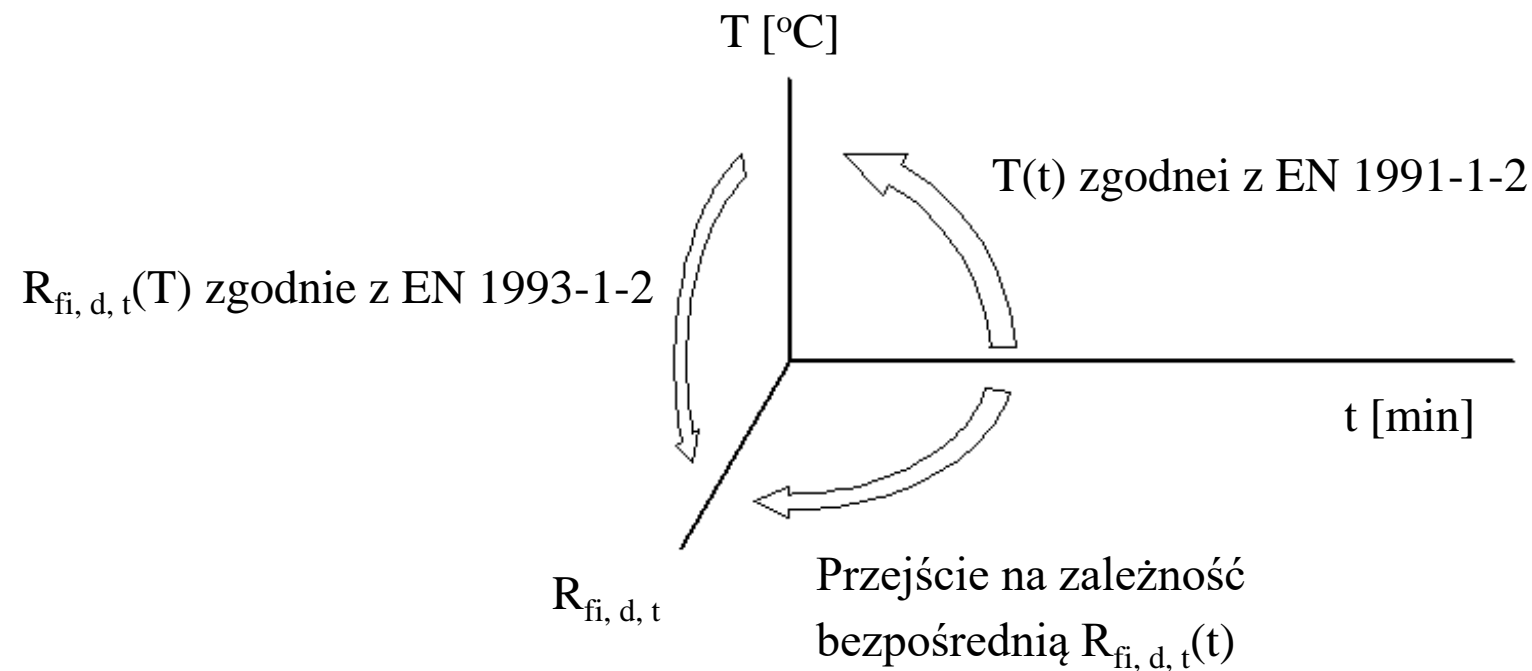


Rys: Autor

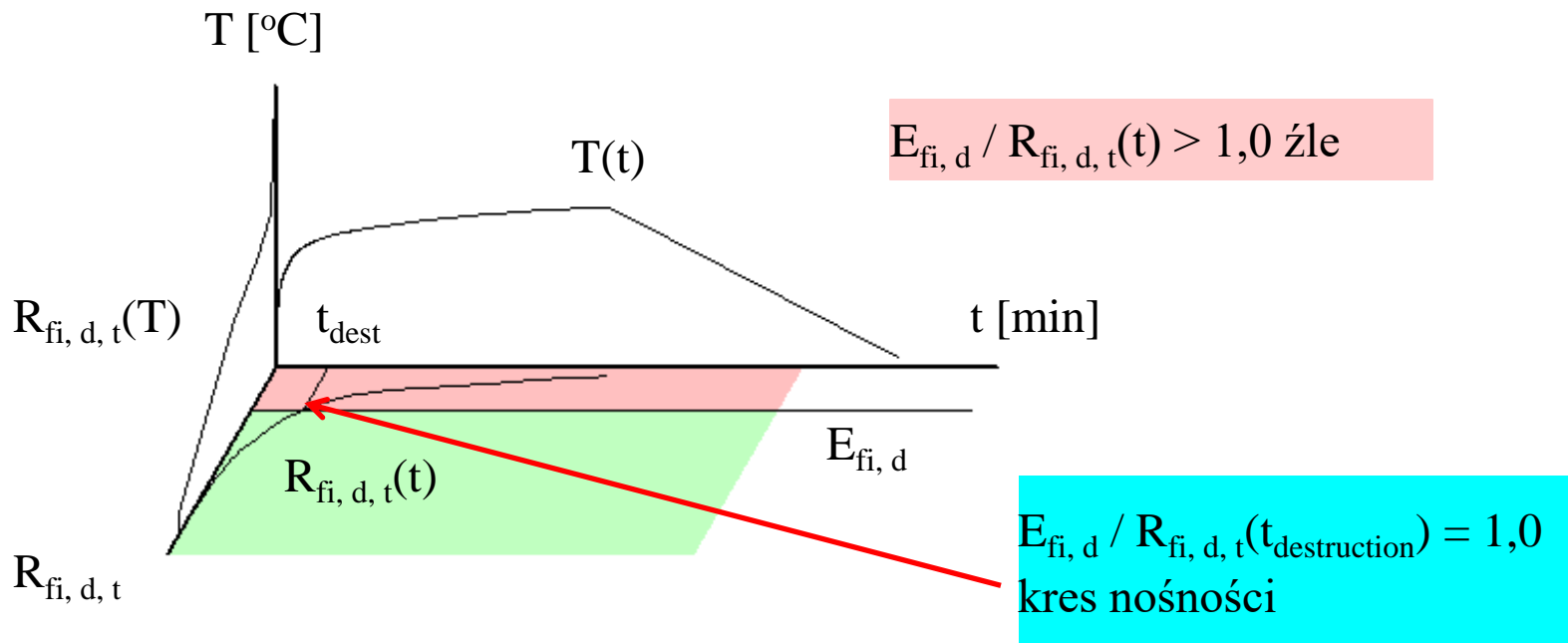
Spadek wartości $R_{critical}$ zależy od spadku wartości f_y oraz od spadku wartości E – z tego powodu spadek wartości $R_{critical}$ następuje szybciej niż spadki wartości f_y i E analizowanych oddzielnie.

Zgodnie z Eurokodem, $R[(T(t))]$ jest oznaczane $R_{fi, d, t}$

Obliczenia



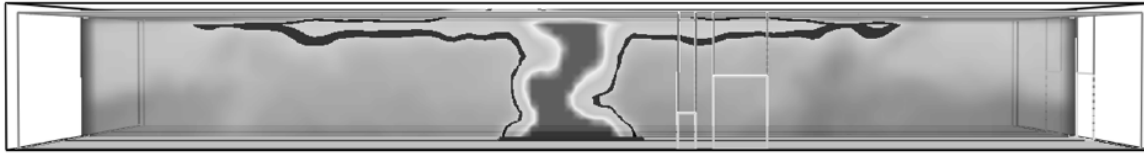
Rys: Autor



$t_{destruction}$ – czas od początku pożaru do zniszczenia; najważniejszy parametr obliczeń

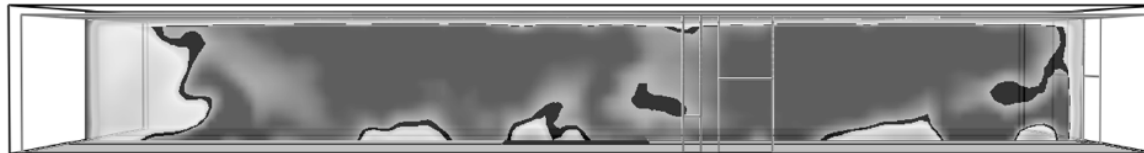
Rys: Autor

Oczywiście tych obliczeń nie da się wykonać ręcznie; są prowadzone komputerowo z wykorzystaniem MES.



Rys. 4. Model MF1. Rozkład wartości temperatury po 11 minutach trwania pożaru. Pogrubioną linią oznaczono izotermę 100°C

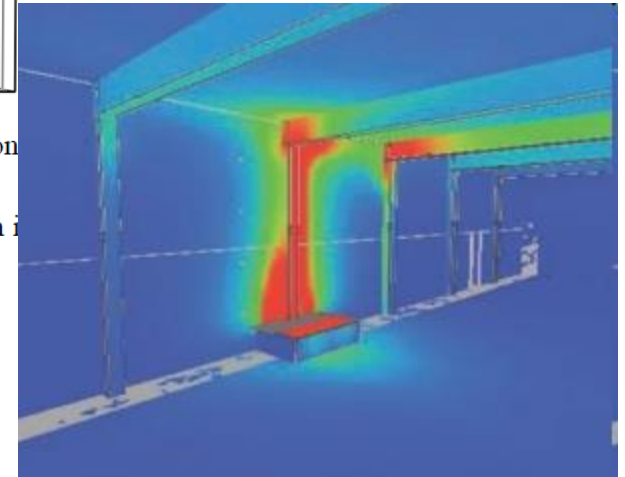
Fig. 4. Model MF1. Distribution of temperature values after 11 minutes of fire. 100°C isotherm is marked in bold



Rys. 5. Model MF2. Rozkład wartości temperatury po 11 minutach trwania pożaru. Pogrubioną linią oznaczono izotermę 690°C

Fig. 5. Model MF2. Distribution of temperature values after 11 minutes of fire. 690°C isotherm is marked in bold

Rys: Woźniczka P., Modelowanie komputerowe pożarów w halach wielkopowierzchniowych, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, 3/1/2017



Rys: canadianconsultingengineer.com

Wnioski

- EN 1991-1-2 określa zależność: czas ↔ T [°C];
- EN 1993-1-2 określa spadek wartości parametrów mechanicznych stali dla T [°C] i nośność w warunkach pożaru R_{fire} ;
- Bezpośrednia zależność R_{fire} (czas) jest wyliczana w specjalistycznych programach komputerowych;
- EN 1991-1-2 4 ; EN 1990 ; EN 1993-1-2 2.2, 2.3 definiują wartości obciążeń w warunkach pożaru;
- Obliczenia statyczne podają wyniki (siły przekrojowe, deformacje) dla tych obciążeń: E_{fire} ;
- Warunek

$$E_{\text{fi, d}} / R_{\text{fi, d, t}}(t) \leq 1,0$$

Jest bardziej użyteczny w postaci:

czas ewakuacji < czas zniszczenia konstrukcji

- Przepisy prawne definiują minimalny czas przetrwania konstrukcji w warunkach pożaru;

Przepisy prawne

$$t_{\text{destruction}} > t_{\text{min}}$$

$t_{\text{destruction}}$ – czas od początku pożaru do zniszczenia konstrukcji

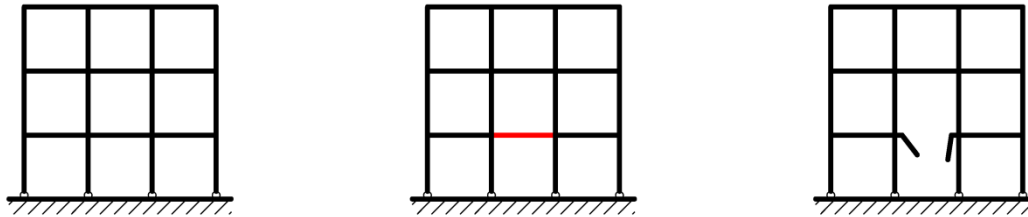
t_{min} - minimalny czas odporności ogniowej (czas ewakuacji); informacje na ten temat nie są przedstawione w Eurokodzie. Informacje te są przedstawione w przepisach prawnych, różnych dla różnych krajów. Zasadniczo czas ewakuacji dotyczy ewakuacji wszystkich ludzi z każdej części budynku - nawet jeśli pożar nastąpi tylko w jednej z nich. Czas do zawalenia się może dotyczyć całkowitego lub tylko lokalnego uszkodzenia, ponieważ lokalne uszkodzenie może wywołać reakcję łańcuchową i całkowite zawalenie się całej konstrukcji.

W Polsce:

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12 IV 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie

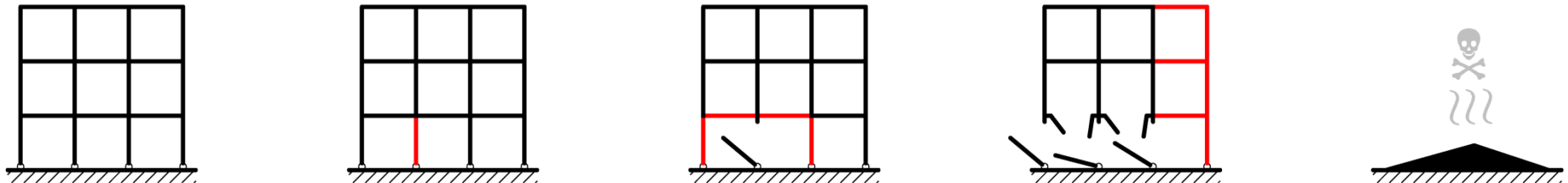
Zniszczenie pojedynczej belki

Rys: Autor



Lokalne uszkodzenie konstrukcji

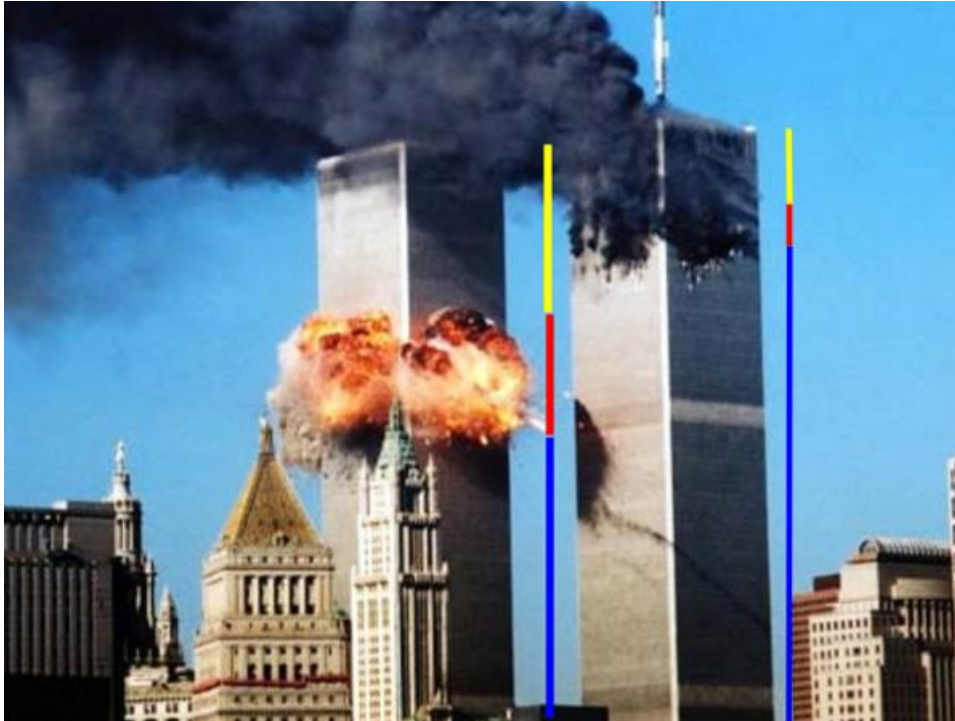
Zniszczenie pojedynczego słupa



Całkowite zawalenie

Wniosek: słupy są ważniejsze dla całości; obliczenia muszą być dokładniejsze, zanalizować należy więcej zjawisk niż w przypadku belek.

11 IX 2001 – przykład zniszczenia lokalnego, uruchamiającego mechanizm łańcuchowy niszczący całą konstrukcję:



Rys: chronologia.pl

1. W ciągu godziny początkowa eksplozja i szalejący pożar niszczą czerwoną część wieżowca (kilka kondygnacji);

2. Część żółta (kilka-kilkanaście kondygnacji, tysiące ton masy) miażdży osłabioną część żółtą, spada w dół i zderza się z częścią niebieską;

3. Siły dynamiczne powstałe na skutek zderzenia przekraczają ok. 30 razy nośność części niebieskiej;

4. Następuje zmiażdżenie i zawalenie części niebieskiej.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12 IV 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie

Wysokość	Budynek
< 12 m; < 4 kondygnacje	N
12 - 25 m; 4- 9 kondygnacji	SW
25 - 55 m; 9 - 18 kondygnacji	W
> 55 m; > 18 kondygnacji	WW

Przeznaczenie	Budynek
Pomieszczenia do jednoczesnego przebywania > 50 osób, nie mających kłopotu z poruszaniem się (kino, teatr, galeria handlowa)	ZL I
Dla ludzi mających kłopot z poruszaniem się (żłobek, szpital, przedszkole, dom starości)	ZL II
Pozostałe użyteczności publicznej	ZL III
Mieszkalne	ZL IV
Zamieszkania zbiorowego poza ZLI i ZL II	ZL V
Produkcja, magazynowanie	PM
Inwentarz	IN

A =
potrzebna
najlepsza
ochrona.

Minimalna odporność pożarowa budynku (OP)		Użytkowanie				
		ZL I	ZL II	ZL III	ZL IV	ZL V
Wysokość	N	B	B	C	D	C
	SW	B	B	B	C	B
	W	B	B	B	B	B
	WW	A	A	A	B	A

Minimalna odporność pożarowa budynku (OP)		Użytkowanie: PM, IN				
		Maksymalne obciążenie ogniem w budynku Q [MJ / m ²]				
		< 500	500 - 1000	1 000 - 2 000	2 000 - 4 000	> 4 000
Wysokość	Jedna kondygnacja	E	D	C	B	A
	N	D	D	C	B	A
	SW	C	C	C	B	A
	W	B	B	B	Niedopuszczalne przez Rozporządzenie	
	WW	B	B	B		

Zgodnie z Rozporządzeniem, budynki dzielone są na sześć części:

główna konstrukcja nośna;

konstrukcja dachu;

strop;

ściana zewnętrzna;

ściana wewnętrzna;

pokrycie dachu;

Podano informacje na temat odporności ogniowej tych części. Opisane są one symbolami

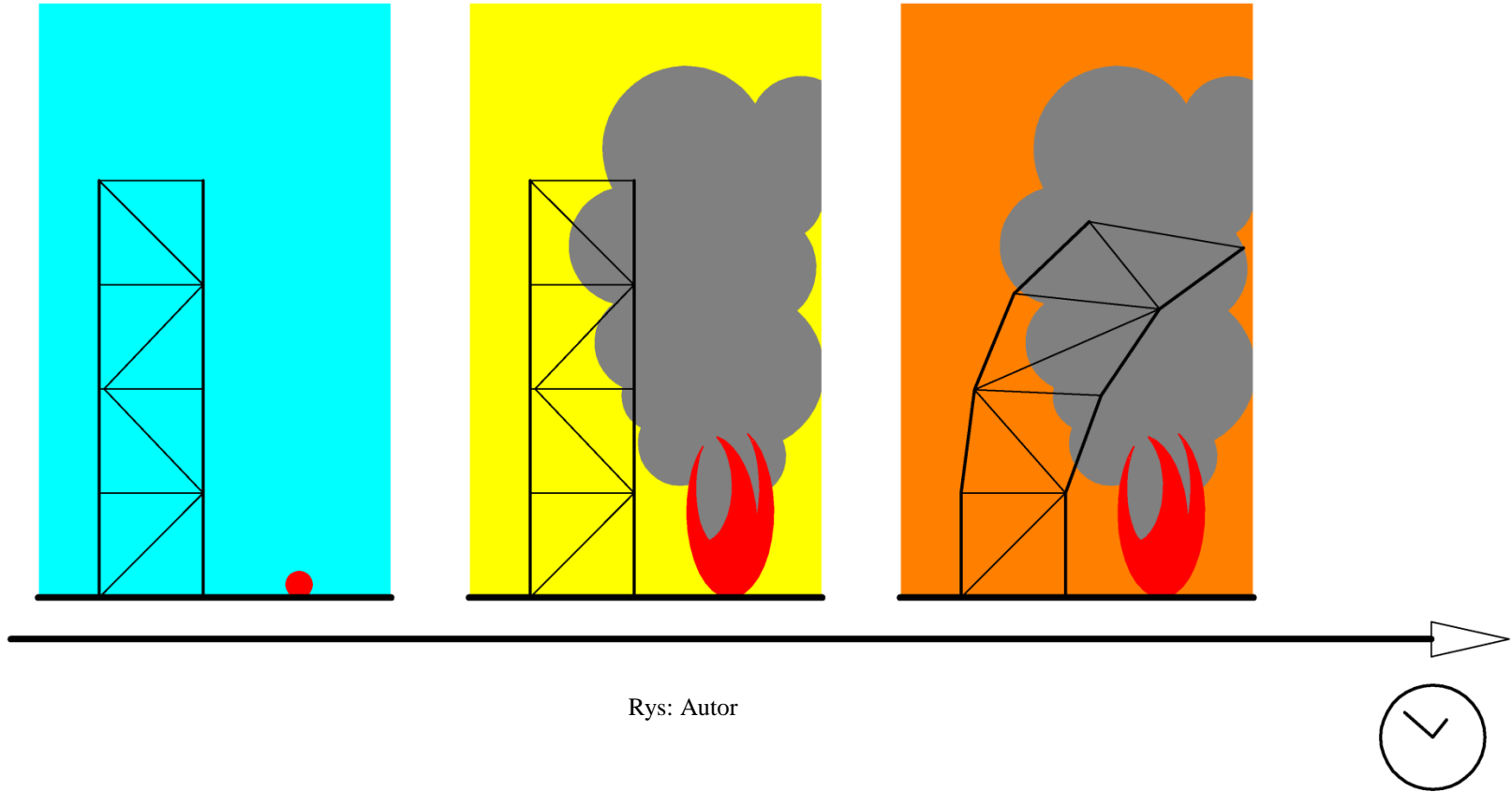
X numer

X – specyficzny typ odporności (R, E, I);

numer – minimalny czas zachowania odporności w minutach.

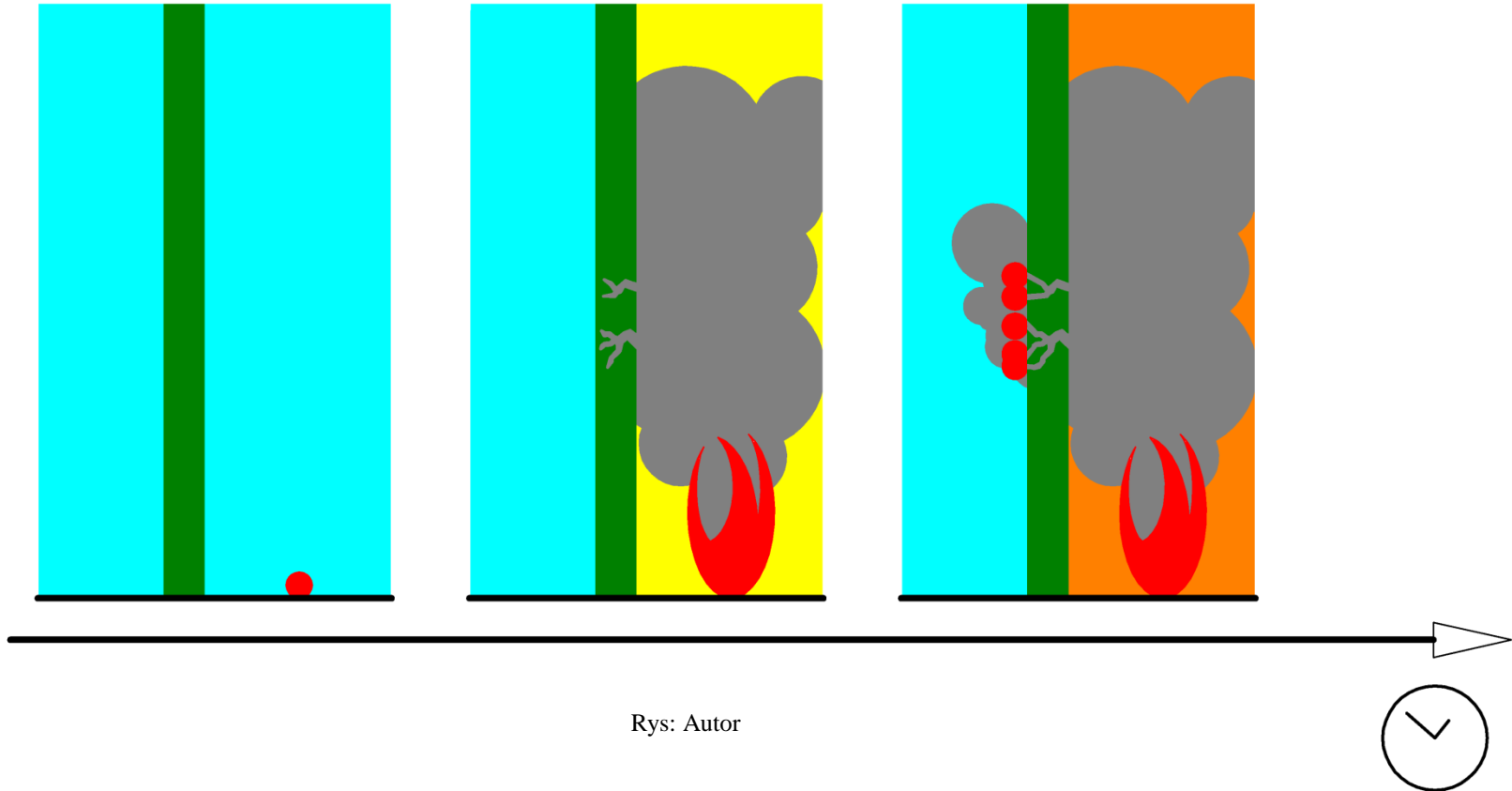
R – Nośność ogniowa (SGN + SGU);

Wyczerpanie stanów granicznych po 60 minutach od wybuchu pożaru → R 60



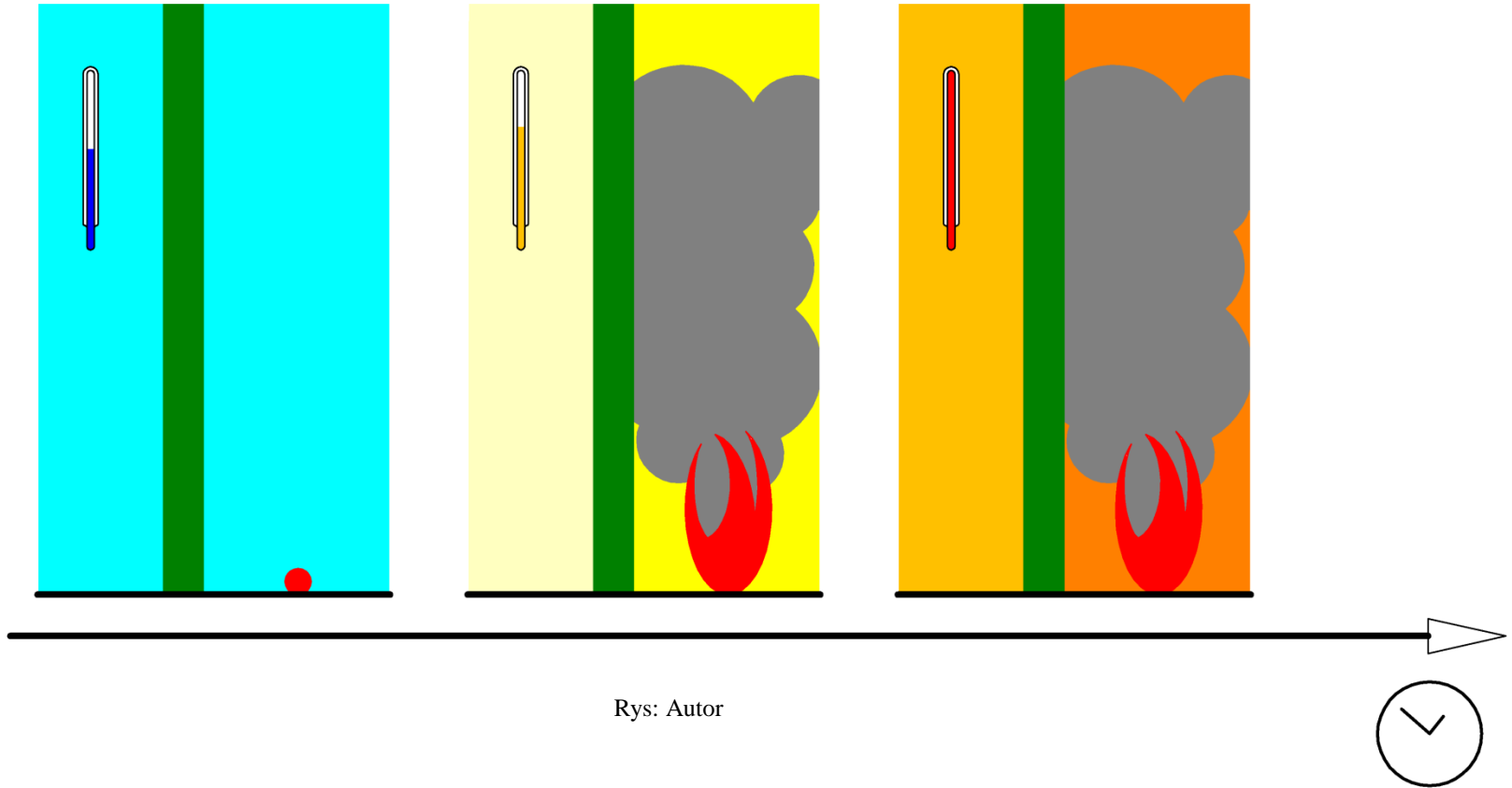
E – szczelność ogniowa;

Penetracja po 30 minutach od wybuchu pożaru → E 30



I – izolacyjność ogniowa;

Zbyt wysoka temperatura po drugiej stronie przegrody po 30 minutach od wybuchu pożaru → I 30



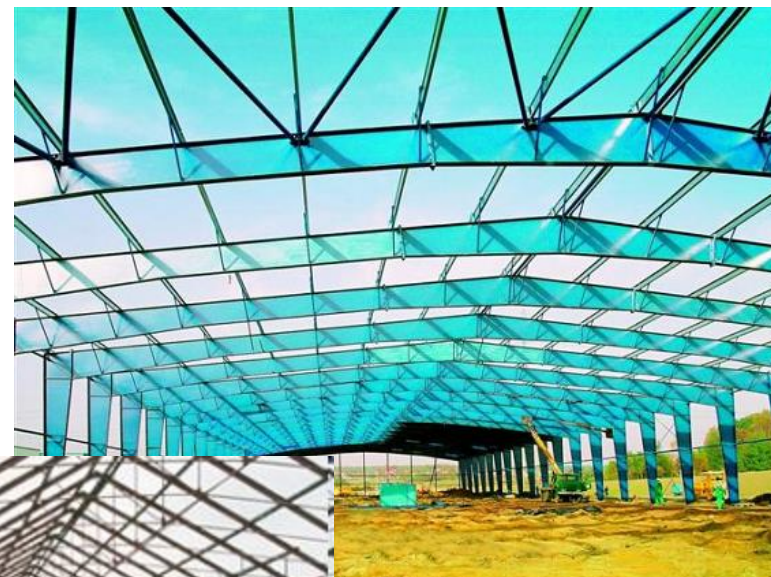
Rys: Autor

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12 IV 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie

Klasa odporności pożarowej budynku (OP)	Klasa odporności ogniowej (OO) elementów budynku					
	Główna konstrukcja nośna	Konstrukcja dachu	Strop	Ściana zewnętrzna	Ściana wewnętrzna	Pokrycie dachu
A	R 240	R 30	REI 120	EI 120	EI 60	EI 30
B	R 120	R 30	REI 60	EI 60	EI 30	EI 30
C	R 60	R 15	REI 60	EI 30	EI 15	EI 15
D	R 30		REI 30	EI 30		
E						

Zielona część tabeli może dotyczyć konstrukcji stalowej: głównej i dźwigarów dachowych

Rys: traskostal.pl



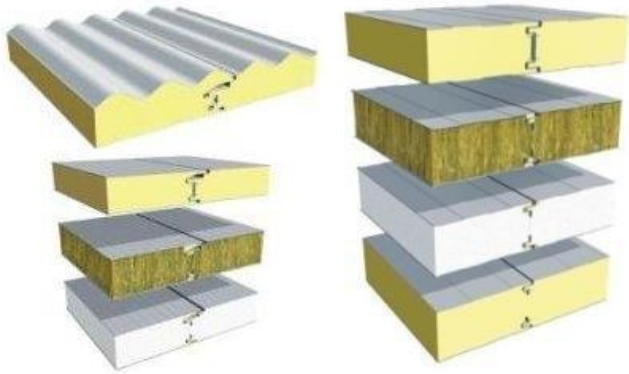
Rys: metroland.com.au



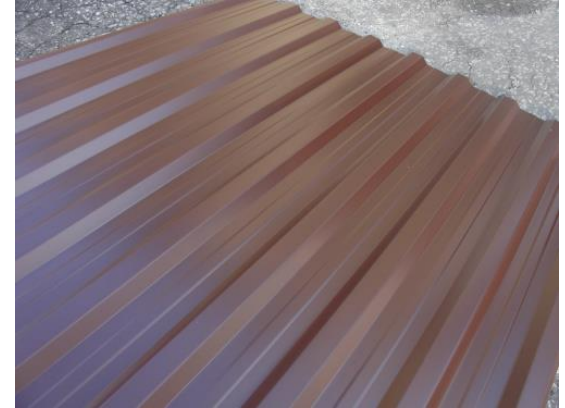
Rys: buildingconservation.com

Pokrycie dachu, obudowa ścian

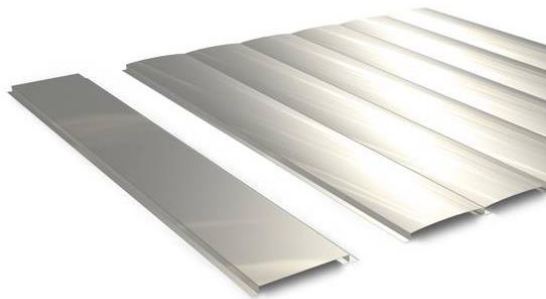
Płyty warstwowe, panele obudowy lub blachy fałdowe; stalowe lub aluminiowe



Rys: steelprofil.pl



Rys: amarodachy.pl



Rys: pruszynski.com.pl



Rys: elewacje-stalowe.pl

Ochrona przeciwpożarowa

Aktywna

- spryskiwacze;
- monitoring



Krótszy czas między rozpoczęciem pożaru a początkiem akcji gaśniczej

Pasywna

- redukcja współczynnika A_m / V (obwód / powierzchnia);
- osłonięcie konstrukcji;
 - betonem;
 - izolacją termiczną;
- farby pęczniące



Wydłużenie czasu osiągnięcia przez konstrukcję temperatury krytycznej

„Kontrola” szybkości wzrostu temperatury elementu

Spryskiwacze p-poż

Ogień zostaje zduszony w zarodku lub przynajmniej znacząco wydłuża się czas od zauważenia ognia do sytuacji pożaru ogarniającego całą konstrukcję



Rys: fireguardllc.net

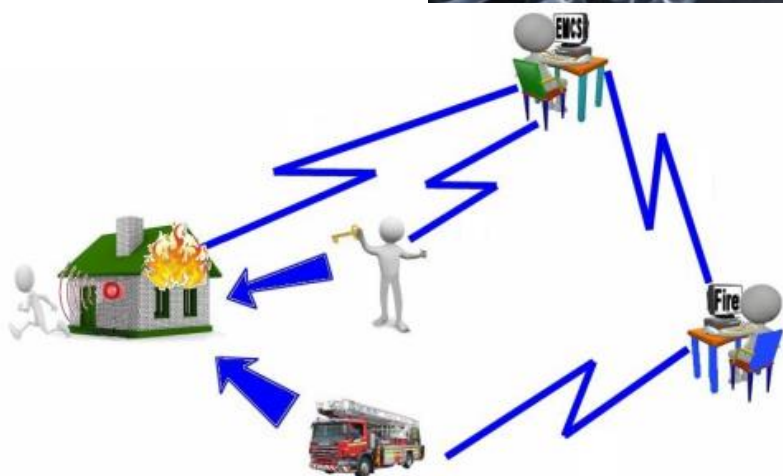


Rys: cofirepro.com

Monitoring p-poż

Czujniki dymu uruchamiają alarm i wzywają straż pożarną.

Rys: interfach.com.pl



Rys: tsng.co.uk



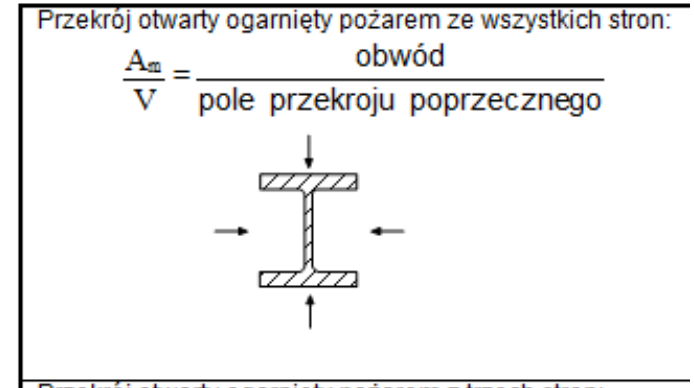
Rys: fire-monitoring.com

Redukcja stosunku A_m / V

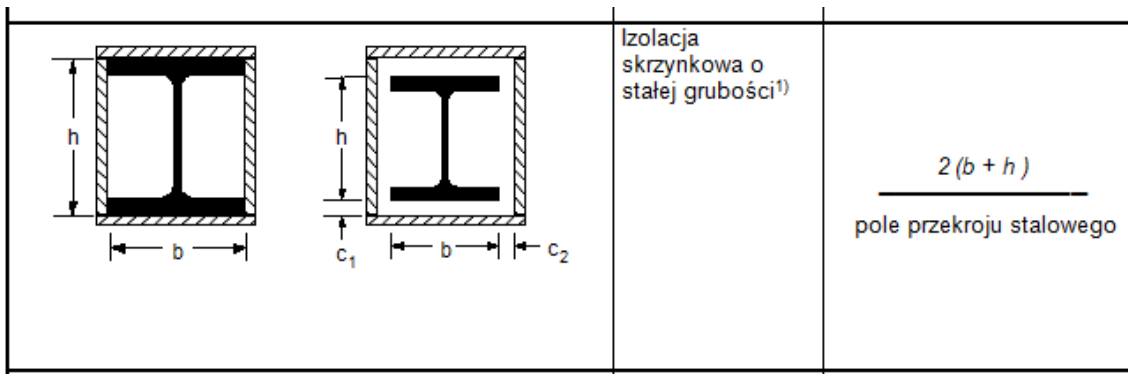
Tempo transferu ciepła do wnętrza elementu zależy od obwodu zewnętrznego A_m .

Tempo wzrostu temperatury zależy od pola przekroju poprzecznego V .

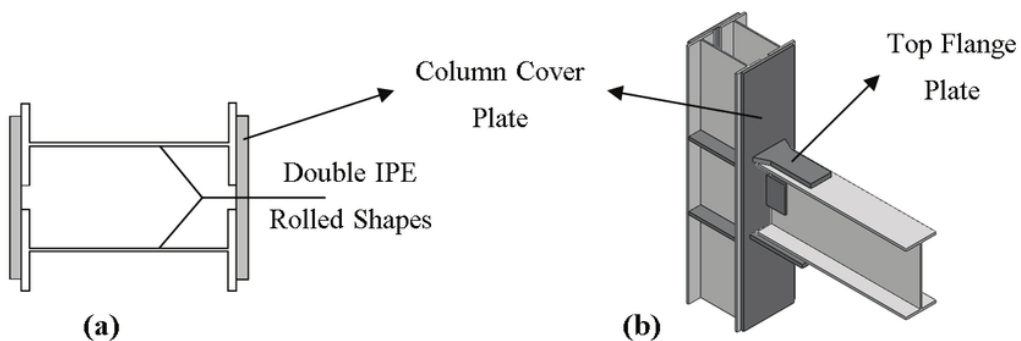
Zmniejszenie stosunku A_m / V spowalnia napływ ciepła i wzrost temperatury.



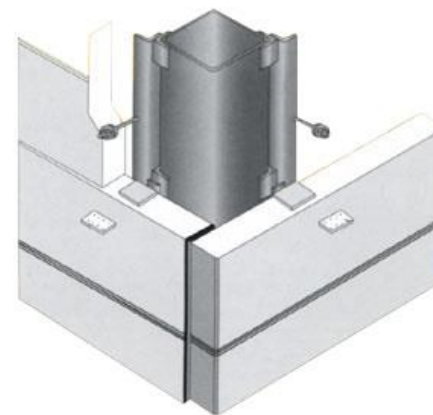
EN 1993-1-2 tab 4.2, tab. 4.3



Redukcja obwodu i
powiększenie powierzchni:



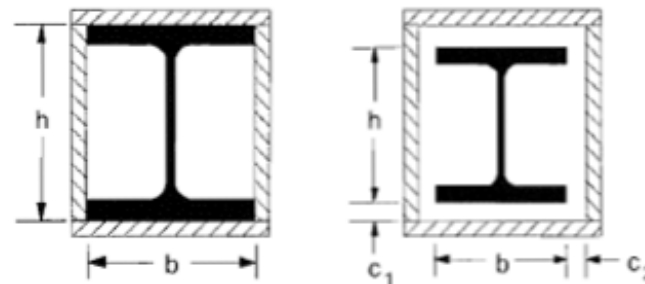
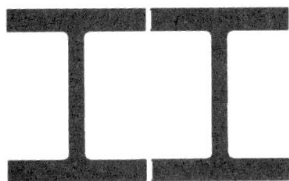
Redukcja obwodu (i
osłonięcie konstrukcji):



Rys: Ardeshir Deylami, Retrofitting of Moment Connection of Double-I Built-Up Columns using Trapezoidal Stiffeners, December 2011Procedia Engineering 14:2544-2551

Rys: ytong.asia

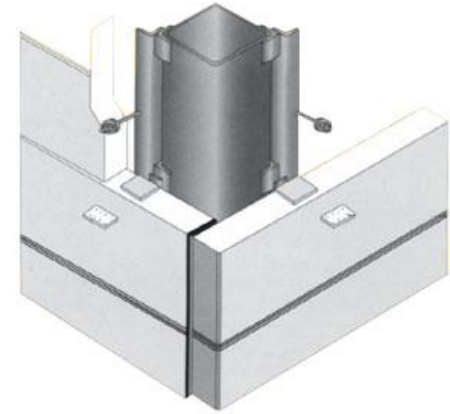
Rys: Autor



Rys: EN 1993-1-2 tab 4.2

Oślonięcie konstrukcji stalowej przez beton lub izolację termiczną znacząco wydłuża czas, w jakim temperatura stali wzrasta do punktu krytycznego.

Rys: ytong.asia



Rys: sharpfibre.com



Rys: techno-poz.pl

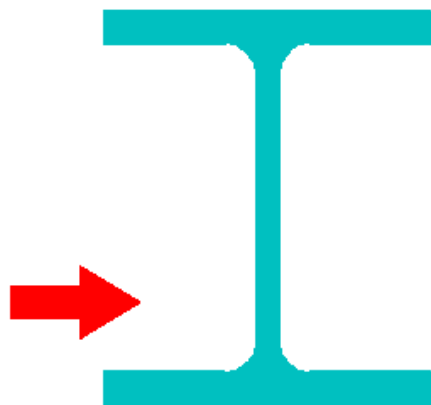




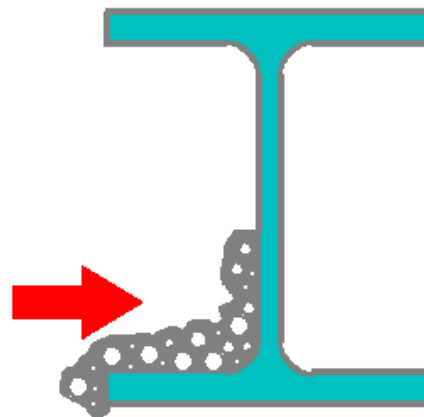
Porównanie słupów stalowych osłoniętych przez beton i nieosłoniętych

Rys: metabunk.org

Cała energia pożaru
oddziałuje na konstrukcję



Rys: Autor



Energia:

- zużyta na formowanie porów
- zużyta na odparowanie wody z porów
- zużyta na odparowanie powłoki
- pozostała część oddziałuje na konstrukcję

Znaczne opóźnienie działania ciepła na konstrukcję



Rys: propaintersnorthants.co.uk

Katastrofy

28 V 2003 centrum handlowe "Gigant"

Kraków

Podpalenie przez nieznaną sprawców + uszkodzony system zraszaczy.



Rys: rmf24.pl



Bez ofiar w
ludziach

Rys: b.aplus.pl



Rys: psp.krakow.pl



Rys: psp.krakow.pl



Rys: psp.krakow.pl



Rys: wiadomosci.wp.pl

Konstrukcja stalowa w warunkach pożaru: ogromne ugięcia i deformacje już po krótkim czasie działania ognia.



Rys: psp.krakow.pl



Rys: psp.krakow.pl



Rys: psp.krakow.pl



Rys: wiadomosci.wp.pl

Rys: 911research.wtc7.net



Rys: 911research.wtc7.net



Rys: 911research.wtc7.net



Rys: homelandsecuritynewswire.com

Aluminium





Rys: isel.com

Drugi z metali, używanych w budownictwie, ma całkowicie odmienne cechy związane z korozją i podatnością na temperaturę.



Rys: tradekorea.com

		
Stal	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Wysoka wytrzymałość ◆ Wysoki stopień prefabrykacji elementów ◆ Łatwość rozbudowy obiektów istniejących ◆ Możliwość rozbiórki bez zniszczenia elementów 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Podatna na korozję ◆ Brak odporności ogniowej
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Pełny recykling złomu ◆ Lekkość 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Wysoki koszt materiału ◆ Brak odporności ogniowej ◆ Podatność na destrukcję termiczną ◆ Niska wytrzymałość zmęczeniowa

→ #1 / 32

Aluminium jest znacznie bardziej odporne na korozję niż stal. Na powierzchni aluminium tworzy się hermetyczna warstwa tlenków, chroniąca przed korozją. Jedynie korozja kontaktowa (inne metale) i agresywne (bardzo mocno kwaśne lub bardzo silnie alkaliczne) chemikalia są niebezpieczne dla aluminium.



Rys: aluteam-alumeco.com.pl

Efektami ubocznymi tworzenia się hermetycznej warstwy tlenków aluminium mogą być rozległe plamy i przebarwienia. Efekt ten jest niekorzystny w przypadku ram okiennych. Dlatego aluminiowe elementy wykończeniowe są chronione przed korozją specjalnymi farbami / pokryciami.



Rys: bramsec.pl

Każde niekontrolowane działanie temperatur (proces spawania, pożar) całkowicie niszczy skutki utwardzania wydzieleniowego (stażenia) i obniża właściwości mechaniczne stopów aluminium.



Rys: stelmet.net



Rys: easternontarionetwork.com

Zależność między temperaturą a spadkiem wytrzymałości jest pokazana w:

- ♦ stal: EN 1993-1-2 fig E.2;
- ♦ aluminium: EN 1999-2 tab. 1.a.



Rys: easternontarionetwork.com

„Normalne” obliczenia, nie w przypadku pożaru:

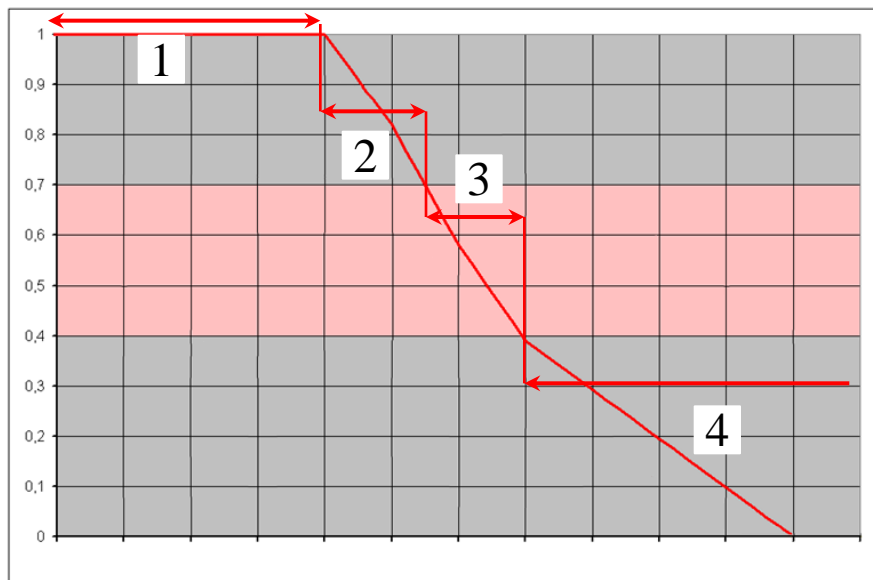
$$E / R \leq 1,0$$

Pożar – odrębne kombinacje obciążeń, zgodnie z EN 1991-1-2:

$$E_{\text{fire}} / R_{\text{fire}} \leq 1,0$$

$$E_{\text{fire}} \approx 40-70\% E$$

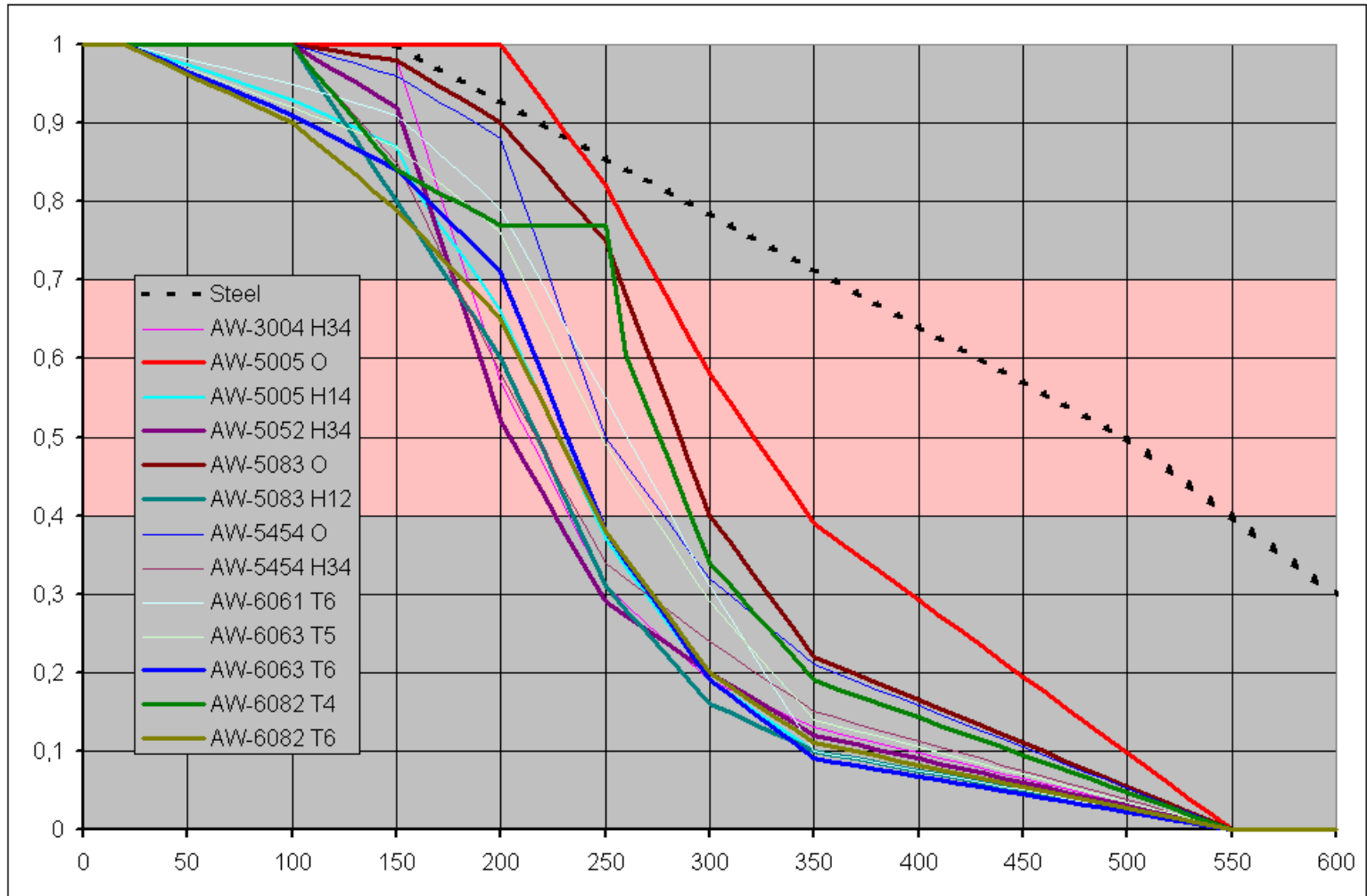
To znaczy, że dopóki $R_{\text{fire}} \geq 40-70\% R$, dopóty konstrukcja jest bezpieczna.



Rys: Autor

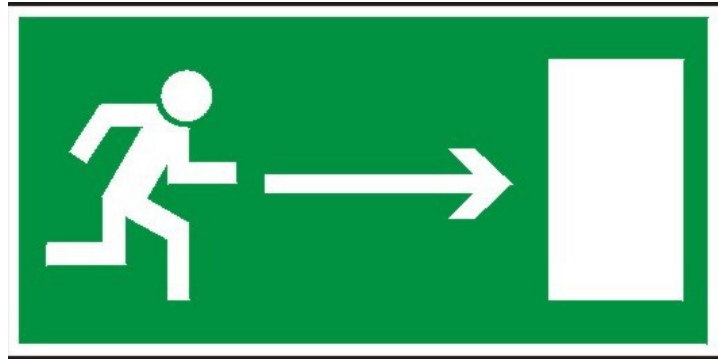
- 1 – bez wpływu temperatury na materiał;
- 2 – wpływ temperatury; nośność większa od obciążenia;
- 3 – wpływ temperatury; nośność może być mniejsza od obciążeń;
- 4 – wpływ temperatury; nośność z całą pewnością niższa od obciążeń;

Obie te zależności można przedstawić na wspólnym wykresie:



Rys: Autor

Wniosek: w przypadku pożaru, temperatura 300 °C (kres nośności konstrukcji aluminiowej) zostanie osiągnięty znacznie szybciej, niż 550 °C (kres nośności konstrukcji stalowej).



Rys: heron.waw.pl

Czas na ewakuację ludzi z konstrukcji aluminiowej jest zatem znacznie krótszy, niż w przypadku konstrukcji stalowej.

Fakt ten, obok znacznie wyższej ceny aluminium, ogranicza zastosowanie aluminium w budownictwie jako materiału na główne konstrukcje nośne.

Zagadnienia egzaminacyjne

Przyczyny korozji

Sposoby ochrony antykorozyjnej

Obliczanie konstrukcji stalowych w warunkach pożaru

Składowe R, E, I odporności ogniowej elementów - definicje

Sposoby ochrony p-poż

Stal i aluminium w warunkach pożaru – podobieństwa i różnice

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@pk.edu.pl