

Jerzy PILŚNIAK

REOLOGIA KONSTRUKCJI STALOWYCH W POŻARZE

Streszczenie. W artykule przedstawione są obliczenia statyczne kilku przykładów konstrukcji stalowych poddanych wpływom pożarów. W opisie własności stali budowlanej w wysokich temperaturach uwzględniono nieliniowe pełzanie ujęte zmodyfikowanym równaniem potęgowym.

NON-LINEAR CREEP STEELWORKS IN FIRE

Summary. In this article, the statical computation of some examples of steel constructions are presented. In the description of quality of steel in high temperatures non-linear creep is taken into consideration, shown a modified involution equation.

1. WPROWADZENIE

W opracowaniu rozważa się wpływ temperatur pożarowych na pracę statyczną konstrukcji stalowej. Zakłada się przy tym, że w fazie inicjacji pożaru stal konstrukcyjna opisywana może być jako materiał liniowo-sprężysty. Wraz ze wzrostem temperatury zaczynają się uwidaczniać nieliniowe własności materiałów, tak cieplne, jak również mechaniczne. Przedstawiany model obliczeniowy dotyczy tych konstrukcji, dla których naprężenia nie przekraczają $2/3$ granicy plastyczności, natomiast maksymalne naprężenia są mniejsze niż $2/3$ temperatury topnienia. W wyniku pożaru w konstrukcji pozostają trwałe deformacje konstrukcji oraz zmienione rozkłady sił wewnętrznych.

2. WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

t - czas

T_0 - temperatura początkowa

T_{sp} - temperatura spalin

λ_i - współ.¹ przewodności cieplnej na kier. i

c_p - pojemność cieplna

¹współczynnik

ρ - gęstość	α_T - współ. rozszerzalności liniowej stali
q_s - strumień ciepła	ε - odkształcenie
λ_n - współ. przewod. cieplnej na normalnej	ε_e - odkształcenie - liniowa sprężystość
α_k - współczynnik przejmowania ciepła	ε_T - odkształcenie termiczne
T_e - temperatura otoczenia	κ - krzywizna
T_s - temperatura elementu	z - współrzędna
σ - naprężenie	M, N - siły wewnętrzne - M, N
ϕ - geometryczny czynnik promieniowania	σ_{ij} - tensor naprężeń
ϵ - współczynnik emisyjności zastępczej	ε_{ij} - tensor odkształceń
T_r - temperatura źródła promieniowania	ϕ_i, ψ_i - funkcje kształtu
ε_v - odkształcenie - nieliniowe pelzanie	δ_i - przemieszczenia węzłowe
E - moduł sprężystości	E^α - moduł sprężystości dla warstwy α
E_a - energia aktywacji pelzania	b^α - szerokość warstwy α
T - temperatura	z^α - współrzędna środka warstwy α
Θ - przyrost temperatury	

3. PRZEPIŁY WY CIEPŁA W TRAKCIE POŻARU

Temperaturę spalin, a tym samym otoczenia ogrzewanej powierzchni profilu, zmienną w czasie, można przyjąć w postaci zależności (Krzywa N - norma w [3, 4]):

$$T_{sp} = T_0 + 345 \log\left(\frac{8}{60} t[s] + 1\right) \quad (1)$$

Proces przepływu ciepła opisuje klasyczne równanie różniczkowe niestacjonarnego przewodnictwa cieplnego:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Można założyć upraszczająco, że powierzchnie boczne są idealnie izolowane. Otrzymuje się wtedy:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Przekazywanie ciepła przez nieizolowane powierzchnie zewnętrzne opisano relacją:

$$q_s = \lambda_n \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4)$$

W równaniu (4) strumień ciepła ujmuje zarówno konwekcyjny, jak i radiacyjny przepływ ciepła. Wpływ konwekcji należałoby przyjąć zgodnie z opisem Newtona, a wpływ promieniowania wg zasady Stefana-Boltzmana:

$$q_s = \alpha_k (T_e - T_s) + \sigma \phi \epsilon (T_r^4 - T_s^4) \quad (5)$$

Przybliżone rozwiązanie tak skonstruowanego układu nieliniowego równań różniczkowych uzyskano metodą różnic skończonych, a dokładniej wersją metody różnic skończonych posługującą się uogólnionymi wielkościami niewiadomymi [2]).

4. RÓWNANIA FIZYCZNE DLA STALI

Przyjęto w rozważaniach następujące równania nieliniowego pełzania nieustalonego, przy założeniu, że $0.4 < T/T_m < 0.8$, oraz $0 < |\sigma|/R_r < 0.8$:

$$\dot{\epsilon}_v = C(\dot{T}, T) \mathcal{P}(\sigma) = C_1 \left(1 + C_2 \left| \dot{T} \right| \right) e^{-\frac{E_a}{T}} \mathcal{P}(\sigma) \quad (6)$$

gdzie przyjęto: $\mathcal{P}(x) \stackrel{\text{def}}{=} |x|^n \text{sign}(x)$ oraz $\mathcal{P}^I(x) \stackrel{\text{def}}{=} |x|^{1/n} \text{sign}(x)$. Równanie (6) uzupełniono o wpływy sprężyste oraz temperaturowe:

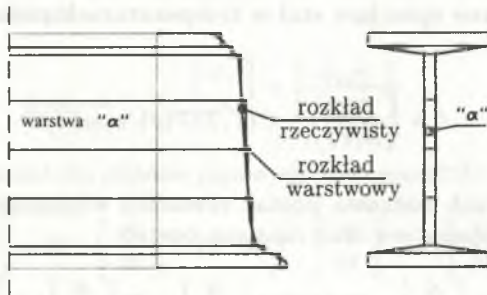
$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\sigma}{E(T)} \right) + C(\dot{T}, T) \mathcal{P}(\sigma) + \alpha_T(T) \dot{\Theta} \quad (7)$$

Równanie (7) opisuje efekty sprężyste, wpływy termiczne oraz nieliniowe nieustalonego pełzania.

5. ZALEŻNOŚĆ DEFORMACJI OD SIŁ WEWNĘTRZNYCH

5.1. Pręt warstwowy - podział na warstwy

Przekroje prętów poddanych niestacjonarnemu działaniu temperatury analizuje się metodami stosowanymi w konstrukcjach warstwowych ([8, 5, 7, 6]). Zakłada się zatem, że pręt zostaje podzielony na kilka warstw o stałych parametrach zewnętrznych (temperatura). Zatem zamiast ciągłego wykresu temperatury przyjmuje się wykres schodkowy (rys.1). Całkowanie po całym przekroju zastępuje się sumą z całek po każdej warstwie.



Rys. 1. Podział przekroju pręta na warstwy

Fig. 1. Laminar bar

W dalszych rozważaniach dokonano dalszego uproszczenia: zakłada się mianowicie, że w danej warstwie stałe są wszystkie wielkości, takie jak naprężenia, temperatura, prędkość

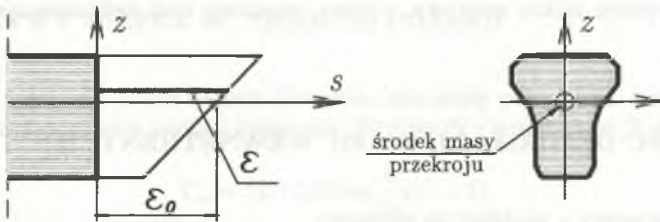
zmian temperatury itp. Takie podejście wymusza stosowanie gęstego podziału na warstwy².

5.2. Określenie zależności $\kappa(M, N, T, t)$ i $\dot{\epsilon}_0(M, N, T, t)$

Przyjęto założenie o addytywności zmian prędkości odkształceń [6] dla części sprężystej, nieliniowej, temperaturowej, tzn. $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_v + \dot{\epsilon}_T$. Dodatkowo przyjęto:

- 1) zależności geometryczne liniowe:

$$\dot{\epsilon} = \kappa z + \dot{\epsilon}_0 \quad \text{oraz dla warstwy } \alpha : \dot{\epsilon}^\alpha = \kappa^\alpha z + \dot{\epsilon}_0^\alpha \quad (8)$$



Rys. 2. Zależności geometryczne

Fig. 2. Geometric relationship

- 2) zależności fizyczne opisujące stal w temperaturach pożarowych:

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\dot{\sigma}}{E(T)} \right) + C(T, T) \mathcal{P}(\sigma) + \overline{\alpha_T(T) \Theta} \quad (9)$$

Po przekształceniach końcowa postać równania wiążącego odkształcenia i siły wewnętrzne, temperaturę oraz czas ma postać:

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_0 \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{N} \\ \dot{M} \end{bmatrix} - \mathbf{D}^{-1} \dot{\mathbf{D}} \mathbf{D}^{-1} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} + \mathcal{F} \left(\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \Delta_{T1} \\ \Delta_{T2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Równanie (10) jest nieliniowym równaniem określającym zależność zmian $\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\kappa}$ jako funkcji sił wewnętrznych.

²Można stosować dowolnie gęste podziały, gdyż rozkład temperatury w przekroju jest ciągły. W przypadku pręta naprawdę warstwowego (np. belka warstwowa (żelbet i stal) łączona spoiwem o własnościach np. plastycznych lub reologicznych) podział na warstwy jest wymuszony w sposób naturalny.

6. RÓWNANIA MES

Obecnie wyprowadzone zostaną równania MES dla płaskich układów prętowych z uwzględnieniem nieliniowego pełzania oraz wpływów termicznych.

- Na podstawie prędkościowej formy zasady prac wirtualnych [10, 1] można napisać:

$$\int_A \dot{P}_k \delta \dot{u}_k dA = \int_V \dot{\sigma}_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV \quad (11)$$

Dla ustrojów prętowych uzyskuje się następującą formę (s - współrzędna na długości):

$$\int_A \dot{P}_k \delta \dot{u}_k dA = \int_s \dot{M} \delta \dot{\kappa} ds + \int_s \dot{N} \delta \dot{\epsilon}_0 ds \quad (12)$$

lub bardziej zwięźle:

$$\int_A \dot{P}_k \delta \dot{u}_k dA = \int_s \begin{bmatrix} \dot{N} \\ \dot{M} \end{bmatrix}^T \delta \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_0 \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} ds \quad (13)$$

- Zakładamy spełniającą odpowiednie warunki funkcję kształtu:

$$\begin{bmatrix} w(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_i \delta_i \\ \psi_i \delta_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

gdzie jako $y(s)$, $w(s)$, δ_i oznaczono funkcje przemieszczeń prostopadłych i równoległych do osi pręta oraz przemieszczenia węzłowe. Na podstawie zależności (14) można napisać:

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_0 \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{i,s} \dot{\delta}_i \\ \psi_{i,ss} \dot{\delta}_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

- Równanie fizyczne dla układów prętowych (równanie (10)):

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_0 \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{N} \\ \dot{M} \end{bmatrix} - \mathbf{D}^{-1} \dot{\mathbf{D}} \mathbf{D}^{-1} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} + \mathcal{F} \left(\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \Delta_{T1} \\ \Delta_{T2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dwa pierwsze składniki związane są z własnościami sprężystymi materiału. Trzeci składnik uwzględnia nieliniowe pełzanie. Ostatni jest związany z rozszerzalnością termiczną materiału. Zakłada się, że stałe materiałowe są zależne od temperatury.

- Ostatnią zależnością potrzebną do opisu zagadnienia jest równanie równowagi węzła układu:

$$\dot{P}_i^w = 0 \quad (17)$$

Powyższy układ równań w pełni określa zadanie wyznaczenia równań MES. Po odwróceniu zależności (16):

$$\begin{bmatrix} \dot{N} \\ \dot{M} \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_0 \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} + \mathfrak{N}(\dots) \quad (18)$$

gdzie jako \mathfrak{N} oznaczono część nieliniową³ równania (16). Podstawiając otrzymany związek oraz funkcję kształtu (15) do (13) otrzymamy:

$$\int_A \dot{P}_i^w \delta_i dA = \int_s \left(\mathbf{D} \begin{bmatrix} \phi_{j,s} \delta_j \\ \psi_{j,ss} \delta_j \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} \phi_{i,s} \dot{\delta}_i \\ \psi_{i,ss} \dot{\delta}_i \end{bmatrix} ds + \int_s \mathfrak{N}^T \begin{bmatrix} \phi_{i,s} \dot{\delta}_i \\ \psi_{i,ss} \dot{\delta}_i \end{bmatrix} ds \quad (19)$$

ostatecznie

$$\dot{P}_i^w = \int_s \left(\mathbf{D} \begin{bmatrix} \phi_{j,s} \\ \psi_{j,ss} \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} \phi_{i,s} \\ \psi_{i,ss} \end{bmatrix} ds \dot{\delta}_j + \int_s \mathfrak{N}^T \begin{bmatrix} \phi_{i,s} \\ \psi_{i,ss} \end{bmatrix} ds \quad (20)$$

Wprowadzając oznaczenia, uzyska się:

$$\dot{P}_i^w = \mathcal{K}_{ij}^a(T) \dot{\delta}_j + \mathcal{K}_i^c(T, \dot{T}, M, N) \quad (21)$$

Równanie (21) jest poszukiwanym równaniem MES dla płaskich układów prętowych z uwzględnieniem nieliniowego pełzania oraz wpływów termicznych. Rozwiązanie powyższego równania przebiegać więc musi na drodze iteracyjnej. Proces iteracyjny rozpoczyna się od wartości sił wewnętrznych i ugięć otrzymanych dla układu sprężystego bez obciążenia termicznego.

W obliczeniach numerycznych przyjęto funkcję kształtu dla pręta w postaci wielomianu trzeciego stopnia. Macierz \mathbf{D} wtedy przybierze formę⁴:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{\alpha} E^{\alpha} b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} & \sum_{\alpha} E^{\alpha} z^{\alpha} b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} \\ \sum_{\alpha} E^{\alpha} z^{\alpha} b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} & \sum_{\alpha} E^{\alpha} (z^{\alpha})^2 b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{D}} &= \begin{bmatrix} \dot{D}_{11} & \dot{D}_{12} \\ \dot{D}_{12} & \dot{D}_{22} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{\alpha} \dot{E}^{\alpha} b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} & \sum_{\alpha} \dot{E}^{\alpha} z^{\alpha} b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} \\ \sum_{\alpha} \dot{E}^{\alpha} z^{\alpha} b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} & \sum_{\alpha} \dot{E}^{\alpha} (z^{\alpha})^2 b^{\alpha} \Delta z^{\alpha} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

7. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

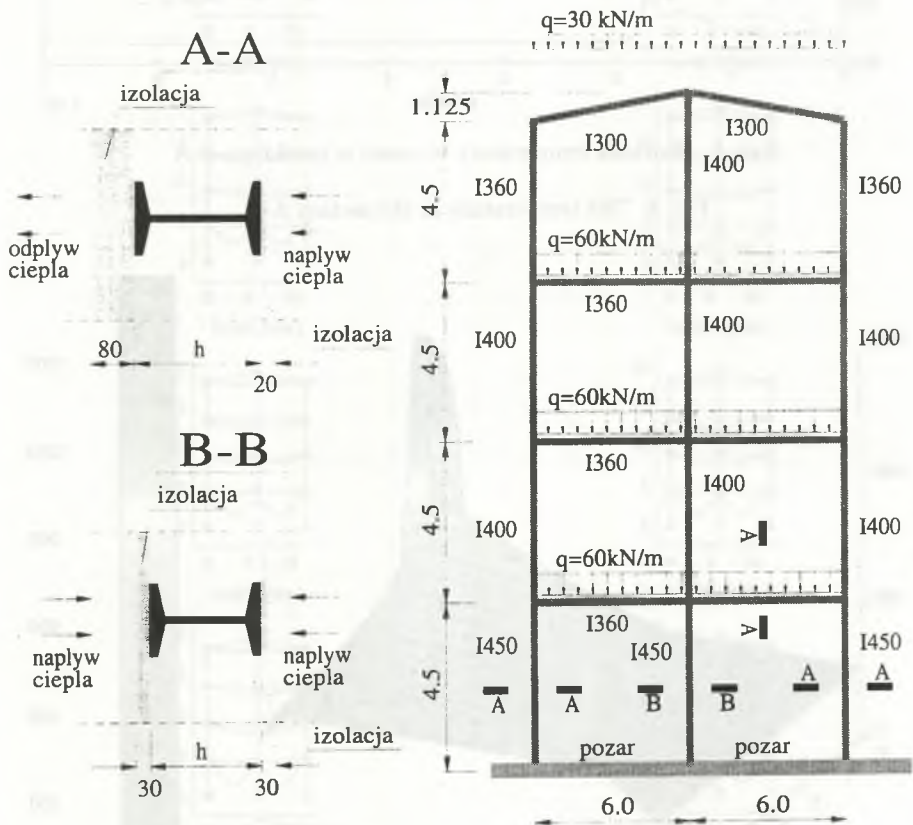
7.1. Opis schematu statycznego i obciążenia

W tym przykładzie schematem statycznym jest rama czterokondygnacyjna, dwunawowa. Dane materiałowe przyjęto na podstawie opracowania Skowroński W. (1992) [9].

³ $\mathfrak{N}(\dots)$ jest funkcją zależną od sił wewnętrznych M, N , prędkości ich zmian, temperatury oraz prędkości zmian temperatury. Jest to funkcja nieliniowa ujmująca wpływy nieliniowego pełzania i temperatury.

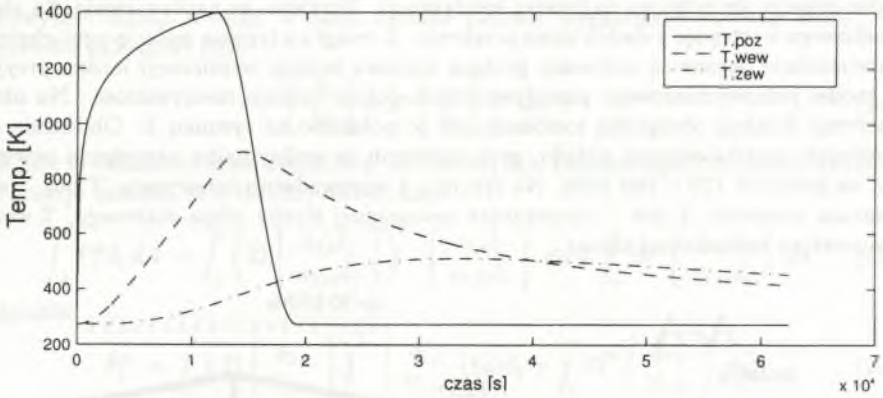
⁴Założono, że wszystkie parametry w warstwie są stałe. Takie przybliżenie przy odpowiednim zagęszczeniu warstw można uznać za dostatecznie dokładne. Jest to oczywiście najprostsza aproksymacja całki.

Pożar rozwija się tylko na najniższej kondygnacji. Przyjęto, że napływ ciepła dla słupa środkowego występuje z dwóch stron przekroju. Z uwagi na typową izolację ogniochronną (powierzchnie boczne są izolowane grubszą warstwą izolacji termicznej) można przyjąć, że model jednowymiarowego przepływu ciepła dobrze opisuje rzeczywistość. Na układ statyczny działają obciążenia rozłożone, jak to pokazano na rysunku 3. Obliczenia poprzedzono projektowaniem układu, przy założeniu że maksymalne naprężenia powinny być na poziomie 120 – 180 MPa. Na rysunku 4 wprowadzono oznaczenia: T_{poz} - temperatura normowa, T_{zew} - temperatura zewnętrznej strony słupa stalowego, T_{wew} - temperatura wewnętrznej strony.



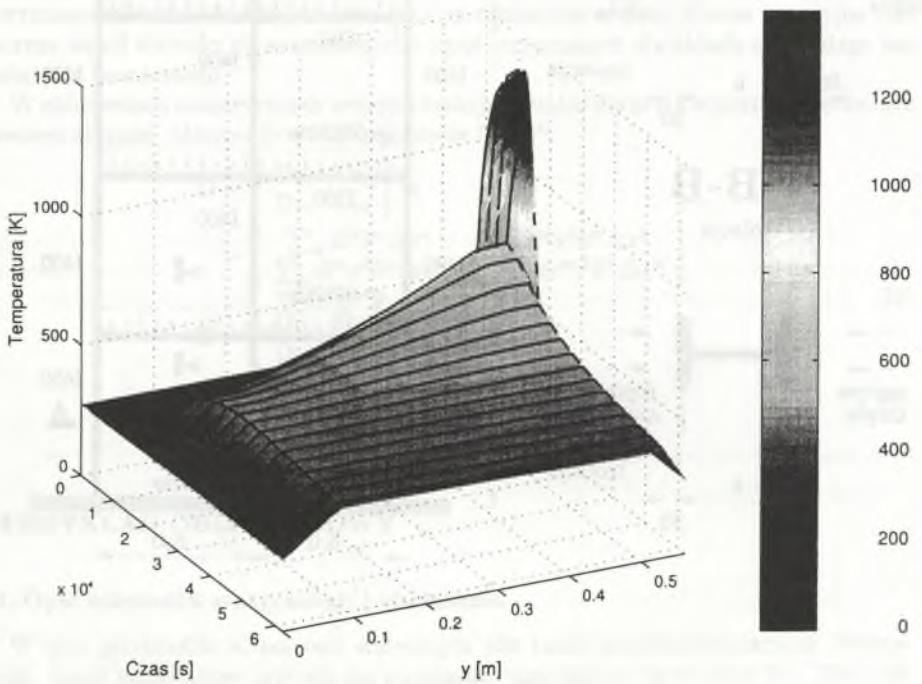
Rys. 3. Obliczana rama

Fig. 3. The steelwork



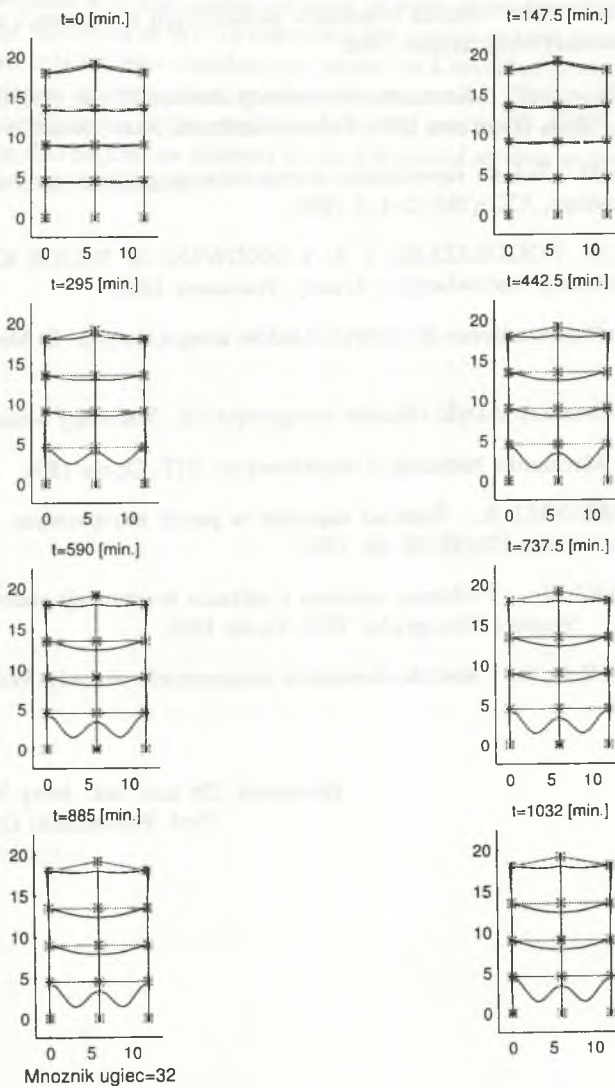
Rys. 4. Rozkład temperatury w czasie w przekroju A-A

Fig. 4. The temperature in the section A-A



Rys. 5. Rozkład temperatury w przekroju A-A

Fig. 5. The temperature distribution in the section A-A



Rys. 6. Ewolucja deformacji ramy

Fig. 6. The displacement

LITERATURA

- [1] GRYZMAŃSKI M.: Metoda elementów skończonych w liniowej i nieliniowej mechanice. Materiały seminaryjne, 1992.
- [2] KLEIBER M. i inni: Komputerowe metody mechaniki ciał stałych. Mechanika Techniczna. PWN, Warszawa 1995. Polska Akademia Nauk, Komitet Mechaniki.
- [3] KOSIOREK M.: Zasady zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego budynków. Materiały Budowlane, XXII(285):2-4, 5 1996.
- [4] KOSIOREK M., POGORZELSKI J. A., LASKOWSKA Z., PILICH K.: Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa 1988.
- [5] KUBIK J.: Wprowadzenie do statyki układów niesprężystych. 3. Monografie WSI, Opole 1983.
- [6] KUBIK J.: Elementy statyki układów niesprężystych. Materiały seminaryjne, 1993.
- [7] KUBIK J.: Mechanika konstrukcji warstwowych. TiT, Opole 1994.
- [8] KUBIK J., WRÓBEL R.: Rozkład naprężeń w pręcie warstwowym. Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, 179(35):55-65, 1992.
- [9] SKOWROŃSKI W.: Problemy nośności i pełzania konstrukcji stalowych w pożarach, tom 62. Studia i Monografie. WSI, Opole 1992.
- [10] ZIENKIEWICZ O. C.: Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1972.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Wyrwał
Prof. Politechniki Opolskiej

Abstract

This article deals with the statical analysis of some examples of steel constructions subjected to the influences of fire. In describing the quality of steel in high temperatures non-linear creep is taken into consideration, shown as a modified involution equation, as well as the variation of thermal and mechanical parameters. The distribution of temperatures in the construction is the result of solving the non-linear equation of the thermal conductivity. In this regard the different types of fireproof screens on temperature distribution is taken into consideration.

WARIANTY WYKONANIA OCHRONY PRZECIWOPOŻAROWEJ

W artykule przedstawiono analizę statyczną niektórych przykładów konstrukcji stalowych podlegających oddziaływaniu ognia. W opisie właściwości stali w wysokich temperaturach uwzględniono nielinię zmięknienie, wyrażone równaniem zmodyfikowanej involucji, oraz zmiany parametrów termicznych i mechanicznych. Rozkład temperatury w konstrukcji jest wynikiem rozwiązania nieliniowego równania przewodności cieplnej. W tym zakresie rozważono różne typy ekranów ogniochronnych i ich wpływ na rozkład temperatury w konstrukcji.

WARIANTY WYKONANIA OCHRONY PRZECIWOPOŻAROWEJ

W artykule przedstawiono analizę statyczną niektórych przykładów konstrukcji stalowych podlegających oddziaływaniu ognia. W opisie właściwości stali w wysokich temperaturach uwzględniono nielinię zmięknienie, wyrażone równaniem zmodyfikowanej involucji, oraz zmiany parametrów termicznych i mechanicznych. Rozkład temperatury w konstrukcji jest wynikiem rozwiązania nieliniowego równania przewodności cieplnej. W tym zakresie rozważono różne typy ekranów ogniochronnych i ich wpływ na rozkład temperatury w konstrukcji.

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono analizę statyczną niektórych przykładów konstrukcji stalowych podlegających oddziaływaniu ognia. W opisie właściwości stali w wysokich temperaturach uwzględniono nielinię zmięknienie, wyrażone równaniem zmodyfikowanej involucji, oraz zmiany parametrów termicznych i mechanicznych. Rozkład temperatury w konstrukcji jest wynikiem rozwiązania nieliniowego równania przewodności cieplnej. W tym zakresie rozważono różne typy ekranów ogniochronnych i ich wpływ na rozkład temperatury w konstrukcji.

W artykule przedstawiono analizę statyczną niektórych przykładów konstrukcji stalowych podlegających oddziaływaniu ognia. W opisie właściwości stali w wysokich temperaturach uwzględniono nielinię zmięknienie, wyrażone równaniem zmodyfikowanej involucji, oraz zmiany parametrów termicznych i mechanicznych. Rozkład temperatury w konstrukcji jest wynikiem rozwiązania nieliniowego równania przewodności cieplnej. W tym zakresie rozważono różne typy ekranów ogniochronnych i ich wpływ na rozkład temperatury w konstrukcji.

W artykule przedstawiono analizę statyczną niektórych przykładów konstrukcji stalowych podlegających oddziaływaniu ognia. W opisie właściwości stali w wysokich temperaturach uwzględniono nielinię zmięknienie, wyrażone równaniem zmodyfikowanej involucji, oraz zmiany parametrów termicznych i mechanicznych. Rozkład temperatury w konstrukcji jest wynikiem rozwiązania nieliniowego równania przewodności cieplnej. W tym zakresie rozważono różne typy ekranów ogniochronnych i ich wpływ na rozkład temperatury w konstrukcji.