

Michał MATHEJA

NOŚNOŚĆ GRANICZNA STALOWEJ KONSTRUKCJI PRĘTOWEJ W CZASIE POŻARU

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono metodę obliczenia wartości momentu uplastycznienia dowolnego przekroju stalowego zmieniającej się w czasie pożaru. Przy wyznaczaniu rozkładu temperatur w przekroju wykorzystano model pręta warstwowego. Uwzględniono zależność parametrów materiału od temperatury.

THE LIMITING BEARING CAPACITY OF THE STEEL STRUCTURE IN FIRE

Summary. The method of calculating for a yield moment in fire is described in the paper. The temperature, in time and in an arbitrary point of section, can be found because of the sandwich model of a steel beam. Inconstant steel physical properties are taken into consideration.

GRENZBELASTUNG DES STAHLSTABSYSTEMS IM BRANDFALL

Zusammenfassung. In der Bearbeitung wurde ein Verfahren vorgestellt, das die Berechnung des im Brand wechselnden Plastifizierungsmomentes für ein beliebiges Stahlprofil ermöglicht. Bei der Bestimmung der Temperaturverteilung im Profil wurde das Modell des Schichtenstabs benutzt. Die Abhängigkeit der Stoffparameter von der Temperatur wurde berücksichtigt.

1. WPROWADZENIE

Własności materiałów konstrukcyjnych zmieniają się wraz ze zmianą temperatury. Materiałem szczególnie wrażliwym na działanie wysokiej temperatury jest stal. Jak wiadomo - wzrost temperatury powoduje m.in. obniżenie granicy plastyczności stali. W efekcie dochodzi do uplastycznienia we włóknach, w których dotychczas naprężenia wywołane obciążeniem mechanicznym nie osiągały granicy plastyczności.

Uplastycznienie na całej wysokości przekroju obciążonego maksymalnym momentem zginającym prowadzi do powstania przegubu plastycznego, a tym samym do zmniejszenia stopnia statycznej niewyznaczalności układu, lub - po powstaniu odpowiedniej liczby takich przegubów - do zniszczenia konstrukcji.

W opracowaniu przedstawiono propozycję metody oszacowania wartości momentu zginającego wywołującego powstanie przegubu plastycznego, czyli momentu uplastycznienia, zmieniającego się w zależności od czasu trwania pożaru - dla pręta o dowolnym przekroju.

2. ROZKŁAD TEMPERATUR W OGRZEWANYM PRĘCIE

Założono, że podczas pożaru bezpośredniemu oddziaływaniu wysokiej temperatury poddana jest jedna z powierzchni zewnętrznych profilu stalowego. Przyjęto ponadto, że boczne powierzchnie elementu stalowego są doskonale izolowane. W praktyce taką izolację stanowić może np. beton, a biorąc pod uwagę różnice współczynników przewodności cieplnej obu materiałów przyjęty model nie odbiega znacznie od rzeczywistości. Ponadto założono, że temperatura otoczenia nieogrzewanej powierzchni pręta (przeciwnieległej w stosunku do powierzchni ogrzewanej) jest stała. Wykorzystano model pręta warstwowego. Na podstawie powyższych założeń oraz równań fizycznych opisujących pożar i proces przewodnictwa cieplnego opracowano algorytm umożliwiający oszacowanie rozkładu temperatury w pręcie w dowolnym czasie trwania pożaru konstrukcji.

Bezpośrednią przyczyną ogrzewania konstrukcji podczas pożaru stają się spaliny. Temperaturę spalin, a tym samym otoczenia ogrzewanej powierzchni profilu, zmienną w czasie, przyjmuje się zazwyczaj w postaci zależności:

$$T_p = T_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

gdzie:

T_p - temperatura spalin,

T_0 - temperatura początkowa,

t - czas trwania pożaru podawany w minutach.

Proces przepływu ciepła w dowolnym materiale ortotropowym opisuje klasyczne równanie różniczkowe niestacjonarnego przewodnictwa cieplnego:

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

gdzie:

T - temperatura,

x, y, z - współrzędne kartezjańskie,

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - współczynniki przewodności cieplnej

dla poszczególnych kierunków,

c_p - ciepło właściwe,

ρ - gęstość.

Uwzględniając doskonałą izolację powierzchni bocznych oraz fakt, że na całej długości elementu temperatura otoczenia jest jednakowa, równanie powyższe przedstawić można w postaci:

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

Do rozwiązania problemu konieczne jest sformułowanie warunków brzegowych. Przekazywanie ciepła przez nieizolowane powierzchnie zewnętrzne opisano relacją:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial n} = q_x \quad (4)$$

gdzie:

n - kierunek prostopadły do powierzchni,
w tym wypadku x ,
 q_x - strumień ciepła.

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

$$q_x = \alpha_t (T_x - T_o) + \sigma \varphi \varepsilon (T_x^4 - T_o^4) \quad (5)$$

gdzie:

α_t - współczynnik przyjmowania ciepła przez konwekcję,
 T_o - temperatura otoczenia,
 T_x - temperatura powierzchni,
 σ - stała Stefana-Boltzmannna,
 φ - geometryczny czynnik promieniowania,
 ε - współczynnik emisyjności zastępczej,
 T_o - temperatura źródła promieniowania.

Relację powyższą przekształcono do postaci:

- dla powierzchni ogrzewanej:

$$q_x = \alpha_t (T_x - T_o) + \sigma \varphi \varepsilon (T_x^4 - T_o^4) = \alpha (T_x - T_o) \quad (6)$$

gdzie:

T_o - temperatura ogrzewanej powierzchni,
 α - współczynnik przyjmowania ciepła:

$$\alpha = \alpha_t + \sigma \varphi \varepsilon (T_x^2 + T_o^2) (T_x + T_o) \quad (7)$$

- dla powierzchni przeciwnieległej:

$$q_x = \alpha_t (T_x - T_o) + \sigma \varphi \varepsilon (T_x^4 - T_o^4) = \alpha (T_x - T_o) \quad (8)$$

gdzie:

T_o - temperatura powierzchni zewnętrznej,

$$\alpha = \alpha_t + \sigma \varphi \varepsilon (T_x^2 + T_o^2) (T_x + T_o) \quad (9)$$

Jako warunki początkowe określić należy rozkład temperatury w pręcie w chwili $t=0$. Rozkład ten przyjmować można jako stały (np. $T=293$ K) lub - w przypadku różnicy temperatur między otoczeniem obu powierzchni zewnętrznych - jako liniowo zmienny. Równanie (2) wraz z warunkami brzegowymi (4) oraz początkowymi określa problem cieplny.

Dalsze rozważania wymagają sprecyzowania poszczególnych wielkości fizycznych zależnych od temperatury. Zgodnie z doświadczeniami możliwe jest przyjęcie następujących zależności "stałych materiałowych" i temperatury (por. [1]):

$$\lambda(T) = 78 - 0.048T \quad (10)$$

$$c_p(T) = 310 + 0.48T \quad (11)$$

$$\alpha(T) = 29 + 5.77s_{red} \frac{(T_p/100)^4 - (T_1/100)^4}{T_p - T_1} \quad (12)$$

oraz

$$\alpha(T) = 29 + 5.77s_{red} \frac{(T_n/100)^4 - (T_0/100)^4}{T_n - T_0} \quad (13)$$

gdzie:

$$s_{red} = (1/s + 1/s_0 - 1) \quad (14)$$

s_{red} - zredukowany współczynnik poziomu czarności układu

s, s_0 - współczynniki poziomu czarności dla otoczenia i powierzchni elementu.

Przybliżone rozwiązanie tak skonstruowanego układu nieliniowych równań różniczkowych uzyskano poprzez przeprowadzenie podziału elementu na warstwy (model pręta warstwowego). Obliczenia wykazały, że zadowalającą zbieżność rozwiązań uzyskuje się już przy podziale na kilka warstw - np. 6. Następnie dla każdej i -tej warstwy konstruuje się równanie bilansu ciepła. Lewą stroną równania stanowi ilość ciepła przekazanego z poprzedniej warstwy bądź - dla pierwszej warstwy - z otoczenia. Prawa strona równania ujmuje sumę ilości ciepła przejętego przez warstwę oraz przekazanego do kolejnej warstwy bądź - dla warstwy ostatniej - wyekspediowanego na zewnątrz. Różniczkę temperatury po czasie zastąpiono różnicami skończonymi, co przy zastosowaniu interwałów czasu w granicach 1-5 sekund pozwala uzyskać wyniki o satysfakcjonującej zbieżności. Rozwiązanie stanowią wartości temperatury na granicy sąsiednich warstw w określonej dowolnej chwili czasu trwania pożaru.

3. OSZACOWANIE MOMENTU UPLASTYCZNIENIA

Badania empiryczne pozwoliły określić zależność między temperaturą a granicą plastyczności stali. Dla zakresu temperatur do 600°C przyjmować można relację:

$$R(T) = \left(1 + \frac{T}{900 \ln(T/1750)}\right) R_s, \quad (15)$$

gdzie:

T - temperatura stali (podawana w °C),

R_s - granica plastyczności dla $T=0^\circ\text{C}$,

a dla temperatur w zakresie 600-1000°C:

$$R(T) = \left(\frac{340 - 0.34T}{T - 240} \right) R_s \quad (16)$$

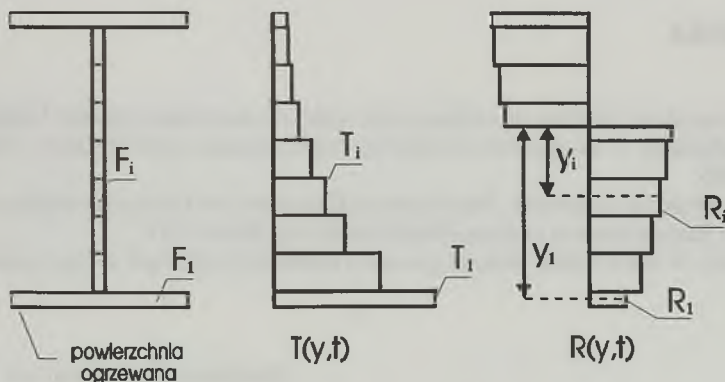
Ustalenie rozkładu temperatur w poszczególnych warstwach pozwala na proste wyznaczenie odpowiadających im granic plastyczności, a następnie wyznaczenie momentu uplastycznienia. W chwili uplastycznienia granice te będą różne w poszczególnych warstwach. Przy założeniu zginania przy pominięciu wpływu siły osiowej:

$$N = \int_F \sigma dF = \int_F R(T) dF = \sum_i R_i(T_i) F_i = 0 \quad (17)$$

wyznaczyć można położenie osi obojętnej, a następnie obliczyć wartość momentu uplastycznienia dla danej chwili czasu trwania pożaru ze wzoru:

$$M_{pl} = \int_F R(T) dF = \sum_i R_i(T_i) y_i F_i \quad (18)$$

Sformułowany program obliczeniowy umożliwia przeprowadzenie takich obliczeń dla pręta o dowolnym przekroju.

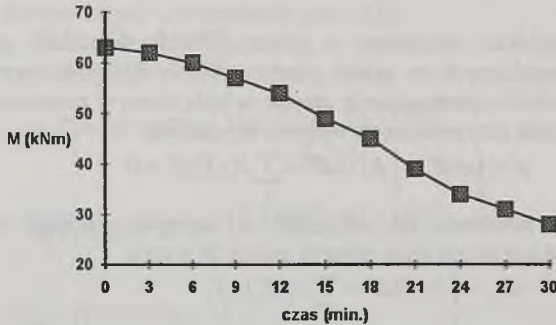


Rys. 1. Rozkład temperatur i naprężeń w ogrzewanej belce stalowej w chwili uplastycznienia

Fig. 1. Temperature and stress distribution in the heated steel beam in plasticity

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Obliczenia przeprowadzono dla dwuteownika I200. Wymiary dwuteownika uśredniono przyjmując stałe grubości jego pólki i średnika. Profil podzielono na 11 warstw, interwał czasowy przyjęto równy 3 sekundy. Wyniki obliczeń ilustruje wykres.



Rys. 2. Wykres zależności momentu uplastycznienia od czasu trwania pożaru dla I200
 Fig. 2. Dependence of plasticity moment and time of fire for I200

LITERATURA

- [1] A. I. Jakowlew. Разчёт огнестойкости строительных конструкций. Moskwa 1988.
- [2] B. Barthelemy, J. Kупра. Огнестойкость строительных конструкций. Moskwa 1985.
- [3] O. Jungbluth, W. Gradwohl. Berechnen und Bemessen von Verbundprofilstäben bei Raumtemperatur und unter Brandeinwirkung. Berlin 1987.
- [4] J. Kubik, W. Skowroński. Nośność graniczna konstrukcji stalowych w czasie pożaru.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Kubik

Wpłynęło do Redakcji 5.06.1995r.

Abstract

In the paper equation of heat flow in a steel element, which is heated up from one side (lower or upper), are proposed. Ideal thermal isolation of a lateral surface is assumed. Empirical relation describes ambient temperature during fire. Inconstant steel physical properties are taken into consideration. The temperature, in time and in an arbitrary point of section, can be found because of the sandwich model of a steel beam. Relation of temperature and a yield point is shown. On the basis of relation shown above, the way of determination of relation of a yield moment and time is described. Formulated a program can find relations of a flow moment and time in fire for arbitrary cross-section. A numeric example is calculated for the profile I200.