

Michał MATHEJA

SZACOWANIE ZMIAN STANU KONSTRUKCJI STALOWYCH W CZASIE POŻARU

Streszczenie. Opracowanie przedstawia propozycję metody szacowania zmian stanu stalowych konstrukcji prętowych poddanych działaniom wysokich temperatur. Metoda umożliwia uzyskanie w dowolnym czasie początkowej fazy trwania pożaru - rozkładów sił wewnętrznych, deformacji konstrukcji oraz rozkładów naprężeń i odkształceń w przekrojach. Do jej opracowania zastosowano przyrostową wersję metody elementów skończonych.

SCHÄTZUNG DER VERÄNDERUNGEN DER STAHLKONSTRUKTIONEN WÄHREND DES BRANDES

Zusammenfassung. Der Beitrag stellt einen Vorschlag für ein Verfahren zur Schätzung der Veränderungen des Standes der durch die hohen Temperaturen belasteten Stahlkonstruktionen vor. Das Verfahren ermöglicht die Berechnung der Verteilung der Innenkräfte, Deformationen in der Konstruktion sowie Verteilung der Spannungen und Formänderungen in Querschnitten für beliebige Zeit in der Anfangsphase des Brandes. Zur Bearbeitung wurde die inkrementale Form des Verfahrens der finiten Elemente angewendet.

1. Wprowadzenie

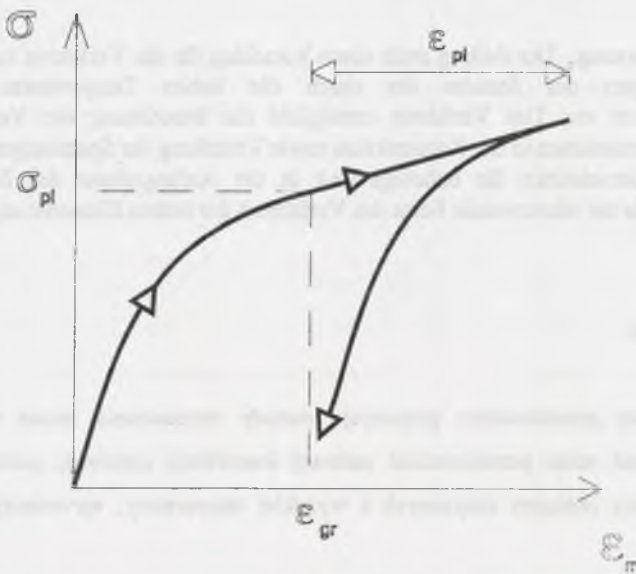
W opracowaniu przedstawiono propozycję metody wyznaczania zmian rozkładu sił wewnętrznych oraz stanu przemieszczeń stalowej konstrukcji prętowej, poddanej jednoczesnemu działaniu obciążeń statycznych i wysokiej temperatury, wywołanej działaniem pożaru.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji najistotniejsze jest możliwie dokładne oszacowanie zachowania się układu w pierwszej fazie trwania pożaru, kiedy to przeprowadzić trzeba akcję ewakuacji ludzi ze strefy zagrożenia. W tym czasie pod wpływem obniżenia

parametrów sztywności materiału oraz odkształceń termicznych ujawniają się własności plastyczne stali. Prowadzi to do znacznych deformacji układu, a w efekcie może spowodować zniszczenie konstrukcji. Z tego powodu istotne jest opracowanie sposobu oszacowania, w jakim czasie od chwili wybuchu pożaru możliwe jest bezpieczne - z punktu widzenia mechaniki - użytkowanie konstrukcji [4].

2. Model materiału

Zgodnie z mapami Ashby'ego, które ilustrują zachowanie stali w zależności od temperatury, stanu naprężeń i prędkości ogrzewania - w początkowej fazie trwania pożaru o wielkościach deformacji decydują sprężyste i plastyczne własności materiału [2] [5]. Dlatego też w dalszych rozważaniach za punkt wyjścia przyjęto model materiału nieliniowo-sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem. Przebieg zależności między naprężeniem i odkształceniem mechanicznym dla jednoosiowego stanu naprężeń przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Wykres zależności między naprężeniem i odkształceniem mechanicznym w jednoosiowym stanie naprężenia

Fig. 1. Diagram of stress-strain relation in one-dimensional stress state

Model uwzględnia efekt wzmocnienia izotropowego materiału – w wyniku przyrostu naprężeń i podwyższenia granicy plastyczności podczas plastycznej fazy pracy, jak również wzmocnienie kinematyczne (efekt Bauschingera) - poprzez uwzględnienie różnych związków między naprężeniem i odkształceniem mechanicznym dla procesu obciążenia (w fazie plastycznej) i odciążenia [6]. Ze względu na złożoność przyjętego modelu konieczne będzie w dalszych rozważaniach zastosowanie przyrostowej wersji metody obliczeń. Z tego powodu równania opisujące związek między naprężeniami i odkształczeniami mechanicznymi zapisano również w wersji przyrostowej:

- w fazie sprężystej (tzn. w procesie obciążenia dla naprężeń poniżej granicy plastyczności tzn. $\sigma < \sigma_{pl}$ oraz zawsze w procesie odciążenia, czyli dla $\Delta\sigma < 0$):

$$\Delta\sigma = (E_0(T) - 3A_0(T)(\epsilon_m - \epsilon_{pl})^2)\Delta\epsilon_m \quad (2.1)$$

- w fazie plastycznej (w procesie obciążenia od chwili osiągnięcia granicy plastyczności, czyli $\sigma = \sigma_{pl}$ oraz $\Delta\sigma > 0$):

$$\Delta\sigma = \dot{E}(T)\Delta\epsilon_m \quad (2.2)$$

gdzie:

$\Delta\sigma$ - przyrost naprężenia,

ϵ_m - odkształcenie mechaniczne, czyli różnica między sumarycznym odkształceniem jednostkowym ϵ a odkształceniem termicznym ϵ_T :

$$\epsilon_m = \epsilon - \epsilon_T \quad (2.3)$$

$\Delta\epsilon_m$ - przyrost odkształcenia mechanicznego w analogii do równania (2.3):

$$\Delta\epsilon_m = \Delta\epsilon - \Delta\epsilon_T \quad (2.4)$$

ϵ_{pl} - odkształcenie plastyczne (powstałe w plastycznej fazie pracy),

$E_0(T), A_0(T)$ - moduły sztywności materiału zależne od temperatury,

T - temperatura,

$\dot{E}(T)$ - moduł wzmocnienia izotropowego materiału obliczany z zależności:

$$\dot{E}(T) = E_0(T) - 3A_0(T)\epsilon_{gr}^2, \quad (2.5)$$

gdzie: ϵ_{gr} - odkształcenie graniczne odpowiadające pierwotnej granicy plastyczności.

Granica plastyczności σ_{pl} zależna jest od wielkości odkształceń plastycznych i wynosi:

$$\sigma_{pl}(T) = E_0(T)\varepsilon_{gr} - A_0(T)\varepsilon_{gr}^3 + \dot{E}(T)\varepsilon_{pl} \quad (2.6)$$

Zależność między modułami sztywności a temperaturą przyjęto dla przedziału 0-1000°C (273-1273K) jako liniową według formuły:

$$E_0(T) = E_0(T_0) \left(1 - \frac{T - T_0}{1000K} \right), \quad (2.7)$$

$$A_0(T) = A_0(T_0) \left(1 - \frac{T - T_0}{1000K} \right), \quad (2.8)$$

przy czym jako temperaturę porównawczą T_0 przyjmowano 273K.

3. Równania metody elementów skończonych

Punktem wyjścia do wyprowadzenia równań MES będzie przyrostowa forma zasady prac wirtualnych (z pominięciem sił masowych):

$$\int_A \Delta P_i \delta u_i dA = \int_V \Delta \sigma_{jk} \delta \varepsilon_{jk} dV \quad (3.1)$$

oraz hipoteza zachowania płaskiej postaci przekroju, z której wynika:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_0 + \kappa x_3, \quad (3.2)$$

gdzie:

ΔP_i - przyrost wektora obciążenia,

u_i - wektor przemieszczenia,

$\Delta \sigma_{jk}$ - przyrost tensora naprężeń,

ε_{jk} - tensor odkształceń,

A - powierzchnia ciała,

V - objętość,

ε_{11} - składowa tensora odkształceń - odkształcenie w kierunku osi podłużnej,

ε_0 - odkształcenie ε_{11} w poziomie środka ciężkości przekroju,

x_3 - oś poprzeczna przekroju leżąca w płaszczyźnie obciążenia.

Sprowadzając przyrost tensora naprężeń do przyrostu naprężenia normalnego w kierunku osi podłużnej elementu prętowego $\Delta\sigma_{11}$, prawą stronę równania (3.1) przekształcić można do postaci:

$$\int_V \Delta\sigma_{11} \delta\varepsilon_{11} dV = \int_s \int_F \Delta\sigma_{11} (\delta\varepsilon_0 + \delta\kappa x_3) dF ds = \int_s (\Delta N \delta\varepsilon_0 + \Delta M \delta\kappa) ds, \quad (3.3)$$

gdzie:

F - pole powierzchni przekroju poprzecznego,

s - długość elementu prętowego,

$\Delta M, \Delta N$ - przyrosty sił wewnętrznych - momentu zginającego i siły osiowej.

Wprowadzając następnie podział na elementy skończone oraz odpowiednie funkcje kształtu otrzymujemy ostatecznie:

$$\Delta R = K \Delta u + \Delta Q, \quad (3.4)$$

gdzie:

ΔR - wektor przyrostu reakcji węzłowych,

K - globalna macierz sztywności,

Δu - wektor przyrostu przemieszczeń węzłowych,

ΔQ - wektor przyrostu uogólnionych obciążeń węzłowych.

Przez pojęcie uogólnionych obciążeń węzłowych rozumieć należy zarówno obciążenia statyczne, jak i termiczne.

4. Opis procedury obliczeniowej

Ze względu na złożony model materiału zastosowanie przyrostowej wersji MES konieczne jest już we wstępnej fazie obliczeń, obejmującej analizę stanu konstrukcji przed wybuchem pożaru - jedynie pod wpływem obciążenia mechanicznego.

Przed rozpoczęciem obliczeń przekrój pręta dzieli się na warstwy. Zastosowanie modelu pręta warstwowego jest w pełni uzasadnione, bowiem różnice temperatur w poszczególnych warstwach prowadzą do różnic między parametrami materiału. W efekcie identyczne naprężenia prowadzą do różnych odkształceń.

Obciążenie zewnętrzne dzieli się na obciążenia cząstkowe, kolejno "przykładane" do schematu. Na każdym kroku takiej iteracji konieczne jest wyznaczenie nowych lokalnych

macierzy sztywności dla poszczególnych elementów skończonych, a na ich podstawie zbudowanie nowej globalnej macierzy sztywności. Wykorzystuje się do tego wielkości uzyskane na poprzednim kroku iteracyjnym. Efektem końcowym po przyłożeniu całego obciążenia jest opis stanu konstrukcji pod wpływem samego tylko obciążenia statycznego.

W drugiej fazie obliczeń przyrosty obciążeń wywołane są przyrostami temperatur dla kolejnych kroków czasowych. Przyrosty temperatur obliczane mogą być na podstawie procedury przedstawionej w publikacji [7], wykorzystującą propozycję Jakowlewa [1]. Na podstawie tych przyrostów oblicza się następnie przyrosty odkształceń termicznych $\Delta\varepsilon_T$ oraz przyrosty odkształceń mechanicznych $\Delta\varepsilon_m$, wywołane zmianą sztywności przekroju pod wpływem jego ogrzania:

$$\Delta\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T \quad (4.1)$$

$$\Delta\varepsilon_m = \frac{\Delta\sigma(\Delta T)}{\bar{E}} = \frac{\sigma(T + \Delta T) - \sigma(T)}{\bar{E}}, \quad (4.2)$$

gdzie:

α_T - współczynnik rozszerzalności termicznej,

ΔT - przyrost temperatury,

$\Delta\sigma(\Delta T)$ - potencjalny przyrost naprężenia pod wpływem przyrostu temperatury,

$\bar{E}(T)$ - zastępczy moduł sztywności obliczany z relacji:

- dla fazy sprężystej:

$$\bar{E}(T) = E_0(T) - 3A_0(T)(\varepsilon_m - \varepsilon_{pl})^2 \quad (4.3)$$

- dla fazy plastycznej:

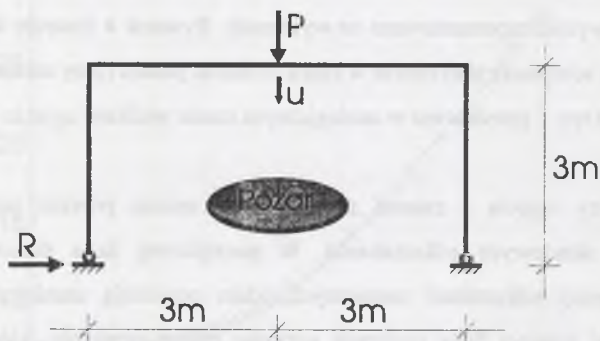
$$\bar{E}(T) = \hat{E}(T) = E_0(T) - 3A_0(T)\varepsilon_{gr}^2 \quad (4.4)$$

Wynikiem na każdym kroku iteracyjnym jest opis stanu konstrukcji w odpowiednim czasie trwania pożaru. Opis ten obejmuje: rozkłady sił wewnętrznych, stan deformacji, odkształcenia i naprężenia w przekrojach.

5. Przykład obliczeniowy

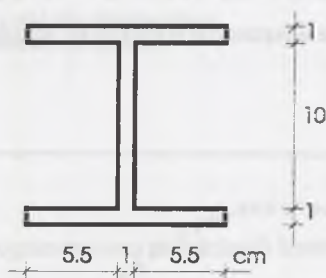
Obliczeniom poddano ramę jednonawową o schemacie jak na rys. 2, przy czym obciążenie P dobrano jako równe 50 kN - tak aby ekstremalne naprężenia w konstrukcji przed wybuchem

pożaru bliskie były granicy plastyczności. Przekrój poprzeczny elementów przyjęto jako dwuteowy o proporcjach jak na rys. 3.



Rys. 2. Schemat statyczny analizowanej konstrukcji

Fig. 2. Static scheme of analysed structure



Rys. 3. Przekrój poprzeczny

Fig. 3. Cross-section

Rozwój pożaru opisano za pomocą zależności łączącej temperaturę spalin z czasem trwania pożaru:

$$T_{sp} = T_p + 345 \log(8t + 1) \quad (5.1)$$

gdzie:

T_{sp} - temperatura spalin wewnątrz pomieszczenia,

T_p - temperatura początkowa,

t - czas trwania pożaru podany w minutach.

Dane materiałowe dobrano natomiast następująco:

$$E_0(T = 273K) = 200 \text{ GPa}$$

$$A_0(T = 273K) = 16.25 \cdot 10^6 \text{ GPa}$$

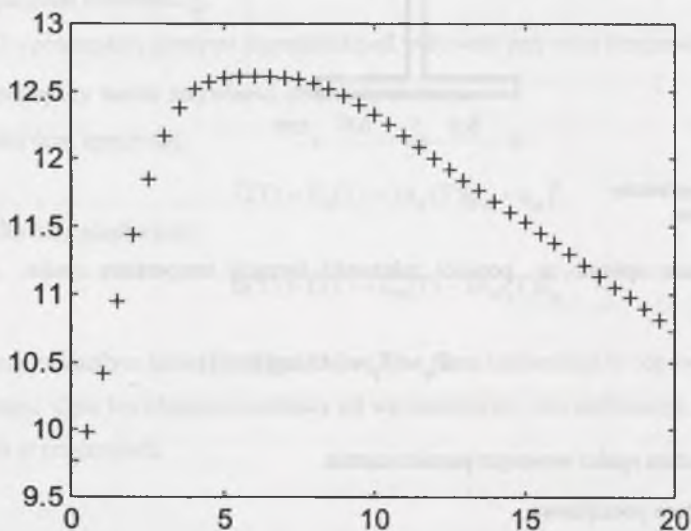
$$\varepsilon_{gr} = 0.002,$$

skąd wynika:

$$\sigma_{pl}(T = 273K) = 270 \text{ MPa}$$

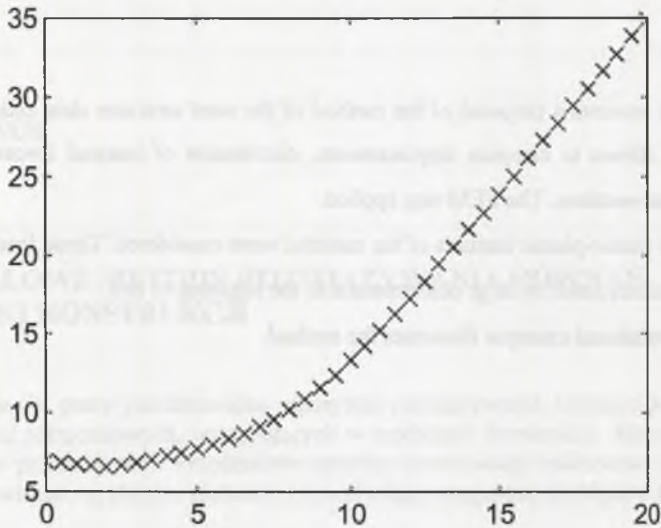
Przykładowe wyniki zaprezentowano na wykresach. Rysunek 4 ilustruje zależność reakcji R zaznaczonej na schemacie statycznym w ciągu 20 minut pożaru (przy założeniu braku osłon termicznych), zaś rys. 5 przedstawia w analogicznym czasie wielkość ugięcia rygla w połowie jego rozpiętości.

Wykres łączący ugięcia z czasem zinterpretować można poprzez analizę wpływów poszczególnych składowych odkształcenia. W początkowej fazie dominują relatywnie niewielkie przyrosty odkształceń termicznych, które powodują zmniejszenie wstępnego ugięcia rygla. W kolejnej fazie następuje ogrzanie całego przekroju, które prowadzi do znacznego zmniejszenia jego sztywności, a w efekcie do narastania deformacji związanych bezpośrednio z obciążeniem mechanicznym i zmniejszenia wpływu odkształceń termicznych na reakcje. W przekrojach silnie wyciężonych dochodzi do uplastycznienia.



Rys. 4. Wykres zależności reakcji R od czasu trwania pożaru

Fig. 4. Diagram of reaction R in function of fire time



Rys. 5. Wykres zależności ugięcia u od czasu trwania pożaru
Fig. 5. Diagram of deflection u in function of fire time

LITERATURA

1. Jakowlew A.I.: Raszczot ogniestrojnosti stroitielnykh konstrukcji. Moskwa 1988.
2. Barthelemy B., Kruppa J.: ogniestroiskost stroitielnykh konstrukcji. Moskwa 1985.
3. Jungbluth O., Gradwohl W.: Berechnen und Bemessen von Verbundprofilstä-bern bei Raumtemperatur und unter Brandeinwirkung. Berlin, 1987.
4. Kosiorek M., Pogorzelski J., Laskowska Z., Pilich K.: Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa 1988.
5. Skowroński W.: Problemy nośności i pełzania konstrukcji stalowych w pożarach. Opole 1992.
6. Rymarz Cz.: Mechanika ośrodków ciągłych. PWN, Warszawa 1993.
7. Pilśniak J., Matheja M.: Pola temperatur w ogrzewanej konstrukcji metalowej. Materiały konferencyjne. IV Konferencja Naukowo-Techniczna: Fizyka budowy w teorii i praktyce. Łódź, 1995.

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

Abstract

The paper presents a proposal of the method of the steel structure state estimation in fire. The method allows to compute displacements, distribution of internal forces, stresses and strains in cross-sections. The FEM was applied.

Nonlinear elastic-plastic features of the material were considered. These features in case of efforted structures result in large deformations in the beginning of fire.

The computational example illustrates the method.