

## **Pożarowe analizy konstrukcji w aspekcie zjawisk fizycznych obserwowanych podczas prób jednoosiowego rozciągania stali**

**Wojciech Skowroński**

*Institut Budownictwa, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji,  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, e-mail: wojciech.skowronski@up.wroc.pl*

**Streszczenie:** Metody obliczeń konstrukcji budowlanych w pożarze powinny umożliwiać dokładną analizę i uwzględniać specyficzne właściwości ogrzewanych materiałów, na przykład nieliniowe pełzanie metali. Teoretyczne rozważania na temat konstrukcji metalowych w pożarze mogą być weryfikowane, a także uzupełniane wynikami badań materiałowych i badań ogniowych. Badania materiałów konstrukcyjnych w podwyższonej temperaturze mają na celu przede wszystkim wyznaczenie charakterystyk wytrzymałościowych i termicznych. Wyniki typowych badań ogniowych określają natomiast reakcję elementu wydzielonego z konstrukcji budowlanej na ogrzewanie zgodne z normową krzywą „temperatura-czas”. Normowe uproszczenia rzeczywistych sytuacji pożarowych wynikają między innymi z ograniczonych możliwości badań laboratoryjnych.

**Słowa kluczowe:** budynek, konstrukcja, stal, pożar, podwyższona temperatura.

### **1. Wprowadzenie**

Pożar w budynku traktuje się, jako niekontrolowany w przestrzeni i czasie proces spalania materiałów, dla którego znane są procedury formułowania scenariuszy rozwoju pożaru, a w szczególności wzrostu temperatury gazów spalinowych w strefie pożarowej, w bezpośredniej bliskości ogrzewanych elementów konstrukcji.

Często rozwiązania analiz konstrukcji uzyskuje się według zasad określonych w Eurokodach przy założeniu naturalnych modeli pożaru, które opisują oddziaływanie termiczne wykorzystując przesłanki o podłożu fizycznym. Rozwój pożaru w tym przypadku oceniany jest na podstawie właściwości użytkowych, między innymi takich jak: geometria strefy pożarowej (wysokość sufitu, powierzchnia otworów...), powierzchnia pożaru, właściwości cieplne przegród ograniczających strefę pożarową, gęstość obciążenia ogniowego, szybkość wydzielania ciepła, warunki wentylacji. Natomiast tzw. zaawansowane modele pożaru umożliwiają analizę szczegółową, najbardziej dokładną, z uwzględnieniem między innymi właściwości gazów spalinowych, wymiany energii i masy.

Podczas analiz realizowanych jako zaawansowane zastosowanie znajdują modele jednostrefowe, dwustrefowe i numeryczne. Przy tym dodać należy, że modele numerycznej mechaniki płynów umożliwiają precyzyjną ocenę zagrożenia, a w tym między innymi określenie zmian temperatury gazów spalinowych w przestrzeni, biorąc pod uwagę miejsce pomiaru w strefie pożarowej i czas (moment) pomiaru. Modele numerycznej mechaniki płynów uwzględniają takie prawa fizyczne, jak na przykład: prawo zachowania masy, II prawo Newtona, I zasada termodynamiki. W tym przypadku analizy przepływu płynu, przepływu ciepła i zjawisk im towarzyszących realizowane są poprzez numeryczne rozwią-

zywanie równań różniczkowych cząstkowych określających zmienne termodynamiczne i aerodynamiczne w dowolnym punkcie przestrzeni wyznaczonej przez rozmiar strefy pożarowej.

Podczas analizowania ogarniętej pożarem konstrukcji budynku w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej istotne znaczenie ma określenie takiego oddziaływania termicznego, które najlepiej odwzoruje problem bezpieczeństwa. Równocześnie istotne jest formułowanie założeń i procedur pożarowej analizy statyczno – wytrzymałościowej konstrukcji adekwatnie do konsekwencji zniszczenia budynku.

W budownictwie stosuje się powszechnie stale niskowęglowe i niskostopowe, a ponadto stopy aluminium. Ich przydatność na konkretne konstrukcje metalowe (wykonywane określonymi metodami i pracujące w określonych warunkach obciążenia, klimatu i środowiska) określa się na podstawie właściwości fizycznych i chemicznych. Równania fizyczne opisujące właściwości materiałowe w podwyższonej temperaturze charakteryzują się silną nieliniowością. Równocześnie równania te powinny uwzględniać problem modelowania pożaru. Istotne jest tutaj uwzględnianie efektów zależnych od czasu – ze względu na wspomnianą wyżej różną intensywność pożarów w budynkach. Zatem istotne jest prowadzenie analiz, które uwzględniają faktyczną intensywność pożaru (taką, jaka może wystąpić w konkretnym projektowanym budynku) wyrażaną w tym przypadku poprzez prędkość wzrostu temperatury w strefie pożarowej.

## **2. Równania mechaniki dla zaawansowanych metod analizy pożarowej**

Podczas pożarowych analiz statyczno-wytrzymałościowych elementów konstrukcji połączonych wzajemnie ze sobą i z podłożem (w celu przenoszenia oddziaływań) poszukuje się najbardziej niekorzystnego rozkładu i wartości sił wewnętrznych, rozwiązując równania równowagi układu. Jeśli zagadnienie jest rozpatrywane w sferze zaawansowanych metod obliczeniowych przy uwzględnieniu zasad teorii fizykalnie nieliniowej, to stosunkowo łatwo można je rozwiązać używając metody sił [1]. W celu zrealizowania obliczeń za pomocą tej metody należy analizować dwa układy konstrukcyjne: pierwotny i podstawowy. Pierwotny układ statycznie niewyznaczalny po odrzuceniu odpowiedniej liczby więzów kinematycznych przekształca się w układ podstawowy (statycznie wyznaczalny i geometrycznie niezmienny). Wymienione układy zachowują się odmiennie pod działaniem tego samego obciążenia. Ujawnia się to zarówno poprzez rozkład sił wewnętrznych, jak również poprzez deformację każdego z układów. Układ podstawowy charakteryzuje możliwość deformacji, przesunięcia punktów leżących na osi konstrukcji prętowej i obrotu przekrojów poprzecznych, odpowiadającej usuniętym więzom kinematycznym. Gdy konstrukcja pracuje jako układ pierwotny (statycznie niewyznaczalny), to każde z tych przemieszczeń ma wartość równą zero. Przywrócenie równoważności układów: pierwotnego oraz powstałego z niego układu podstawowego można uzyskać wprowadzając - w tym drugim z układów - reakcje usuniętych więzów (siły nadliczbowe) o odpowiednio dobranych wartościach. Wartości tych reakcji wynikają z warunków zgodności przemieszczenia, opisujących efekt przyrównywania do zera takich obrotów przekrojów poprzecznych oraz przesunięć punktów leżących na osi konstrukcji prętowej, które odpowiadają siłom nadliczbowym.

Przemieszczenie  $\delta$  powstające pod wpływem obciążenia działającego na ustrój prętowy określony w niezmiennym układzie kartezjańskim  $x, y, z$  można obliczyć wykorzystując całkę Mohra:

$$\delta = \int_s \theta_{\text{skr}} \tilde{M}_{\text{skr}} ds + \int_s \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)_y \tilde{M}_y ds + \int_s \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)_z \tilde{M}_z ds + \\ + \int_s \lambda \tilde{N} ds + \int_s \gamma_y \tilde{S}_y ds + \int_s \gamma_z \tilde{S}_z ds, \quad (1)$$

gdzie  $\theta_{\text{skr}}$  oznacza kąt skręcenia przekroju poprzecznego odcinka pręta o długości  $s$ ,  $\tilde{M}_{\text{skr}}$  – moment skręcający spowodowany siłą jednostkową, przyłożoną w punkcie pomiaru przemieszczenia,  $\rho_0$  – promień początkowej krzywizny pręta,  $\tilde{M}_y, \tilde{M}_z$  – momenty zginające (siły wewnętrzne) spowodowane wyżej określoną siłą jednostkową,  $\lambda, \gamma$  – wydłużenie oraz kąt odkształcenia postaciowego,  $\tilde{N}, \tilde{S}_y, \tilde{S}_z$  – wewnętrzne siły spowodowane siłą jednostkową.

W ramach analizy obliczeniowej zakłada się, że spełnione są:

- równanie geometryczne:

$$\varepsilon = \lambda + \rho^{-1} y; \quad (2)$$

- równania definiujące siły przekrojowe:

$$M = \iint_A \sigma y dA, \quad (3)$$

$$N = \iint_A \sigma dA, \quad (4)$$

$$S = \iint_A \tau dA, \quad (5)$$

gdzie  $M$  oznacza moment zginający,  $A$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego,  $N$  – siłę podłużną (siłę osiową),  $S$  – siłę poprzeczną,  $\tau$  – naprężenie styczne.

Równania statyki często zbudowane są ze składników liniowych oraz nieliniowych, które w procesie formułowania równań statyki można rozważać oddzielnie. Zakres fizycznej liniowej pracy konstrukcji opisuje kanoniczny układ równań metody sił w postaci:

$$\mathbf{D}\mathbf{X} + \mathbf{C} = \mathbf{0}, \quad (6)$$

gdzie  $\mathbf{0}$  oznacza macierz o elementach równych zero,  $\mathbf{D}$  – macierz o elementach  $\delta_{ij}$ ,  $\mathbf{X}$  oraz  $\mathbf{C}$  – macierze o elementach odpowiednio  $X_j$  oraz  $\Delta_{ir}$ , przy czym:

$$\Delta_{ir} = \Delta_{iT} + \Delta_{iq} + \Delta_{ig}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Symbol  $\delta_{ij}$  oznacza przemieszczenie punktu przyłożenia siły nadliczbowej (hiperstatycznej)  $X_i$  do układu podstawowego, mające kierunek oraz zwrot tej siły. Spowodowane jest ono działaniem siły nadliczbowej  $X_j = 1$ . Symbol  $\Delta_{ir}$  oznacza przemieszczenie punktu przyłożenia siły  $X_i$  do układu podstawowego, mające kierunek i zwrot tej siły, spowodowane działaniem: wpływów termicznych  $\Delta_{iT}$ , zewnętrznego obciążenia mechanicznego –  $\Delta_{iq}$  oraz wpływów geometrycznych –  $\Delta_{ig}$  (np. osiadanie fundamentu [2]).

Dla nieliniowego składnika modelu fizycznego:

$$\sigma = (B^{-1} \varepsilon)^{1/m} \quad \text{dla } m \neq 0. \quad (8)$$

słuszne jest równanie [3]:

$$\int_s B \left[ I \left( \frac{1}{m} + 1 \right) \right]^{-m} \left[ \tilde{\mathbf{m}}^T(s) \mathbf{X} + \mathbf{m}^T(s) \mathbf{P} \right]^m \tilde{\mathbf{m}}(s) ds = \mathbf{d}, \quad (9)$$

przy czym:

$$\int_s B \left[ I \left( \frac{1}{m} + 1 \right) \right]^{-m} \left[ \tilde{\mathbf{m}}^T(s) \right]^m \tilde{\mathbf{m}}(s) ds > \mathbf{0}, \quad (10)$$

gdzie  $\mathbf{P}$  oznacza wektor, którego składowe określają obciążenie zewnętrzne układu konstrukcyjnego,  $\tilde{\mathbf{m}}$  – wektor, którego składowe określają funkcje momentu zginającego spowodowanego jednostkowymi siłami odpowiadającymi siłom nadliczbowym,  $\mathbf{m}$  – wektor, którego składowe określają funkcje momentu zginającego spowodowanego jednostkowymi siłami odpowiadającymi obciążeniu zewnętrznemu,  $\mathbf{d}$  – wektor określający przemieszczenie  $\delta_i$ .

Moment bezwładności przekroju poprzecznego

$$I \left( \frac{1}{m} + 1 \right) = \iint_A y^{\frac{1}{m}+1} dA. \quad (11)$$

Przedstawione wyżej równania w specyficzny sposób podlegają zasadzie superpozycji – sumowaniu podlegają tylko odkształcenia. Jeśli przykładowo odkształcenia  $\varepsilon$  (oraz prędkości odkształceń  $\dot{\varepsilon}$ ) opisywane są równaniem addytywnym ujmującym składnik termiczny  $\varepsilon_T$ , sprężysty  $\varepsilon_e$ , plastyczny  $\varepsilon_p$  i zależny od czasu  $\varepsilon_t$  według relacji:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon(\sigma, T, t), & \varepsilon &= \varepsilon_T + \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_t; \\ \dot{\varepsilon} &= \dot{\varepsilon}(\sigma, T, t), & \dot{\varepsilon} &= \dot{\varepsilon}_T + \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_p + \dot{\varepsilon}_t. \end{aligned} \quad (12)$$

to efekty opisane przez trzeci składnik prawej strony całki Mohra (1) wyraża równanie:

$$\delta = \int_s \frac{1}{\rho} \tilde{M} ds = \int_s \frac{1}{\rho_T} \tilde{M} ds + \int_s \frac{1}{\rho_e} \tilde{M} ds + \int_s \frac{1}{\rho_p} \tilde{M} ds + \int_s \frac{1}{\rho_t} \tilde{M} ds. \quad (13)$$

gdzie indeksem przy symbolu  $\rho$  oznaczono promień krzywizny odpowiadający każdemu z składników odkształcenia opisanego równaniem (12).

Kształtowanie konstrukcji powinno ujmować efekty deformacji. Przewidywać należy, że w czasie odkształcania się konstrukcji może nastąpić zmiana wartości momentu zginającego  $M$ . Występuje wówczas sprzężenie zmian momentu  $M$  z procesem odkształcania konstrukcji polegające na tym, że konsekwencją przykładowo ugięcia się belki obciążonej dodatkowo siłą osiową jest zwiększenie momentu  $M$ , a zwiększenie się momentu  $M$  przyspiesza proces uginania belki. Taka możliwość występuje na przykład podczas pożaru. Jeśli analiza pożarowa dotyczy konstrukcji metalowych, to pierwsze z równań (12) można uściślić modelem [4]:

$$\begin{aligned} \varepsilon = \Psi(\sigma, T, t) = \varepsilon_T + \sigma \psi_1(T) + \sigma |\sigma|^{\mu(T)-1} \psi_2(T) + \\ + \sigma |\sigma|^{m-1} \psi_3 \left[ \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT'}\right), t \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Każdemu ze składników prawej strony równania (13) można przyporządkować związek geometryczny oraz warunek równowagi sił w przekroju poprzecznym konstrukcji. W wyniku przekształceń składników mechanicznych otrzymuje się spowodowany nieskończenie małą zmianą momentu zginającego nieskończenie mały przyrost przemieszczenia

$$\begin{aligned} d\delta = \frac{\partial \delta}{\partial M} dM = \int_s \frac{\check{M}}{[\psi_1(T)]^{-1} I} ds dM + \int_s \frac{\check{M}}{[\psi_2(T)]^{-1} I_p^{\mu(T)}} \cdot \frac{\partial M^{\mu(T)}}{\partial M} ds dM + \\ + \int_s \frac{\check{M}}{\left\{ \psi_3 \left[ \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT'}\right), t \right] \right\}^{-1} I_t^m} \cdot \frac{\partial M^m}{\partial M} ds dM. \end{aligned} \quad (15)$$

Wynikającą z tego przyrostu deformację zginanej konstrukcji opisuje natomiast równanie [1]:

$$\begin{aligned} \delta(\bar{t}) = \int_s \int_0^{M(\bar{t})} \frac{\check{M}}{[\psi_1(T)]^{-1} I} dM ds + \int_s \int_0^{M(\bar{t})} \frac{\check{M}}{[\psi_2(T)]^{-1} I_p^{\mu(T)}} \cdot \frac{\partial M^{\mu(T)}}{\partial M} dM ds + \\ + \int_s \int_0^{M(\bar{t})} \frac{\check{M}}{\left\{ \psi_3 \left[ \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT'}\right), t \right] \right\}^{-1} I_t^m} \cdot \frac{\partial M^m}{\partial M} dM ds, \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie  $\bar{t}$  oznacza czas liczony od rozpoczęcia pożaru do momentu zniszczenia konstrukcji.

Koncypanie mechanizmu zniszczenia złożonych konstrukcji prętowych (np. ram) niejednokrotnie bazuje na założeniu, że wzrost obciążenia ram określają mnożniki obciążenia  $A_p$  i  $A_{cr}$ . Mnożnik definiujący wzrost obciążenia  $A_G$  określa stan równowagi granicznej rami natomiast drugi z mnożników wynika z obliczeń według teorii stateczności. Przykładowym kryterium opisującym globalną nośność ram jest wzór Rankine-Merchanta [5]:

$$\left( \frac{A_G}{A_p} \right)^n + \left( \frac{A_G}{A_{cr}} \right)^n = 1 \quad (17)$$

lub

$$\left( \frac{N}{N_p} \right)^n + \left( \frac{N}{N_{cr}} \right)^n = 1, \quad (18)$$

gdzie wykładnik  $n$  jest parametrem imperfekcji, odwrotnością weibullowskiego współczynnika zmienności, określanym przy założeniu mówiącym o tym, że mechanizmy nośności granicznej i krytycznej są losowo niezależne.

Podane wyżej formuły interakcyjne wyrażają wzajemną zależność pomiędzy nośnością plastyczną  $N_p$  rozumianą jako wynik analizy według teorii nośności granicznej, nośnością krytyczną  $N_{cr}$  rozumianą jako rezultat analizy stateczności układu *perfect* (konstrukcji idealnej, a więc obciążonej siłami powodującymi stan bezgiętny) oraz globalną nośnością (niestatecznością) konstrukcji rzeczywistej  $N$ .

Wartość nośności globalnej maleje wraz ze wzrostem temperatury konstrukcji. W analizie konstrukcji ogarniętych pożarem nośność globalna  $\tilde{N}(T, \dot{T})$  obliczona z uwzględnieniem efektów zależnych od czasu i prędkości wzrostu temperatury  $\dot{T}$  wiąże się nierozdzielnie z temperaturą krytyczną  $\tilde{T}_{cr}$  lub z czasem krytycznym  $\tilde{t}_{cr}$  (odpornością ogniową). Zakłada się, że konstrukcja budowlana (lub element konstrukcji) spełniająca warunki wynikające z metody stanów granicznych, do chwili rozpoczęcia pożaru niezawodnie przenosi określone obciążenia, a po wybuchu pożaru utrata nośności zachodzi w chwili, gdy konstrukcja ogrzeje się do temperatury krytycznej. Stąd temperatura krytyczna konstrukcji

$$T_{cr} \rightarrow \tilde{T}_{cr} = \tilde{N}^{-1}(N_e, N_p, N_t, f(\dot{T}), n) \quad (19)$$

natomiast odporność ogniowa (czas krytyczny)

$$\bar{t} \rightarrow \tilde{t}_{cr} = [f(\dot{T})]^{-1} \tilde{T}_{cr}, \quad (20)$$

gdzie funkcja  $f$  określa uśrednioną prędkość wzrostu temperatury konstrukcji podczas pożaru.

### 3. Zagadnienia występujące podczas prób rozciągania

Fot. 1 przedstawia uniwersalną maszynę wytrzymałościową Instron/Satec KN 600 (z piecem SF-16 2230 umożliwiającym prowadzenie badań próbek o temperaturze nie wyższej od 1200°C) w laboratorium Instytutu Budownictwa Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Stanowisko to zostało zaprojektowane przez autora w celu prowadzenia badań wytrzymałościowych metali w podwyższonej temperaturze dla potrzeb analiz pożarowych konstrukcji budowlanych.

Na Fot. 2 widoczny jest piecyk ogrzewający próbkę podczas statycznej próby rozciągania, wyposażony w zestaw ekstensometrów do pomiaru odkształceń zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturze podwyższonej. Próby realizowane są z wykorzystaniem wspomaganego komputerowo systemu pomiarowego z programem Bluehill (Fot. 3). Zerwana próbka po zakończeniu badania pokazana jest na Fot. 4. Pierwsze wyniki badań zamieszczono w pracy [6]. Na Rys. 1 pokazano wynik badań stali S235JR w zakresie temperaturowym od 20°C do 700°C w postaci pięciu krzywych "naprężenie – odkształcenie". Podczas każdego z przedmiotowych badań w pierwszej kolejności ogrzano próbkę do temperatury badania, a następnie wykonano statyczną próbę rozciągania.

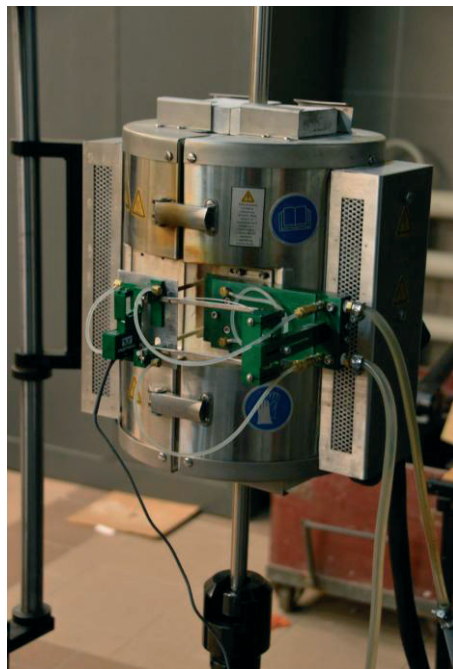
Przebieg krzywych opisujących wynik badania próbek w temperaturze normalnej i próbek ogrzanych do temperatury 100°C oraz 300°C jest odmienny od przebiegu dwóch pozostałych krzywych pokazanych na Rys. 1. Ilościowe zmiany wynikające z relacji "naprężenie - odkształcenie" próbek ogrzanych do temperatury 500°C oraz 700°C najwyraźniej uzasadniają konieczność stosowania w analizie pożarowej elementów konstrukcyjnych znacznej redukcji wartości parametrów materiałowych, między innymi takich jak: granica plastyczności i moduł sprężystości. Rys. 1 uwidacznia na przykład mniejsze o około 20% (względem wyniku badania próbek w normalnej temperaturze) naprężenie próbek ogrza-



nych do temperatury 500°C oraz mniejsze o około 70% naprężenie próbek ogrzanych do temperatury 700°C – przy odkształceniu na poziomie wartości 0,15 mm/mm. W zakresie od 300°C do 700°C istotnie wzrastają wartości odkształcenia stali. Dodać przy tym należy, że w tym przedziale temperatury dodatkowym efektem termicznej aktywacji jest odkształcenie wynikające z pełzania stali.



Fot. 1. Stanowisko do badań wytrzymałościowych zaprojektowane przez autora



Fot. 2. Piecyk SF-16 2230 ogrzewający próbkę podczas statycznej próby rozciągania

Opisywane badania realizowane są dla prostego stanu naprężenia, jaki uzyskuje się przy jednoosiowym rozciąganiu. Umożliwiają one uzyskanie informacji o właściwościach wytrzymałościowych badanych materiałów. Podstawę analiz stanowią dane liczbowe generowane automatycznie w plikach; niemniej jednak niezależnie od tego monitor systemu komputerowego – natychmiast po zakończeniu próby – wyświetla wynik w formie pokazanej na Fot. 5. Autor wykonał tę fotografię, gdyż obrazuje ona nie często spotykane zjawisko "niestateczności siły w trakcie rozciągania", które można kojarzyć z efektem Portevin-Le Chateliera. Występowanie tego typu efektów i potrzeba ich interpretacji uzasadnia przeprowadzanie badań mikroskopowych.

Pożarowe badania mikroskopowe wykazują niejednolite, zależne od temperatury w czasie pożaru, zmiany strukturalne stali budowlanych. Stwierdza się efekty odwęglania, przegrzania, rozrostu ziaren i występowanie struktury Widmanstättena. Często dochodzi do przegrzania zewnętrznej warstwy stali bez jej odwęglania (następującego przy ogrzewaniu w atmosferze tlenu) a także do hartowania stali przy polewaniu wodą w czasie akcji gaszenia pożaru. Podczas długotrwałych pożarów magazynów (duże obciążenie ogniowe) dochodzi natomiast do nawęglania stali przez wyżarzenie przy niedostatku powietrza. Stwierdzony na skutek przegrzania rozrost ziaren oraz występująca lokalnie struktura Widmanstättena – charakteryzująca się iglastym ułożeniem faz, towarzyszą pogorszeniu właściwości mecha-

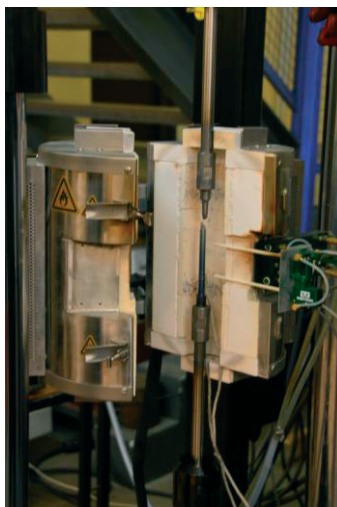
nicznych stali. Przy rozpatrywaniu możliwości ponownego wykorzystania elementów konstrukcji po pożarze należy również brać pod uwagę fakt, że odwęglona warstwa powierzchniowa stanowi potencjalne miejsce zapoczątkowania mikropęknięć, które mogą się rozszerzyć na dalszą część wyężonego przekroju poprzecznego.

Osobliwość reakcji materiałów konstrukcyjnych na jednocześnie oddziaływanie temperatury i naprężenia jest w dalszym ciągu rozpoznawana, przy czym kierunki badań wytyczają wnioski sformułowane wcześniej dla metali i stopów o innych, niż budowlane, zastosowaniach – głównie stali przeznaczonych do pracy w podwyższonej temperaturze. Jeden z takich wniosków wskazuje na możliwości wykorzystania idei temperatury homologicznej, która jest równa stosunkowi absolutnej temperatury tworzywa metalicznego do absolutnej temperatury topnienia tego tworzywa.

Na tej podstawie można podejmować próby interpretowania wyników badań i formułowania uogólnień w zakresie istotnych z punktu widzenia analizy pożarowej charakterystyk mechanicznych opisujących stale niskowęglowe i niskostopowe oraz stopy aluminium stosowane w budownictwie.

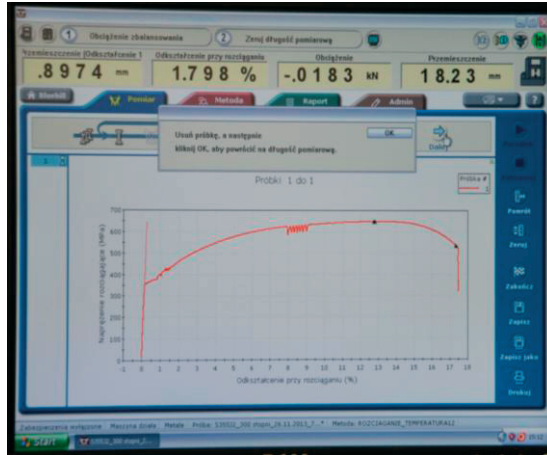


Fot. 3. System pomiarowy

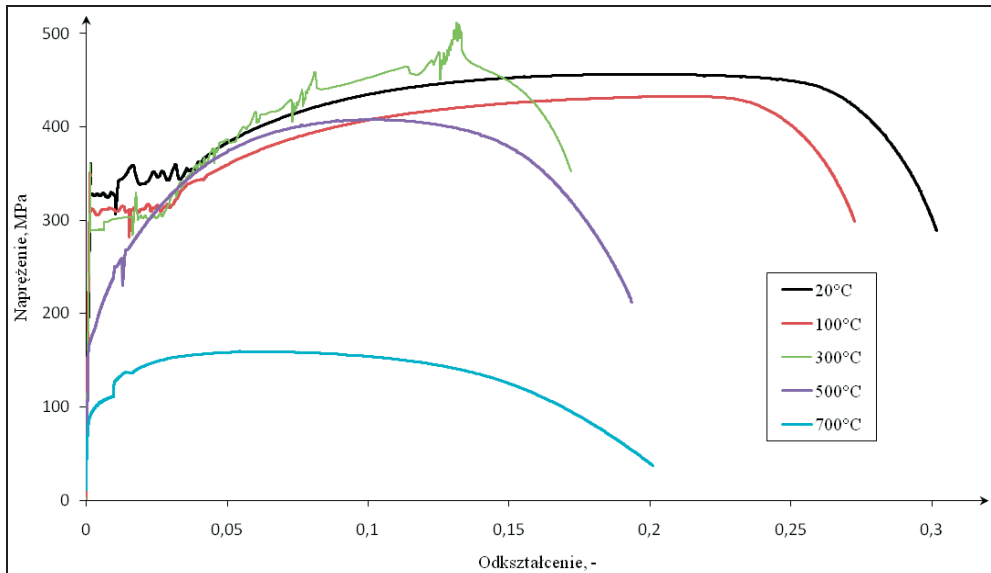


Fot. 4. Zerwana próbka po zakończeniu badania





Fot. 5. Efekt "niestateczności siły w trakcie rozciągania"



Rys. 1. Wyniki badań stali S235JR [6]

Ogólnie znane wartości temperatury topnienia metali i ich stopów wykorzystano do wykonania Rys. 2 obrazującego istotę temperatury homologicznej dla stali i aluminium. Biorąc to pod uwagę na Rys. 3 pokazano krzywe obrazujące standaryzowane odkształcenie pełzania budowlanej stali ASTM A36 w podwyższonej temperaturze wyznaczone za pomocą równania:

$$\epsilon_{t,s} = \epsilon_t(T)/\epsilon_t(T=20^\circ\text{C}). \tag{21}$$

gdzie, zgodnie z równaniem (14):

$$\epsilon_t = 1,053410^{-4} \sigma^{4,1833} \left[ \int_0^t \exp\left(-\frac{38900}{T+273,16}\right) dt \right]^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{m}{m} \right] \tag{14a}$$

Do powyższego równania wprowadzone są następujące parametry pełzania [7]

$$\frac{\Delta H}{R} = 38900K$$

$$Z = 3,7296 \cdot 10^8 \sigma^{4,70} \quad [1/h] \quad \text{dla } \sigma < 103 \text{ [MPa]}$$

$$Z = 1,23 \cdot 10^{16} \exp(0,043425 \sigma) \quad [1/h] \quad \text{dla } \sigma > 103 \text{ [MPa]}$$

$$\varepsilon_{i0} = 4,0708 \cdot 10^{-6} \sigma^{1,75} \quad \left[ \frac{m}{m} \right]$$

$$\phi_{\alpha}(\sigma) = 3,9862 \cdot 10^{-4} \sigma^{1,45} \quad [h^{2/3}]$$

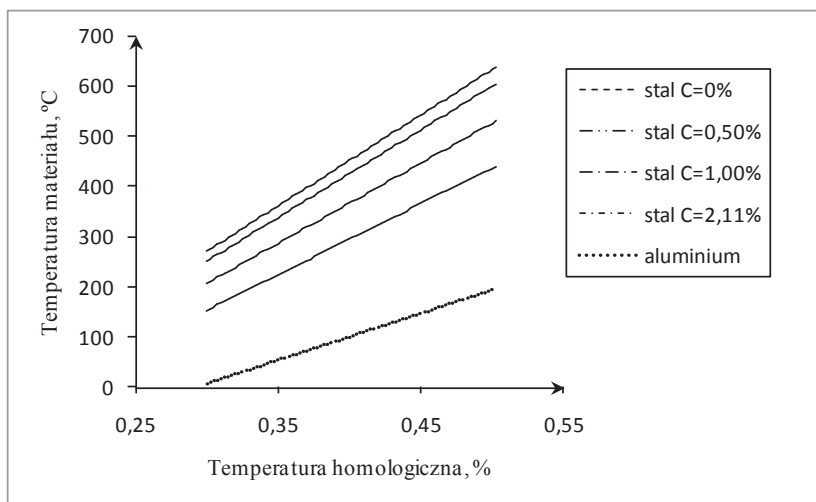
W ramach analiz pożarowych interpretacje efektów zależnych od czasu są szczególnie ważne [8-10]. Formułowanie procedury badawczej pełzania w podwyższonej temperaturze, a w szczególności interpretowanie wyników badań tego typu powinno uwzględniać fakt działania temperatury i naprężenia. W opracowanych dotychczas – przez wielu autorów – równaniach fizycznych opisujących pełzanie ogrzewanych metali lub stopów występują operatory różniczkowe i całkowite funkcji naprężenia oraz funkcji odkształcenia, co przedstawione zostało przykładowo w [1]. Mimo, iż temat dotyczy najprostszego przypadku jednoosiowego rozciągania próbki, to nie można lekceważyć przykładowo faktu, że warunkach wysokiej temperatury i dużych wartości naprężenia dochodzi do pełzania krótkotrwałego, którego pomiar podczas badań laboratoryjnych odbywa się przy równoczesnym istnieniu odkształceń plastycznych.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

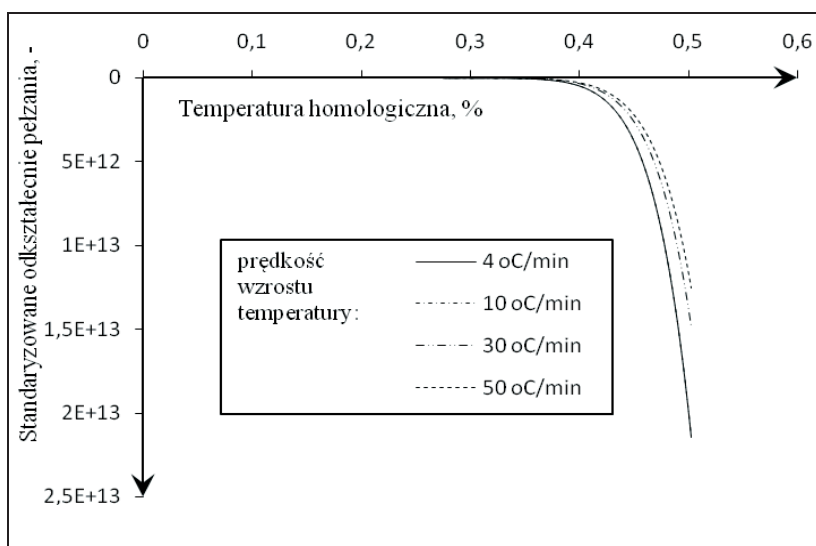
Kryteria bezpieczeństwa pożarowego budynków są ściśle powiązane z tzw. próbami ogniowymi prowadzonymi na obciążonych konstrukcjach w skali naturalnej. Możliwość prowadzenia badań laboratoryjnych konstrukcji są jednak ograniczone (ze względu na cenę i stopień skomplikowania badań). Rzadko kiedy realizuje się próby ogniowe elementów o schemacie statycznym bardziej skomplikowanym od belki wolnopodpartej, czy też słupa dwuprzegubowego lub sztywno zamocowanego na końcach; tylko w najlepiej wyposażonych laboratoriach istnieje zwyczaj filmowania próbki podczas próby ogniowej. Oceny zdolności konstrukcji budowlanych do przeciwstawiania się niekorzystnym zjawiskom w sytuacjach pożarowych można jednak realizować teoretycznie, z wykorzystaniem wyników badań materiałów budowlanych - badań znacznie tańszych od badań ogniowych. W takich przypadkach akcentowana jest konieczność precyzyjnego formułowania wyników badań laboratoryjnych materiałów budowlanych.

W wielu publikacjach na temat konstrukcji budowlanych od lat formułuje się procedury umożliwiające prowadzenie stosunkowo dokładnych obliczeń (np. z uwzględnieniem przestrzennej współpracy mechanicznej elementów [11]), a przy tym zachęca się do realizowania obliczeniowych analiz konstrukcji budowlanych pod obciążeniem wyjątkowym pożarem tzw. metodami zaawansowanymi [12]. Zaleca się przy tym opis całkowitych odkształceń w pożarze równaniem fizycznym addytywnym, ujmującym składnik termiczny, składnik sprężysto - plastyczny oraz silnie nieliniowy składnik pełzania. Podczas tzw. zaawansowanych obliczeń kratownic i innych konstrukcji złożonych stosowane są mimo

wszystko pewne uproszczenia - na przykład wynikające z formułowania równań konstytutywnych według prawa potęgowego. Wówczas jednak należy zadbać o odpowiednią jakość analizy wyników badań materiału, korzystając z możliwości jaki przykładowo stwarza gradientowa metoda Marquardta – Levenberga. Prawidłowe dopasowanie krzywych doświadczalnych i teoretycznych uzyskuje się dopiero po zastosowaniu dwuetapowej metody ustalania wartości parametrów prawa potęgowego polegającej na tym, że pierwszy etap realizuje się według zasad analizy liniowej, drugi natomiast - według zasad nieliniowej metody Marquardta – Levenberga. Konsekwencje nieprawidłowego dopasowania krzywych materiałowych ujawniają się poprzez błędy w analizie pożarowej konstrukcji.



Rys. 2. Temperatury aluminium i stali (o określonej zawartości węgla C podanej w procentach wagowych) w wybranym przedziale wartości temperatury homologicznej



Rys. 3. Krzywe pelzania stali ASTM A36

## Literatura

1. Skowroński W. *Fire safety of metal structures. Theory and design criteria*. PWN, 2004.
2. Miedziałowski Cz. *Dyskretny model złożonych konstrukcji ścianowych budynków uwzględniający współpracę podłoża gruntowego*. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, 1994.
3. Kubik J. *Wprowadzenie do statyki układów niesprężystych*. Wydawnictwo WSI w Opolu, 1983.
4. Skowroński W. *Methodik zur Beurteilung des Brandverhaltens von Metallkonstruktionen*. Stahlbau 76 (2007) 47-56.
5. Merchant W. *The failure load of rigidly jointed frame works as influenced by stability*. The Structural Engineer 32 (1954) 185-186.
6. Skowroński W., Włóka A., Chmiel R. *Modelling of strength processes of S235JR steel at increased temperature*. Structure and Environment 6 (2014) 32-37.
7. Skowroński W. *A study of the steel beam deformation during fire*. Building and Environment 23 (1988) 159-167.
8. Couto C., Vila Real P., Lopes N., Rodrigues J.P. *Buckling analysis of braced and unbraced steel frames exposed to fire*. Engineering Structures 49 (2013) 541-559.
9. Han L.-H., Wang W.-H., Yu H.-X. *Analytical behaviour of RC beam to CFST column frames subjected to fire*. Engineering Structures 36 (2012) 394-410.
10. Hozjan T., Planinc I., Saje M., Srpčič S. *Buckling of an axially restrained steel column under fire loading*. International Journal of Structural Stability and Dynamics 11 (2011) 451-472.
11. Miedziałowski Cz., Krętowska J. *Finite element analysis for the modelling of building structures in three dimensional schemes*. American Journal of Civil Engineering and Architecture 2 (2014) 143-148.
12. Skowroński W. *Buckling fire endurance of steel columns*. ASCE Journal of Structural Engineering 119 (1993) 1712-1732.

## Fire analysis of structures in terms of physical phenomena observed during uniaxial tensile tests of steel

Wojciech Skowronski

*Institute of Building Engineering, Faculty of Environmental Engineering and Geodesy,  
Wrocław University of Environmental and Life Sciences, e-mail: wojciech.skowronski@up.wroc.pl*

**Abstract:** Calculation Methods for building structures in fire should allow a thorough analysis and take into account the specific characteristics of heated materials such as steel's non-linear creep. Theoretical consideration about metal structures in a fire might be verified and supplemented by the results of the material and fire tests. The main objectives of the research on structure material at elevated temperature is to assign the strength and thermal characteristics. The results of the standard fire tests determine the reaction of the element separated from a structure on the heating according to a standard curve 'temperature-time'. The standard reduction of the real fire scenarios results, among the others, from the limited opportunities of the laboratory testing.

**Keywords:** building, structure, steel, fire, elevated temperature.