

dr inż. **Paweł A. KRÓL**¹

dr hab. inż. Lesław KWAŚNIEWSKI, prof. PW²

st. kpt. mgr inż. **Krzysztof J. ŁĄCKI**³

Przyjęty/Accepted/Принята: 23.10.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 19.11.2014;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.12.2014;

WYBRANE ZAGADNIENIA MODELOWANIA SŁUPÓW STALOWYCH PODDANYCH ODDZIAŁYWANIOM POŻAROWYM⁴

**Selected Issues Concerning the Use of Computational Techniques
in the Design of Steel Pillars Subsequently Exposed to a Fire**

**Выбранные вопросы моделирования стальных столбов,
подверженных воздействиям пожара**

Abstrakt

Cel: Celem artykułu jest wskazanie możliwości wykorzystania dostępnych, zaawansowanych narzędzi numerycznych do wirtualnego testowania konstrukcji poddanych oddziaływaniom symulowanego pożaru. Przy poprawnie skalibrowanym modelu obliczeniowym, testy przeniesione na platformę wirtualną mogą stanowić wiarygodną alternatywę dla tradycyjnych, kosztownych metod badawczych, w szczególności badań doświadczalnych konstrukcji w skali naturalnej.

Wprowadzenie: Modelowanie słupów stalowych w warunkach pożaru napotyka poważne trudności z uwagi na problemy z dopasowaniem i właściwą kalibracją modelu numerycznego w sposób zapewniający jak najlepsze odwzorowanie warunków pracy, zbliżonych do tych, w jakich znajduje się rzeczywista konstrukcja. W trakcie pożaru, w elementach nośnych (słupach, ryglach) rzeczywistej konstrukcji, przesztynowanej w sposób naturalny elementami doń dochodzącymi generują się dodatkowe siły wewnętrzne, trudne do przewidzenia i których wielkość zależy od sztywności elementów zbiegających się w węzłach, sposobu ich deformacji, rozkładu pól temperatury itp. Ograniczenie zarówno przemieszczeniowych, jak i obrotowych stopni swobody wywołuje dodatkowe obciążenie, które w połączeniu ze zmniejszoną (na skutek działania podwyższonej temperatury) sztywnością elementu może powodować jego wcześniejsze wyoboczenie i tym samym – zmniejszenie jego odporności pożarowej, często poniżej poziomu wymaganego odpowiednimi przepisami techniczno-budowlanymi.

Metodyka: W niniejszym opracowaniu zaprezentowano wyniki analiz i symulacji numerycznych przeprowadzonych z uwzględnieniem nieliniowego charakteru zjawisk. W pracy położono nacisk na doskonalenie przyjętego modelu obliczeniowego, jego weryfikację i wielokryterialną walidację. W analizach uwzględniono kilka wariantów warunków brzegowych – zarówno termicznych, jak i mechanicznych. Wyniki analiz porównano z wynikami autentycznych badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Uniwersytecie Ulster we współpracy z Uniwersytetem w Sheffield (Wielka Brytania), które wykorzystano do walidacji modelu numerycznego.

Wnioski: Ciągły rozwój technik obliczeniowych stwarza możliwości wykorzystania w analizie konstrukcji budowlanych nowoczesnych metod i narzędzi komputerowych, pozwalających na prowadzenie zaawansowanych analiz termo-mechanicznych. Dostępne narzędzia numeryczne umożliwiają dokładną ocenę przyrostu temperatury elementów konstrukcyjnych z równoczesną analizą wpływu warunków środowiska na mechaniczną odpowiedź konstrukcji. Na obecnym etapie stosowanie tego typu technik obliczeniowych wymaga, poza umiejętnościami obsługi skomplikowanych, komercyjnych narzędzi komputerowych, także zaawansowanej, gruntownej wiedzy teoretycznej. Przeprowadzone analizy wykazały, jak pozornie nieistotne i trudne do uchwycenia błędy modelowe mogą wpływać na jakość uzyskanych wyników.

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; p.krol@il.pw.edu.pl / Warsaw University of Technology, Poland.

² Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa / Warsaw University of Technology, Poland.

³ Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, ul. Słowackiego 52/54; 01-629 Warszawa; klacki@sgsp.edu.pl / The Main School of Fire Service, Poland.

⁴ Wkład merytoryczny w powstanie artykułu / Percentage contribution: P. A. Król – 30%, L. Kwaśniewski – 50%, K. J. Łącki – 20%.

Słowa kluczowe: pożar, słup stalowy, model numeryczny, weryfikacja, walidacja, kalibracja, sprzężone analizy termo-mechaniczne
Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Abstract

Aim: The purpose of this study is identification of accessible advanced computational tools to facilitate virtual testing of structures exposed to the thermal action of fire. With correctly calibrated numeric models, structure tests transferred to a virtual platform can provide a credible alternative to traditional costly research methods, particularly experimental research performed on actual scale constructions.

Introduction: The modelling process for steel pillars exposed to action of a fire faces serious difficulties because of problems involving matching and proper calibration of the numeric model to ensure the best possible reproduction of working conditions, similar to those in the actual environment. During a fire incident, additional internal forces are generated, which are difficult to predict, culminating in deformation of pillars and adjoining structure elements. Axial and rotational restraints can produce significant loadings which, together with reduced rigidity caused by thermal action, may cause premature buckling of pillars, often below accepted parameters required by relevant building regulations, and reduce pillars' resistance to the consequence of fire.

Methodology: The paper reveals results from an analysis and performed numeric simulations, and takes account of the non-linear character of outcomes. The paper provides a focus on the development of a selected numeric model, its verification and validation. The analysis includes several variations of boundary conditions covering thermal as well as mechanical issues. For validation purposes, the numeric prediction of structural reaction during heating was compared with published experimental data for tests performed at the University of Ulster in collaboration with the University of Sheffield, UK.

Conclusions: The continuous development of computational techniques provides opportunities in the application of modern techniques and computer technology for performing advanced structural-thermal analysis for building structures. Available numeric tools allow for an accurate assessment of temperature increases in structures. Simultaneously, they facilitate an examination of influences caused by environmental conditions on the mechanical reaction of structures. In order to use such a computational technique a prerequisite lies in the ability to manipulate complex commercial software. Additionally, it is necessary to have advanced and in depth theoretical knowledge of the topic. Examination by authors reveal how seemingly insignificant and difficult to identify modelling errors can affect the quality of final results.

Keywords: fire, steel column, numerical model, verification, validation, calibration, coupled structural-thermal analysis

Type of article: original scientific article

Аннотация

Цель: Целью статьи является определение возможности использования доступных современных числовых методов для виртуального тестирования конструкций подверженных воздействию симулированного пожара. При правильно откалиброванной расчётной модели, тесты, перенесённые на виртуальную платформу, могут стать достоверной альтернативой для традиционных, дорогостоящих методов исследования, в частности, экспериментальных испытаний конструкций в реальном масштабе.

Введение: Моделирование стальных столбов в условиях пожара сталкивается с серьёзными трудностями из-за проблем с подгонкой и правильной калибровкой числовой модели так, чтобы обеспечить наилучшее отображение условий работы аналогичных тем, в которых находится реальная конструкция. Во время пожара в несущих элементах (столбах, ригелях) реальной конструкции стойкой естественным способом с помощью её частей, генерируются дополнительные внутренние силы, действия которых трудно спрогнозировать и величина которых зависит от жёсткости элементов, сходящихся в узлах, от способа деформации, от разложения температурных полей и т.п. Ограничение как степени свободы перемещения, так и степени свободы вращения вызывает дополнительную нагрузку, которая в сочетании с уменьшенной (вследствие действия повышенной температуры) жёсткостью элемента может привести к его раннему изгибанию и тем самым – к снижению его огнестойкости, часто ниже уровня, требуемого соответствующими техническими и строительными правилами.

Методика: В данной разработке представлены результаты анализов и числовых симуляций осуществлённых с учётом нелинейного характера явлений. В работе основное внимание уделяется совершенствованию принятой численной модели, ее проверке и валидации по множеству критериев. Анализы включают в себя несколько вариантов граничных условий - как термических, так и механических. Результаты анализов были сопоставлены с результатами реальных лабораторных исследований, проведенных в Университете Ольстера в сотрудничестве с Университетом Шеффилд, которые были использованы для валидации численной модели.

Выводы: Постоянное развитие вычислительной техники создает возможности использования при анализе строительных конструкций современных методов и компьютерных инструментов, которые позволяют проводить современные термо-механические анализы. Доступные числовые решения позволяют точно оценить рост температуры структурных элементов с одновременным анализом влияния условий окружающей среды на механические ответы конструкции. На данном этапе использование вычислительных техник такого типа требует, кроме умения работать со сложными, коммерческими компьютерными инструментами, также развитые, основные теоретические знания. Проведенные анализы показали, что кажущиеся незначительными и трудными для обнаружения модельные ошибки могут влиять на качество полученных результатов.

Ключевые слова: пожар, стальной столб, числовая модель, проверка, валидация, калибровка, сопряжённые термомеханические анализы

Вид статьи: оригинальная научная статья

Pro Memoria

Artykuł niniejszy dedykujemy pamięci naszego nieodżałowanego Kolegi, wielkiego przyjaciela młodzieży, cenionego nauczyciela akademickiego i wybitnego specjalisty w zakresie zastosowań metod komputerowych w inżynierii – **dra hab. inż. Lesława Kwaśniewskiego, profesora PW**, który niespodziewanie przegrał walkę z chorobą w dniu 12 października 2014 r. Do końca był niezwykle aktywny w pracy zawodowej, snuł szerokie plany na przyszłość. Jesteśmy dumni z tego, że mogliśmy razem z nim pracować. Cześć Jego Pamięci!

1. Wprowadzenie

Zgodnie z postanowieniami zawartymi w normie PN-EN 1993-1-2 [1] nośność konstrukcji stalowych podczas pożaru można oceniać na poziomie pojedynczego elementu, wyodrębnionej części układu konstrukcyjnego (tzw. podukładu) lub całej konstrukcji. W przypadku słupów, stanowiących pionowe elementy nośne w wielokondygnacyjnych układach szkieletowych, w wyniku działania pożaru generują się dodatkowe siły podłużne i/lub momenty zginające spowodowane zróżnicowanym oddziaływaniem pól temperatury na sąsiadujące elementy konstrukcyjne układu. Naturalne ograniczenia zarówno przemieszczeniowych, jak i obrotowych stopni swobody mogą wywoływać w elemencie dodatkowe siły wewnętrzne o znacznych wartościach, trudne lub niemożliwe do dokładnej identyfikacji, które finalnie, w połączeniu ze zredukowaną sztywnością i zmniejszonymi wartościami parametrów wytrzymałościowych materiału, mogą prowadzić do przedwczesnego wybożenia i – w efekcie do znaczącego zmniejszenia odporności pożarowej konstrukcji, często poniżej poziomu wymaganego odpowiednimi przepisami techniczno-budowlanymi. Skala zjawiska jest zależna od wielu parametrów takich jak m.in. sposób rozkładu pól temperatury w czasie i przestrzeni, sztywność połączeń pomiędzy elementami konstrukcji w węzłach, wzajemna relacja sztywności prętów zbiegających w węzłach, stopień i tempo degradacji parametrów wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych, spowodowanych nagrzewaniem, prędkości wzrostu temperatury itp. Zjawisko ma bardzo złożoną naturę i charakteryzuje się silną nieliniowością.

Uwzględniając złożoność problemu, zagadnienie można analizować w sposób doświadczalny lub numeryczny, stosując zaawansowane modele obliczeniowe. Analizy numeryczne mogą być w ogólności wykorzystywane do projektowania elementów konstrukcji wystawionych na działanie pożaru [2], jako dodatek lub uzupełnienie eksperymentu [3], bądź też do prowadzenia tzw. analiz parametrycznych [4]. Ograniczenia badań laboratoryjnych spowodowane wymiarami pieców oraz innych urządzeń badawczych, wysokimi kosztami ich prowadzenia oraz innymi trudnościami natury technicznej w sposób automatyczny wymuszają potrzebę prowadzenia zaawansowanych analiz numerycznych jako uzupełniającej czy alternatywnej metody badawczej. Zaawansowane analizy obliczeniowe mogą być pomocne w tych dziedzinach, w których klasyczny eksperyment natrafia na przeszkody wynikające z dużych wymiarów testowanych elemen-

tów, trudności w odtworzeniu rzeczywistych warunków obciążenia czy podparcia, problemy w dokonaniu pomiarów określonych wielkości fizycznych lub inne, skutkujące w efekcie brakiem możliwości właściwej interpretacji zachowania się badanego fragmentu konstrukcji. Przy projektowaniu i realizacji analiz obliczeniowych należy włożyć maksimum wysiłku w uzyskanie maksymalnego podobieństwa pomiędzy budowanym modelem a rzeczywistą konstrukcją – tak w zakresie geometrycznym, mechanicznym, jak również termicznym. Tylko w przypadku spełnienia tego warunku wyniki analiz numerycznych mogą być uznane za wartościowe i względnie wiarygodne źródło informacji. Jednym z wyzwań stojących przed analizami obliczeniowymi konstrukcji oraz możliwościami, jakie zapewniają narzędzia numeryczne, jest możliwość oceny odporności i zachowania się konstrukcji w warunkach nagrzewania i chłodzenia, spowodowanych działaniem pożarów zlokalizowanych [5].

W pracy zaprezentowano wyniki serii analiz numerycznych stalowych słupów ściskanych, zamocowanych w sposób ograniczający swobodę odkształceń węzłów podporowych, poprzez nałożenie więzów obrotowych, jak również więzów ograniczających swobodę odkształceń w kierunku podłużnym, wzdłuż osi elementu. Zagadnienie rozwiązano na drodze dynamicznych analiz opartych na metodzie elementów skończonych. Weryfikację i walidację modelu przeprowadzono na podstawie wyników autentycznych badań doświadczalnych przeprowadzonych w przeszłości w laboratoriach Uniwersytetu w Ulster we współpracy z Uniwersytetem w Sheffield (Wielka Brytania). Uzyskane wyniki – zarówno badań doświadczalnych, jak i analiz numerycznych potwierdzają, iż wymuszone ograniczenia swobody odkształceń powodują istotną redukcję odporności/nośności pożarowej konstrukcji.

2. Koncepcja modelu numerycznego

2.1. Typy analizy i metodyka rozwiązań

Obliczenia numeryczne powinny być prowadzone z poszanowaniem praw fizyki, z uwzględnieniem wszelkich istotnych warunków brzegowych i środowiskowych oraz winny być poddane weryfikacji i walidacji. Najczęściej procesu weryfikacji i walidacji dokonuje się w oparciu o dostępne wyniki autentycznych badań eksperymentalnych. W zależności od przewidywanego scenariusza oraz dokładności analizy można ją prowadzić w sposób uwzględniający obliczenia: termiczne, mechaniczne lub sprzężone termo-mechaniczne. Przyjęta metodyka analizy wytrzymałościowej konstrukcji powinna uwzględniać odkształcenia spowodowane sprężystymi i plastycznymi deformacjami, jak również te wynikające z odkształceń termicznych (w przypadku sprzężonych analiz termo-mechanicznych). Sprzężone analizy termo-mechaniczne są trudne do przeprowadzenia i wymagają zastosowania profesjonalnych narzędzi numerycznych, z których jedynie część stwarza użytkownikowi możliwość pełnego sprzężenia obliczeń termicznych i mechanicznych w jednym kroku obliczeniowym, pozwalając na bieżącą wymianę danych pomiędzy solverami. W większości mniej

skomplikowanych przypadków możliwa jest również analiza uproszczona, pozwalająca najpierw na przeprowadzenie obliczeń termicznych, a następnie zeskanowanie wyników z solwera termicznego (pól rozkładu temperatury, odkształceń termicznych itp.) i kontynuację, niejako w kolejnym kroku, analiz typowo mechanicznych czy wytrzymałościowych.

Stosowanie narzędzi metody elementów skończonych umożliwia prowadzenie niezwykle komplikowanych analiz, ale sposób podejścia do zagadnienia determinuje sposób i metodykę prowadzonych obliczeń w ujęciu numerycznym. Analiza przyrostowa uwzględniająca zmienność w czasie zjawisk i warunków brzegowych może być prowadzona w oparciu o tzw. jawne i niejawne metody całkowania równań równowagi. Zastosowanie metod jawnych (*explicit*) w sprzężonej analizie termo-mechanicznej jest niemożliwe z uwagi na zbyt duże przedziały czasowe stanowiące specyfikę tej metody całkowania. W przypadku analiz termicznych zwykle dobrą zbieżność wyników uzyskuje się, wykorzystując tzw. niejawną (*implicit*) metodę całkowania równań równowagi [6].

2.2. Geometria i siatki

Dla większości zagadnień numerycznych analizowany element powinien być odwzorowany z wykorzystaniem elementów przestrzennych lub powłokowych. Jeśli wymagają tego warunki analizy, elementy powłokowe winny umożliwiać przepływ ciepła na swojej grubości. Jeśli w analizie wykorzystuje się skończone elementy przestrzenne do odwzorowania kształtu metalowych elementów płytowych (np. półek lub środników kształtowników), należy przewidzieć przynajmniej cztery warstwy elementów na grubości modelowanego fragmentu/ścianki konstrukcji, celem poprawnego odwzorowania efektu zginania. Uwzględniając wynikające stąd ograniczenia – modelowanie elementów traktowanych jako cienkościennie (o zdegenerowanym trzecim wymiarze w stosunku do dwóch pozostałych) prowadzi do rozbudowania modelu, nienaturalnego wzrostu liczby elementów skończonych, co w sposób znaczący zwiększa wymiar zagadnienia i wydłuża czas analizy.

2.3. Modele materiałowe

Stosowane w obliczeniach nieliniowe modele materiałowe zarówno termiczne, jak i mechaniczne powinny uwzględniać zmienność właściwości i parametrów wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego w funkcji temperatury. Dla materiałów o strukturze porowatej (np. betonu) pewne złożone zagadnienia fizyko-chemiczne (wilgotność, transport i ciśnienie pary, odwodnienie) potrafią wywierać istotny wpływ na wyniki analiz, niemniej jednak – z uwagi na trudności w uwzględnieniu – często bywają pomijane. Model materiałowy stali konstrukcyjnej użyty w przeprowadzonych analizach uwzględnia zmienność odcinkową parametrów wytrzymałościowych w funkcji temperatury [7]. Zmienność modelu obejmuje moduł sprężystości podłużnej i poprzecznej, współczynnik Poisson'a, współczynnik rozszerzalności termicznej, granice plastyczności i moduł plastycznego wzmocnienia. Na potrzeby analiz termicznych oraz sprzężonych analiz

termo-mechanicznych właściwości termiczne, takie jak pojemność cieplna czy przewodność cieplna, są określone w dodatkowym modelu materiałowym. Wszystkie wymienione wcześniej parametry mogą i powinny być zdefiniowane jako zależne od temperatury.

2.4. Obciążenia i mechaniczne warunki brzegowe

Zdefiniowane mechaniczne warunki brzegowe, obciążenia i inne więzy winny odpowiadać warunkom autentycznego testu stanowiącego podstawę weryfikacji i walidacji modelu numerycznego oraz możliwie precyzyjnie odwzorowywać warunki faktycznego zamocowania elementu konstrukcyjnego. W zależności od typu prowadzonej analizy obciążenia mechaniczne mogą być zadawane w formie przyłożonej siły, ciśnienia lub wymuszenia przemieszczeniem. W przypadku konieczności uwzględnienia zmienności warunków podparcia mogą one być uwzględnione w formie zależnej od czasu lub temperatury bądź też mogą zostać zadane w formie pośredniej – za pomocą narzędzi kontaktu. W praktyce inżynierskiej, stosowanej przy ocenie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji, mamy do czynienia z dwoma typami obciążenia i sposobów nagrzewania. Jeden ze scenariuszy zakłada wzrost obciążenia w warunkach oddziaływania stałej (niezmiennej w czasie) temperatury. Taki scenariusz jest wykorzystywany do wyznaczania wartości krytycznej obciążeń dla określonych wartości temperatury. W drugim scenariuszu konstrukcja jest poddawana działaniu niezmiennego w czasie obciążenia, ale zmiennej w czasie (rosnącej) temperatury. Celem takiego podejścia jest wyznaczenie temperatury krytycznej oraz czasu krytycznego. W środowisku naukowym ta procedura badawcza, znana w literaturze pod nazwą *transient-state test*, jest rekomendowana do wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych, ponieważ lepiej odzwierciedla warunki termiczno-mechaniczne występujące podczas realnego pożaru [8]. Jest powszechnie uznane, iż parametry materiałowe uzyskane w testach prowadzonych w oparciu o ten typ procedury gwarantują lepszą wiarygodność opartych na nich analiz numerycznych i uzyskanych na ich podstawie wyników. Powtarzając obliczenia w oparciu o parametry uzyskane na drodze obu scenariuszy badawczych, można stworzyć diagramy pozwalające na określenie dla założonego poziomu obciążenia odpowiadającej mu odporności pożarowej elementu zarówno w domenie temperaturowej – Θ_{cr} , jak i czasowej – t_{cr} .

2.5. Termiczne warunki brzegowe

W zależności od rozpatrywanego przypadku obciążenia termiczne mogą zostać zadane w postaci różnorodnych warunków brzegowych zależnych od czasu i temperatury, w postaci np. narzuconych pól temperatury, elementów izolowanych, strumieni ciepła, konwekcji czy radiacji. Najprostszym sposobem modelowania obciążeń termicznych jest zadanie w sposób bezpośredni pól temperatury na powierzchni elementu, gdzie z góry zdefiniowane (w funkcji czasu) warunki brzegowe są przyłożone bezpośrednio do węzłów analizowanego (w tym węzłów wewnętrznych) modelu konstrukcji. Takie rozwią-

zanie jest odpowiednie i wystarczające w przypadku analiz, które nie uwzględniają przewodzenia ciepła w obrębie (na grubości) modelu.

Inne możliwe podejście, znajdujące w szczególności zastosowanie przy modelowaniu warstw izolacyjnych, objawia się założeniem stałych lub zmiennych w czasie oddziaływań termicznych, przyłożonych bezpośrednio do wybranych węzłów, które są zlokalizowane na zewnętrznej powierzchni modelu. W tym uproszczonym podejściu transport ciepła pomiędzy otoczeniem a zewnętrzną powierzchnią modelu nie jest rozpatrywany, natomiast transport ciepła wewnątrz modelu jest uwzględniany w trakcie prowadzonych obliczeń. Aby zamodelować pełną izolację, należy ograniczyć przewodzenie ciepła na powierzchni modelu do minimum, stosując możliwości danego software'u, pozwalające na definiowanie określonych parametrów bezpośrednio „z ręki” lub za pomocą odpowiednich komend.

Najbardziej zaawansowane podejście do modelowania brzegowych warunków termicznych polega na wykorzystaniu zjawiska przepływów oddziałujących na wewnętrzne powierzchnie analizowanego modelu. Przepływ można zdefiniować jako zależny od czasu lub temperatury, bądź stały podczas całego czasu analizy. To podejście jest stosowane w przypadku bardziej zaawansowanych analiz termicznych lub sprzężonych analiz termomechanicznych. Wybór tej opcji wymaga dysponowania dokładnymi i rzetelnymi danymi dotyczącymi wielkości przepływów.

W najbardziej realistycznych scenariuszach obliczeniowych transport ciepła pomiędzy elementem konstrukcji a otoczeniem odbywa się z uwzględnieniem konwekcji i radiacji. Konwekcja i radiacja mogą być zdefiniowane oddzielnie dla każdej z określonych powierzchni analizowanego modelu konstrukcji. Opcja ta znajduje zastosowanie w przypadku prowadzenia zaawansowanych analiz termicznych lub termomechanicznych. Metodyka ta jest z reguły stosowana na platformach obliczeniowych wykorzystujących zdobycze tzw. numerycznej dynamiki płynów (CFD), np. w środowisku takich programów jak CFX czy FLUENT, dostępnych obecnie na płaszczyźnie ANSYS-a.

Konwekcja może być opisana w funkcji czasu np. korzystając z poniższej zależności [6], [9]:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c [\Theta_g - \Theta_m] \quad (1)$$

gdzie:

$\dot{h}_{net,c}$ – konwekcyjny strumień ciepła netto [W/m²],
 α_c – współczynnik konwekcyjnego strumienia ciepła [W/m²K] (może przyjmować wartość stałą lub zależną od temperatury), zależy od przyjętego modelu materiałowego, sposobu wykończenia powierzchni, zabezpieczenia ogniochronnego i rodzaju otaczającego gazu,
 Θ_m – aktualna temperatura obliczona na powierzchni modelu (elementu) [°C],
 Θ_g – zdefiniowana temperatura gazu w otoczeniu elementu poddawanego działaniu pożaru, może mieć wartość

stałą lub zmienną w czasie (np. odzwierciedlającą przebieg krzywej nominalnej) [°C]

Przepływ radiacyjny pomiędzy gazem a powierzchnią elementu może być opisany w postaci zależności [6], [9]:

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma_{SB} \left[(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4 \right] \quad (2)$$

gdzie:

$\dot{h}_{net,r}$ – radiacyjny strumień ciepła netto [W/m²],
 h – współczynnik konfiguracji; zwykle przyjmuje wartość $h=1,0$, jednak w celu uwzględnienia tzw. efektów cienia i położenia można przyjmować wartość mniejszą. Szczegółowa metoda obliczania współczynnika konfiguracji h została podana w Załączniku G normy [1]
 ε_m – współczynnik absorpcyjności (emisyjności) powierzchni, może przyjmować wartość stałą lub zmienną, zależną od czasu/temperatury; zależy od przyjętego modelu materiałowego, sposobu wykończenia powierzchni i rodzaju zabezpieczenia ogniochronnego,
 ε_f – współczynnik emisyjności ognia; zwykle przyjmuje się jako $\varepsilon_f=1,0$,
 σ_{SB} – stała Stefana Boltzmanna [5,67·10⁻⁸ W/m²K⁴],
 Θ_m – aktualna temperatura obliczona na powierzchni modelu (elementu) [°C],
 Θ_r – efektywna temperatura promieniowania środowiska pożaru [°C]; w przypadku elementów całkowicie ogarniętych przez ogień, jako temperaturę promieniowania Θ_r można przyjąć temperaturę gazu Θ_g w otoczeniu danego elementu.

3. Doświadczalna walidacja modelu numerycznego

3.1. Reguły ogólne

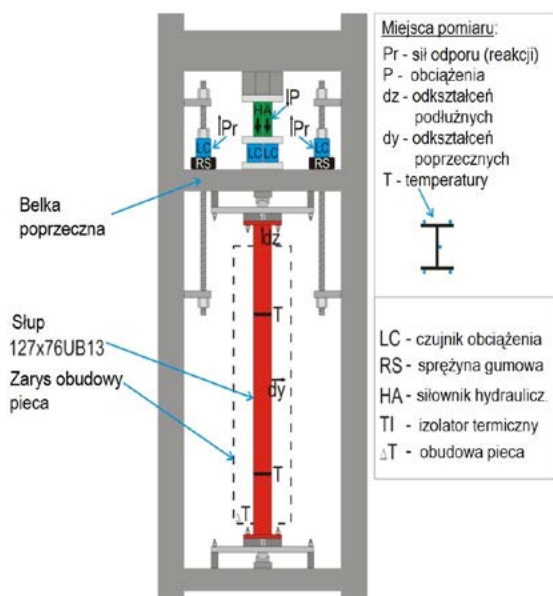
Weryfikacja i walidacja modelu numerycznego analizowanej konstrukcji jest podstawowym gwarantem dopasowania modelu do warunków rzeczywistej pracy odwzorowywanego elementu konstrukcji. Weryfikacja powinna poprzedzać walidację. Weryfikacja obliczeniowa jest pożądana z uwagi na potrzebę oszacowania bądź wyeliminowania błędów numerycznych spowodowanych przybliżeniami i uproszczeniami wynikającymi z dyskretyzacji. Walidacja prowadzona najczęściej poprzez porównanie wyników symulacji komputerowych z wynikami autentycznego eksperymentu ma na celu dopasowanie modelu matematycznego do specyfiki zjawiska fizycznego [10]. Do walidacji modelu numerycznego opracowanego na potrzeby przeprowadzonych analiz, opisanych szerzej w dalszej części artykułu, wykorzystano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Ali i O'Connor [11]. W przedstawionej pracy badany jest sposób zachowania słupów stalowych (zmniejszonych dwukrotnie w stosunku do ich wymiarów rzeczywistych), testowanych w warunkach pożaru z uwzględnieniem dwóch różnych sposobów podparcia na końcach, modelowanych przez różne charakterystyki sztywności przemieszczeniowej i obrotowej podpór.

3.2. Badania eksperymentalne w komorze pieca

W pracy wykorzystano wyniki badań doświadczalnych uzyskane dla słupów stalowych o specyfikacji 127x76UB13, przeprowadzonych w *The Fire Research Centre*, Uniwersytetu w Ulster we współpracy z Uniwersytetem w Sheffield [11]. Słupy stalowe o wymiarach dwukrotnie zmniejszonych w stosunku do wymiarów rzeczywistych badano w piecu, modelując zróżnicowane sztywności przemieszczeniowe i obrotowe podpór. Dla wybranego scenariusza obciążenia testowany element początkowo obciążano siłą osiową równą w przybliżeniu 205 kN, a następnie nagrzewano. W trakcie badania na bieżąco rejestrowano całkowitą siłę osiową, rozszerzalność termiczną (wydłużenie) słupa oraz przemieszczenia poprzeczne w połowie wysokości (długości) słupa. Temperaturę kontrolowano i monitorowano za pomocą zestawu termopar rozmieszczonych równomiernie na trzech poziomach wysokości pieca i dwóch poziomach na długości badanego elementu. Na każdym z poziomów pomiarowych słupa mocowano 5 termopar rozmieszczonych według następującego porządku: jedna przymocowana w środku wysokości środnika i cztery przymocowane do półek słupa (ryc. 1.) W badaniach wytrzymałościowych opisanych przez Ali i O'Connora [11] przemieszczeniowe i obrotowe usztywnienia, ograniczające swobodę odkształceń, realizowano za pomocą nastawnych gumowych podkładek umiejscowionych w górnej i dolnej części trzonu słupa oraz stalowych płyt dociskowych przekazujących obciążenie z belki trawersy i ramy maszyny wytrzymałościowej, zlokalizowanych poza obrysem pieca.

3.3. Obliczenia numeryczne

Wszystkie przeprowadzone analizy numeryczne wykonano z wykorzystaniem niejawnej metody całkowania równań równowagi za pomocą wbudowanego solvera zaimplementowanego w programie LS-DYNA [7]. Model numeryczny użyty w analizach zbudowano zgodnie ze schematem pokazanym na ryc. 2, odwzorowującym możliwie precyzyjnie warunki stanowiska badawczego.



Ryc. 1. Schemat stanowiska badawczego do testowania słupów podanych działaniu podwyższonych temperatur [11]

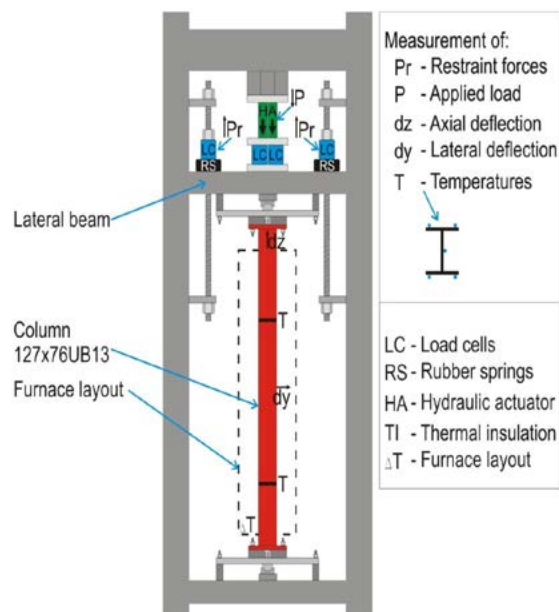


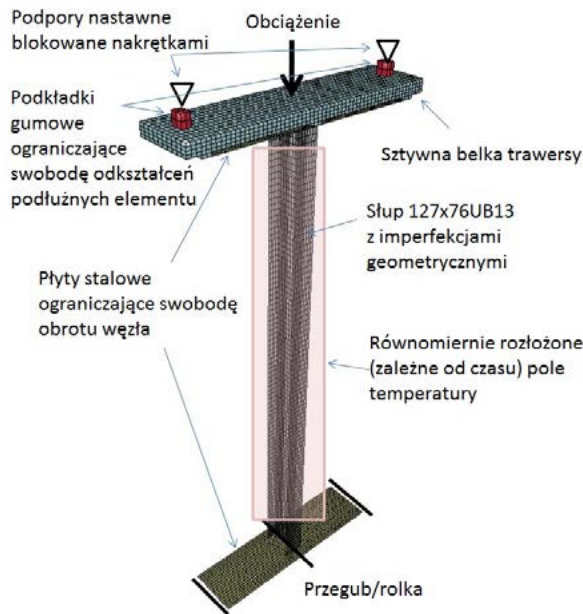
Fig. 1. Experimental test setup [11]

Z uwagi na relatywnie małe grubości ścianek składowych modelu (półek i środnika) wykorzystano model powłokowy 3D z pominięciem zjawisk transportu ciepła na grubości ścianek. W oparciu o średnią wartość profilu temperatury zarejestrowanego w trakcie badań doświadczalnych w modelu zadano obciążenie temperaturą, jako zależne od czasu, przyłożone do tych węzłów modelu konstrukcji, które były zlokalizowane w części słupa wyeksponowanej na oddziaływania imitujące pożar w trakcie testu. Zjawiska transportu ciepła pomiędzy otoczeniem (wnętrzem pieca) i słupem pominięto. Jednakże transport ciepła w kierunku podłużnym (wzdłuż osi słupa) został uwzględniony w trakcie obliczeń i okazał się zjawiskiem niezwykle istotnym, wpływającym znacząco na jakość wyników – szczególnie w odniesieniu do górnej i dolnej części słupa położonych w pobliżu ścianek pieca.

Przeprowadzono sprzężone analizy termiczno-naprężeniowe z mechanicznymi krokami całkowania następującymi bezpośrednio tuż po krokach całkowania w analizie termicznej, podczas których w kolejnych iteracjach rozwiązywano równania transportu ciepła i aktualizowano rozkład pól temperatury. Podczas pierwszych 100 sekund symulacji przykładano jedynie obciążenie mechaniczne w postaci siły osiowej o wartości 205 kN. Obciążenie przykładano w formie wstępnie przyjętego przemieszczenia sztywnej belki, ryc. 2. Następnie blokowano przemieszczenie górnych powierzchni podkładek gumowych i w dalszym kroku zwiększano temperaturę – zgodnie z zasadami przyjętymi w trakcie badań doświadczalnych. Sztywność podkładek gumowych w modelu numerycznym, znajdujących się na szczycie i pod podstawą słupa, ustalono na poziomie zapewniającym identyczną sztywność przemieszczeniową i obrotową z tą, jaką założono w przeprowadzonych testach laboratoryjnych.

Wstępne wyniki uzyskane po przeanalizowaniu uproszczonego modelu obliczeniowego pokazały, że jakkolwiek przyjęte zagęszczenie siatki jest wystarczające do właściwego uchwycenia odkształceń spowodowanych

wyboczeniem pręta (rys. 3.), to jednak występują znaczne – widoczne rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentu i analiz numerycznych [12].



Ryc. 2. Rozwinięty model numeryczny stanowiska badawczego [11]

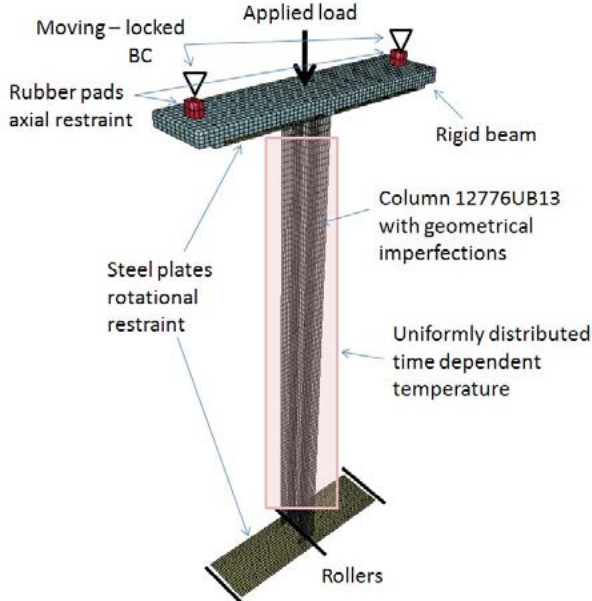


Fig. 2. Improved finite element model of the experimental test setup [11]

Dalsze analizy prowadzone na potrzeby niniejszej pracy koncentrowały się głównie na studiach parametrycznych, które wskazały trzy najważniejsze parametry modelu wywierające znaczący wpływ na jakość wyników pochodzących z analiz numerycznych: a) opis modelu materiałowego nie w pełni adekwatny do gatunku użytej stali, b) imperfekcje geometryczne modelu oraz c) zmienność pola temperatury na długości słupa, szczególnie w pobliżu ścianek pieca.

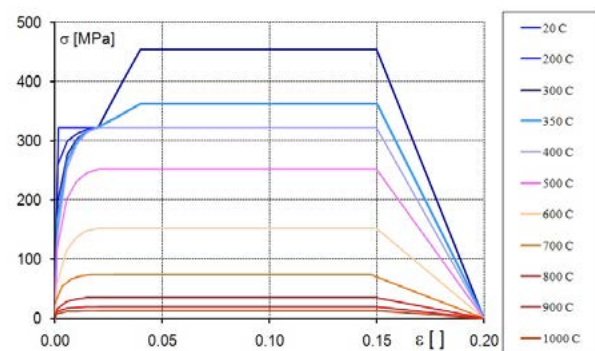


Ryc. 3. Mapy wartości naprężeń zastępczych wg hipotezy Hubera-Misesa w słupie po wyboczeniu [12]

Fig. 3. Contours of effective von Mises stress in buckled column [12]

3.4. Właściwości materiałowe stali konstrukcyjnej

Na potrzeby prowadzonych analiz przetestowano trzy, zależne od temperatury, modele materiałowe stali S275, z której były wykonane elementy badawcze testowane na drodze eksperymentu. Pierwszy model materiałowy przyjmował nominalną wartość granicy plastyczności f_y bez uwzględniania efektów wzmocnienia ($f_u=f_y=275$ MPa). Drugi model uwzględniał nominalne wzmocnienie materiału w fazie poplastycznej, zgodnie z opisem przyjętym w PN-EN 1993-1-2 [1], ($f_y=275$ MPa, $f_u=1,25f_y$). Właściwości materiału w temperaturze pokojowej w trzecim z analizowanych modeli materiałowych przyjęto na bazie wyników serii autentycznych badań doświadczalnych przeprowadzonych w Czeskim Uniwersytecie Technicznym w Pradze przez Walda z Zespołem [13] ($f_y=303$ MPa, $f_u=469$ MPa $\rightarrow f_u=1,55f_y$). Opis zależności pomiędzy naprężeniami a odkształceniami dla każdego z trzech wymienionych przypadków przyjęto za PN-EN 1993-1-2 [1], jak dla stali węglowych. Dla przykładu na ryc. 4 pokazano zależność σ - ϵ dla trzeciego z opisanych modeli materiałowych.

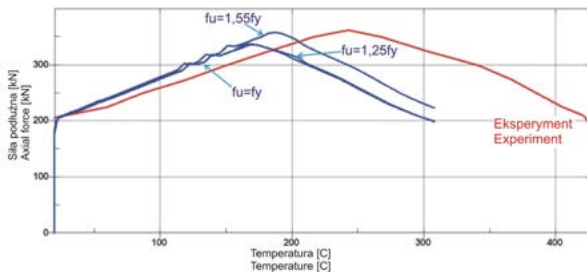


Ryc. 4. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla stali S275
Fig. 4. Stress-strain curves for steel S275

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań [13] oraz PN-EN 1993-1-2 [1].

Source: Own elaboration based on coupon tests [13] and PN-EN 1993-1-2 [1].

Porównanie pomiędzy wynikami eksperymentu i rezultatami przeprowadzonych analiz numerycznych dla każdego z trzech opisanych modeli materiałowych pokazano w formie wykresów na ryc. 5-7. Ilościowe porównanie pokazuje zależności uwzględniające wzajemne relacje pomiędzy średnią temperaturą słupa a siłą osiową (ryc. 5), osiowym przemieszczeniem (ryc. 6) i przemieszczeniem poprzecznym przekroju środkowego słupa (ryc. 7).

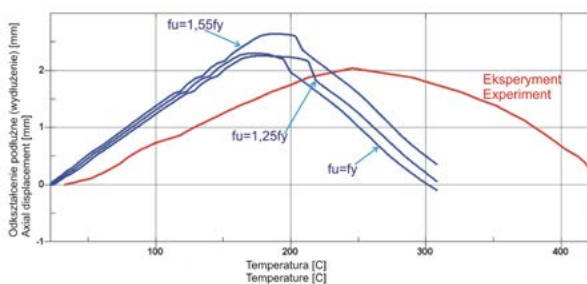


Ryc. 5. Siła osiowa w funkcji temperatury dla trzech modeli materiałowych przyjętych w analizach

Fig. 5. Axial force vs. column average temperature for three material models, compared to experiment

Zródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

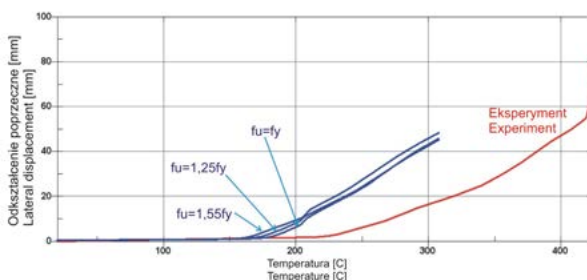


Ryc. 6. Przemieszczenie osiowe (wydłużenie) w funkcji temperatury dla trzech modeli materiałowych przyjętych w analizach

Fig. 6. Axial displacement vs. column average temperature for three material models compared to experiment

Zródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 7. Przemieszczenie poziome przekroju środkowego słupa w funkcji temperatury dla trzech modeli materiałowych przyjętych w analizach

Fig. 7. Lateral displacement vs. column temperature for three material models compared to experiment

Zródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

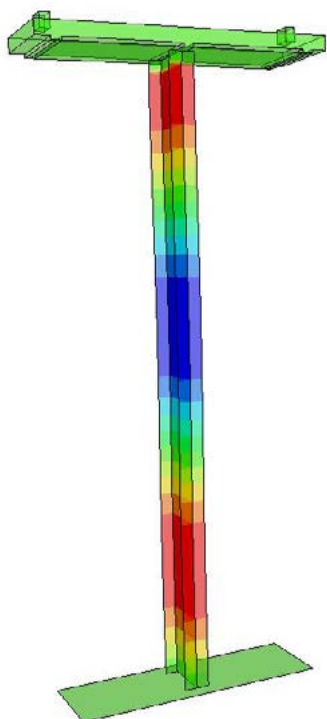
Wszystkie trzy zestawy wykresów pokazują, że faktyczne wyoboczenie pomierzone podczas testów przeprowadzonych w laboratorium występuje przy wyższych

wartościach temperatur, niż wynika to z obliczeń numerycznych, zaś faza po wyoboczeniu zachowuje bardziej łagodny przebieg. Przeprowadzone porównanie wskazuje również na fakt, iż oprócz różnic w opisie materiału także inne parametry wywierają zauważalny wpływ na charakter i rozkład wyników analiz numerycznych.

3.5. Zaimplementowane imperfekcje geometryczne

Jest kwestią oczywistą, iż nawet niewielkie imperfekcje geometryczne mogą znacząco wpłynąć na zachowanie się elementów konstrukcyjnych ściskanych osiowo, po osiągnięciu wartości siły krytycznej. Rzeczywiste imperfekcje, definiowane jako odchylenia od stanu idealnego (zwykle odwzorowywanego w modelu numerycznym) nie są łatwe do określenia i pomierzenia w realnej konstrukcji, ponieważ mogą być one spowodowane wieloma czynnikami – nie tylko o charakterze geometrycznym, ale również materiałowym. Imperfekcje w słupach stalowych mogą być wynikiem zróżnicowania parametrów materiałowych na długości i w przekroju pręta, rozkładu naprężeń resztkowych, niesymetrycznego przyłożenia obciążenia czy niesymetrycznych warunków podparcia bądź też, co wydaje się najbardziej banalne – braku idealnej prostoliniowości elementu. Zróżnicowane w czasie i przestrzeni pola temperatury wywołane pożarem wywołują dodatkowe nierównomierne przemieszczenia i odkształcenia wpływające na geometrię badanego elementu.

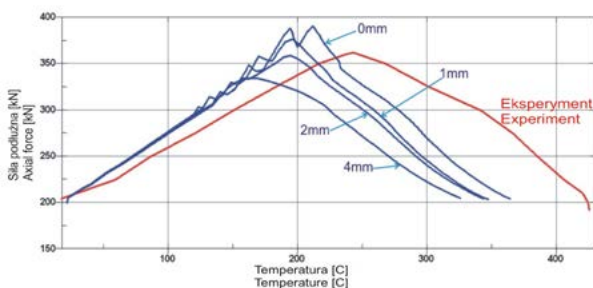
W przypadku budowania modeli numerycznych MES powszechnie stosowanym sposobem wprowadzania imperfekcji geometrycznych jest metoda polegająca na wymuszonym przemieszczaniu węzłów siatki elementów skończonych w stosunku do ich pierwotnego położenia. W ten sposób – w ujęciu numerycznym – idealnie prostoliniowy słup jest traktowany jako element o niewielkiej krzywiźnie. W wielu komercyjnych programach MES imperfekcje mogą być generowane w sposób automatyczny za pomocą procedury pozwalającej na wskazanie węzłów, które mają zostać przesunięte, jak również kierunku przemieszczenia czy amplitudy maksymalnej dopuszczalnej zmiany współrzędnych węzłów. Na ryc. 8 przedstawiono harmoniczne zaburzenie wprowadzone do geometrii analizowanego słupa. W analizach przyjęto, iż zadane geometryczne imperfekcje poprzeczne pomierzone w przekroju środkowym na długości słupa wynoszą odpowiednio 0 mm (geometria idealna), 1 mm, 2 mm i 4 mm, jak pokazano na ryc. 9-11. Wszystkie krzywe pokazane na ryc. 9-11 stanowią rezultat obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem trzeciego analizowanego modelu materiałowego, dla którego $f_u=1,55f_y$.



Ryc. 8. Zaburzenie idealnej prostoliniowej geometrii słupa wprowadzone w formie harmonicznego przesunięcia węzłów siatki elementów skończonych

Fig. 8. Applied geometrical imperfections: contours of nodal perturbations

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

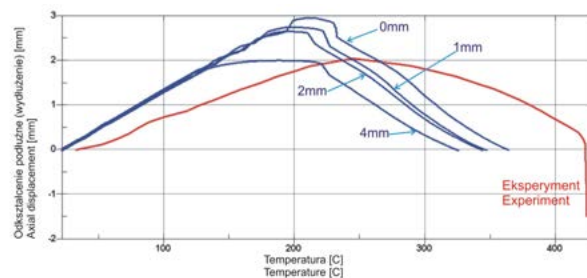


Ryc. 9. Siła osiowa w funkcji temperatury dla trzech wielkości imperfekcji geometrycznych przyjętych w analizach

Fig. 9. Axial force vs. column temperature for different magnitudes of geometrical imperfections and $f_u = 1,55f_y$

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

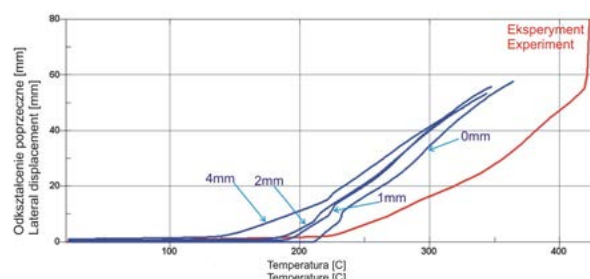
Krzywe pokazane na ryc. 9-11 pokazują, że imperfekcje geometryczne przyłożone wstępnie do analizowanego elementu w sposób znaczący wpływają na charakter wyników – zarówno na wielkość siły krytycznej inicjującej wyoboczenie, jak i sposób zachowania elementu w fazie tuż po wyoboczeniu. Krzywe opisujące zachowanie elementu z większymi zadanymi imperfekcjami zdecydowanie lepiej dopasowują się do kształtu krzywych równowagi zarejestrowanych podczas badań eksperymentalnych, jednakże wciąż zjawisko wyoboczenia w przypadku badań laboratoryjnych ujawnia się przy wyższych wartościach temperatury.



Ryc. 10. Przemieszczenie osiowe w funkcji temperatury dla trzech wielkości imperfekcji geometrycznych przyjętych w analizach oraz trzeciego modelu materiałowego, dla którego $f_u = 1,55f_y$

Fig. 10. Axial displacement vs. column temperature for different magnitudes of geometrical imperfections and $f_u = 1,55f_y$

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 11. Przemieszczenie poziome przekroju środkowego słupa w funkcji temperatury dla trzech wielkości imperfekcji geometrycznych przyjętych w analizach oraz trzeciego modelu materiałowego, dla którego $f_u = 1,55f_y$

Fig. 11. Lateral displacement of the mid-length cross-section vs. column temperature for different magnitudes of geometrical imperfections and $f_u = 1,55f_y$

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Ta niezgodność wskazuje na konieczność uwzględnienia innego (istotnego z punktu widzenia dopasowania modelu) parametru, jakim jest przypuszczalnie nierównomierne nagrzanie słupa na jego długości.

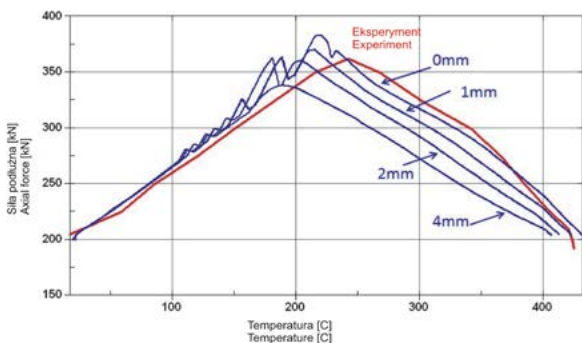
3.6. Nierównomierny rozkład pola temperatury na długości słupa

W pierwszym podejściu obliczeniowym podczas budowy modelu, bazując na opisie podanym przez Ali i O'Connora [11], przyjęto, że słup na całej swej długości znajduje się wewnątrz komory pieca, co pozwoliło na przyjęcie założenia, iż jest on na całej swej długości poddany działaniu tego samego (zmiennego w czasie) pola temperatury. Bardziej szczegółowa analiza fotografii zamieszczonych w publikacji wykazała, iż górne i dolne fragmenty słupa położone w pobliżu ścian pieca były poddane działaniu niższej temperatury niż środek słupa z uwagi na nieuniknioną ucieczkę ciepła przez otwory w obudowie pieca. W związku z takim spostrzeżeniem kolejną serią obliczeń przeprowadzono dla przyjętego wcześniej trzeciego modelu materiałowego ($f_u = 1,55f_y$), czterech poziomów wstępnych imperfekcji geometrycznych oraz zmiennego na długości słupa rozkładu pola temperatury. Pierwotnie nagrzewany odcinek

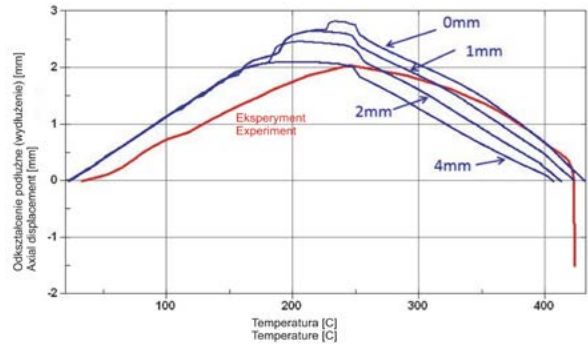
nek słupa równy 1750 mm (zgodnie z opisem zawartym w [11]) zmniejszono do fragmentu o długości 1460 mm położonego symetrycznie w centralnej części elementu. W modelu przyjęto, iż tak zdefiniowany śródkowy odcinek słupa jest obciążony równomiernie rozłożonym polem temperatury, którego wartość jest zmienna w funkcji czasu, natomiast cała reszta jest obciążona polem o wartościach zmiennych na długości, w którym prędkość zmian wynika bezpośrednio z praw fizyki i równań przepływu ciepła. Przykładowy, nierównomierny rozkład pola temperatury na długości elementu pokazano na ryc. 12.



Ryc. 12. Nierównomierny rozkład pola temperatury na długości analizowanego elementu
Fig. 12. Longitudinal variation of temperature along the column's length
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



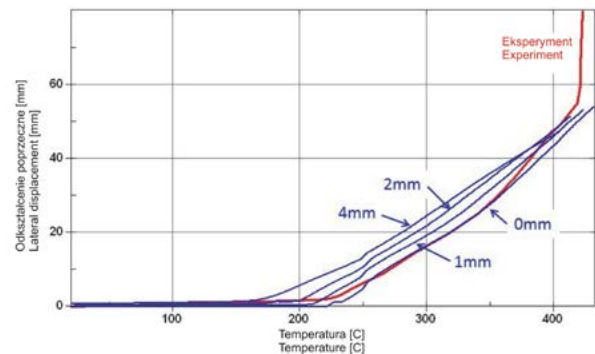
Ryc. 13. Siła podłużna w funkcji temperatury (dla nierównomiernego rozkładu temperatury na długości elementu), dla trzech wielkości imperfekcji geometrycznych przyjętych w analizach oraz trzeciego modelu materiałowego, dla którego $f_u=1,55f_y$
Fig. 13. Axial force vs. column temperature for varied temperature distribution – results for different magnitudes of imperfections and $f_u=1,55f_y$, compared to experiment
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 14. Przemieszczenie osiowe w funkcji temperatury (dla nierównomiernego rozkładu temperatury na długości elementu) dla trzech wielkości imperfekcji geometrycznych przyjętych w analizach oraz trzeciego modelu materiałowego, dla którego $f_u=1,55f_y$
Fig. 14. Axial displacement vs. column temperature for varied temperature distribution – results for different magnitudes of geometrical imperfections and $f_u=1,55f_y$, compared to experiment
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Porównanie końcowych wyników pokazujące dopasowanie wyników analiz numerycznych z wynikami eksperymentu zaprezentowano na ryc. 13-15.

Zmienność wartości temperatury na długości słupa w analizowanym modelu MES spowodowała zmniejszenie całkowitego wydłużenia termicznego elementu oraz doprowadziła do opóźnienia fazy inicjacji wybożenia, które tym razem pojawiło się przy odpowiednio wyższej temperaturze.



Ryc. 15. Przemieszczenie poziome przekroju środkowego słupa w funkcji temperatury (dla nierównomiernego rozkładu temperatury na długości elementu) dla trzech wielkości imperfekcji geometrycznych przyjętych w analizach oraz trzeciego modelu materiałowego, dla którego $f_u=1,55f_y$
Fig. 15. Lateral displacement of the mid-length cross-section vs. column temperature for varied temperature distribution – results for different magnitudes of geometrical imperfections and $f_u=1,55f_y$, compared to experiment
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Nietrudno zauważyć, że krzywe pokazane na ryc. 13-15 prezentujące przyrost wartości siły osiowej oraz podłużnych i poprzecznych przemieszczeń elementu, tym razem wykazują zdecydowanie lepszą korelację z krzywymi uzyskanymi na drodze eksperymentu.

4. Podsumowanie i wnioski

W artykule zaprezentowano i podsumowano wyniki przykładowej serii analiz numerycznych słupa stalowego obciążonego osiowo i poddanego działaniu podwyższonej temperatury symulującej warunki pożaru, podpartego na końcach w sposób ograniczający swobodę przemieszczeń – zarówno w kierunku podłużnym, jak i swobodę obrotów.

Celem pracy było wskazanie możliwości wykorzystania dostępnych, zaawansowanych narzędzi numerycznych do wirtualnego testowania konstrukcji. Do kalibracji modelu wykorzystano wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych w przeszłości w ośrodkach brytyjskich, co pozwoliło również na wykonanie serii analiz parametrycznych. W każdym z rozpatrywanych przypadków porównania wyników obu typów analiz dokonano dla zależności pomiędzy temperaturą a siłą osiową, wydłużeniem lub przemieszczeniem poprzecznym środkowego przekroju słupa. Przy kalibracji stworzonego modelu obliczeniowego wykorzystano trzy niezależne parametry wpływające na zachowanie się analizowanego słupa, zmieniając je odpowiednio w trakcie prowadzonych obliczeń: model materiałowy, wielkość imperfekcji geometrycznych oraz sposób rozkładu pola temperatury na długości elementu. W wyniku przeprowadzonych analiz parametrycznych odkryto, iż przyczyną zauważalnych rozbieżności wyników analiz numerycznych w stosunku do wyników eksperymentu było niewłaściwe założenie początkowe o równomierności rozkładu pola temperatury na długości słupa. W rzeczywistości – z uwagi na konstrukcję stanowiska badawczego – w trakcie badań element był nagrzewany w sposób nierównomierny, zaś część ciepła (w strefach położonych bezpośrednio w pobliżu końców słupa) była odprowadzana na zewnątrz pieca przez nieuszczelnienia w jego obudowie. Przeprowadzone analizy udowodniły, jak pozornie nieistotne i trudne do stwierdzenia błędy modelowe mogą doprowadzić do niewłaściwej interpretacji zjawisk ocenianych tylko i wyłącznie na podstawie analiz numerycznych, bez ich odpowiedniej walidacji i weryfikacji w oparciu o wyniki prawdziwego eksperymentu. W opinii autorów pracy poprawnie skalibrowany model numeryczny pozwala uniknąć konieczności prowadzenia większej liczby tradycyjnych badań doświadczalnych danego typu i przenieść część analiz na płaszczyznę wirtualną, co jest rozwiązaniem tańszym, szybszym i mniej pracochłonnym, zwykle wymaga jednak zdecydowanie bardziej specjalistycznej wiedzy teoretycznej.

Na obecnym etapie rozwoju technik obliczeniowych obserwujemy coraz szerszy udział analiz numerycznych w prowadzonych pracach badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych. Wiele osób traktuje wyniki tychże analiz jako pełnowartościowe źródło wiarygodnej informacji, co w ogólnym przypadku nie jest lub nie musi być prawdą. Autorzy w sposób stanowczy pragną podkreślić i przestrzec, iż do wiarygodności wyników symulacji numerycznych należy podchodzić z dużą ostrożnością, kierując się zasadą ograniczonego zaufania. Metody numeryczne stanowią użyteczne narzędzie, pomocne w ocenie zjawisk, jednakże wraz ze wzrostem skomplikowania

modelu oraz w przypadku silnej nieliniowości analizowanych zagadnień należy zachować szczególną ostrożność w ocenie uzyskanych wyników. Szczególnie w przypadku zagadnień inżynierii bezpieczeństwa pożarowego (w tym w szczególności bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji) możliwość predykcji na podstawie rezultatów symulacji komputerowych jest poważnie ograniczona. Mogą one stanowić na ogół podstawę do poprawnego wnioskowania w zakresie jakościowej oceny zjawisk, stanowią znakomite narzędzie do prowadzenia analiz parametrycznych, ale ich wiarygodność w rozumieniu ilościowym jest dyskusyjna z uwagi na niewystarczającą liczbę danych pozwalających na wielokryterialną weryfikację i walidację modelu. Potwierdzeniem tej tezy niech będzie choćby przykład z rynku motoryzacyjnego, w którym pomimo przeniesienia części procesu projektowania na platformę numeryczną nie da się i tak zrezygnować z prowadzenia kosztownych testów zderzeniowych (tzw. *crash testów*), wykorzystywanych do weryfikacji i walidacji modeli obliczeniowych oraz stanowiących ich naturalne uzupełnienie.

W przypadku podejmowanych prób oceny bezpieczeństwa pożarowego istniejących obiektów budowlanych (w szczególności obiektów nietypowych, o skomplikowanej geometrii, dla których nie ma wyników porównawczych badań doświadczalnych) jedynie w oparciu o wyniki analiz numerycznych – zdaniem autorów – na obecnym etapie mogą one stanowić podstawę do co najwyżej bardzo ogólnej, jakościowej oceny zachowania i sposobu pracy konstrukcji poddanej wpływom oddziaływań termicznych.

Literatura

1. PN-EN 1993-1-2:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-2: Reguły ogólne. Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe, PKN, Warszawa 2007.
2. Franssen J.M., *Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire*, "Fire Safety Journal", Vol. 34, 2000, pp. 191-207.
3. Vila Real P.M.M., Lopes N., Simoes da Silva L., Piloto P., Franssen J.M., *Numerical modelling of steel beam-columns in case of fire - comparisons with Eurocode 3*, "Fire Safety Journal", Vol. 39, 2004, pp. 23-39.
4. Gomes F.C.T., Providencia e Costa P.M., Rodrigues J. P.C., Neves I.C., *Buckling length of a steel column for fire design*, "Engineering Structures", Vol. 29, 2007, pp. 2497-2502.
5. Kosiorek M., *Fire safety in regulations and designing*, "Fire Protection", Vol. 1 Issue1, 2002.
6. Shapiro, A., *Heat Transfer in LS-DYNA*, in: 5th European LS-DYNA Users Conference New Applications and Developments, Birmingham 2005.
7. Hallquist J.O., *LS-DYNA Keyword Manual*, Livermore, Livermore Software Technology Corporation, 2006.
8. Franssen J.M., Zaharia R., *Design of Steel Structures Subjected to Fire: Background and Design Guide to Eurocode 3*, "Fire Safety Journal", Vol. 41, 2006, pp. 628-629.
9. PN-EN 1991-1-2:2006. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru, PKN, Warszawa 2006.
10. Oberkampf W.L., Trucano T.G., and Hirsch C., *Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics*, "Applied Mechanics", Vol. 57 Issue 5, 2004, pp. 345-384.

11. Ali F. and O'Connor D., *Structural performance of rotationally restrained steel columns in fire*, "Fire Safety Journal", Vol. 36 Issue 7, 2001, pp. 679-691.
12. Kwaśniewski L., Król P.A., Łącki K., *Numerical modeling of steel columns in fire*, Proceedings of COST Action C26 International Conference: Urban Habitat Constructions Under Catastrophic Events, Naples, Italy, 16-18 September 2010.
13. Wald F., da Silva L.S., Moore D., Santiago A., *Experimental behaviour of steel joints under natural fire*, ECCS - AISC Workshop, 2004.

dr inż. Paweł A. Król – ukończył jednolite studia magisterskie na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (1994), gdzie uzyskał również stopień doktora nauk technicznych (2007). Absolwent studiów podyplomowych organizowanych przez Politechnikę Warszawską we współpracy z Polish-British Construction Partnership Ltd. Związany z Politechniką Warszawską od 1998 roku, zatrudniony początkowo jako asystent, a od 2007 roku na stanowisku adiunkta. Od 2000 roku posiada uprawnienia budowlane b/o w specjalności konstrukcyjno-budowlanej, zajmując się równoległe projektowaniem konstrukcji oraz działalnością ekspercką w budownictwie. W 2014 roku uzyskał tytuł Rzecznawcy Budowlanego w tejże samej specjalności, w zakresie projektowania i kierowania robotami budowlanymi bez ograniczeń. Jest członkiem wielu krajowych i międzynarodowych organizacji i stowarzyszeń zawodowych oraz członkiem komitetów technicznych przy Polskim Komitecie Normalizacyjnym oraz *European Convention for Constructional Steelwork*. Członek grupy roboczej *Structural Safety* w ramach Europejskiego Programu Współpracy w Dziedzinie Badań Naukowo-Technicznych (COST) – akcja TU0904 „Integrated Fire Engineering and Response”, realizowanego w latach 2010-2014. Odbił kilka zagranicznych staży naukowych: *Michigan State University*, USA (2011), *University of Ulster*, Zjednoczone Królestwo (2013) oraz *Auburn University*, USA (2014) – w ramach przyznanego stypendium Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta. Odnznaczony Medalem Brązowym za Długoletnią Służbę (2010), Medalem Komisji Edukacji Narodowej (2013) oraz Srebrną Odznaką Honorową Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa (2013). Jest autorem lub współautorem licznych opracowań o charakterze naukowym i ponad 200 opracowań o charakterze technicznym.

dr hab. inż. Lesław Kwaśniewski, profesor Politechniki Warszawskiej – absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (1986), gdzie uzyskał rów-

nież stopień doktora nauk technicznych (1997) oraz doktora habilitowanego nauk technicznych (2011). Jego zainteresowania naukowe oscylują wokół zastosowań metod komputerowych w inżynierii. Uczestnik kilku akcji w ramach Europejskiego Programu Współpracy w Dziedzinie Badań Technicznych COST, m.in. TU0904 *Integrated fire engineering and response*, realizowanego w latach 2010-2014. Od 2001 roku w sposób ciągły współpracował z Florida State University, USA jako Visiting Postdoctoral Research Associate. Wyróżniony kilkoma nagrodami indywidualnymi Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia Naukowe, m.in. w latach 2008, 2010, 2012 i 2014. Od 2011 roku pełnił funkcję Kierownika Zakładu Mechaniki Teoretycznej i Mechaniki Nawierzchni Komunikacyjnych, będącego częścią Instytutu Dróg i Mostów, działającego w obrębie Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Zmarł w pełni sił twórczych 12 października 2014 roku. Do ostatnich dni życia był aktywny i miał ambitne plany na przyszłość.

st. kpt. mgr inż. Krzysztof J. Łącki – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w 2000 roku, kiedy to uzyskał dyplom inżyniera pożarnictwa. W 2002 roku ukończył uzupełniające studia magisterskie i otrzymał dyplom magistra inżyniera pożarnictwa. Studia podyplomowe Zarządzanie w stanach zagrożeń ukończył w 2005 r. Po ukończeniu studiów i uzyskaniu dyplomu inżyniera pożarnictwa rozpoczął służbę w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Pododdziałach Szkolnych na stanowiskach młodszy oficer (2000-2001), młodszy specjalista (2001-2004) i dowódca kompanii szkolnej (2004-09.2008). W 2008 roku rozpoczął pracę na stanowisku asystenta w Zakładzie Bezpieczeństwa Pożarowego Budynków w Katedrze Bezpieczeństwa Budowli na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego. Zajmuje się problematyką ochrony przeciwpożarowej obiektów budowlanych w zakresie projektowania, koordynowania prac pomiędzy branżami budowlanymi, nadzoru, nad jakością prac budowlanych w zakresie zabezpieczeń przeciwpożarowych a także dostosowywaniem budynków istniejących do wymagań ochrony przeciwpożarowej w uwzględnieniu optymalizacji techniczno-ekonomicznej. Odnznaczony srebrnym i złotym medalem za zasługi dla pożarnictwa oraz brązowym medalem za zasługi dla ochrony przeciwpożarowej. Jest autorem lub współautorem ponad dwudziestu publikacji o charakterze naukowo-technicznym oraz ponad 200 opracowań technicznych dotyczących ochrony przeciwpożarowej obiektów budowlanych.