

dr inż. **Paweł A. Król**<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 22.07.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 16.02.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2015;

## **Źródła niepewności w ocenie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji stalowych**

### **Sources of Uncertainty in the Fire Safety Assessment of Steel Structures**

#### **Источники погрешности при оценке пожарной безопасности стальных конструкций**

#### **ABSTRAKT**

**Cel:** Celem niniejszego artykułu jest wskazanie źródeł niepewności oraz nakreślenie podstaw probabilistycznej oceny losowego bezpieczeństwa konstrukcji stalowych w warunkach pożaru. Świadomość istnienia niemożliwych do uniknięcia niepewności oraz losowego, niedeterministycznego charakteru wielu zjawisk i wielkości może być kluczowa dla właściwego zrozumienia zagadnień niezawodności konstrukcji w sytuacji oddziaływań ekstremalnych lub wyjątkowych.

**Wprowadzenie:** W naturze ludzkiej leży naturalne upodobanie do porządku, bezpieczeństwa oraz pewnej normalizacji. Niepewność towarzyszy również projektowaniu konstrukcji inżynierskich. Zarówno wielkości obciążeń podawanych w normach, jak i parametry decydujące o nośności elementów czy układów konstrukcyjnych nie są wartościami deterministycznymi, lecz zmiennymi losowymi o określonym stopniu rozproszenia. Im więcej źródeł niepewności w procesie projektowania, tym kryteria dotyczące oczekiwanego poziomu bezpieczeństwa stają się trudniejsze do spełnienia, zaś wyniki uzyskane na podstawie uproszczonych procedur i modeli mniej wiarygodne i potencjalnie obciążone większym błędem, który jednak nie powinien wykroczyć poza pewne akceptowalne granice przyjęte w normach.

**Metodologia:** W pracy wskazano na różne źródła niepewności towarzyszące ocenie bezpieczeństwa konstrukcji stalowych oraz wpływających na wiarygodność oszacowań. Oddzielnie opisano czynniki o charakterze uniwersalnym, wywierające wpływ na losową nośność konstrukcji w każdych warunkach projektowych. Znaczną część opracowania poświęcono zagadnieniom, które odnoszą się wyłącznie do wyjątkowej sytuacji pożaru. Odniesiono się do niepewności analitycznego modelu opisującego nośność konstrukcji w ujęciu probabilistycznym oraz zaproponowano własną propozycję modelu nośności obowiązującego w warunkach temperatur pożarowych.

**Wnioski:** W podsumowaniu sformułowano szereg wniosków odnoszących się do poszczególnych podrozdziałów pracy. Autor podkreśla m.in., iż z uwagi na brak odpowiednich informacji statystycznych, prowadzenie w chwili obecnej w pełni rzetelnych probabilistycznych analiz losowej nośności konstrukcji w warunkach pożaru nie jest możliwe. Unikalną częścią pracy jest sformułowana przez Autora propozycja opisu modelu losowej nośności konstrukcji w sytuacji pożaru z wykorzystaniem podejścia probabilistycznego, będąca autorską modyfikacją modeli stosowanych w warunkach normalnych.

**Słowa kluczowe:** pożar, bezpieczeństwo pożarowe, element konstrukcyjny, konstrukcja stalowa, niepewność, niezawodność, podejście probabilistyczne, probabilistyczna analiza konstrukcji, losowa nośność, zmienna losowa, wartość deterministyczna

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

#### **ABSTRACT**

**Aim:** The main purpose of this article is to identify sources of uncertainty and outline the basics of a probabilistic approach to determine the reliability of steel structures exposed to a fire. An awareness of unavoidable uncertainty and random,

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; p.krol@il.pw.edu.pl / Warsaw University of Technology, Poland;

non-deterministic nature of many events and parameters, may be crucial for a proper understanding of structural reliability issues in context of structures exposed to extreme or accidental forces.

**Introduction:** Human nature has a natural predilection for order, safety and some form of normalization. The design process of engineering structures is accompanied by uncertainty. Both, the loads given in standards and parameters, which determine the load bearing capacity of structural elements, are not deterministic values, but random variables incorporating some specified degree of variation. Design criteria accepted as a standard provision, used for evaluation of durability and deflection of structural elements, reveal sources of uncertainty, which exist in the design process. The more sources of uncertainty, which appear during the design process, the more difficult it is to achieve the expected level of safety and results obtained from simplified procedures and models become less reliable. However, resulting errors should not exceed acceptable limits adopted in design standards.

**Methodology:** The study highlighted various sources of uncertainty associated with estimating the safety of steel structures, which impact on the credibility of estimated results. A separate description was provided, to deal with selected universal factors, which influence the random load capacity of structures under standard conditions. Significant part of the research work was devoted solely to issues concerned with extreme fire conditions. Doubts were expressed about the probabilistic analytical model, which described the load bearing capacity of structures and the author advanced a proposed alternative model appropriate to temperature conditions generated by fires.

**Conclusions:** The conclusion provides a range of proposals to various subsections of the paper. Among other things, the author has emphasised that, at this point in time and in the absence of suitable statistical data, it is not possible to conduct a fully credible probabilistic analysis of load bearing capacity of structures in conditions generated by fires. A unique part of the paper contains a proposal for a model to describe reliability of steel structures in conditions of fire, using a random reliability approach incorporating an authorial modification to models used for standard conditions.

**Keywords:** fire, fire safety, structural element, steel structure, uncertainty, reliability, probability-based analytical approach, probability-based structural analysis, random resistance, random variable, deterministic value

**Type of article:** original scientific article

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** Целью данной статьи является определение источников погрешности и представление основ вероятностной оценки безопасности стальных конструкций в условиях пожара. Осведомлённость о существовании неизбежных погрешностей, а также случайного, недетерминированного характера многих явлений и значений может стать необходимым для правильного понимания вопросов надёжности конструкций в ситуациях экстремальных и чрезвычайных воздействий.

**Введение:** В человеческой природе заложена естественная склонность к порядку, безопасности и стандартизации. Неопределённость (погрешность) соседствует также при проектировке инженерных конструкций. Как значения нагрузки, указанные в стандартах, так и параметры, определяющие несущую способность конструктивных элементов, не являются детерминистическими. Наоборот, они являются случайными переменными, значения которых могут колебаться в разных пределах. Чем больше источников погрешности в процессе проектировки, тем критерии, касающиеся предусмотренной степени безопасности, сложнее для соблюдения, а результаты, полученные на основе упрощённых моделей и процедур, менее достоверные и (потенциально) содержат больше ошибок, которые, однако, не должны выходить за рамки определенных допустимых пределов, принятых в стандартах.

**Методология:** В работе представлены разные источники погрешности в оценке безопасности стальных конструкций, влияющие на достоверность оценок. Отдельно описаны факторы универсального характера, влияющие на возможную грузоподъёмность конструкции во всех проектных условиях. Значительная часть статьи посвящена вопросам, которые касаются исключительно уникальной ситуации пожара. Была сделана ссылка на неопределённость аналитической модели, описывающей несущую способность конструкции в возможном плане, и было сделано собственное предложение о грузоподъёмности модели при температурных условиях во время пожара

**Выводы:** В заключении был сделан ряд выводов, касающихся отдельных глав работы. Автор подчёркивает, что из-за отсутствия соостествующей статистической информации на данный момент проведение вполне достоверных вероятностных анализов возможной (случайной) грузоподъёмности конструкций в условиях пожара невозможно. Уникальная часть работы - это разработанное автором предложение модели возможной грузоподъёмности конструкции при пожаре с использованием вероятностного подхода, которое является модификацией моделей, используемых в нормальных условиях.

**Ключевые слова:** пожар, пожарная безопасность, конструкционный элемент, стальная конструкция, погрешность, надёжность, вероятностный подход, вероятностный анализ конструкции, возможная (случайная) грузоподъёмность, случайная переменная, детерминированное значение

**Вид статьи:** оригинальная научная статья

## 1. Wprowadzenie

Poruszając się na co dzień w realiach współczesnego świata, odnosimy pozorne wrażenie, że cała przestrzeń wokół nas jest względnie poprawnie uporządkowana, a wszelkie przejawy działań ludzkich, zgodne z przyjętymi unormowanymi zasadami i regułami postępowania, są akceptowalne i nie budzą niczyich zastrzeżeń. Człowiek ma naturalne upodobanie do porządku oraz pewnej normalizacji i takie pojmowanie rzeczywistości, szczególnie przez osoby o inklinacjach technicznych, wydaje się z logicznego punktu widzenia zupełnie uzasadnione. Oczywiście mamy świadomość istnienia pewnych źródeł ryzyka i niepewności w naszym życiu, ale raczej wiążemy je z czynnikami innej natury, niezależnymi od nas, często określanymi też mianem przyczyn obiektywnych czy okoliczności siły wyższej, na które nie mamy specjalnego wpływu. Sformułowania podobnej treści bardzo często pojawiają się w umowach o roboty budowlane, zawieranych kontraktach, zaś ich podstawowym zadaniem jest ochrona wykonawcy przed konsekwencjami niedotrzymania terminów spowodowanego niekorzystnymi i nieprzewidywalnymi zdarzeniami, najczęściej pochodzenia klimatycznego.

Rzadko kiedy zastanawiamy się nad tym, co wydaje nam się z natury rzeczy oczywiste. Nie dopuszczamy myśli, że coś, co jest związane z zagadnieniami technicznymi, a więc z czymś, co w sposób oczywisty kojarzy się z wymaganiami odpowiedniej precyzji i niezawodności, może kryć w sobie źródła niepewności.

Jeśli rozszerzymy dywagacje na zagadnienia projektowania konstrukcji (niekoniecznie budowlanych, choć to głównie nim jest poświęcony niniejszy artykuł), to musimy sobie uświadomić, iż również tej dyscyplinie nieodłącznie towarzyszą pewne źródła niepewności. Zarówno wielkości obciążeń podawanych w normach projektowania, jak i parametry decydujące o wytrzymałości elementów konstrukcyjnych nie są wartościami deterministycznymi, czyli takimi, które są w stu procentach znane. Wszystkie one są w rzeczywistości zmiennymi losowymi charakteryzującymi się pewnym stopniem rozproszenia, zaś wartości podawane w dokumentach normalizacyjnych jako wartości nominalne, stosowane w projektowaniu, są tylko pewnym kompromisem, zgodnym z akceptowanymi regułami ustalonymi z wykorzystaniem narzędzi rachunku prawdopodobieństwa. Świadomość natury tych wielkości wyjaśnia, dlaczego oczekiwanie absolutnego bezpieczeństwa jest irracjonalne i niemożliwe do spełnienia. Mając na uwadze nieuniknioną niepewność, powinniśmy mieć świadomość, iż wszystkie budowle i obiekty inżynierskie są projektowane z uwzględnieniem milczącej akceptacji niewielkiego

prawdopodobieństwa wystąpienia awarii, do której może dojść w wyniku niezwykle niekorzystnego zbiegu okoliczności lub jednoczesnego wpływu wielu ekstremalnie niekorzystnych oddziaływań. Naturalne oczekiwania społeczeństwa, by dzieła sztuki inżynierskiej były projektowane z zachowaniem zasad rozsądnego poziomu bezpieczeństwa, są w praktycznym podejściu realizowane przez stosowanie uznanych i odpowiednio skalibrowanych norm projektowania i dochowanie wymagań zawartych w odnośnych przepisach techniczno-budowlanych.

Przyjęte w normach procedury wymiarowania, opisujące zasady oceny nośności elementów, ich sztywności, podane kryteria graniczne dot. dopuszczalnych odkształceń konstrukcji, pomimo pozornie deterministycznej formy, są faktycznym odzwierciedleniem istnienia źródeł niepewności w projektowaniu. Przy kalibracji współczynników częściowych stosowanych we współczesnych normach wykorzystujących filozofię metody stanów granicznych do oceny konstrukcji uwzględniane są wymagania dotyczące oczekiwanego poziomu bezpieczeństwa oraz przewidywanego okresu eksploatacji obiektu. Zagadnienia niezawodności konstrukcji są przedmiotem dyscypliny naukowej o tej samej nazwie. Pod pojęciem niezawodności konstrukcji kryje się zdolność do pełnienia przez nią projektowanej funkcji w z góry określonym, przewidywanym okresie użytkowania, (np. w przypadku konstrukcji tymczasowych jest to arbitralnie przyjęty okres 10 lat eksploatacji, w przypadku konstrukcji budynków i innych konstrukcji normalnego przeznaczenia – 50 lat, w przypadku mostów, budowli monumentalnych i innych konstrukcji inżynierskich – 100 lat). Wiele z nich w rzeczywistości jest w stanie przetrwać bez poważniejszej awarii przez dużo dłuższy czas, o czym z łatwością przekonujemy się, oglądając współcześnie zabytki z przeszłości. Niezawodność jest też często rozumiana jako prawdopodobieństwo zdarzenia losowego polegającego na tym, iż konstrukcja nie przestanie pełnić swojej projektowanej funkcji.

W kontekście niezawodności pojawia się naturalne pytanie o racjonalny poziom bezpieczeństwa. Co to znaczy, że coś jest bezpieczne, a coś jest niebezpieczne? Gdzie przebiega granica pomiędzy jednym a drugim stanem? Jaki poziom bezpieczeństwa jest wystarczający dla spełnienia społecznych oczekiwań? Znalezienie optymalnej odpowiedzi na stawiane pytania nigdy nie było zadaniem banalnym i oczywistym. Wymaga przyjęcia odpowiednich miar oceny ryzyka – rozumianego zarówno w znaczeniu zagrożenia życia ludzkiego, jak i strat ekonomicznych. Znalezienie racjonalnego kompromisu nastęrcza wiele trudności. Projektowanie konstrukcji „nadmiernie” bezpiecznych prowadzi do

rozwiązań nieopłacalnych i nieakceptowalnych z ekonomicznego punktu widzenia. Stosowanie rozwiązań tańszych i mniej bezpiecznych nie znajduje akceptacji społecznej.

Zdobycze wynikające z możliwości stosowania metod oceny niezawodności konstrukcji są znaczne. Mogą one być wykorzystywane w procesach decyzyjnych dotyczących konieczności przeprowadzania remontów, wzmocnień czy wymiany elementów konstrukcyjnych, (dobrym przykładem są tutaj doświadczenia z rynku amerykańskiego, gdzie każda poważna decyzja dotycząca np. remontu mostu jest poprzedzona wnikliwymi analizami niezawodnościowymi). Analizując bezpieczeństwo konstrukcji, należy do każdej z nich podchodzić w sposób indywidualny. Większość z systemów konstrukcyjnych jest skomplikowanym układem złożonym z wielu komponentów współpracujących ze sobą w przenoszeniu obciążeń i nominalny stan awaryjny jednego z nich nie musi oznaczać awarii całej konstrukcji. W wielu wypadkach konstrukcja jest w stanie przejąć obciążenia przypadające na uszkodzony element, stworzyć wtórny schemat statyczny i dalej pełnić swoją funkcję, zgodnie z projektowanym przeznaczeniem. I choć w większości norm projektowania będących w użyciu w chwili obecnej podejście niezawodnościowe znajduje zastosowanie jedynie do pojedynczych elementów konstrukcyjnych, to przynajmniej w kwestii oceny sił wewnętrznych zaleca się analizę pewnych wydzielonych, reprezentatywnych podukładów lub pełnych ustrojów konstrukcyjnych. Przewiduje się, że w związku z ciągłym rozwojem metod analitycznych w ciągu najbliższych kilku lub kilkunastu lat powinien nastąpić zauważalny postęp w sposobach oceny bezpieczeństwa konstrukcji umożliwiający zastosowanie teorii niezawodności konstrukcji do całych systemów konstrukcyjnych, bez konieczności odrębnego wydzielenia z nich pojedynczych elementów.

Artykuł niniejszy ma na celu zwrócenie uwagi środowiska inżynierskiego na różne rodzaje niepewności, z jakimi może zetknąć się projektant czy osoba odpowiedzialna za ocenę stanu technicznego konstrukcji stalowych, w szczególności tych poddanych oddziaływaniom pożarowym. Świadomość istnienia nieuniknionych źródeł niepewności może być kluczowa dla właściwego wypełniania obowiązków zawodowych w poczuciu pełnej rzetelności i odpowiedzialności.

## 2. Losowe imperfekcje elementów konstrukcyjnych

W klasycznym deterministycznym podejściu do projektowania konstrukcji przyjmuje się, że wszystkie podstawowe dane wejściowe, takie jak wymiary

elementów czy właściwości wytrzymałościowe materiałów konstrukcyjnych, są parametrami o ściśle określonych, niezmiennych wartościach podawanych jako ich wielkości nominalne w katalogach, tablicach czy normach. Stosowane modele obliczeniowe zakładają, że analizowane elementy nośne w rzeczywistej konstrukcji zachowują idealną geometrię, kształty przekrojów, prostoliniowość prętów, zaś docelowo sposób wykonania, montażu i eksploatacji będzie w pełni zgodny z przyjętymi założeniami projektowymi. Przyjmuje się ponadto, niezależnie od przewidywanych procesów technologicznych i ewentualnych niedokładności wykonawczo-montażowych, iż zrealizowana konstrukcja będzie wolna od tzw. naprężeń resztkowych, zaś jakość wyrobów zastosowanych do wytworzenia konstrukcji – nie gorsza od zakładanej. Takie założenie jest wygodne, jednak z reguły nieprawdziwe. Każda konstrukcja charakteryzuje się pewnymi niedoskonałościami, praktycznie niemożliwymi do uniknięcia, które można zaklasyfikować jako imperfekcje geometryczne, technologiczne czy strukturalne. Wszystkie one mają charakter losowy i znaczna część z nich została już dobrze rozpoznana w rozumieniu statystycznym. Dzięki temu mogą one być traktowane w probabilistycznym podejściu do projektowania jako zmienne losowe, opisane określonym typem rozkładu o znanym stopniu rozproszenia wokół wartości średniej.

Należy mieć pełną świadomość, iż wszystkie niedoskonałości i imperfekcje w stosunku do założonego stanu idealnego wywierają niekorzystny wpływ na realną nośność konstrukcji, powodując – w każdym przypadku – jej zmniejszenie. W sytuacji wyjątkowej mogą one ujawnić swój wpływ w sposób mniej oczekiwany, czasem wręcz niespodziewany, zdecydowanie wcześniej, niż ma to miejsce w przypadku normalnej sytuacji projektowej.

W dalszej części pracy odniesiono się w sposób nieco bardziej szczegółowy do poszczególnych typów imperfekcji.

### 2.1. Imperfekcje technologiczne

Przez imperfekcje technologiczne rozumie się najczęściej wewnętrzne naprężenia resztkowe, rozłożone w sposób nierównomierny w obrębie przekroju elementu oraz na jego długości. Są one pozostałością procesów technologicznych, którym zostaje poddany materiał wyjściowy w hucie w procesie walcowania lub spawany element konstrukcyjny w wytwórni przed jego wbudowaniem. W większości przypadków źródłem imperfekcji technologicznych są procesy termiczne, których wpływ nie został zniwelowany w procesie późniejszego odpuszczania lub normalizacji. W przypadku

dużych różnic w wartościach naprężeń resztkowych przeciwnych znaków mogą one prowadzić nawet do odkształcenia elementów na długości czy deformacji przekrojów tychże elementów, co ma często miejsce w sytuacji nieumiejętnego doboru technologii i kolejności spawania. Obecność naprężeń resztkowych o dużej wartości może skutkować zupełnie nieoczekiwanymi lokalnymi uszkodzeniami elementu konstrukcyjnego (np. w obrębie strefy wpływu ciepła w okolicach spoin), w przypadku ich zsumowania się z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń eksploatacyjnych, których łączna wartość przekroczy granicę odporności materiału. Imperfekcje technologiczne są na tyle niebezpieczne, że o ile nie prowadzą do widocznych deformacji elementów, to z reguły przed wystąpieniem awarii nie da się stwierdzić ich obecności tzw. gołym okiem.

## 2.2. Imperfekcje geometryczne

Innym rodzajem niedoskonałości, z którymi mamy do czynienia w stalowych elementach konstrukcyjnych, są tzw. imperfekcje geometryczne. Do grupy tej można zaliczyć zarówno imperfekcje w obrębie przekroju poprzecznego elementu konstrukcyjnego, jak i odkształcenia na jego długości. Do grupy imperfekcji w obrębie przekroju poprzecznego można zakwalifikować te związane np. z niezgodnością wymiarów (grubości i szerokości) ścianek składowych profili z ich wartościami nominalnymi oraz niezgodnością zachowania kształtów, objawiającą się chociażby skrzywieniem ścianek czy brakiem odpowiednich kątów pomiędzy nimi. Zaobserwowano, że bezpośrednią przyczyną powodującą powstawanie imperfekcji geometrycznych w kształtownikach walcowanych na gorąco jest zużycie walców i powstające luzy w obrębie punktów ich łożyskowania. Przeprowadzone badania statystyczne wykazały, że stopki dwuteowników mają tendencję do pocieniania się, zaś ścianki środników – do pogrubiania się. W wyniku pocieniania się półek ulega zauważalnemu zmniejszeniu moment bezwładności przekroju, co niekorzystnie wpływa na jego nośność przy zginaniu. W przypadku wspomnianych losowych zmian cech geometrycznych przekrojów mogą być one na tyle duże, że należy je brać pod uwagę w procesie szacowania nośności. W przypadku projektowania konstrukcji stalowej narażonej na warunki pożarowe mogą one wpływać na wielkość temperatury krytycznej (z uwagi na zmianę realnej wartości wskaźnika wykorzystania nośności przekroju –  $\mu_0$ ) oraz powodować błędy szacowania temperatury elementów stalowych poddanych wpływom oddziaływań pożarowych (z uwagi na zmianę wskaźnika ekspozycji przekroju –  $A_m/V$ ). Tym samym mogą one skutkować błędnym oszacowaniem bezpieczeństwa konstrukcji.

Do imperfekcji geometrycznych występujących na długości elementu konstrukcyjnego można zakwalifikować np. wygięcie pręta (w jednej bądź w obu płaszczyznach), skrzywienie przekroju, lokalne wybrzuszenia i wygięcia ścianek kształtowników itp. Następstwem tychże imperfekcji jest zmiana układu sił wewnętrznych w stosunku do założonego modelu teoretycznego, zaś obecność nieprzewidywanych wcześniej mimośrodków konstrukcyjnych prowadzi do powstawania dodatkowo tzw. momentów II rzędu. Obecność tychże zjawisk może prowadzić do wcześniejszego osiągnięcia przez element stanu granicznego utożsamianego z wyczerpaniem jego nośności lub wcześniejszego niż spodziewane wystąpienia nadmiernych odkształceń niemożliwych do zaakceptowania z użytkowego punktu widzenia. Co więcej, nawet odkształcenia o charakterze lokalnym, w postaci miejscowych wybrzuszeń czy wygięć ścianek kształtownika – szczególnie w przypadku elementów obciążonych siłami ściskającymi i narażonych na wyboczenie – mogą powodować inicjację tychże niekorzystnych zjawisk przy warunkach obciążenia potencjalnie bezpiecznego w przypadku analogicznej konstrukcji o idealnej geometrii. Można nawet pokusić się o generalne stwierdzenie, iż nośność ustrojów ściskanych z imperfekcjami (nie tylko geometrycznymi) jest w każdym przypadku mniejsza w porównaniu z nośnością konstrukcji idealnej.

W normach projektowania wpływ pewnych ograniczonych imperfekcji został uwzględniony w postaci odpowiednio wykalibrowanych współczynników niestateczności. W zależności od stopnia wrażliwości elementu na wstępne losowe imperfekcje geometryczne i technologiczne prętów ściskanych, norma PN-EN 1993-1-1 [1] proponuje cztery krzywe wyboczeniowe. Wyznaczono je, analizując model pręta ściskanego ze wstępnymi ekwiwalentnymi krzywiznami  $w_0$ , które wynoszą odpowiednio, dla krzywej wyboczeniowej „a” –  $w_0 = l/500$ , dla krzywej „b” –  $w_0 = l/250$ , „c” –  $w_0 = l/200$  i „d” –  $w_0 = l/150$ . Poza imperfekcjami powstającymi w procesie hutniczo-walcowniczym do tej grupy niedoskonałości konstrukcyjnych można również zakwalifikować odchyłki geometryczne wynikające z jakości wykonania konstrukcji w wytwórni (np. dokładności trasowania otworów pod śruby) oraz warunków jej montażu. Stąd w przypadku konstrukcji o większym stopniu skomplikowania zaleca się przeprowadzenie w wytwórni jej wstępnego scalenia, który ma wyeliminować ewentualne przeróbki lub „naciąganie” konstrukcji na budowie. Tego typu zabiegi są niedopuszczalne, ponieważ generują siły wewnętrzne o wartościach trudnych do wcześniejszego przewidzenia oraz znacząco zmieniają charakterystyki stateczności danej konstrukcji. Autor w trakcie swojej praktyki

zawodowej był świadkiem zdarzenia, kiedy próba zmontowania ramy portalowej z nieco zbyt krótkim słupem (błąd pomiarowy w wytwórni) poskutkowałą pęknięciem fundamentu i trwałą deformacją podstawy słupa. W wyniku awarii konieczne było ponowne wylanie górnej części fundamentu oraz odcięcie uszkodzonej i wykonanie nowej podstawy słupa.

Normy dotyczące podstawowych warunków wykonania i odbioru konstrukcji podają dopuszczalne wartości wstępnych geometrycznych wad technologicznych, wykonawczych i montażowych, które mogą być uznane jako nie zmniejszające w sposób istotny nośności i poziomu bezpieczeństwa konstrukcji. Taki sposób rozumowania jest jednak charakterystyczny w podejściu deterministycznym do projektowania konstrukcji, w podejściu probabilistycznym wszelkie niedokładności geometryczne powinny być uwzględniane poprzez traktowanie ich jako zmiennych losowych o określonym rozkładzie i stopniu zmienności.

### 2.3. Imperfekcje struktury stali i ich wpływ na kluczowe parametry wytrzymałościowe

W przyjętym powszechnie w projektowaniu konstrukcji stalowych sprężysto-plastycznym modelu materiałowym najistotniejsze wydają się dwa parametry: granica plastyczności stali –  $f_y$  oraz moduł sprężystości podłużnej Younga –  $E$ . Pierwsza wielkość wywiera istotny wpływ na szacowanie nośności elementów, w rozumieniu wymagań Stanów Granicznych Nośności (SGN), druga zaś – na ocenę ich odkształceń w stanie obciążonym, w rozumieniu procedur przyjętych w odniesieniu do tzw. Stanów Granicznych Użytkowalności (SGU). Obie te wielkości w ujęciu probabilistycznym mają charakter losowy, a ich rozkłady i statystyki w temperaturze otoczenia – z uwagi na dość dużą liczbę zarejestrowanych badań – zostały dość dobrze rozpoznane. Każdy, kto choć raz prowadził badania statycznej próby rozciągania stali, ma pełną świadomość faktu, iż w praktyce w zasadzie nie udaje się uzyskać identycznych wartości siły zrywającej czy wielkości modułu sprężystości podłużnej dla serii oddzielnych próbek, a rozrzut pomierzonych wielkości w wielu przypadkach bywa znaczący. Bezpośredni wpływ na losowy charakter tych wielkości mają występujące imperfekcje strukturalne objawiające się przez nierównomierny rozkład właściwości mechanicznych materiału – zarówno w obrębie przekroju poprzecznego, jak i na długości wyrobu hutniczego. Za rozrzut wyników poprawnie zaprojektowanych i przeprowadzonych badań doświadczalnych (tzw. statycznej próby rozciągania metali) odpowiedzialne są różnice w zakresie składu chemicznego, zawartości zanieczyszczeń i wtrąceń,

nierównomierne rozmieszczenie niepożądanych składników wynikające w części – z technologii odlewania stali i w części – ze sposobu jej obróbki w hucie. Walcowanie na gorąco, na przykład, powoduje odkładanie się zanieczyszczeń w środkowej części objętości gotowego produktu z uwagi na wolniejszy proces stygnięcia tych miejsc. W przypadku kształtowników walcowanych są to z reguły miejsca styku ścianek składowych – półek i środnika, z czego wynika m.in. zalecenie dotyczące niewykonywania spoin w strefach, w których materiał z założenia ma gorszą jakość. W strefach tych często dochodzi również do koncentracji naprężeń resztkowych, będących pozostałością po procesach walcowniczych. Proces walcowania prowadzi także do deformacji naturalnych kryształów, co powoduje pewną anizotropię właściwości mechanicznych w pozornie izotropowym materiale konstrukcyjnym. Z tego powodu zalecane jest takie kształtowanie konstrukcji, by kierunek dominujących naprężeń pokrywał się z kierunkiem walcowania, w którym właściwości mechaniczne pozostają najlepsze. Nie bez znaczenia dla właściwości mechanicznych jest też grubość elementów. Elementy grubsze, wykonane z tego samego materiału, są słabsze od elementów cieńszych. Te różnice w wytrzymałości potrafią być dość istotne, dlatego znalazło to odzwierciedlenie w normach projektowania w postaci różnych wartości nominalnych granicy plastyczności podawanych dla różnych grup grubości wyrobów. Ponadto elementy o znacznej grubości obciążone poprzecznie mają tendencję do rozwarstwiania, co jest zjawiskiem szczególnie niebezpiecznym i często obserwowanym np. w przypadku blach doczołowych połączeń śrubowych.

Pozostając przy temacie losowego charakteru wybranych parametrów wytrzymałościowych, jako pewną ciekawostkę można tutaj podać informację dotyczącą przyjętej w normach projektowania nominalnej wartości modułu sprężystości podłużnej, którą jedne normy określają na poziomie  $E = 205 \text{ GPa}$ , inne zaś – nieco wyższym,  $E = 210 \text{ GPa}$ . Jak podano w [2] dokładne badania statystyczne, wykonane i zebrane na przestrzeni wielu lat wykazały, że średnia wartość modułu sprężystości wynosi  $\bar{E} = \mu_E = 204 \text{ GPa}$ , przy współczynniku zmienności

$$V_E = \frac{\sigma_E}{\mu_E} = 0,013$$

gdzie  $\sigma_E$  oznacza odchylenie standardowe od wartości średniej. Pozwala to na ustalenie wartości charakterystycznej (nominalnej) modułu sprężystości stali (jako 95% kwantyla rozkładu logarytmiczno-normalnego, przy wskaźniku tolerancji  $t = 1,64$ ):

$$\begin{aligned}
 E_k &= E_{nom} = \bar{E} - t \cdot \sigma_E = \mu_E - t \cdot \sigma_E = \\
 &= \mu_E - t \cdot V_E \cdot \mu_E = \mu_E (1 - t \cdot V_E) = \\
 &= 204 \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,013) = 200 \text{ GPa}
 \end{aligned}$$

Różnica na niekorzyść bezpieczeństwa pomiędzy wartością rzeczywistą wynikającą ze statystyk a tą, która została przyjęta w normach projektowania, np. w PN-EN 1993-1-1 [1] wynosi  $(210 - 200)/200 \cdot 100\% = 5\%$ . Została ona jednak uznana przez badaczy jako różnica nieistotna.

Zupełnie odrębną kwestią pozostaje kwestia zmienności materiałowych parametrów wytrzymałościowych: granicy plastyczności –  $f_y$  oraz modułu sprężystości podłużnej Younga –  $E$ , w warunkach temperatur pożarowych, której poświęcony jest w całości kolejny rozdział.

Należy także dla porządku wspomnieć, że w ujęciu probabilistycznym do opisu losowego charakteru cech materiałowych stali wykorzystuje się najczęściej rozkład logarytmiczno-normalny, a w przypadku małych populacji – rozkład normalny. Jest to ważna informacja z punktu widzenia stosowanego opisu niezawodnościowego modelu nośności materiału, który to temat zostanie rozwinięty w dalszej części pracy.

### 3. Właściwości materiałowe stali konstrukcyjnych w podwyższonych temperaturach

Najistotniejsze informacje dotyczące właściwości mechanicznych i termicznych stali konstrukcyjnych oraz ich zmienności funkcji temperatury podaje norma PN-EN 1993-1-2 [3].

Sprawdzając nośność konstrukcji stalowych w tzw. normalnej temperaturze (określanej też wymiennie mianem temperatury otoczenia), przyjmuje się, że granica plastyczności –  $f_y$  oraz moduł sprężystości podłużnej Younga –  $E$  mają stałą wartość. W przypadku oceny nośności konstrukcji w warunkach temperatur pożarowych uwzględnia się degradację tychże parametrów wraz ze wzrostem temperatury elementu, przyjmując w obliczeniach aktualną wartość adekwatną do określonej na podstawie procedur normowych temperatury stali. Wartości aktualnych (efektywnych) wartości granicy plastyczności, granicy proporcjonalności oraz modułu sprężystości liniowej stali w podwyższonych temperaturach podano w normie w sposób pośredni za pomocą tabelaryzowanych wartości współczynników redukcyjnych  $k_{y,\theta}$ ,  $k_{p,\theta}$  oraz  $k_{E,\theta}$ , gdzie  $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$  oznacza odpowiednio stosunek efektywnej granicy plastyczności do granicy plastyczności w temperaturze 20°C,  $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$  – stosunek

granicy proporcjonalności do granicy plastyczności w temperaturze 20°C, zaś  $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$  – stosunek modułu sprężystości liniowej w danej temperaturze do modułu sprężystości liniowej w temperaturze 20°C.

Poza zestawieniem tabelarycznym oraz wykresem norma nie podaje żadnego wzoru analitycznego pozwalającego na obliczenie aktualnej wartości współczynnika redukcyjnego dla konkretnej wartości temperatury, zalecając stosowanie interpolacji liniowej w przypadku temperatur pośrednich niezamieszczonych w tablicy. Sposób degradacji przyjęty w Eurokodzie jest w przypadku każdego ze współczynników linią łamaną, złożoną z kilku odcinków prostoliniowych, być może właśnie dlatego autorzy normy zrezygnowali z przedstawienia ich w postaci analitycznej. Bardzo podobny sposób opisu funkcji zmienności współczynników redukcyjnych przyjęto w dokumentach amerykańskich ANSI/AISC 360-10 [4] oraz AISC Steel Design Guide 19 [5]. Pewne niewielkie różnice w przebiegu funkcji zmienności wynikają bardziej z konwersji jednostek imperialnych stosowanych w Stanach Zjednoczonych na jednostki układu SI, niż z jakichkolwiek innych względów. Warto zaznaczyć, że istnieją wypracowane oszacowania proponowanych przez normy [3], [4] i [5] współczynników redukujących wartości granicy plastyczności oraz modułu sprężystości odnoszące się nie do linii łamanych, ale do dopasowanych do nich linii ciągłych, niemniej jednak nie doczekały się one sformalizowania w postaci uznanych powszechnie i akceptowanych przez szerokie środowisko dokumentów.

Dla odmiany analityczny sposób określenia zmienności tychże współczynników podają np. norma nowozelandzka NZS 3404: Part 1: 1997 [6], dotychczasowa norma polska PN-B-03200:1990 [7] czy dokument Komitetu Technicznego Europejskiej Konwencji Konstrukcji Stalowych ECCS [8].

Zależności podane w normie nowozelandzkiej [6] bazują na ustaleniach francuskiego instytutu badawczego CTICM. W pewnym stopniu w sensie ilościowym są one zbliżone do zaleceń, które można odnaleźć we wspomnianej już wcześniej „starej” normie polskiej [7], czy ustaleniom wypracowanym przez ECCS-TC3 [8]. Z uwagi na ograniczenia objętości nie przytacza się tutaj dokładnie funkcji opisujących przebieg zmienności wartości współczynników redukcyjnych, odsyłając zainteresowanych czytelników do odnośnych dokumentów.

Alternatywne formuły, ale odnoszące się do gatunków stali stosowanych do produkcji konstrukcyjnych elementów cienkościennych, zaprezentowali Lee, Mahendran i Mäkeläinen w pracy [9].

Należy zwrócić uwagę nie tylko na różnice w wymiarze czysto ilościowym, ale także na pewne różnice

jakościowe w tym zakresie, zauważalne pomiędzy normą europejską [3] a dotychczasową normą polską [7]. W przypadku normy [3] wartość granicy plastyczności  $f_{y,\theta}$  maleje wraz ze wzrostem temperatury wolniej niż ma to miejsce w przypadku modułu sprężystości  $E_{a,\theta}$ , zaś w przypadku normy [7] jest odwrotnie. Dla porównania rozbieżności proponowanych sposobów opisu – wartości współczynników redukcyjnych, określonych na podstawie postanowień powyższych propozycji, przedstawiono w sposób graficzny na ryc. 1 i ryc. 2.

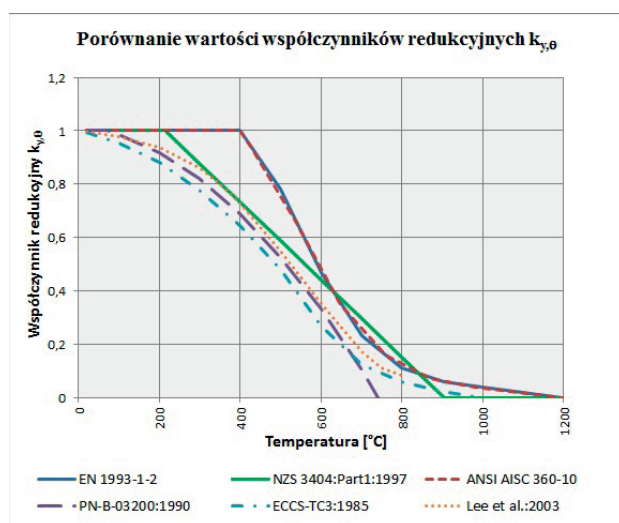
Warto zwrócić uwagę na ogromne różnice w wartościach współczynników redukcyjnych, określanych na podstawie przywołanych wyżej dokumentów, oraz w konsekwencji – wynikające z tego tytułu różnice w docelowych wartościach obliczeniowych nośności elementów czy szacowanych ugięć. Dla przykładu wartość granicy plastyczności  $f_{y,\theta} = f_{y,400^{\circ}\text{C}}$  w temperaturze  $400^{\circ}\text{C}$  wg normy europejskiej [3] oraz norm amerykańskich [4] i [5] jest równa wartości wyjściowej  $f_y$ , określonej dla warunków normalnych, podczas gdy określona wg dokumentu ECCS [8] wynosi jedynie 65% wartości podstawowej.

Podobnie, jeśli przyrzeć się rozbieżnościom w ocenie wartości współczynnika sprężystości podłużnej Younga dla temperatury  $600^{\circ}\text{C}$ , to wg normy europejskiej [3] wartość  $E_{a,\theta} = E_{a,600^{\circ}\text{C}}$  wynosi 31% wartości wyjściowej  $E_a$  określonej dla warunków normalnych, wg dokumentu ECCS [8] odpowiednio 17,3% wartości początkowej, zaś wg normy nowozelandzkiej [6] już 50,5% wartości podstawowej.

Nie do końca jest jasne, z czego dokładnie wynikają tak duże różnice sięgające od kilkunastu do nawet kilkudziesięciu procent, ale odnosząc to do wspomnianej

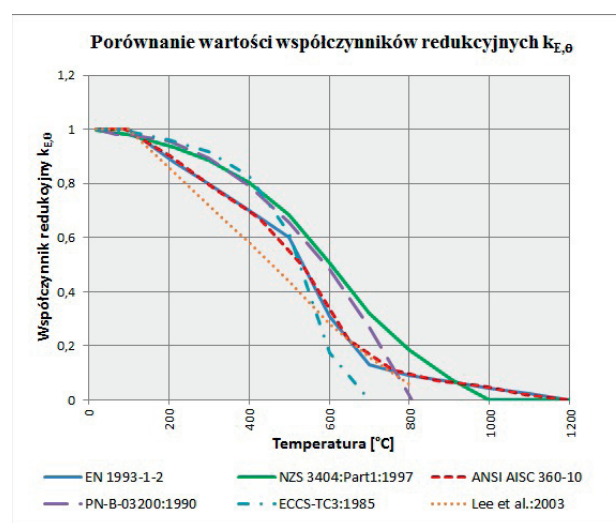
wcześniej i podanej jako ciekawostka 5-proc. różnicy pomiędzy wartością rzeczywistą modułu Younga, wynikającą ze statystyk, a tą, która została przyjęta w normach projektowania jako wartość nominalna, można ją uznać za pomijalnie małą czy wręcz nieistotną.

Tak istotna różnica w wartościach odpowiednich współczynników redukcyjnych może wynikać z kilku czynników. Przypuszcza się, że rozbieżności są efektem nieuniknionego postępu technologicznego zarówno w zakresie procesów hutniczych na etapie produkcji stali, jak i w zakresie techniki pomiarowej. Należy zwrócić uwagę, iż znakomita większość przywołanych wyżej opracowań jest zauważalnie starsza od Eurokodu, przez co metodyka badawcza zastosowana przy wyznaczaniu wartości granicy plastyczności oraz modułu Younga w podwyższonych temperaturach mogła być przed laty inna od obecnie stosowanej, gorsza była też z pewnością jakość samej stali. Sposób prowadzenia badań oraz tempo nagrzewania stali wywierają istotny wpływ na wartości rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych stali w podwyższonych temperaturach, ustalane na drodze eksperymentów. Temat ten zostanie szerzej rozwinięty w dalszej części pracy, niemniej jednak warto już teraz, porównując rozbieżności w ocenie kluczowych dla bezpieczeństwa konstrukcji parametrów wytrzymałościowych, uzmysłwić sobie relatywistyczny, niedeterministyczny charakter większości parametrów wywierających w efekcie końcowym bardzo istotny wpływ na poziom niepewności towarzyszący szacowaniu bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji inżynierskich z wykorzystaniem dostępnych procedur ich oceny.



Ryc. 1. Wartości współczynników redukcyjnych efektywnej granicy plastyczności (w stosunku do  $f_y$ ) – porównanie

Źródło: Opracowanie własne.



Ryc. 2. Wartości współczynników redukcyjnych modułu sprężystości liniowej (w stosunku do  $E_a$ ) – porównanie

Źródło: Opracowanie własne.



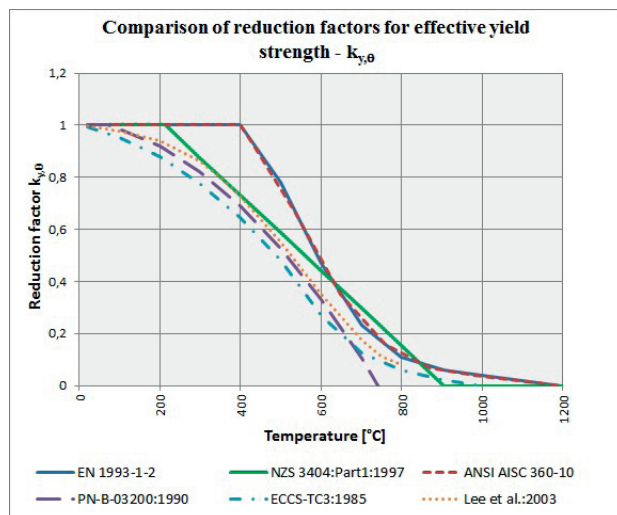


Fig. 1. Reduction factors for effective yield strength (relative to  $f_y$ ) – comparison  
Source: Own elaboration.

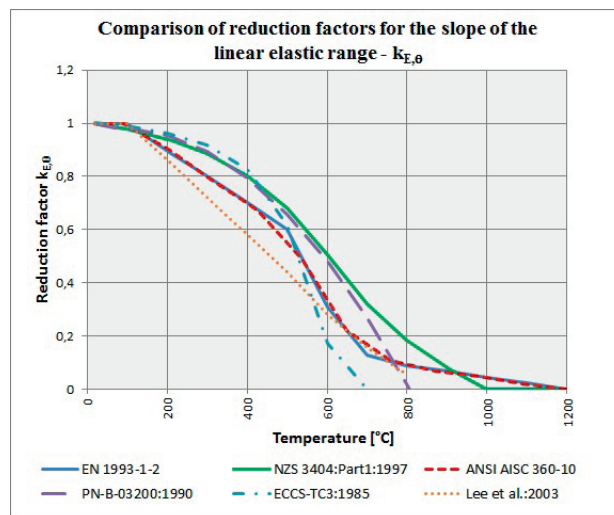


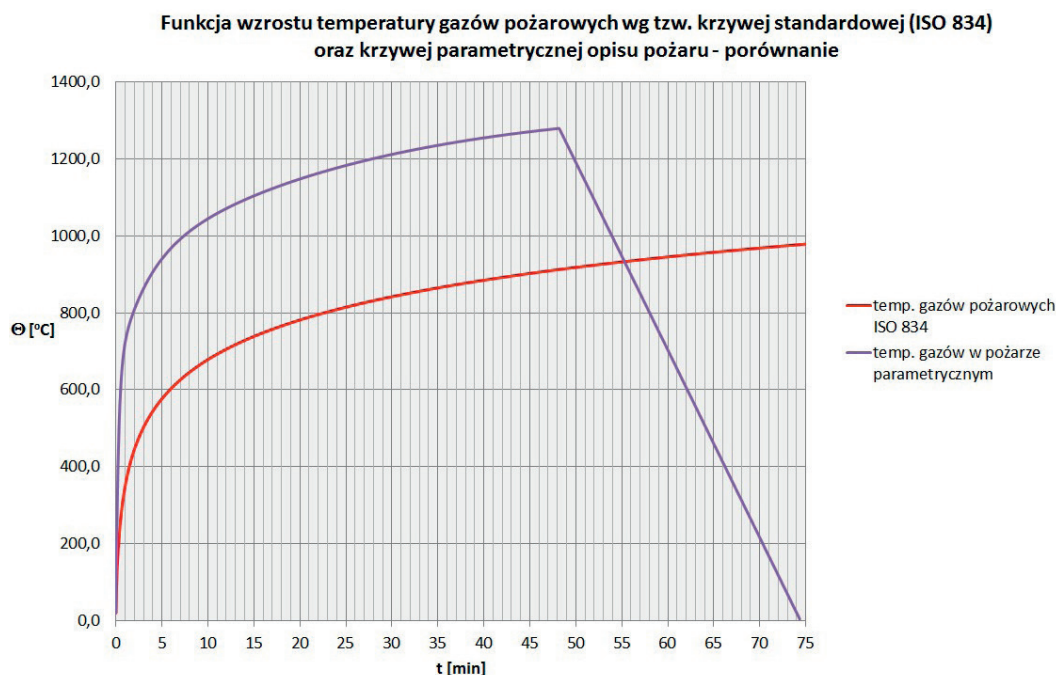
Fig. 2. Reduction factors for the slope of the linear elastic range (relative to  $E_a$ )  
Source: Own elaboration.

#### 4. Niepewność modelu opisującego nośność konstrukcji

W najprostszym rozumieniu przez nośność konstrukcji pojmujemy jej zdolność do przenoszenia obciążeń. Jest ona zwykle zależna od indywidualnej nośności jej pojedynczych komponentów składowych oraz połączeń pomiędzy poszczególnymi elementami. Nośność (odporność) elementu oznaczana w literaturze i w normach projektowania najczęściej literą  $R$  (w rozumieniu ogólnym), lub jako wielkość odpowiadająca konkretnemu rodzajowi sił wewnętrznych, z dolnym indeksem  $R$  (np.  $M_R$ ,  $N_R$ ,  $V_R$ , ewentualnie  $M_{Rd}$ ,  $N_{Rd}$ ,  $V_{Rd}$  – w odniesieniu do nośności obliczeniowych), jest w klasycznym projektowaniu pojmowana jako funkcja wytrzymałości materiału (definiowanej, w zależności od normy, jako granica plastyczności –  $f_y$ , wytrzymałość obliczeniowa –  $f_d$  itp.), odpowiednich parametrów geometrycznych przekroju (powierzchni przekroju poprzecznego – w przypadku sił osiowych i poprzecznych, wskaźnika wytrzymałości – w przypadku elementów zginanych itp.) i wymiarów podłużnych (długości, rozpiętości) stanowiących miarę smukłości elementu odpowiedzialnej za niebezpieczeństwo utraty stateczności globalnej. W przypadku elementów o smukłych ściankach odrębna miara smukłości odpowiada za niebezpieczeństwo utraty stateczności lokalnej. W klasycznym podejściu do projektowania wykorzystującym procedury normowe wszystkie wymienione wcześniej wielkości są przyjmowane jako wielkości

deterministyczne o stałej z góry ustalonej wartości. W rzeczywistości – większość z nich może, a nawet powinna być traktowana jako oddzielne zmienne losowe, ponieważ każdej towarzyszy pewna zmienność potwierdzona czy to wynikami badań materiałowych prowadzonych w laboratoriach, pomierzonymi odchyłkami wymiarowymi (w ramach dopuszczalnych tolerancji) czy też imperfekcjami wynikającymi z dokładności wykonania. Zmienność powyższych parametrów w projektowaniu jest uwzględniana w tzw. podejściu probabilistycznym.

Źródeł niepewności wpływających na ostateczną wartość nośności elementu określoną w sposób probabilistyczny można upatrywać w każdym z trzech obszarów dotyczących bezpośrednio: właściwości materiałowych (wspomniane wcześniej imperfekcje strukturalne), jakości wykonania (imperfekcje geometryczne i technologiczne) oraz w samym sposobie analizy konstrukcji czy stopniu uproszczenia modelu obliczeniowego (np. w odniesieniu do przyjętego schematu statycznego, rodzaju zastosowanych elementów skończonych itp.) w stosunku do warunków panujących w rzeczywistym ustroju. Temat niedoskonałości materiałowych oraz geometrycznych został już w stopniu wystarczającym rozwinięty w poprzednim podrozdziale, nie ma więc sensu ponownie się na tym koncentrować. Warto skupić się tutaj nieco bardziej na tzw. imperfekcjach modelu analitycznego.



Ryc. 3. Porównanie funkcji wzrostu temperatury gazów pożarowych: standardowej i parametrycznej  
Źródło: Opracowanie własne.

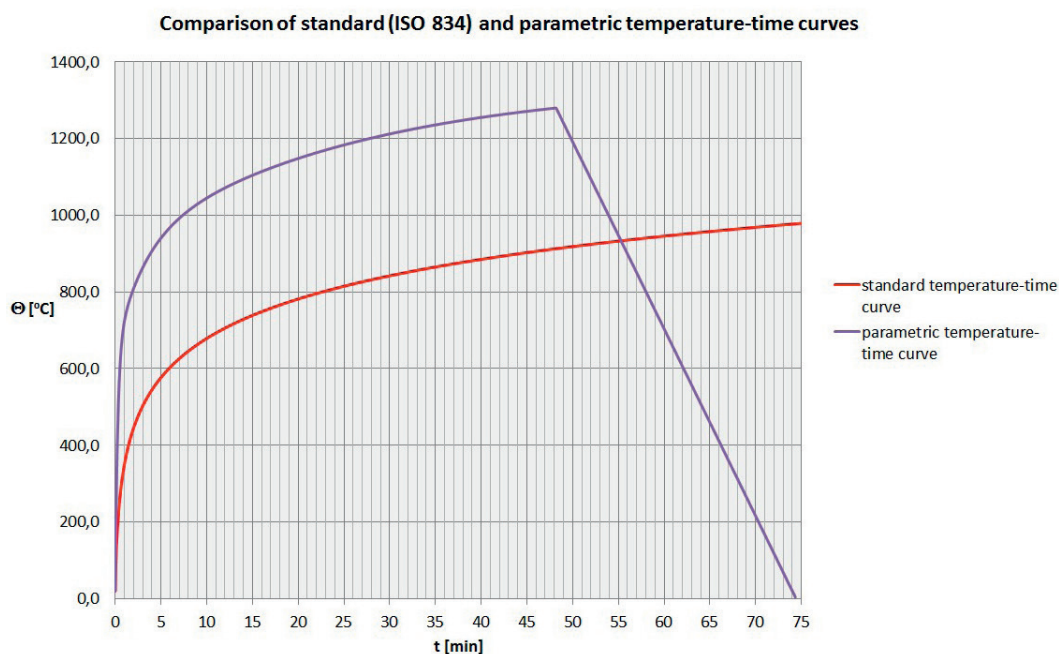


Fig. 3. Comparison of standard temperature-time and parametric temperature-time curves  
Source: Own elaboration.

Niedokładności związane ze sposobem analizy wynikają z uproszczeń przyjmowanych w trakcie obliczania konstrukcji w zakresie doboru metod obliczeniowych (mniej lub bardziej precyzyjnych), uproszczeń rzeczywistych schematów statycznych, przyjętych założeń upraszczających zauważalnie skracających czas analiz czy wreszcie – odnosząc się do projektowania konstrukcji na warunki pożarowe – z wyboru scenariusza pożaru, sposobu opisu funkcji wzrostu

temperatury gazów pożarowych w czasie, przyjętego sposobu analizy, a co się z tym wiąże – wiarygodności warunków termicznych, na jakie zostanie lub została narażona konstrukcja.

Doskonały przykład niejednoznaczności oceny warunków termicznych pożaru stanowi przypadek pokazany na ryc. 3, na której wykreślono zależności temperatura-czas wyznaczone dla tego samego pomieszczenia (strefy pożarowej) w budynku mieszkalnym,

w oparciu o model standardowy oraz model parametryczny opisu pożaru. Rozbieżność krzywych jest na tyle duża, że nie wymaga ona dodatkowego komentarza. Jakkolwiek zestawienie tych dwóch modeli pożaru ze sobą może budzić pewien sprzeciw u osób, które traktują krzywą standardową jedynie jako narzędzie do ustalania jednolitych warunków nagrzewania w laboratoryjnej próbie ogniowej, o tyle Autorowi pracy takie podejście do problemu wydaje się nieuzasadnione. I choć można tu oczywiście toczyć dyskusję nad wyższością jednego podejścia nad drugim, o tyle w rzeczywistości, w ujęciu typowo normowym, obie krzywe służą do opisu analitycznych modeli pożaru, obie też są wykorzystywane w praktyce przy projektowaniu nowych oraz ocenie bezpieczeństwa pożarowego istniejących konstrukcji budowlanych. W zależności od wyboru funkcji opisującej wzrost temperatury gazów pożarowych w czasie można uzyskać zupełnie niespójne i silnie rozbieżne dane do dalszych analiz, co może prowadzić do grubych błędów już na etapie założeń, zanim jeszcze rozpocznie się właściwy proces oceny nośności konstrukcji w danych warunkach środowiskowych. Ocenę wpływu, jaki wywiera dobór scenariusza pożarowego, na rozbieżność wyników analizy bezpieczeństwa pożarowego omówioną na przykładzie stalowych belek stropowych, w rozwiązaniach konstrukcyjnych, w których belka nośna jest ukryta w grubości stropu, zawarł Autor w pracy [10].

Często sam wybór określonego scenariusza pożarowego (np. pożaru parametrycznego) i sposób jego opisu sam z siebie wprowadza dodatkowe źródła niepewności w proces oceny warunków termicznych, z racji uzależnienia przebiegu funkcji (w tym również prędkości nagrzewania materiału konstrukcyjnego) od wielu innych parametrów opisujących środowisko pożaru, z których większość można traktować jako oddzielne, niezależne zmienne losowe. Nie wszystkie one zostały jak dotychczas wystarczająco dobrze rozpoznane i opisane w sensie statystycznym. Najbardziej dynamiczny okres badań poświęconych bezpieczeństwu pożarowemu budowli przypada *de facto* na ostatnie kilkanaście, no może kilkadziesiąt lat, co powoduje, że relatywnie niewiele jeszcze wiemy o istocie zjawisk zachodzących w czasie pożaru, bądź wiedza ta jest niepełna. Zmienność niektórych parametrów wpływających w sposób bezpośredni lub pośredni na nośność konstrukcji została do pewnego stopnia rozpoznana i skwantyfikowana na drodze testów prowadzonych w specjalistycznych laboratoriach, obserwacji istniejących obiektów, pomiarów czy oceny ekspertów. Część tych informacji można znaleźć w literaturze, zwykle są one jednak niepełne, część nadal pozostaje w sferze badań, które są kosztowne

i często trudne do jednoznacznej interpretacji bądź niemożliwe do uogólnienia, jako że odnoszą się do określonej konfiguracji środowiska pożaru. Najbogatsze źródła informacji dotyczących tzw. statystyk pożarowych, użytecznych z punktu widzenia projektowania konstrukcyjno-budowlanego, można odnaleźć w literaturze amerykańskiej. Większość danych tam zawartych dotyczy budynków biurowych i obiektów mieszkalnych, przy czym użyteczność tych danych w przypadku chęci adaptacji na realia europejskie nie w każdym przypadku jest możliwa. Specyfika budownictwa mieszkalnego w USA, w którym największy udział mają niskie budynki wykonane w technologii lekkiego szkieletu drewnianego, nie w pełni odpowiada warunkom budownictwa mieszkalnego w Europie. Jeśli chodzi o statystyki europejskie, to są one póki co niezwykle ubogie i mało użyteczne z naukowego punktu widzenia, a w niektórych krajach – z uwagi na strukturę systemów i służb ratowniczych – nie prowadzi się ich w ogóle.

## 5. Probabilistyczne podejście do oceny nośności konstrukcji

Elementy teorii dotyczącej metodyki analizy konstrukcji z uwzględnieniem niepewności można znaleźć zarówno w literaturze zagranicznej, jak i krajowej. Do najbardziej znanych pozycji literatury krajowej można zaliczyć na przykład prace Murzewskiego [11], cały cykl publikacji Kowala (niewymienionych tutaj szczegółowo z tytułu), Biegusa [2] czy Wolińskiego i Wróbel [12]. Wśród literatury zagranicznej należy wskazać przede wszystkim na prace Nowaka i Collinsa [13], Melchersa [14] czy Thoft-Christensena i Bakera [15], które stały się światową klasyką w tej dziedzinie. Wszystkie wymienione wyżej pozycje generalnie odnoszą się do zagadnień niezawodności i probabilistycznego projektowania konstrukcji w tzw. normalnych warunkach projektowych. Nie podejmują one wprost problematyki niezawodności konstrukcji w warunkach pożarowych, choć można w nich znaleźć odniesienie do innych sytuacji wyjątkowych. Na pewne aspekty projektowania pożarowego zwrócili uwagę w swoich pracach Murzewski z Zespołem [16–19], a w ostatnim czasie Maślak w cyklu licznych publikacji, zwieńczonych monografią [20]. Informacje tam zawarte nie w pełni jednak wypełniają niszę panującą w tym zakresie, zarówno w literaturze przedmiotu, jak i w świadomości środowiska inżynierskiego.

Sposób opisu niepewności modelu nośności przyjęty w literaturze zagranicznej, np. [13], [14] różni się nieco od podejścia prezentowanego w literaturze krajowej [2].

W niezawodnościowym podejściu do analizy konstrukcji, upowszechnianym w literaturze zagranicznej, popularnym sposobem modelowania nośności  $R$  (np.  $M_R, N_R, V_R$ ) jest potraktowanie jej jako iloczynu nośności nominalnej  $R_n$ , rozumianej dalej jako wielkość deterministyczna, wykorzystywana w klasycznym projektowaniu, oraz trzech parametrów uwzględniających poszczególne, wcześniej wymienione źródła niepewności, które należy traktować jako zmienne losowe o rozpoznanym rozkładzie.

W matematycznym ujęciu można to zapisać w sposób następujący:

$$R(\omega) = R_n M(\omega) P(\omega) E(\omega) \quad (1)$$

gdzie:

$R_n$  – oznacza wartość nominalną odpowiedniej nośności pojmowaną jako wielkość deterministyczną,  $M(\omega)$  – tzw. współczynnik materiałowy jest parametrem opisującym sposób zmienności parametrów wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego (parametrów materiałowych), odzwierciedlającym imperfekcje strukturalne. Jest to współczynnik definiowany jako stosunek rzeczywistych do nominalnych parametrów materiałowych (takich jak chociażby stosunek wartości granicy plastyczności ustalonej na podstawie statycznej próby rozciągania metali do wartości podawanej w normach projektowania).

$P(\omega)$  – tzw. współczynnik produkcyjny jest parametrem opisującym zmienność parametrów zależnych od procesów produkcyjnych i wykonawczych, (np. niedoskonałości wymiarowych), odzwierciedlającym imperfekcje technologiczne i montażowe. Jest to wielkość rozumiana jako stosunek faktycznych wymiarów elementów (określonych na podstawie pomiarów z natury) do wartości nominalnych odpowiednich wielkości (podawanych w tablicach lub normach, takich jak np. pole przekroju poprzecznego, moment bezwładności, sprężysty lub plastyczny wskaźnik wytrzymałości itp.).

$E(\omega)$  – tzw. współczynnik ekspercki jest parametrem uwzględniającym niedoskonałości wynikające z uproszczeń w obrębie przyjętych metod analizy konstrukcji. Współczynnik ekspercki jest definiowany jako stosunek rzeczywistej nośności elementu (określonej np. na podstawie badań lub obserwacji zachowania realnej konstrukcji, pomiarów w trakcie obciążeń próbnych itp.) do nośności nominalnej, tj. przyjętej na podstawie wyników analizy z wykorzystaniem przyjętego modelu obliczeniowego.

W przypadku analiz pożarowych konstrukcji, zaprezentowany w postaci wzoru (1) opis modelu nośności należałoby rozszerzyć o parametr  $T(\omega)$ , do postaci:

$$R_\theta(\omega) = R_{n,\theta}(\omega) M(\omega) P(\omega) E(\omega) T(\omega) \quad (2)$$

gdzie:

$T(\omega)$  – należy rozumieć jako stosunek rzeczywistej temperatury osiągniętej przez element konstrukcyjny w realnym pożarze do wartości temperatury oszacowanej na podstawie przyjętego scenariusza (modelu) pożaru. Należy nadmienić, iż w przypadku elementów stalowych osłoniętych za pomocą izolacji ogniochronnych stopień zmienności współczynnika termicznego  $T(\omega)$  może być również zależny od zmienności właściwości otuliny i dla każdego rodzaju materiału izolacyjnego winien być szacowany niezależnie.

Ze względu na wprowadzenie parametru termicznego (przy jednoczesnym założeniu, iż w przyjętym sposobie opisu wartości wszystkich czterech parametrów  $M(\omega), P(\omega), E(\omega)$  i  $T(\omega)$  są niewrażliwe na zmianę warunków termicznych) faktyczna nośność konstrukcji, podobnie jak wartość nośności nominalnej stają się automatycznie wielkościami zależnymi od temperatury, ze względu na silną zależność aktualnej wartości granicy plastyczności –  $f_{y,\theta}$  oraz modułu sprężystości podłużnej Younga –  $E_{a,\theta}$  od faktycznych warunków termicznych środowiska pracy. Jednak z uwagi na niepewność oceny rzeczywistej wartości obu wspomnianych wyżej wielkości, (por. ryc. 1 i ryc. 2), wielkości  $R_{n,\theta}(\omega)$  we wzorze (2) nie należy traktować jako wielkości deterministycznej, ale również jako zmienną losową.

W celu przywrócenia zależności (2) analogicznej struktury logicznej, charakterystycznej dla wzoru (1), należałoby wprowadzić jeszcze jeden współczynnik –  $D(\omega)$ , rozumiany jako współczynnik dokładności oceny efektywnych parametrów materiałowych ( $f_{y,\theta}, E_{a,\theta}$ ), w danych warunkach termicznych. Po wprowadzeniu współczynnika dokładności (precyzji) –  $D(\omega)$ , zależność (2) przybierze postać:

$$R_\theta(\omega) = R_{n,\theta} M(\omega) P(\omega) E(\omega) T(\omega) D(\omega) \quad (3)$$

w której  $R_{n,\theta}$  staje się wielkością deterministyczną oznaczającą nośność nominalną w danych warunkach termicznych. W klasycznym podejściu projektowym wartość nominalna nośności w sytuacji pożarowej  $R_{n,\theta}$  jest zatem opisana zależnością matematyczną pomiędzy innymi wielkościami rozumianymi tutaj jako wielkości deterministyczne, czyli takie o ściśle określonej wartości, które w ujęciu wytrzymałościowym mogą być rozumiane jako np.  $M_{f_i,\theta,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{y,\theta} / \gamma_{M,f}$ , w przypadku nośności na zginanie elementów zabezpieczonych przed utratą stateczności, czy  $N_{f_i,\theta,Rd,t} = A \cdot f_{y,\theta} / \gamma_{M,f}$ , w przypadku elementów rozciąganych itp.

Zależność opisana wzorem (3) jest funkcją nieliniową stanowiącą iloczyn kilku niezależnych zmiennych losowych. Linearyzując funkcję (3) za pomocą rozwinięcia w szereg Taylora oraz stosując akceptowalne

z technicznego punktu widzenia uproszczenie pozwalające na wykorzystanie w dalszych analizach jedynie składników pierwszego rzędu, przyjmując ponadto, że losowa nośność pręta w wyjątkowej sytuacji projektowej pożaru jest zmienną losową o rozkładzie logarytmiczno-normalnym stanowiącą iloczyn kilku zmiennych losowych o rozkładach logarytmiczno-normalnych można, korzystając z centralnego twierdzenia granicznego, wyprowadzić zależności na:

- wartość średnią  $\mu_{R_\theta}$  zmiennej losowej  $R_\theta(\varpi)$ , w postaci:

$$\mu_{R_\theta} = R_{n,\theta} \mu_M \mu_P \mu_E \mu_T \mu_D \quad (4)$$

gdzie:  $\mu_M, \mu_P, \mu_E, \mu_T, \mu_D$  oznaczają wartości średnie odpowiednich parametrów  $M(\omega), P(\omega), E(\omega), T(\omega)$  i  $D(\omega)$ ;

- wskaźnik odchylenia (ang. *bias factor*)  $\lambda_{R_\theta}$  zmiennej losowej  $R_\theta(\varpi)$ , definiowany jako stosunek wartości średniej danej zmiennej do jej wartości nominalnej  $\lambda = \frac{\mu}{nom}$ , w postaci:

$$\lambda_{R_\theta} = \lambda_M \lambda_P \lambda_E \lambda_T \lambda_D \quad (5)$$

gdzie:  $\lambda_M, \lambda_P, \lambda_E, \lambda_T, \lambda_D$  oznaczają wskaźniki odchylenia wartości parametrów  $M(\omega), P(\omega), E(\omega), T(\omega)$  i  $D(\omega)$ ;

- współczynnik zmienności  $V_{R_\theta}$  zmiennej losowej  $R_\theta(\varpi)$ , w postaci:

$$V_{R_\theta} = \sqrt{(V_M)^2 + (V_P)^2 + (V_E)^2 + (V_T)^2 + (V_D)^2} \quad (6)$$

gdzie:  $V_M, V_P, V_E, V_T, V_D$  oznaczają współczynniki zmienności odpowiednich parametrów  $M(\omega), P(\omega), E(\omega), T(\omega)$  i  $D(\omega)$ .

Statystyki opisujące zmienność parametrów  $M(\omega), P(\omega), E(\omega)$ , (tj. ich wartości średnie, wskaźniki odchylenia i współczynniki zmienności) bazujące na wynikach reprezentatywnych badań statystycznych, są dostępne w literaturze. Najbardziej wiarygodnego zestawienia tych wielkości dokonali Ellingwood, Galambos, MacGregor i Cornel [21], [22] i [23].

Jako że zaprezentowane podejście do opisu modelu nośności konstrukcji w warunkach pożarowych za pomocą dodatkowych zmiennych  $T(\omega)$  i  $D(\omega)$  jest unikalną nowatorską propozycją Autora niniejszego opracowania, nie istnieją w związku z tym żadne statystyki dotyczące zmienności tychże parametrów. Według wiedzy Autora jest wielce prawdopodobne, że do chwili obecnej nikt nie przeprowadził odpowiednich badań, które mogłyby się choćby w niewielkim stopniu przyczynić do powstania takowych zestawień, i pod względem badawczym zagadnienie otwiera zupełnie nową kartę w tym zakresie.

W literaturze krajowej przeważa nieco inny sposób podejścia do zagadnień niepewności modelu nośności konstrukcji oraz matematycznego sposobu opisu zagadnienia. W polskim piśmiennictwie wprowadzono pojęcie losowej nośności elementu, którą w ogólnym przypadku (z uwzględnieniem jedynie normalnych warunków pracy konstrukcji) można zapisać w postaci:

$$N(\varpi) = a(\varpi)C(\varpi)f(\varpi) \quad (7)$$

gdzie:

$a(\varpi)$  – oznacza współczynnik modelu wyężenia konstrukcji pojmowany jako współczynnik zwiczerzenia, wyboczenia lub niestateczności miejscowej – w przypadku elementów o smukłych ściankach (w zależności od sytuacji);  $C(\varpi)$  – oznacza losową charakterystykę geometryczną przekroju poprzecznego elementu (np. pole przekroju poprzecznego –  $A(\varpi)$ ), wskaźnik wytrzymałości –  $W(\varpi)$ , pole przekroju czynnego przy ścinaniu –  $A_V(\varpi)$  w zależności od sytuacji obliczeniowej i analizowanego stanu konstrukcji);  $f(\varpi)$  – losową wytrzymałość materiału rozumianą odpowiednio jako granica plastyczności –  $f_y$  lub wytrzymałość obliczeniowa –  $f_d$ , w zależności od normy, której dotyczy.

Taki sposób opisu nośności w ujęciu probabilistycznym proponują m.in. Biegus [2] oraz Woliński i Wróbel [12]. Proponowany sposób opisu uwzględnia wszystkie możliwe rodzaje niedoskonałości wymienionych i opisanych we wcześniejszych podrozdziałach pracy, a więc losowe parametry wytrzymałości materiału, losowe charakterystyki geometryczne pręta, losowe imperfekcje geometryczne osi pręta oraz losowe mimośrodowość obciążeń. Dzięki zastosowanemu sposobowi rozumowania nośność elementu przestaje być wielkością deterministyczną o ściśle określonej wartości, a staje się wielkością probabilistyczną – jako funkcja stanowiąca kombinację kilku zmiennych losowych opisanych za pomocą odpowiednich rozkładów.

W przypadku szacowania nośności z uwzględnieniem oddziaływań pożarowych formuła (7) staje się nieściśła, ponieważ nie uwzględnia różnic w opisie samych krzywych niestateczności stosowanych w dwóch różnych sytuacjach projektowych (poprzez losowy współczynnik modelu wyężenia konstrukcji), ani też zmienności losowej wytrzymałości materiału w warunkach podwyższonych temperatur. Stosując pewną analogię zapisu, zależność (7) dla warunków wyjątkowej sytuacji projektowej pożaru można by sformułować w następującej postaci:

$$N_\theta(\varpi) = a_\theta(\varpi)C(\varpi)f_\theta(\varpi) \quad (8)$$

gdzie:

$a_\theta(\varpi)$  – oznacza współczynnik modelu wyężenia konstrukcji, w warunkach temperatur pożarowych;

$f_\theta(\varpi)$  – losową wytrzymałość materiału, w sytuacji odpowiadającej danym warunkom termicznym, w trakcie pożaru.

Stosując filozofię przyjętą w pakiecie Eurokodów, losową wytrzymałość materiału w sytuacji podwyższonych temperatur –  $f_\theta(\varpi)$  można wyrazić w postaci iloczynu  $f_\theta(\varpi) = k_\theta(\varpi)f(\varpi)$ , gdzie  $k_\theta(\varpi)$  oznacza losowy współczynnik redukcyjny losowej wytrzymałości materiału, dzięki czemu wzór (8) przyjmuje postać:

$$N_\theta(\varpi) = a_\theta(\varpi)C(\varpi)k_\theta(\varpi)f(\varpi) \quad (9)$$

lub, odnosząc to do losowej nośności pręta w normalnej sytuacji projektowej, opisanej wzorem (7):

$$N_\theta(\varpi) = \frac{a_\theta(\varpi)k_\theta(\varpi)}{a(\varpi)} N(\varpi) \quad (10)$$

Do szacowania nośności losowej elementu konstrukcyjnego wystarczające są metody uproszczone, zwane często metodami probabilistycznymi poziomu 2, w których korzysta się jedynie ze znajomości tzw. dwóch momentów: wartości średniej danej zmiennej losowej –  $\mu_x$  (będącej momentem zwykłym pierwszego rzędu) oraz jej wariancji –  $\sigma_x^2$  (będącej momentem centralnym drugiego rzędu). W praktyce wykorzystuje się również wielkości pochodne, takie jak: odchylenie standardowe –  $\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$  oraz współczynnik zmienności  $V_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x}$ .

Jeśli podobnie jak poprzednio przyjmując, że produkt końcowy w postaci losowej nośności pręta w wyjątkowej sytuacji projektowej pożaru jest zmienną losową o rozkładzie logarytmiczno-normalnym stanowiącą iloczyn (lub iloraz) kilku zmiennych losowych o rozkładach logarytmiczno-normalnych, to przez analogię – dla zmiennych losowych opisanych wzorami (9) [lub (10)] można zapisać zależności opisujące odpowiednio wartość średnią  $\mu_{N_\theta}$  zmiennej losowej  $N_\theta(\varpi)$ , wskaźnik odchylenia  $\lambda_{N_\theta}$ , czy współczynnik zmienności  $V_{N_\theta}$ , podobne do tych podanych wcześniej w formie wzorów (4), (5) i (6), i tak:

- wartość średnia  $\mu_{N_\theta}$  zmiennej losowej  $N_\theta(\varpi)$ , przyjmuje postać:

$$\mu_{N_\theta} = \mu_{a_\theta} \mu_C \mu_{k_\theta} \mu_f \quad (11)$$

gdzie:  $\mu_{a_\theta}, \mu_C, \mu_{k_\theta}, \mu_f$  oznaczają wartości średnie odpowiednich zmiennych losowych  $a_\theta(\omega), C(\omega), k_\theta(\omega)$  i  $f(\omega)$ ;

- wskaźnik odchylenia (ang. bias factor)  $\lambda_{N_\theta}$  zmiennej losowej  $N_\theta(\varpi)$ , przyjmuje postać:

$$\lambda_{N_\theta} = \lambda_{a_\theta} \lambda_C \lambda_{k_\theta} \lambda_f \quad (12)$$

gdzie:  $\lambda_{a_\theta}, \lambda_C, \lambda_{k_\theta}, \lambda_f$  oznaczają wskaźniki odchylenia odpowiednich zmiennych losowych  $a_\theta(\omega), C(\omega), k_\theta(\omega)$  i  $f(\omega)$ ;

- współczynnik zmienności  $V_{N_\theta}$  zmiennej losowej  $N_\theta(\varpi)$ , przyjmuje postać:

$$V_{N_\theta} = \sqrt{(V_{a_\theta})^2 + (V_C)^2 + (V_{k_\theta})^2 + (V_f)^2} \quad (13)$$

gdzie:  $V_{a_\theta}, V_C, V_{k_\theta}, V_f$  oznaczają odpowiednio współczynniki zmienności zmiennych losowych  $a_\theta(\omega), C(\omega), k_\theta(\omega)$  i  $f(\omega)$ .

Ponadto, jeżeli zmienna losowa  $N_\theta(\varpi)$  ma rozkład logarytmiczno-normalny, to zmienna losowa  $\ln N_\theta(\varpi)$  ma rozkład normalny i wówczas zachodzą także następujące zależności:

$$\mu_{\ln N_\theta} = \mu_{\ln a_\theta} + \mu_{\ln C} + \mu_{\ln k_\theta} + \mu_f \quad (14)$$

$$\sigma_{\ln N_\theta}^2 = \sigma_{\ln a_\theta}^2 + \sigma_{\ln C}^2 + \sigma_{\ln k_\theta}^2 + \sigma_{\ln f}^2 \quad (15)$$

gdzie:

$$\sigma_{\ln a_\theta}^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma_{a_\theta}^2}{\mu_{a_\theta}^2} \right) = \ln(1 + V_{a_\theta}^2) \quad (16)$$

$$\sigma_{\ln C}^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma_C^2}{\mu_C^2} \right) = \ln(1 + V_C^2) \quad (17)$$

$$\sigma_{\ln k_\theta}^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma_{k_\theta}^2}{\mu_{k_\theta}^2} \right) = \ln(1 + V_{k_\theta}^2) \quad (18)$$

$$\sigma_{\ln f}^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma_f^2}{\mu_f^2} \right) = \ln(1 + V_f^2) \quad (19)$$

$$\mu_{\ln a_\theta} = \ln(\mu_{a_\theta}) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln a_\theta}^2 \quad (20)$$

$$\mu_{\ln C} = \ln(\mu_C) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln C}^2 \quad (21)$$

$$\mu_{\ln k_\theta} = \ln(\mu_{k_\theta}) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln k_\theta}^2 \quad (22)$$

$$\mu_{\ln f} = \ln(\mu_f) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln f}^2 \quad (23)$$

Należy zauważyć, że nawet w sytuacji, kiedy nie wszystkie zmienne losowe  $a_\theta(\omega), C(\omega), k_\theta(\omega)$  i  $f(\omega)$  (albo żadna z nich) są opisane rozkładem logarytmiczno-normalnym, wówczas równania (14) i (15) są nadal prawdziwe, o ile wspomniane wyżej zmienne losowe składowe są od siebie statystycznie niezależne.

Nie można jednak wówczas powiedzieć, że zmienna losowa  $N_\theta(\varpi)$  jest opisana rozkładem logarytmiczno-normalnym.

Rozkład logarytmiczno-normalny jest najczęściej stosowany do opisu losowego charakteru cech materiałowych stali, jednak w przypadku małych populacji dopuszczalne jest zastąpienie go rozkładem normalnym. Sposób określenia wartości charakterystycznych

dla rozkładów będących kombinacją niezależnych zmiennych losowych normalnych podał m.in. Biegus [2], ograniczając jednak rozwiązania szczegółowe do przypadków kombinacji dwóch niezależnych zmiennych losowych.

W literaturze przedmiotu można odnaleźć statystyki dotyczące zmienności parametrów losowych  $C(\varpi)$  i  $f(\varpi)$ , oparte na wynikach reprezentatywnych badań statystycznych, natomiast Autorowi nic nie wiadomo na temat statystyk dotyczących parametrów  $a_\theta(\varpi)$  i  $k_\theta(\varpi)$ . Współczynnik modelu wyężenia konstrukcji w warunkach podwyższonych temperatur pożarowych –  $a_\theta(\varpi)$  dodatkowo sam w sobie stanowi kombinację innych parametrów o charakterze losowym, w tym w szczególności: losowej smukłości pręta, wartości parametru imperfekcji oraz precyzji oszacowania temperatury elementu konstrukcyjnego i cała trudność ustalenia jego statystyk sprowadza się do znajomości charakterystyk opisu innych zmiennych składowych, co znacznie komplikuje sprawę.

Tym samym zagadnienia probabilistycznej oceny nośności konstrukcji, związane choćby z opisem wskazanych wyżej parametrów losowych, stanowią nową, ciekawą i pełną wyzwań, przestrzeń badawczą dla współczesnych i przyszłych pokoleń naukowców.

## 6. Wpływ metod badawczych na wartość istotnych parametrów wytrzymałościowych stali konstrukcyjnych

Znajomość właściwości wytrzymałościowych różnych gatunków stali w warunkach podwyższonych temperatur jest kluczowa dla właściwego zrozumienia zachowania się konstrukcji stalowych i zespolonych w warunkach pożaru. Bardzo często do oceny zjawisk oraz ewaluacji odporności konstrukcji stalowych na działanie ognia przyjmuje się uproszczone modele materiałowe, co nie zawsze prowadzi do zadowalających wyników. W przypadku bardziej zaawansowanych analiz numerycznych, prowadzonych np. z wykorzystaniem narzędzi MES, jedynie przyjęcie poprawnie dobranego, opartego na realnych badaniach wytrzymałościowych, modelu materiałowego odwzorowującego w sposób możliwie precyzyjny rzeczywiste procesy degradacji właściwości materiałowych staje się gwarantem uzyskania wiarygodnych wyników. Wspomniane badania wytrzymałościowe, mające na celu ustalenie rzeczywistych właściwości materiałowych, muszą być zaprojektowane i przeprowadzone z zachowaniem zaleceń normowych w stosunku do warunków testu, aby mogły być uznane za wiarygodne

i miarodajne, jak również użyteczne ze względów porównawczych.

### 6.1. Przygotowanie próbek, zasadnicze metody i rodzaje badań

#### 6.1.1. Przygotowanie i wymiary próbek

Podstawowe zasady prowadzenia badań statycznej próby rozciągania metali w podwyższonej temperaturze zawarto w normie [24]. Grubości i szerokości stref pomiarowych poszczególnych próbek są zależne od wymiarów (grubości) elementów i ustala się je zgodnie z zasadami przyjętymi w przywołanej normie.

#### 6.1.2. Rodzaje badań materiałowych w warunkach podwyższonych temperatur

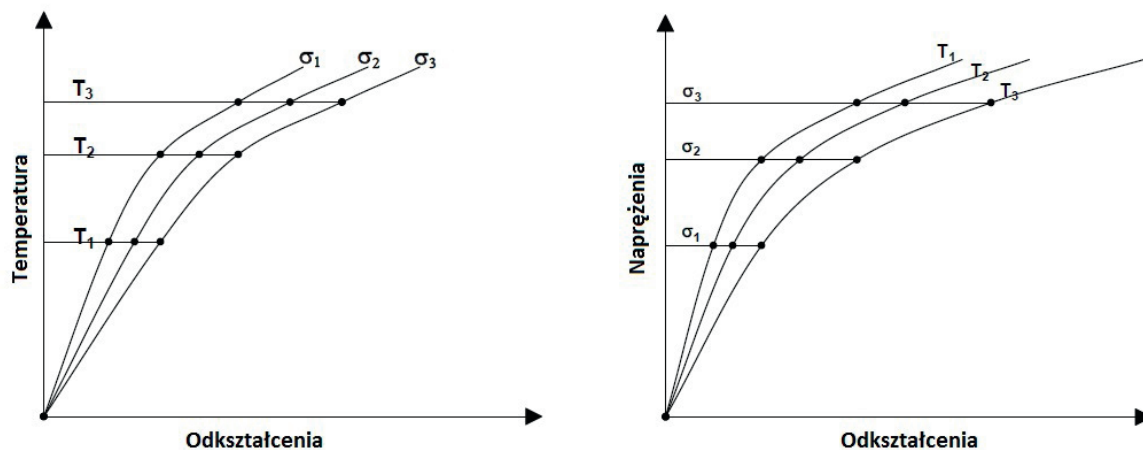
Powszechnie znane są dwie metody prowadzenia testów – statycznej próby rozciągania metali w warunkach podwyższonych temperatur: badanie w ustalonym polu temperatur (izotermiczne), powszechnie znane w literaturze pod nazwą *steady-state test* oraz badanie w stanie nieustalonym (anizotermiczne), znane jako *transient-state test*. Badania w ustalonym polu temperatur polegają na rozciąganiu próbek uprzednio ogrzanych do określonej temperatury, a następnie obciążonych. Jest to jednak sytuacja nienaturalna, niemająca wiele wspólnego z warunkami pracy realnej konstrukcji w pożarze. W rzeczywistych konstrukcjach w przypadku wystąpienia pożaru mamy do czynienia z sytuacją całkowicie odwrotną – konstrukcja, która jest pierwotnie obciążona, zostaje poddana oddziaływaniom termicznym o różnej prędkości zmiany pola temperatury, zależnej wprost od dynamiki rozwoju pożaru. Badania, które próbują odtworzyć taki ciąg przyczynowo-skutkowy zdarzeń, są nieco trudniejsze w realizacji, zaś ich wyniki w interpretacji. Jak się okazuje bowiem, nie bez znaczenia dla niektórych właściwości wytrzymałościowych stali pozostaje dodatkowy parametr, którym jest prędkość nagrzewania. Wybrane badania czułości stali na prędkość nagrzewania były między innymi prowadzone przez Bednarek i Kamocką [25] oraz Outinena [26]. W niniejszym artykule zostaną zaprezentowane główne wnioski z tych badań.

Badania w ustalonym polu temperatur są zdecydowanie łatwiejsze do przeprowadzenia w sensie technicznym i dlatego też właśnie ta metoda jest najczęściej stosowana w wielu przypadkach, w których poprawne odzwierciedlenie scenariusza pożaru jest mniej istotne i nie wywiera znaczącego wpływu na analizowane wielkości. Z uwagi na pewne niedoskonałości metod oceny parametrów wytrzymałościowych na drodze badań w warunkach ustalonego pola

temperatur jedyną w pełni uznaną i zalecaną metodą stosowaną w projektach badawczych, w których poprawność odwzorowania zjawisk i procesów ma wartość najwyższą, jest badanie w zmiennych warunkach termicznych symulujących rozwój realnego pożaru, choć nie zawsze uwzględnia ono ostatnią fazę – fazę chłodzenia, z jaką mamy do czynienia w warunkach rzeczywistych (akcja gaśnicza, samoistne ugaszenie spowodowane wyczerpaniem się paliwa lub brakiem tlenu).

## 6.2. Badania w nieustalonym polu temperatur (anizotermiczne)

W statycznej próbie rozciągania w warunkach zmiennego pola temperatury badana próbka znajduje się pod stałym obciążeniem i jest poddawana działaniu zmiennego w czasie (ale zmiennego ze stałą prędkością wzrostu) pola temperatur. W trakcie badania w danej chwili  $t$ , w sposób bezpośredni mierzy się wartość temperatury elementu i wielkość odkształcenia.



Ryc. 4. Sposób transformacji danych na potrzeby wyznaczenia krzywej naprężenie-odkształcenie w oparciu o wyniki statycznej próby rozciągania metali w zmiennym polu temperatur

Źródło: Opracowanie własne.

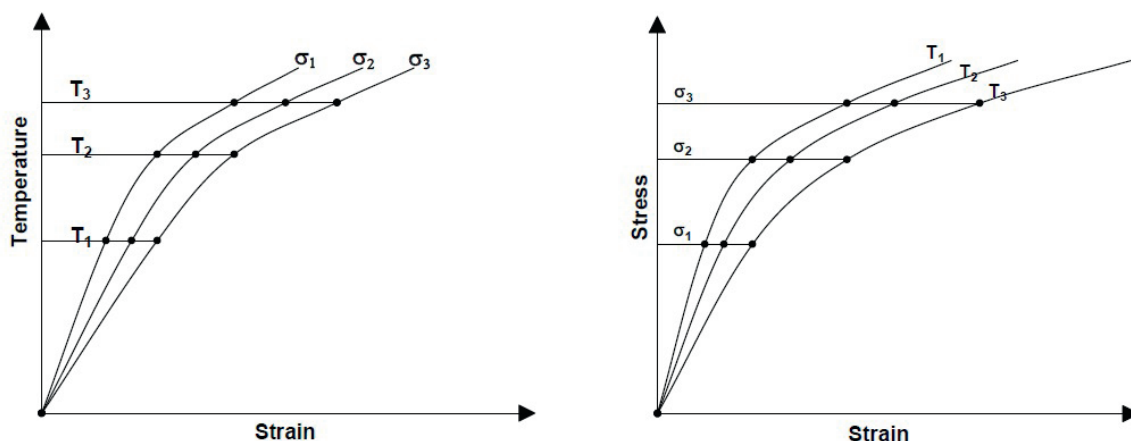


Fig. 4. Converting the stress-strain curves from the transient state test results

Source: Own elaboration.

Od całości zarejestrowanych odkształceń odejmuje się wydłużenia aktywowane termiczne. Krzywą naprężenie-odkształcenie buduje się w sposób pośredni, na zasadzie transformacji wyników, zgodnie ze schematem pokazanym na ryc. 4, co wyjaśniono szczegółowo poniżej, a co może również stanowić źródło niezamierzonych pomyłek i nieścisłości.

Statyczną próbę rozciągania w warunkach zmiennego pola temperatury przeprowadza się dla określonych

poziomów obciążenia, odpowiadających nominalnym wartościom naprężeń rozciągających, odniesionych do pierwotnego przekroju badanego elementu:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , (np. 80, 160, 240 N/mm<sup>2</sup>). Prędkość wzrostu temperatury w nagrzewanym elemencie przyjmuje się zgodnie z normą [24]. Badania prowadzi się do momentu zerwania próbki lub osiągnięcia określonego poziomu temperatury. Na potrzeby badań z reguły przyjmuje się, iż całkowite odkształcenie elementu w podwyższonej



temperaturze składa się z odkształceń mechanicznych wynikających z przyłożonego obciążenia –  $\varepsilon_{e-p}(\sigma, T)$  oraz odkształceń termicznych –  $\varepsilon_T(T)$ . Taki sposób rozumowania stanowi pewne uproszczenie problemu, jako że w rzeczywistości, zgodnie z propozycją międzynarodowego komitetu *RILEM-COMMITTEE 44-PHT* [27], całkowite odkształcenie w podwyższonej temperaturze opisuje równanie:

$$\varepsilon = \varepsilon_T(T) + \varepsilon_{e-p}(\sigma, T) + \varepsilon_i(\sigma, T, t) \quad (24)$$

gdzie:

$\varepsilon_T(T)$  – oznacza odkształcenie termiczne

$\varepsilon_T = \alpha(T) \cdot \Delta T$ , wynikające z wydłużalności termicznej stali,

$\varepsilon_{e-p}(\sigma, T)$  – jest odkształceniem mechanicznym obliczonym z pominięciem wpływów pełzania, a więc formalnie niezwiązanym z efektami zależnymi od czasu. Składnik ten z reguły jest opisywany za pomocą równania Ramberga-Osgooda w sposób następujący:

$$\varepsilon_{e-p} = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E(T)} + 0,002 \left[ \frac{1}{\sigma_y(T)} \right]^{\mu(T)} |\sigma|^{\mu(T)-1} \sigma \quad (25)$$

$\varepsilon_i(\sigma, T, t)$  – oznacza odkształcenia pełzania będące funkcją trzech zmiennych: naprężenia, temperatury i czasu. Sposób opisu jest zależny od przyjętego modelu teoretycznego.

W praktyce, w przypadku próby rozciągania w warunkach anizotermicznych, składnik odpowiadający za odkształcenia pełzania jest pomijany (m.in. z uwagi na relatywnie krótki czas ekspozycji elementu na dane warunki termiczne), zaś odkształcenia wynikające z wydłużalności termicznej stali określa się na drodze eksperymentalnej, prowadząc badanie przy tych samych parametrach wzrostu temperatury, ale przy znikomym obciążeniu (np. na poziomie 3 N/mm<sup>2</sup>), lub też w zupełnej ostateczności określa się na podstawie formuł analitycznych.

Tak określone wielkości odkształceń, pomierzone odpowiednio w konkretnych warunkach termicznych –  $T_1, T_2, T_3$  i odpowiadające tym samym danemu poziomowi temperatury testowanego elementu, odkłada się na osi rzędnych, przyporządkowując im na osi odciętych wartości naprężeń, które je wywołały.

Istotne właściwości mechaniczne stali, takie jak wartość granicy plastyczności czy modułu Younga, ustala się na podstawie tak stworzonych krzywych naprężenie-odkształcenie. Badania prowadzi się dla różnych poziomów wyężenia próbek oraz różnych prędkości nagrzewania. Aby wyniki mogły być ze sobą porównywane, powinny dotyczyć badań prowadzonych

przy tym samym tempie wzrostu temperatury elementu. Badania prowadzone przez Bednarek i Kamocką były zorientowane na ocenę wpływu różnic tempa nagrzewania na stabilność określonych wielkości, a nie na potwierdzenie wartości nominalnych istotnych parametrów wytrzymałościowych, stąd próby te wykonano przy pięciu różnych prędkościach nagrzewania z przedziału 5°C/min–65°C/min, niższych od powszechnie przyjętego poziomu odniesienia, który stanowi krzywa ISO 834. W przypadku chęci porównania rzeczywistego zachowania się materiału z opisem przyjętym w dokumentach normalizacyjnych należałoby podczas testów odwzorować wyższe tempo wzrostu temperatury odzwierciedlające warunki pożaru standardowego, odpowiadającą mu prędkość narastania temperatury gazów pożarowych oraz adekwatną prędkość narastania temperatury w badanym elemencie. Niezwykle istotnym elementem mającym kluczowy wpływ na jakość uzyskanych wyników jest, by podczas badań mierzyć temperaturę nagrzewanego elementu, a nie temperaturę gazów pożarowych, ponieważ wielkości te różnią się od siebie i mogą prowadzić do późniejszych nieścisłości, których źródło może się okazać trudne do wychwycenia. W trakcie prowadzonych badań zaobserwowano wyraźny efekt pełzania materiału, który był odwrotnie proporcjonalny do tempa nagrzewania (im większa prędkość nagrzewania, tj. większa dynamika pożaru, tym mniejsze pełzanie).

Badania Bednarek i Kamockiej [25] zostały dodatkowo zorientowane na wyznaczenie wartości temperatury krytycznej –  $T_{cr}$  (temperatury, przy której dochodzi do zerwania próbki przy danym poziomie obciążenia), temperatury, dla której całkowite wydłużenie próbki wyniosło  $\varepsilon = 1\% - T_{\varepsilon=1\%}$  i czasu krytycznego –  $\tau_{cr}$  (czasu mierzonego od początku badania w temperaturze 20°C do momentu osiągnięcia przez element temperatury krytycznej). Dokonano ponadto pomiarów odkształcenia krytycznego –  $\varepsilon_{cr}$ , stanowiącego sumę odkształceń próbki w chwili zniszczenia, w danych warunkach termicznych i spowodowanych przyłożonym obciążeniem, zgodnym z programem badań dla danej serii.

Analiza wyników badań przeprowadzonych przez Bednarek i Kamocką [25] wskazuje, iż wraz ze wzrostem tempa nagrzewania wzrastają wartości temperatury krytycznej (czyli temperatury utożsamianej z chwilą zniszczenia konstrukcji) oraz maleją odkształcenia. Tym samym rośnie (w danych warunkach termicznych) nośność elementu konstrukcyjnego w rozumieniu jego trwałości pożarowej.

W [26] Outinen zaprezentował m.in. wyniki badań prowadzonych w zmiennym polu temperatury, mających na celu ustalenie wartości modułu sprężystości

podłużnej Younga. Wyniki uzyskane z badań porównano z tymi, które są dostępne w literaturze i w normach projektowania, a także z wynikami uzyskanymi na podstawie testów prowadzonych w warunkach ustalonego pola temperatur. Analiza porównawcza przeprowadzona przez Outinena wykazała, że wartości uzyskane z badań eksperymentalnych, niezależnie od sposobu ich prowadzenia, nie odbiegały istotnie od krzywej normowej zamieszczonej w Eurokodzie [3].

Jak wykazały badania, prędkość wzrostu temperatury stali ma również wpływ na wielkość pomierzonej siły zrywającej w statycznej próbie rozciągania stali w nieustalonych warunkach termicznych. Wraz ze wzrostem tempa nagrzewania odnotowywano wzrost wartości naprężeń rozciągających, odpowiadających danemu poziomowi temperatury.

Efekt ten zaobserwowano już przed laty, czego ślad można znaleźć chociażby w opublikowanym w 1998 roku artykule Anderberga [28]. Przypuszcza się, że zwiększona prędkość nagrzewania opóźnia aktywowane termicznie procesy zachodzące w wewnętrznej strukturze materiału, prowadzące do jej uszkodzenia w wysokich temperaturach. Wartość temperatury krytycznej wzrasta wraz ze wzrostem tempa nagrzewania przy jednoczesnym zmniejszeniu wielkości odkształceń krytycznych, co potwierdziły badania Bednarek i Kamockiej [25].

### 6.3. Badania w ustalonym polu temperatur (izotermiczne)

W przypadku badań w stanie ustalonym badana próbka jest nagrzewana do poziomu określonej temperatury, a następnie rozciągana, podobnie jak ma to miejsce w przypadku badań prowadzonych w temperaturze pokojowej. Zarówno odkształcenia, jak i towarzyszące im naprężenia, w odróżnieniu od próby prowadzonej w warunkach nieustalonych, są rejestrowane w sposób bezpośredni. Sterowanie odbywa się za pośrednictwem obciążenia lub przemieszczenia. W obu przypadkach przyrosty zadaje się w sposób równomierny. Prędkość przyrostu odkształcenia/obciążenia ma kluczowe znaczenie dla uzyskanych rezultatów, dlatego też parametr ten musi pozostawać w całkowitej zgodności z postanowieniami normowymi w tym zakresie. Im większa prędkość rozciągania, tym wyższa uzyskana wartość siły zrywającej. Niestety większość badań raportowanych w literaturze nie zawiera informacji na temat parametrów prowadzonych testów, co czyni te wyniki mało przydatnymi do celów porównawczych.

Badania Outinena [26] potwierdziły słuszność powyższego spostrzeżenia także w warunkach badań w podwyższonej temperaturze, przy czym najwyższe

wartości sił zrywających w danej temperaturze uzyskano dla prób rozciągania w ustalonym polu temperatur prowadzonych przy dużej prędkości zadawanych odkształceń, następnie w kolejności – dla analogicznych warunków termicznych i niskiej prędkości zadawanych odkształceń, a najniższe w badaniach prowadzonych w warunkach nieustalonego pola temperatur. W każdym z przypadków normowa krzywa naprężenie-odkształcenie wyznaczona zgodnie z regułami podanymi w PN-EN 1993-1-2 [3] dawała oszacowania bezpieczne z punktu widzenia oceny bezpieczeństwa konstrukcji.

W wyniku przeprowadzonych licznych serii badań dla różnych typów stali stwierdzono, że wpływ ten jest zdecydowanie większy w przypadku stali węglowych, niż w przypadku stali szlachetnych, nierdzewnych.

## 7. Wpływ modelu materiału, imperfekcji geometrycznych i termicznych na wyniki analiz numerycznych

Prezentację i podsumowanie rezultatów przykładowej serii obliczeń numerycznych słupa stalowego obciążonego osiowo i poddanego oddziaływaniom symulowanego pożaru, podpartego na końcach w sposób ograniczający swobodę przemieszczeń podłużnych oraz swobodę obrotów węzłów podporowych zawarł Autor wraz z Zespołem w artykule [29]. W pracy omówiono w możliwie szerokim zakresie wyniki analiz parametrycznych, uwzględniających niepewności wynikające z racji zmienności modelu materiałowego stali, wielkości imperfekcji geometrycznych oraz sposobu rozkładu pola temperatury na długości elementu. Przeprowadzone analizy wykazały, jak pozornie nieistotne i trudne do stwierdzenia niedoskonałości modelowe mogą doprowadzić do niewłaściwej interpretacji zjawisk ocenianych tylko i wyłącznie na podstawie obliczeń numerycznych bez ich odpowiedniej walidacji i weryfikacji w oparciu o wyniki realnego eksperymentu.

Na obecnym etapie rozwoju technik obliczeniowych obserwuje się coraz szerszy udział analiz numerycznych w prowadzonych pracach badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych. Coraz powszechniej traktuje się wyniki tychże analiz jako wiarygodne źródło pełnowartościowej informacji, co w ogólnym rozumieniu nie jest lub nie musi być prawdą. Należy podkreślić, iż metody numeryczne stanowią niewątpliwie użyteczne narzędzie, pomocne w jakościowej ocenie zjawisk, jednakże w przypadku procesów o silnie nieliniowym charakterze możliwość predykcji na podstawie rezultatów symulacji komputerowych jest poważnie ograniczona. W przypadku zagadnień inżynierii

bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji mogą one na ogół stanowić podstawę jedynie do względnie poprawnego wnioskowania w zakresie jakościowej oceny zjawisk, czy też służyć jako narzędzie do prowadzenia analiz parametrycznych.

## 8. Podsumowanie i wnioski

W pracy nakreślono probabilistyczne podstawy oceny nośności konstrukcji stalowych w warunkach pożaru. Wskazano na różne źródła niepewności towarzyszące szacowaniu bezpieczeństwa konstrukcji stalowych oraz wpływające na wiarygodność rezultatów. Oddzielnie opisano czynniki o charakterze uniwersalnym, wywierające wpływ na losową nośność konstrukcji w każdych warunkach projektowych, takie jak np. imperfekcje geometryczne, technologiczne czy materiałowo-strukturalne. Znaczną część opracowania poświęcono zagadnieniom, które odnoszą się wyłącznie do wyjątkowej sytuacji pożaru, zwracając uwagę w szczególności na zmienność, kluczowych dla oceny nośności konstrukcji, właściwości materiałowych stali w funkcji temperatury oraz tempa jej wzrostu. Odniesiono się do niepewności modelu opisującego nośność konstrukcji oraz zaproponowano własną, autorską propozycję modyfikacji tegoż modelu, obowiązującą w warunkach temperatur pożarowych. Na podstawie studiów literaturowych dokonano syntetycznego podsumowania i usystematyzowania doniesień dotyczących wpływu, jaki wywiera sposób prowadzenia badań materiałowych na wielkość uzyskiwanych wyników.

Przeprowadzone studia literaturowe, własne doświadczenia zawodowe, naukowe i dydaktyczne Autora niniejszego opracowania upoważniają go do sformułowania kilku obszerniejszych uwag natury ogólnej, związanych bezpośrednio lub pośrednio z zagadnieniami niezawodności konstrukcji w pożarze oraz problematyką oceny jej nośności metodami probabilistycznymi, stanowiącymi obszar zainteresowań badawczych Autora:

1. Prawdopodobieństwo utraty nośności w pożarze należy traktować jako zdarzenie losowe wynikające wprost z prawdopodobieństwa wybuchu pożaru rozwiniętego oraz prawdopodobieństwa równoczesnego przekroczenia określonego stanu granicznego, w warunkach jednoczesnego działania na konstrukcję obciążeń mechanicznych oraz podwyższonej temperatury. Z kolei prawdopodobieństwo wybuchu pożaru rozwiniętego jest prawdopodobieństwem warunkowym, którego wartość wynika z sumy prawdopodobieństwa zaproszenia ognia i iloczynu prawdopodobieństwa braku skuteczności środków czynnej ochrony przeciwpożarowej (rozumianych jako spójne działanie automatycznych systemów

detekcyjno-gaśniczych i służb ratowniczych) oraz prawdopodobieństwa niestłumienia ognia, zanim pożar rozgorzeje. Mając jedynie do dyspozycji statystyki, odnoszące się wyłącznie do parametrów materiałowych i wytrzymałościowych elementów nośnych, nie da się właściwie oszacować ryzyka awarii oraz poziomu bezpieczeństwa konstrukcji metodami probabilistycznymi bez znajomości statystyk zaproszenia ognia adekwatnych do sposobu użytkowania budynku, którego dotyczą oraz statystyk skuteczności odpowiednich służb czy systemów. Problem jest więc złożonym zadaniem matematycznym wymagającym gruntownej wiedzy z zakresu rachunku prawdopodobieństwa oraz dostępu do odpowiednich danych statystycznych, które w zakresie niezbędnym do przeprowadzenia w pełni wiarygodnych analiz są na chwilę obecną – mało dostępne i niepełne.

2. Samo zjawisko pożaru w rozumieniu fizycznym jest zjawiskiem niezwykle skomplikowanym, którego przebieg, dynamika i intensywność są ściśle zależne od warunków środowiska, w którym dochodzi do wybuchu – zgromadzonego obciążenia ogniowego, skuteczności wentylacji, wielkości strefy pożarowej itp. Wpływ pożaru na konstrukcję zależy od przewodności cieplnej materiałów, absorpcyjności termicznej przegród wydzielających, grubości, gęstości, przewodności termicznej i wilgotności materiałów izolacyjnych itp. Pożar jest zjawiskiem trudnym do opisanego w sensie analitycznym, a dostępne modele są niespójne i mogą prowadzić do niepoprawnych oszacowań. W każdym przypadku wywołuje zmiany warunków środowiska skutkujące nieliniowym zachowaniem się konstrukcji. Nieliniowość zjawisk znacznie komplikuje analizy i potęguje efekt różnego typu imperfekcji wpływających na rzeczywistą nośność konstrukcji. Co więcej, sam sposób rozwoju pożaru (jego dynamika) istotnie wpływa na wielkość, kluczowych z punktu widzenia oceny nośności, parametrów wytrzymałościowych materiału, w tym m.in. wartości temperatury krytycznej, wielkości naprężeń niszczących, towarzyszących odkształceń termicznych oraz odkształceń pełzania itp. Wraz ze wzrostem temperatury zmniejszeniu ulegają wartości zarówno granicy plastyczności stali, jak i modułu sprężystości podłużnej, stanowiących podstawę oceny nośności konstrukcji za pomocą procedur normowych – zarówno w normalnych warunkach projektowych, jak i w wyjątkowej sytuacji pożaru.
3. Do przeprowadzenia probabilistycznej oceny nośności konstrukcji w warunkach pożaru niezbędną jest znajomość statystyk dotyczących wymienionych wcześniej parametrów (charakterystyk

użytkowych opisujących możliwie precyzyjnie środowisko pożaru (takich jak np. gęstość obciążenia ogniowego odpowiadająca danemu sposobowi użytkowania, wielkość strefy pożarowej, wskaźnik otworów, parametry cieplne materiałów konstrukcyjnych i przegród wydzielających itp.), podających informacje zarówno na temat wartości średniej danej wielkości, wariancji oraz typu rozkładu. Dodatkowo niezbędna jest znajomość analogicznych danych odnoszących się do zależnych od temperatury parametrów wykorzystywanych w dostępnych, normowych procedurach oceny konstrukcji, np. zmienności losowego współczynnika redukcyjnego losowej wytrzymałości konstrukcji –  $k_{\theta}(\varpi)$  czy losowego współczynnika modelu wyteżenia konstrukcji w warunkach temperatur pożarowych –  $a_{\theta}(\varpi)$ . Na chwilę obecną pewne statystyki dot. charakterystyk parametrów użytkowych środowiska pożaru można odnaleźć głównie w literaturze amerykańskiej, w mniejszym stopniu – w literaturze azjatyckiej: japońskiej czy indyjskiej. Część danych jest jednak obciążona specyfiką rozwiązań stosowanych na tamtejszych rynkach i ma ograniczoną przydatność w warunkach europejskich. Statystyki europejskie są niezwykle ubogie, a wiele krajów nie prowadzi ich w ogóle.

4. Unikalną część pracy stanowi zaproponowany sposób opisu modelu losowej nośności konstrukcji w sytuacji pożaru, ujęty wzorami (2) i (3) oraz (9) i (10), będący sformułowaną przez Autora nowatorską i oryginalną propozycją rozwinięcia modeli stosowanych wspólnie do opisu losowej nośności konstrukcji w warunkach normalnych. Z uwagi na unikalny charakter tej propozycji, ze zrozumiałych względów nie istnieją również żadne statystyki, które pozwoliłyby na ocenę zmienności parametrów  $T(\varpi)$ ,  $D(\varpi)$  oraz wspomnianych wcześniej –  $a_{\theta}(\varpi)$  czy  $k_{\theta}(\varpi)$ , umożliwiających przeprowadzenie probabilistycznej oceny nośności konstrukcji z uwzględnieniem warunków pożarowych.
5. Jak wynika z analizy wyników badań doświadczalnych, stal jest tworzywem konstrukcyjnym wrażliwym na prędkość nagrzewania oraz prędkość

obciążania czy odkształcania. Biorąc pod uwagę spostrzeżenia wypływające z zaprezentowanych badań, należy podkreślić szczególnie te, które znajdują bezpośrednie przełożenie na proces projektowania. Stwierdzono m.in., że odkształcenia konstrukcji spowodowane pełzaniem są odwrotnie proporcjonalne do tempa nagrzewania. Ponieważ przepisy techniczno-budowlane z reguły precyzują w odniesieniu do głównych elementów nośnych odpowiednio wyższe wymagania w zakresie odporności ogniowej, w praktycznym projektowaniu przekłada się to zwykle na lepsze (bardziej efektywne) zabezpieczenie tej klasy elementów przed wpływami ognia. W efekcie skutkuje to ich powolniejszym nagrzewaniem, co może doprowadzić do większych, wywołanych pełzaniem, odkształceń tychże elementów. Uzasadnia to potrzebę zwrócenia szczególnej uwagi na wskazany problem w procesie projektowania tychże elementów.

6. Autor z pewnym przerażeniem obserwuje bezkrytyczne podejście niektórych młodych adeptów sztuki inżynierskiej do wyników analiz komputerowych. W przypadku analiz dotyczących zjawisk skomplikowanych i silnie nieliniowych niezbędne są odpowiednie doświadczenie oraz wiedza teoretyczna, pozwalające na poprawną ocenę uzyskanych rezultatów. Szczególnie w przypadku analiz pożarowych dostępne na rynku systemy obliczeniowe oferują niezwykle duży potencjał i stanowią znakomite narzędzie do prowadzenia badań i oceny zjawisk, wyłącznie jednak w sensie jakościowym. W sensie ilościowym ich wiarygodność na obecnym etapie można uznać za umiarkowaną, ponieważ kalibracja modelu rzeczywistej konstrukcji na podstawie ograniczonych rezultatów badań laboratoryjnych prowadzonych z wykorzystaniem wyselekcjonowanych elementów konstrukcyjnych nie musi prowadzić do wiarygodnych oszacowań odnoszących się do całego ustroju nośnego, złożonego z układu pojedynczych elementów połączonych ze sobą w sposób ograniczający swobodę przemieszczeń i odkształceń.

## Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, PKN, Warszawa 2006.
- [2] Biegus A., *Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [3] 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.
- [4] ANSI/AISC 360-10, An American National Standard, Specification for Structural Steel Buildings,

- American Institute of Steel Construction, Chicago, June 22, 2010.
- [5] AISC Steel Design Guide 19, Fire Resistance of Structural Steel Framing, American Institute of Steel Construction, Chicago 2003.
- [6] NZS 3404: Part 1: 1997, Steel Structures Standard, Standards New Zealand, Wellington 1997.
- [7] PN-B-03200:1990, Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie, PKN, Warszawa 1990.
- [8] ECCS-TC3:1985, *Design manual on the European recommendations for the fire safety of steel structures*, European Convention for Constructional Steelwork, Technical Note No.35, Brussels 1985.
- [9] Lee J.H., Mahendran M., Mäkeläinen P., *Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures*, "Journal of Constructional Steel Research", 59 (2003), pp. 1517–1532.
- [10] Król P., *Ocena odporności ogniowej stropów na belkach stalowych*, BiTP Vol. 35 Issue 3, 2014, pp. 73-96, DOI:10.12845/bitp.35.3.2014.7.
- [11] Murzewski J., *Niezawodność konstrukcji inżynierskich*, Arkady, Warszawa 1989.
- [12] Woliński Sz., Wróbel K., *Niezawodność konstrukcji budowlanych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2001.
- [13] Nowak A.S., Collins K.R., *Reliability of Structures*, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2013, s. 391.
- [14] Melchers R.E., *Structural reliability analysis and prediction*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York, 2002, s. 437.
- [15] Thoft-Christensen P., Baker M. J., *Structural reliability theory and its applications*, Springer-Verlag, New York 1982, s. 267, DOI: 10.1007/978-3-642-68697-9.
- [16] Murzewski J., Sowa A., Domański T., *Probabilistyczne koncepcje obliczeń odporności ogniowej konstrukcji*, Materiały XXX Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1984, t.1, s. 231–236.
- [17] Murzewski J., Sowa A. Domański T., *Probabilistyczne koncepcje oceny bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji*, Archiwum Inżynierii Łądowej, t. XXXIII, z. 3/1987, s. 319–329.
- [18] Murzewski J., *Modele probabilistyczne nośności ogniowej elementów konstrukcji stalowych*, Materiały XXXV Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Wrocław-Krynica 1989, s. 105–110.
- [19] Murzewski J., *Probabilistyczna ocena ognioodporności konstrukcji zespolonych*, Materiały VI Konferencji Naukowej „Konstrukcje Zespolone”, Zielona Góra, 20–21.06.2002, s. 125–136.
- [20] Maślak M., *Trwałość pożarowa stalowych konstrukcji prętowych*, Monografia 370, Seria Inżynieria Łądowa, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
- [21] Ellingwood B., Galambos T.V., MacGregor J.G., Cornell C.A., *Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58*, National Bureau of Standards, NBS Special Publication 577, Washington, DC, 1980.
- [22] Ellingwood B., MacGregor J.G., Galambos T.V., Cornell C.A., *Probability Based Load Criteria: Load Factors and Load Combinations*, "Journal of the Structural Division", ASCE, Vol. 108, No. ST5, May 1982, pp. 978–997.
- [23] Galambos T.V., Ellingwood B., MacGregor J.G., Cornell C.A., *Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice*, "Journal of the Structural Division", ASCE, Vol. 108, No. ST5, May 1982, pp. 959–977.
- [24] PN-EN ISO 6892-2:2011. Metale. Próba rozciągania. Część 2: Metoda badania w podwyższonej temperaturze, PKN, Warszawa 2011.
- [25] Bednarek Z., Kamocka R., *The Heating Rate Impact on Parameters Characteristic of Steel Behaviour under Fire Conditions*, "Journal of Civil Engineering and Management", 2006, Vol. XII, No.4, pp. 269–275.
- [26] Outinen J., *Mechanical Properties of Structural Steels at High Temperatures and After Cooling Down*, Helsinki University of Technology, Laboratory of Steel Structures Publications 32, Espoo 2007.
- [27] RILEM 44-PHT (Properties of Materials at High Temperatures), Anderberg Y., Behaviour of Steel at High Temperatures, Division of Building Fire Safety and Technology, Report LUTVDG/TVBB-3008, Lund, Sweden, 1983.
- [28] Anderberg Y., *Modelling Steel Behaviour*, "Fire Safety Journal", Vol. 13, No.1, 1988, pp. 17–26.
- [29] Król P., Kwaśniewski L., Łącki K., *Wybrane zagadnienia modelowania słupów stalowych, poddanych oddziaływaniom pożarowym*, BiTP Vol. 36 Issue 4, 2014, pp. 65–76, DOI:10.12845/bitp.36.4.2014.7.

\* \* \*

**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 równolegle projektowaniem konstrukcji oraz działalnością ekspercką w budownictwie. W 2014 roku uzyskał tytuł Rzeczoznawcy 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 oraz akcji TU1402 „Quantifying the value of structural health monitoring” (od 2014 roku). Odbył 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. Odznaczony 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.