



ZAKŁAD NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI
KATEDRA MECHANIKI KONSTRUKCJI
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, ARCHITEKTURY
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
POLITECHNIKA ŁÓDZKA

Michał Strąkowski

ROZPRAWA DOKTORSKA

Niezawodność wybranych konstrukcji stalowych w warunkach pożaru

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Marcin Kamiński

Łódź 2016

Rozprawa poświęcona jest analizom niezawodności wybranych konstrukcji stalowych w warunkach pożaru z użyciem Stochastycznej Metody Elementów Skończonych. Składa się ona ze wstępu, podstaw matematycznych, opisu Stochastycznej Metody Elementów Skończonych, części poświęconej eksperymentom numerycznym, podsumowania i wniosków, odniesień literaturowych oraz czterech załączników. Praca ta jest zwięźczeniem moich badań prowadzonych w latach 2010-2015. W tym czasie odbyłem studia doktoranckie na wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, opublikowałem, jako współautor trzy publikacje naukowe, które ukazały się w międzynarodowych czasopismach oraz przedstawiłem wyniki swojej pracy na dwóch konferencjach naukowych.

Głównym celem pracy jest weryfikacja czy Stochastyczna Metoda Elementów Skończonych Wyższych Rzędów zaimplementowana za pomocą uogólnionej metody perturbacji stochastycznej 10ego rzędu może być stosowana do określania niezawodności konstrukcji stalowych z oddziaływaniem pożaru. Założeniem metody perturbacyjnej jest rozwinięcie w szereg Taylora wszystkich zmiennych losowych oraz wszystkich funkcji stanu wokół ich wartości średnich. Podejście zastosowane w pracy wykorzystuje takie zagadnienia jak klasyczna Metoda Elementów Skończonych rozwiniętą w Metodę Funkcji Odpowiedzi, która bazuje na Metodzie Najmniejszych Kwadratów. Wymienione metody mają na celu uwzględnienie losowego charakteru oddziaływań konstrukcji oraz parametrów materiałowych stali. Opracowanie to opiera się na równaniach równowagi termiczno-sprężystej zarówno w formie stacjonarnej, jak i niestacjonarnej przepływu ciepła w materiałach sprężystych, izotropowych. Ważnym elementem zawartym w pracy jest uzależnienie parametrów materiałowych (termicznych oraz mechanicznych) stali od jej temperatury. Do właściwości uzależnionych od temperatury należą: moduł Younga, granica plastyczności, przewodność cieplna, ciepło właściwe oraz rozszerzalność termiczna. Warunki pożaru zostały odwzorowane przy pomocy tzw. krzywych pożarowych, o których mowa w odpowiednich częściach obowiązujących norm projektowych – Eurokod. Uszczegóławiając, głównym celem pracy jest określenie zakresu wejściowego współczynnika wariancji zmiennej losowej α , dla którego można efektywnie stosować Stochastyczną Metodę Elementów Skończonych Wyższych Rzędów. Następnym celem niniejszej rozprawy jest określenie wskaźnika niezawodności konstrukcji stalowych, na które oddziałują podwyższone temperatury oraz stworzenie algorytmu obliczeniowego, który umożliwi zastosowanie Stochastycznej Metody Elementów Skończonych Wyższych Rzędów do określania prawdopodobieństwa awarii konstrukcji.

Wstęp pracy to prezentacja różnych metod szacowania bezpieczeństwa konstrukcji stalowych takich jak: metoda analityczna, deterministyczna metoda częściowych współczynników bezpieczeństwa, metoda symulacji Monte-Carlo oraz metody perturbacyjne: metoda pierwszego rzędu (FORM) i metoda drugiego rzędu (SORM). Rozdział poświęcony podstawom matematycznym zawiera opisy oraz niezbędne równania zagadnień zawartych w niniejszej dysertacji w ujęciu probabilistycznym, statystycznym, podstawy teoretyczne uogólnionej metody perturbacji stochastycznej oraz równania wariacyjne termosprężystości uwzględniające ich losowy charakter. W dalszej części rozdziału przedstawiono eksperymenty numeryczne wraz z zastosowaniem Stochastycznej Metody Elementów Skończonych Wyższych Rzędów wykonane przy użyciu programu ROBOT oraz programu ABAQUS. Rozdział poświęcony eksperymentom numerycznym zawiera różnego rodzaju przykłady termo-sprężystego zachowania konstrukcji stalowych, w których właściwości materiałowe stali zależą od jej temperatury. Przykłady te odnoszą się do stacjonarnej oraz niestacjonarnej przepływu ciepła. Pierwsze dwa przykłady to zastosowanie zagadnienia niesprężonego, stacjonarnej przepływu ciepła w elemencie. Następne przykłady są rozwinięciem oraz uszczegółowieniem poprzednich badań. Dalsze obliczenia obejmują dwustopniową analizę termo-mechaniczną oraz najbardziej rozwiniętą w pełni sprężoną analizę niestacjonarnej wymiany ciepła. Każde z wymienionych doświadczeń wykorzystuje Stochastyczną Metodę Perturbacji Stochastycznej Wyższego Rzędu jako narzędzie do numerycznego modelowania niezawodności konstrukcji. Cztery, najważniejsze z punktu widzenia dysertacji, eksperymenty numeryczne – (a) probabilistyczna, sprężysta analiza pręta stalowego, umocowanego na obu końcach, na którego długości oddziałują podwyższone temperatury, (b) wysoka wieża telekomunikacyjna poddana oddziaływaniu pożarowemu spowodowanemu spalaniem traw i krzewów występujących w jej otoczeniu (wykonana dwa różne modele), (c) belka stalowa wykonana z profilu dwuteowego walcowanego na gorąco (jest to typowy element nośny konstrukcji dachu), (d) nieliniowa deformacja próbki pręta okrągłego o własnościach sprężysto-plastycznych poddana obciążeniu pożarowemu. Powyższe przykłady przeprowadzono w celu weryfikacji wpływu losowego charakteru zjawiska pożaru, uwzględnienia w obliczeniach probabilistycznego charakteru pojawienia się pożaru oraz w celu sprawdzenia konsekwencji wystąpienia pożaru w odniesieniu do różnego typu konstrukcji stalowych. Należy zaznaczyć, że w przeprowadzonych analizach zmienną losową zawsze była temperatura pożaru, która powoduje pojawienie się silnych nieliniowości modelu ze względu na redukcje parametrów materiałowych stali w podwyższonych temperaturach. Przedstawione w pracy probabilistyczne określanie niezawodności konstrukcji jest

nowatorskie i stanowi alternatywę do stosowanego powszechnie podejścia deterministycznego, w którym wymagany poziom bezpieczeństwa konstrukcji zapewniony jest przez stosowanie normowych, częściowych współczynników bezpieczeństwa. Uwzględniają one losowy charakter oddziaływań klimatycznych (śnieg, wiatr, oblodzenie, pożar), sposób przyłożenia obciążenia na konstrukcję, parametry materiałowe stali oraz niepewność przyjętego schematu statycznego konstrukcji. Redukcje mechanicznych właściwości stali (moduł Younga, granica plastyczności) oraz fizycznych parametrów (przewodność cieplna, ciepło właściwe, współczynnik rozszerzalności termicznej) zostały określone zgodnie z zaleceniami normy Eurokod. Ważnym elementem tej pracy jest przeprowadzone sprawdzenie, według którego do wyboru funkcji odpowiedzi konstrukcji można z powodzeniem stosować różnego typu funkcje matematyczne (wielomianowa, wykładnicza, potęgowa, hiperboliczna). Określono charakterystyki probabilistyczne (wartość oczekiwana, współczynnik wariancji, skośność oraz kurtoza) dla temperatur, przemieszczeń oraz naprężeń oraz przeprowadzono sprawdzenie zbieżności tych wielkości. Należy zaznaczyć, że wyniki otrzymane przy użyciu HOSFEM zostały zweryfikowane metodą analityczną oraz dobrze znaną metodą symulacji Monte-Carlo. Ostatecznie określony zakres stosowalności metody HOSFEM jest potwierdzony poprzez zgodności z wynikami otrzymanymi przy użyciu dwóch wspomnianych powyżej metod. Wyznaczenie skośności oraz kurtozy dla różnych funkcji stanu ma na celu uzyskania pełniejszego obrazu rozkładu gęstości prawdopodobieństwa oraz precyzyjniejsze określenie czy jest od zgodny z rozkładem Gaussa.

Praca ta zawiera komputerowe, zależne od czasu t , symulacje stochastycznej niezawodności konstrukcji, w których wskaźnik niezawodności β również jest zależny od czasu t . Wyznaczenie czasu, po którym konstrukcja nie spełnia wymogów bezpieczeństwa jest szczególnie istotne ze względów bezpieczeństwa osób w niej przebywających. Informacja ta jest niezwykle istotna w kontekście odporności ogniowej, którą muszą spełniać konstrukcje stalowe (np. REI120 oznacza konieczność zapewnienia nośności konstrukcji przez 120minut od chwili rozpoczęcia pożaru, dla budynków wysokiego ryzyka).

Ostatecznym wnioskiem wynikającym z niniejszej rozprawy jest możliwość skutecznego stosowania Stochastycznej Metody Elementów Skończonych Wyższego Rzędu, jako narzędzia do określania niezawodności konstrukcji stalowych w warunkach pożaru, jeśli zmienność parametru losowego (temperatura pożaru) nie przekracza 5% w porównaniu z jej wartością oczekiwaną. Zakres ten może być rozszerzony stosując rozwinięcie w szereg Taylora o kolejne wyrazy oraz stosując metody wyższych rzędów niż zawarty w pracy 10 rząd.

Arkadiusz