

Współczesne możliwości badania i symulacji nośności konstrukcji metalowych

Modern capabilities of research and simulation strength of metal structures

JERZY MADEJ
MATEUSZ ŚLIWKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.1.24>

Zastosowanie współczesnych technik pomiarowych i obliczeniowych otwiera nowe możliwości w zakresie obliczania i badania konstrukcji metalowych. Zaprezentowano badania prowadzone za pomocą zestawu pomiarowego MTS w celu weryfikacji modelu obliczeniowego konstrukcji zabezpieczenia dachowego, zapewniającego bezpieczeństwo konserwatorów pracujących na dachach hal przemysłowych.

SŁOWA KLUCZOWE: metody numeryczne, badania wytrzymałościowe

The use of modern measurement techniques and computing methods opens up new possibilities for the calculation and testing of metal structures. This article presents research conducted using measuring set MTS to verify the computational model of the structure of the roof protection on industrial buildings.

KEYWORDS: numerical methods, strength tests

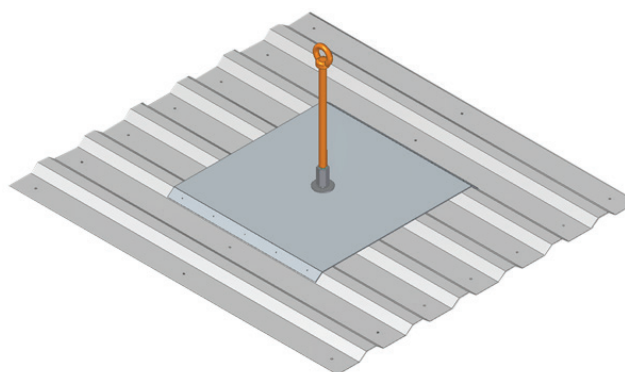
Dostępne programy obliczeniowe i urządzenia pomiarowe otwierają przed współczesnym inżynierem nowe możliwości w zakresie projektowania i badania konstrukcji metalowych. Nowoczesne systemy obliczeniowe pozwalają na projektowanie i obliczanie w oparciu o MES nowych rozwiązań konstrukcyjnych oraz symulację pracy konstrukcji w różnych warunkach eksploatacyjnych. Każdy system obliczeniowy MES wymaga wprowadzenia charakterystyk materiałowych poszczególnych części składających się na konstrukcję, wzajemnego powiązania tych części, wykonania regularnej i odpowiednio gęstej siatki elementów skończonych oraz określenia warunków brzegowych. Podstawą do określenia charakterystyk materiałowych są badania, wykonywane najczęściej na maszynach wytrzymałościowych z wykorzystaniem próbek materiałów, z których tworzy się konstrukcję. Wyniki obliczeń w sposób istotny zależą jednak od stopnia poprawności modelu dyskretnego konstrukcji. Jedyną metodą walidacji tych obliczeń jest zbadanie rzeczywistej konstrukcji. Badania te pozwalają określić rzeczywistą nośność, przemieszczenia oraz deformacje konstrukcji i skonfrontować je z wynikami obliczeń numerycznych.

Tego typu badań nie można przeprowadzić na klasycznych maszynach wytrzymałościowych. Takie możliwości stwarzają jednak nowoczesne systemy pomiarowe, np. układ pomiarowy firmy MTS. Jego podstawową część stanowią siłowniki serwohydrauliczne, sterowane sygnałem pochodzącym z czujnika siły, przemieszczenia, bądź sygnałem zdefiniowanym poprzez odpowiednią kombinację tych wielkości. W dalszej części niniejszego artykułu przedstawiono walidację modelu dyskretnego konstrukcji zabez-

pieczenia dachowego za pomocą układu pomiarowego MTS oraz badania próbek i gotowych konstrukcji przeprowadzone w Laboratorium Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.

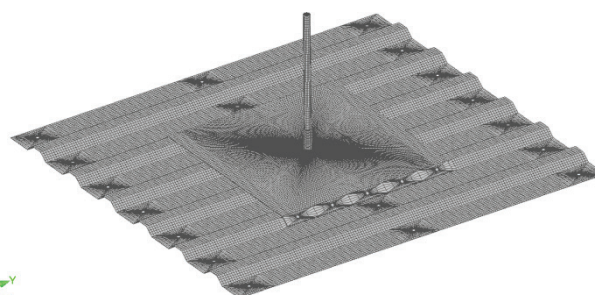
Model geometryczny i model dyskretny

Przedmiotem analizy MES była konstrukcja zabezpieczenia dachowego przeznaczonego dla osób dokonujących prac konserwatorskich na dachach hal fabrycznych. Moduł podstawowy tej konstrukcji, na który składa się stalowa blacha i ramię zakończone uchem, mocuje się do blachy trapezowej pokrycia dachowego. Kompletny układ zabezpieczający składa się z kilkunastu modułów podstawowych w ilości zależnej od powierzchni dachu i liczby osób jednocześnie na nim pracujących. Przygotowanie bezpiecznego miejsca pracy polega na przeciągnięciu przez ucha ramion stalowej liny i połączeniu obu jej końców stalowym zaciskiem. Pracownicy przystępują do prac konserwacyjnych po przypięciu się do liny zabezpieczającej. Model geometryczny podstawowego modułu konstrukcyjnego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Model geometryczny modułu podstawowego

Model geometryczny został podzielony na części w celu uzyskania regularnej siatki heksagonalnej. Podziału tego dokonano w środowisku FEMAP v.11 z NX Nastran [1]. Siatkę elementów przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model dyskretny

* Dr hab. inż. Jerzy Madej (juma@ath.bielsko.pl), inż. Mateusz Śliwka (sliwkamateuszjan@gmail.com) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej



Do dyskretyzacji blach użyto 41 496 elementów typu Plate; pozostałe części konstrukcji modelowano 4768 elementami solid. Warunki brzegowe zdefiniowano za pomocą elementów typu Rigid w węzłach odpowiadających miejscom mocowania blachy trapezowej do konstrukcji dachu i miejscom mocowania blachy modułu konstrukcji do blachy trapezowej.

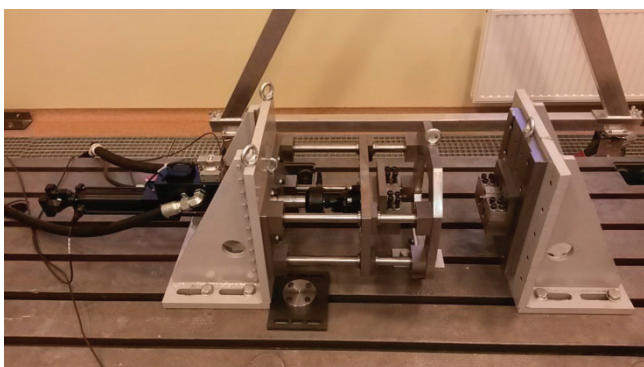
Opis zestawu pomiarowego do wyznaczenia stałych materiałowych

Do przeprowadzenia obliczeń konieczne jest wyznaczenie stałych materiałowych dla materiału, z którego wykonana jest konstrukcja. Stałe te wyznaczono w statycznej próbie rozciągania z wykorzystaniem zestawu pomiarowego MTS. Na zestaw pomiarowy znajdujący się w ATH składają się dwa siłowniki hydrauliczne: serwohydrauliczny siłownik liniowy do badań statycznych, dynamicznych i zmęczeniowych o skoku 150 mm, realizujący znamionową siłę ± 25 kN, oraz serwohydrauliczny siłownik liniowy do badań statycznych i niskoczęstotliwościowych obciążeń zmiennych o skoku 500 mm i sile znamionowej na ściskanie 160 kN i 90 kN na rozciąganie (rys. 3).

Konfiguracja zawiera wzmacniacze pomiarowe umożliwiające programowe wybieranie rodzaju pracy. Wzmacniacz ma opcje autozerowania i kalibracji dowolnych czujników oraz zakresów pomiarowych bezpośrednio przez użytkownika. Siłownikami kieruje cyfrowy, wielokanałowy układ sterowania, zapewniający sterowanie w funkcji sprzężenia zwrotnego. Całość zestawu uzupełniają płyty rowkowe i konstrukcja ramowa do mocowania siłowników. Konstrukcja taka zapewnia możliwość łatwego przesu-



Rys. 3. Siłownik MTS



Rys. 4. Stanowisko badawcze z adapterem do badania próbek płaskich



Rys. 5. Próbkę z ekstensometrem MTS

wania i zmiany przestrzeni roboczej. Stałe materiałowe wyznaczono w statycznej próbie rozciągania na płaskich próbkach wiosetkowych ze stali, z której wykonana jest konstrukcja zabezpieczenia dachowego. Próbę przeprowadzono z wykorzystaniem mniejszego z siłowników zestawu. Zastosowano adapter wykonany we własnym zakresie do badania próbek płaskich (rys. 4).

Parametry materiałowe wyznaczono, stosując podczas próby ekstensometr MTS o bazie 25 mm (rys. 5).

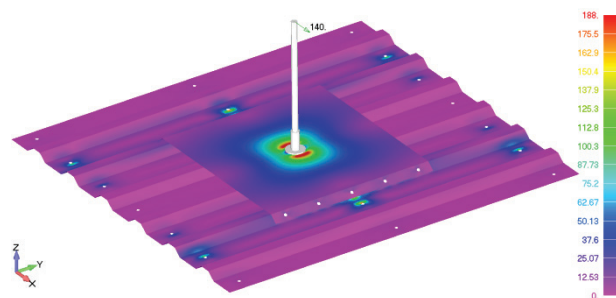
Procedura badawcza, realizująca próbę rozciągania zgodnie z [2], została przygotowana w środowisku programowania MTS TestSuite [3]. Zarejestrowaną podczas próby wartość stałych materiałowych zestawiono w tablicy.

TABLICA. Stałe materiałowe

Moduł Younga E , MPa	206767,84
Umowna granica sprężystości $R_{0,05}$, MPa	177,92
Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$, MPa	188,32
Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	321,54

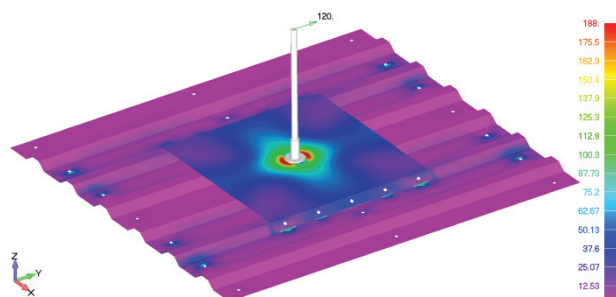
Obliczenia konstrukcji

Na podstawie wprowadzonych do programu obliczeniowego MES stałych materiałowych przeanalizowano konstrukcję dla dwóch schematów obciążeń – wzdłuż przetłoczeń blachy trapezowej (kierunek y) i w kierunku poprzecznym (kierunek x). Wartość siły dobrano tak, aby wywołać w konstrukcji naprężenia zredukowane rzędu 188 MPa, co odpowiada wyznaczonej doświadczalnie umownej granicy plastyczności. Dla siły działającej w kierunku osi x wartość ta wynosi 140 N. Odpowiada jej przemieszczenie końca ramienia równe 19,56 mm. Uzyskany z obliczeń rozkład naprężeń zredukowanych w blachach przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Kontur naprężeń zredukowanych w elementach płytowych dla obciążenia w kierunku poprzecznym do przetłoczeń

Dla siły działającej w kierunku osi y wartość ta wynosi 120 N. Odpowiada jej przemieszczenie końca ramienia równe 20,39 mm. Uzyskany z obliczeń rozkład naprężeń zredukowanych w blachach przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Kontur naprężeń zredukowanych w elementach płytowych dla obciążenia w kierunku wzdłuż przetłoczeń

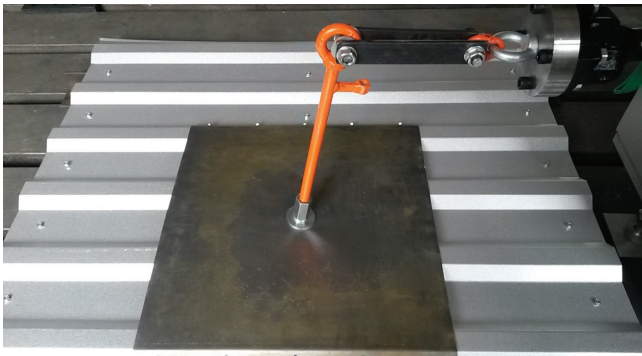
Walidacja modelu dyskretnego

Wartości przemieszczeń końca ramienia wywołanych przez rozważane siły posłużyły do weryfikacji poprawności modelu dyskretnego. Wyliczone wartości przemieszczeń zostały przyjęte jako graniczne wartości przemieszczeń siłownika MTS w próbie obciążenia rzeczywistej konstrukcji. Poprawność modelu dyskretnego zweryfikowano poprzez odpowiadającą tym przemieszczeniom wartość obciążenia, zarejestrowaną przez czujnik siły.

Na potrzeby badania wykonano konstrukcję ramową odpowiadającą konstrukcji podłoża dachowego. Do tej konstrukcji przymocowano blachę trapezową z zabezpieczeniem. Badania przeprowadzono w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach na dwóch egzemplarzach konstrukcji (rys. 8 i 9). Procedurę badania przygotowano w środowisku MTS TestSuite.



Rys. 8. Badanie konstrukcji w kierunku prostopadłym do przetłoczeń blachy trapezowej



Rys. 9. Badanie konstrukcji w kierunku równoległym do przetłoczeń blachy trapezowej

W przypadku obciążenia działającego prostopadle do przetłoczeń blachy trapezowej przemieszczeniu siłownika o wartości 19,56 mm odpowiadała wartość obciążenia 145 N, zatem względny błąd procentowy w stosunku do wartości siły zadanej w obliczeniach numerycznych wynosi 3,45%.

Dla obciążenia działającego równolegle do przetłoczeń blachy trapezowej przemieszczeniu siłownika o wartości 20,39 mm odpowiadała siła 128 N, co w stosunku do wartości siły przyjętej w obliczeniach daje błąd rzędu 6,25%.

Badanie nośności odlewów magnezowych

Przykładem badań konstrukcji metalowych, prowadzonych w laboratorium ATH, jest sprawdzenie nośności odlewów magnezowych produkowanych na potrzeby branży

motoryzacyjnej przez firmę Shiloh Industries w Bielsku-Białej. Odlew o długości 1500 mm poddano niszczącej próbie rozciągania siłownikiem o sile znamionowej 90 kN (rys. 10).



Rys. 10. Odlew magnezowy na stanowisku badawczym

Partia 10 odlewów uzyskała średnią wytrzymałość na rozciąganie rzędu 50,72 kN przy odchyleniu standardowym 1,4. Średnie maksymalne wydłużenie wynosiło 26,28 mm. Pęknięcia wszystkich odlewów występowały w tej samej strefie.

Lokalizacja miejsca pęknięcia pozwoliła producentowi odlewów zweryfikować parametry procesu odlewania. Odtąd jakiegokolwiek modyfikacje technologiczne lub zmiany wprowadzane w procesie odlewania są regularnie badane na urządzeniu MTS, zanim produkt zostanie wprowadzony do produkcji masowej.

Podsumowanie

Niewielka rozbieżność pomiędzy siłą zadaną w symulacjach numerycznych a wartością zarejestrowaną w badaniach dla zadanego przemieszczenia świadczy o poprawnym wykonaniu modelu numerycznego. Pozytywne weryfikacja modelu dyskretnego pozwala na jego wykorzystanie do przeprowadzenia wiarygodnych symulacji w zakresie oszacowania nośności konstrukcji w zależności od materiału poszycia dachowego, rodzaju przetłoczeń blachy trapezowej i różnych kombinacji obciążeń, lub dokonania modyfikacji konstrukcji w celu zwiększenia jej nośności.

To swoiste sprzężenie zwrotne pomiędzy symulacjami numerycznymi i badaniami doświadczalnymi konstrukcji odgrywa coraz większą rolę w miarę postępującego rozwoju narzędzi obliczeniowych i nowoczesnych, precyzyjnych systemów pomiarowych. Coraz szerszego znaczenia nabiera również pojęcie próbk. Nie jest nią już tylko przedmiot o małych gabarytach dostosowanych do uchwytów klasycznej maszyny wytrzymałościowej, lecz wielkogabarytowa konstrukcja, której zachowanie pod wpływem różnorodnych czynników można precyzyjnie badać.

LITERATURA

1. Siemens Inc. „NX Nastran Numerical Methods User's Guide”. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. USA 2011.
2. PKN. „Stacyjna próba rozciągania PN-EN 10002-1”. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2004.
3. MTS System Corporation „Multipurpose Elite User Guide”. USA: MTS, 2013.