

Walidacja hierarchiczna modeli MES na potrzeby wyznaczania zdolności do obrotu węzłów konstrukcji stalowych

Hierarchical validation of FEM models for the needs of rotation capacity determination of steel structure joints

KRZYSZTOF OSTROWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.203>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono wyniki wieloetapowej walidacji hierarchicznej zaawansowanych modeli MES stosowanych do określania zdolności węzłów stalowych do obrotu. Walidację wykonano dla modeli o różnym stopniu złożoności. Przeprowadzono analizę porównawczą modeli MES z wynikami własnych badań laboratoryjnych. Opracowana metodologia kształtowania charakterystyk materiałowych jest podstawą do dalszych analiz zaawansowanych modeli połączeń doczołowych belki do słupa w obszarze prognozowania krzywej zdolności do obrotu ($M-\phi$).
SŁOWA KLUCZOWE: walidacja modeli MES, charakterystyka materiałowa, zdolność węzłów do obrotu

The paper presents results from multistage hierarchical validation of advanced FEM models used to define rotation capacity of steel joints. Validation process has been carried out for different models with various level of complexity. Comparative analysis of the FEM models has been carried out in relation to results obtained in laboratory tests. Developed methodology of the formation of material characteristic is a base for further analysis of advanced models of beam-to-column end-plate connections in the area of forecasting the rotation capacity curve ($M-\phi$).

KEYWORDS: validation of FEM models, material characteristics, rotation capacity of joints

Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów metoda elementów skończonych stała się powszechnie używanym narzędziem, które umożliwia rozpoznanie skomplikowanych zjawisk zachodzących w badanych obiektach. Wyniki MES można uznać za zadowalające, jeżeli są porównywalne z wynikami badań laboratoryjnych. Aby uzyskać zbieżne wyniki, konieczne jest dostrojenie modeli MES. W tym celu stosuje się metodę walidacji hierarchicznej modeli numerycznych w analizie porównawczej modeli o różnym stopniu złożoności z wynikami badań laboratoryjnych [1]. Podstawowym kryterium w procesie walidacji jest poziom dopasowania charakterystyki opisującej zachowanie badanego obiektu poddanego analizie MES z charakterystyką otrzymaną w badaniach laboratoryjnych [2, 3]. Walidacja obejmuje: opracowanie charakterystyki materiałowej, określenie poziomu doszczegółowienia detali geometrycznych modelu MES, dobór powierzchni kontaktowych oraz typu elementów skończonych.

Program badawczy obejmował walidację modeli wykorzystujących stale konstrukcyjne S235 i S355 oraz śruby o wysokiej wytrzymałości – klasy 10.9 (ISO4014).

Modele materiałowe

W normie [4] określono następujące modele materiałowe:

- model sprężysto-plastyczny bez wzmocnienia,
- model sprężysto-plastyczny z minimalnym wzmocnieniem,

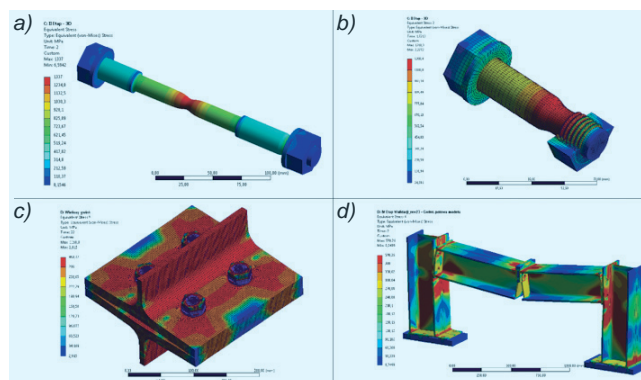
- model sprężysto-plastyczny z liniowym wzmocnieniem,
- model realistyczny otrzymany w efekcie modyfikacji eksperymentalnej zależności naprężenie–odkształcenie (uzyskanej na podstawie badań laboratoryjnych).

Pierwsze trzy modele reprezentują podejście konserwatywne i są szeroko stosowane w badaniach przemysłowych inżynierii materiałowej. Charakterystyki materiałowe, w których odkształcenie nie jest funkcją logarymiczną, są pewnego rodzaju gwarancją niezawodności optymalizowanych obiektów, ponieważ w takich przypadkach analiza numeryczna zawsze wykazuje wcześniejsze osiągnięcie stanu dopuszczalnego naprężenia i odkształcenia w porównaniu z zastosowaniem logarymicznej charakterystyki $\sigma-\epsilon$. Jedyłą charakterystyką, która zapewnia wierne odwzorowanie deformacji badanego obiektu, jest charakterystyka naprężenie–odkształcenie wyznaczona na podstawie badań laboratoryjnych i odniesiona do chwilowych pól przekroju poprzecznego próbki rozciąganej, a więc obrazująca naprężenie rzeczywiste w odkształconym przekroju próbki.

Etapy walidacji hierarchicznej

Procedura walidacji hierarchicznej modeli MES obejmowała następujące etapy:

- I etap – rozciąganie próbek stalowych i próbek śrub (rys. 1a),
- II etap – rozciąganie zestawów śrub w konfiguracji: śruba–podkładka–nakrętka (rys. 1b),
- III etap – rozciąganie króćców teowych (rys. 1c),
- IV etap – zginanie doczołowego połączenia belki do słupa w konfiguracji ramy portalowej (rys. 1d).



Rys. 1. Modele MES użyte w wieloetapowej walidacji hierarchicznej: a) I etap, b) II etap, c) III etap, d) IV etap

Na pierwszym etapie walidacji wyznacza się charakterystykę siła–odkształcenie ($F-\epsilon$) próbek stali pozyskanych z profili stalowych (HEA 240 oraz HEB 240) oraz blach (o grubości 12 i 20 mm) użytych na trzecim etapie walidacji.

Dostrojenie charakterystyk materiałowych osiąga się dzięki modyfikacji krzywej naprężenie–odkształcenie ($\sigma-\epsilon$) do takiej formy, aby uzyskać akceptowalną zgodność

* Mgr inż. Krzysztof Ostrowski (krzysztof.ostrowski@mta-online.net) – MTA Engineering Sp. z o.o.

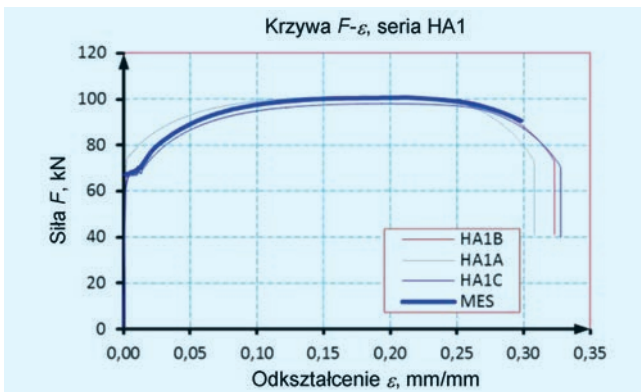
wyników z badaniami laboratoryjnymi. Zakres, dla którego znana jest charakterystyka σ - ε , wyznacza się ze wzorów:

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

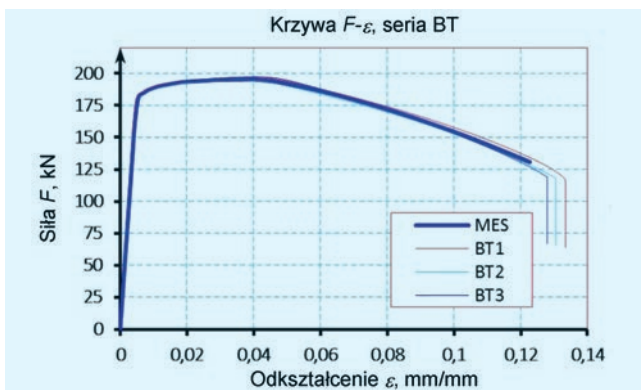
$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

Modyfikacji krzywej σ - ε dokonuje się tylko w zakresie, w którym nieznane jest zachowanie się materiału (nie można określić relacji σ - ε na podstawie dostępnych w literaturze zależności analitycznych), czyli od momentu wystąpienia przewężenia w badanej próbce materiału. Wartość maksymalnego naprężenia σ_u wyznacza się na podstawie wartości siły przed zerwaniem rozciąganej próbki, odniesionej do wartości odkształconego pola powierzchni próbki A po zerwaniu. Maksymalne odkształcenie ε_u , odpowiadające maksymalnemu naprężeniu σ_u , wyznacza się w sposób iteracyjny, zwiększając odkształcenie ε_u do takich wartości, przy których uzyskuje się najlepsze dopasowanie rzeczywistej charakterystyki σ - ε .

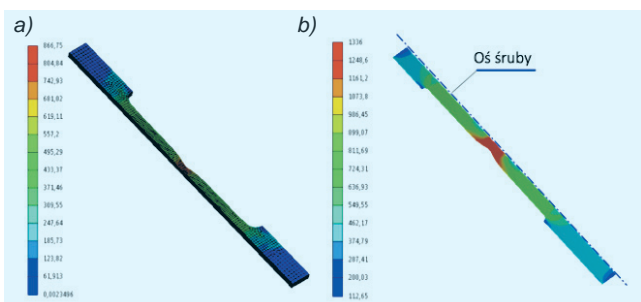
W trójwymiarowej analizie MES próbek stalowych uwzględniono podwójną symetrię badanego obiektu



Rys. 2. Wyniki analizy porównawczej MES pierwszego etapu walidacji – próbka stalowa (stal S235), analiza 3D



Rys. 3. Wyniki analizy porównawczej MES pierwszego etapu walidacji z wynikami próby osiowego rozciągania próbek śrub – klasa 10.9, analiza 2D



Rys. 4. Model MES pierwszego etapu walidacji: a) próbka stalowa (model 3D), b) próbka śruby – klasa 10.9 (analiza 2D – symetria radialna)

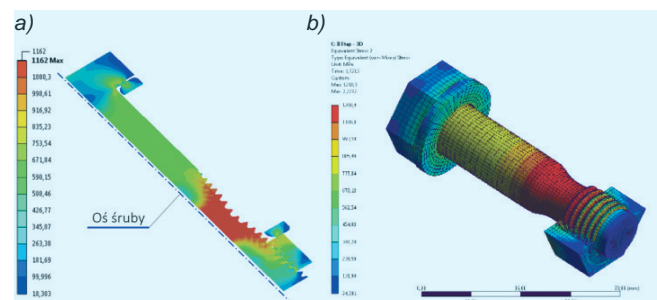
względem płaszczyzn przecinających jego osie środkowe (rys. 4a). W analizie MES próbek śrub zastosowano modele płaskie (rys. 4b) oraz modele trójwymiarowe.

W drugim etapie walidacji wykonano serię 11 prób osiowego rozciągania łączników w układzie śruba–podkładka–nakrętka. Analizę MES przeprowadzono w wersji 2D (rys. 5a) i 3D (rys. 5b).

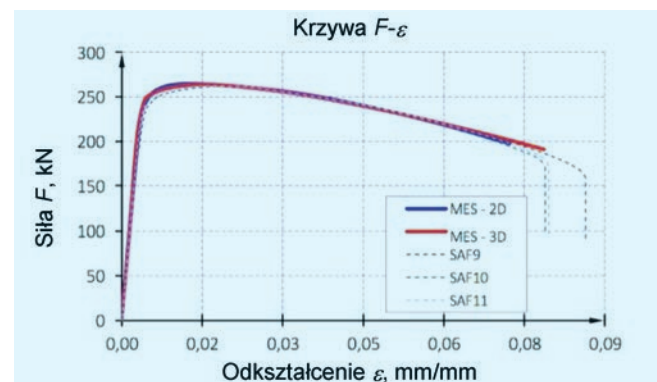
Maksymalna wartość siły w śrubie, określona na podstawie badań laboratoryjnych, wynosi: dla próbek SAF9 – 261,59 kN, dla próbek SAF10 – 263,18 kN, dla próbek SAF11 – 262,81 kN. Są to wartości porównywalne z siłą w śrubie określoną w analizie MES: $F_{\text{FEM}} = 264,37$ kN (rys. 6).

Trzeci etap sprowadza się do wyznaczenia porównawczej charakterystyki F - Δ , opisującej stan deformacji doczołowego połączenia, zdefiniowanego w formie rozciąganych króćców teowych (rys. 7). Na tym etapie walidacji wykonano serię prób osiowego rozciągania króćców teowych według następującego programu:

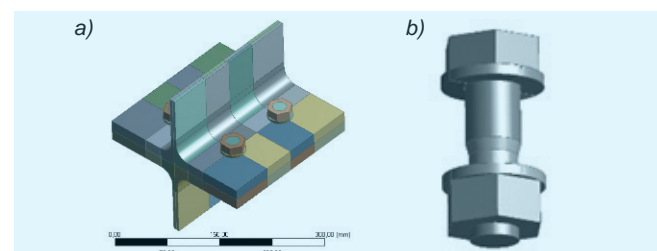
- seria H01 – połączenie wykonane z profili HEA 240 (S235),
- seria B01 – połączenie wykonane z profili HEB 240 (S355),
- seria SP01 – połączenie wykonane z blach, płyta czołowa o grubości $t_p = 20$ mm (S355),
- seria SP02 – połączenie wykonane z blach, płyta czołowa o grubości $t_p = 12$ mm (S235).



Rys. 5. Model MES drugiego etapu walidacji: a) analiza 2D, b) analiza 3D



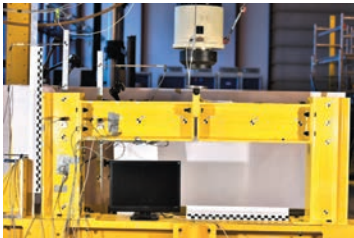
Rys. 6. Wyniki analizy porównawczej MES drugiego etapu walidacji z wynikami próby osiowego rozciągania śrub (klasa 10.9 – ISO 4014)



Rys. 7. Model MES trzeciego etapu walidacji: a) model króćca teowego, b) model śruby

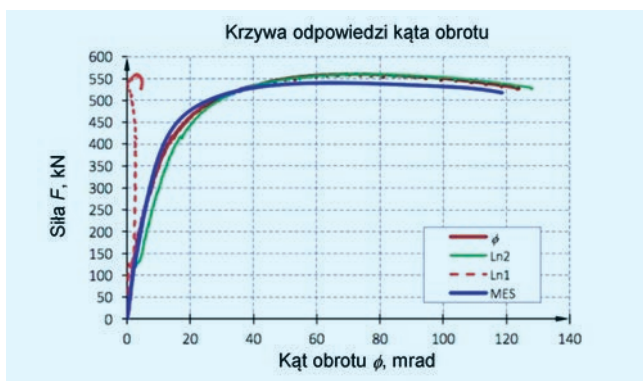
W modelach numerycznych badanych obiektów geometrię odwzorowano na podstawie dokładnego pomiaru elementów poddanych próbie rozciągania.

Na ostatnim etapie walidacji hierarchicznej analizowano model połączenia belki do słupa w układzie ramowym (rys. 8). Dążono do uzyskania zbieżnych wyników kąta obrotu w oparciu o analizę otrzymanej charakterystyki $M-\phi$. Wszystkie części składowe węzła modelowano za pomocą trójwymiarowych elementów skończonych typu: Hex8, Tet4, Wed6 i Pyr5. Dla blachy czołowej oraz półki słupa przyjęto pięć warstw elementów skończonych.



Rys. 8. Stanowisko badawcze czwartego etapu walidacji – układ ramowy wykonany z profili HEB 260

Powierzchnie kontaktowe między poszczególnymi elementami węzła zamodelowano jako nieliniowe ze współczynnikiem tarcia $\mu = 0,2$ (przyjętym jak dla powierzchni w stanie naturalnym). Sposób modelowania powierzchni kontaktowych między poszczególnymi elementami układu ramowego, modelowania śruby oraz dyskretyzacji siatki był analogiczny do opisanego w pracach [1, 2]. W celu zwiększenia efektywności obliczeń wykonano model połowy układu ramowego, wykorzystując symetrię względem płaszczyzny środkowej układu.



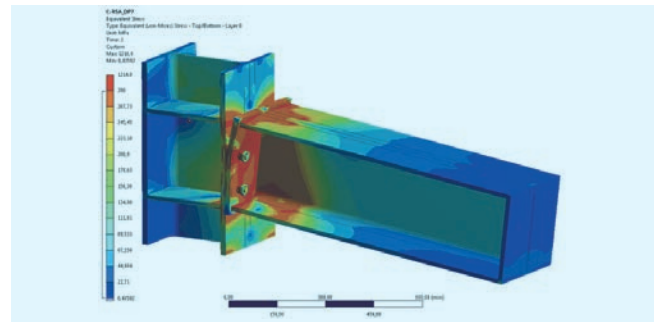
Rys. 9. Wyniki analizy porównawczej MES czwartego etapu walidacji z wynikami testu laboratoryjnego. Pomiar kąta obrotu z użyciem inklinometrów (Ln1 – inklinometr zamocowany na środku słupa, Ln2 – inklinometr zamocowany na środku belki)

Na rys. 9 przedstawiono porównanie wyników analizy MES z wynikami badań laboratoryjnych układu ramowego wykonanego z profili HEB260. Jako punkt odniesienia przyjęto kryterium porównawcze charakterystyk $F-\phi$.

Uzyskane wyniki w pełni potwierdzają wiarygodność założeń przyjętych na każdym z etapów walidacji. Tak sformułowane założenia pozwalają na wykorzystanie metody elementów skończonych do prognozowania zdolności do obrotu węzłów konstrukcji stalowych w różnych konfiguracjach geometrycznych.

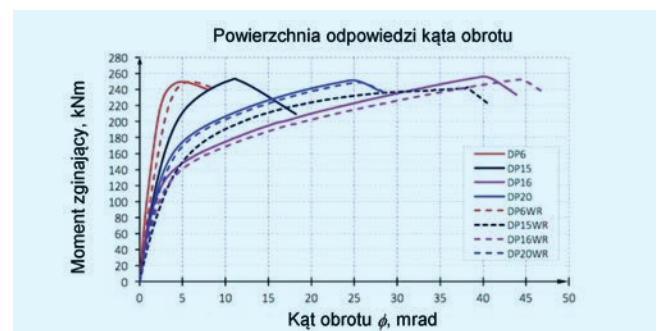
Zdolność węzłów do obrotu

Wyniki walidacji hierarchicznej modeli MES posłużyły do opracowania planu eksperymentu numerycznego, na podstawie którego dokonuje się oceny wpływu zmiennych czynników na zdolność do obrotu węzła przedstawionego na rys. 10.



Rys. 10. Model MES połączenia doczołowego belki do słupa

W analizie uwzględniono następujące czynniki zmienne: h_b – wysokość profilu rygla, h_c – wysokość profilu słupa, t_p – grubość płyty czołowej, w – poziomy rozstaw śrub, c_{g1} – odległość od osi górnego szeregu śrub do górnej powierzchni półki rygla. Do wyznaczenia powierzchni odpowiedzi kąta obrotu przyjęto trójwartościowy $(-1, 0, 1)$ plan Hartleya (PS/DS-P:Ha₅) zbudowany na 27 układach, zawierający kombinację czynników zmiennych o następujących zakresach: $t_p = 12 \div 20$ mm, $w = 135 \div 200$ mm, $c_{g1} = 60 \div 120$ mm, $h_b = 290 \div 490$ mm oraz $h_c = 300 \div 500$ mm.



Rys. 11. Wyniki planu eksperymentu numerycznego: linia ciągła – wyniki dla układu z żebrowaniem, linia przerywana – wyniki dla układu bez żebrowania

W celu oceny wpływu uźebrowania na zdolność do obrotu wykonano – przez analogię – obliczenia planu eksperymentu węzła pokazanego na rys. 10, lecz bez żebrowania usztywniających. Na rys. 11 pokazano analizę porównawczą wyników wybranych układów planu eksperymentu.

Wprowadzenie do analizy odpowiednich charakterystyk materiałowych, będących wynikiem wieloetapowego procesu dostrajania modeli MES w ramach walidacji hierarchicznej, jest warunkiem koniecznym do otrzymania wiarygodnych wyników analizy numerycznej. Proponowana w normie [5] metoda składnikowa nie została jeszcze w pełni dopracowana w zakresie prognozowania zdolności do obrotu, co skłania do poszukiwań innych, alternatywnych, ale możliwie wiarygodnych metod szacowania zdolności do obrotu węzłów w konstrukcjach stalowych.

LITERATURA

- Ostrowski K., Kozłowski A. "Hierarchical validation of FEM models". XIV International Scientific Conference Rzeszów-Lwów-Koszyce. Rzeszów, 2015.
- Ostrowski K., Kozłowski A. "FEM based assessment of the rotation capacity of bolted joints". Recent Progress in Steel and Composite Structures: Proceedings of the XIII International Conference on Metal Structures (ICMS2016, Zielona Góra, Poland, 15–17 June 2016). CRC Press, 2016, s. 479.
- Ostrowski K. "Finite element analysis of the rotation capacity of beam-to-column end-plate bolted joints". Neapol: Eurosteel, 2014.
- PN-EN 1993-1-5:2008 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-5: Blachownice.
- PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów