

Analiza statyczna i stateczność stalowej ramy blachownicowej

JEL: L97 DOI: 10.24136/atest.2018.535
 Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

Zastosowanie blachownic na elementy nośne ram ma minimalizować grubość środnika, którego nośność jest wykorzystywana jedynie w ścinanych strefach przypodporowych, jako nośność na ścinanie, natomiast w strefach środkowych przęseł, gdzie dominują momenty zginające, a siła poprzeczna dąży do zera – nośność środnika jest wykorzystywana minimalnie. Blachownice wykazują przy zginaniu dużą nadkrytyczną rezerwę nośności, która ujawnia się szczególnie wyraźnie w przypadku zastosowania sztywnych pasów i smukłych środników, obciążenia niszczące dla tego typu blachownic mogą być znacznie wyższe od obciążeń krytycznych określonych dla idealnych modeli płytowych i ich środników. Wykonano analizę stateczności ramy płaskiej z elementami nośnymi blachownicy o przekroju dwuteowym w zakresie sprężystym, z uwzględnieniem uźebrowania środnika słupów, jako przeciwdziałanie na zjawisko miejscowej utraty stateczności środnika. Przeprowadzono badania wpływu stężeń na utratę stateczności ogólnej giętnej, giętno-skrętnej oraz zwichrzenia. W analizie zastosowano modele obliczeniowe prętowy i powłokowy, który pozwala na analizy miejscowej utraty stateczności poszczególnych ścianek przekroju blachownicy.

Słowa kluczowe: frame, stability, critical loads.

Wstęp

Celem pracy jest jakościowe i ilościowe porównanie wyników analiz stateczności stalowej ramy o przekroju blachownicy dwuteowej, modelując ramę elementami prętowymi oraz elementami powłokowymi, z zastosowaniem metody elementów skończonych.

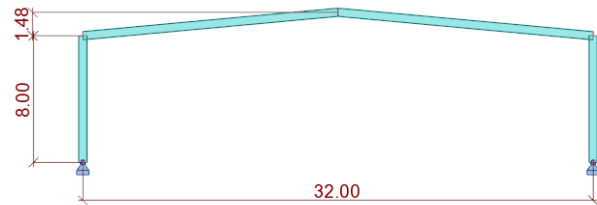
Korzystną cechą przekrojów z blach jest możliwość swobodnego doboru grubości blach składowych, zastosowania sztywnych pasów i smukłych środników, daje najbardziej efektywne wykorzystanie nośności przekroju. Blachownice wykazują przy zginaniu dużą nadkrytyczną rezerwę nośności, obciążenia niszczące dla tego typu blachownic mogą być znacznie wyższe od obciążeń krytycznych.

Wykonano analizę stateczności ramy płaskiej z elementami nośnymi blachownicy o przekroju dwuteowym w zakresie sprężystym, z uwzględnieniem uźebrowania środnika słupów, jako przeciwdziałanie na zjawisko miejscowej utraty stateczności środnika. Przeprowadzono badania wpływu stężeń na utratę stateczności ogólnej giętnej, giętno-skrętnej oraz zwichrzenia. W analizie zastosowano modele obliczeniowe prętowy i powłokowy, który pozwala na analizy miejscowej utraty stateczności poszczególnych ścianek przekroju blachownicy [4].

Obliczenia przeprowadzono na podstawie jednonawowej ramy (Rys.1) o rozpiętości 32m, z załamanym rygłem dachowym, podpartej przegubowo, poddanej kombinacji obciążeń

$$F_{Rd} = (1 + 2) * 1,15 + 3 * 1,5 \quad (1)$$

gdzie: 1-ciężaru własnego, 2-ciężaru obudowy ściennej i dachowej oraz 3-obciążenia śniegiem (Rys.3).



Rys. 1. Rama płaska

1 Sformułowanie problemu

Norma [5] wymaga wyznaczenia współczynnika wrażliwości na utratę stateczności α_{cr} definiowanego

$$\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Rd} \quad (2)$$

gdzie:

F_{Rd} - obciążenie porównawcze równe kombinacji obciążeń,

F_{cr} - obciążenie krytyczne.

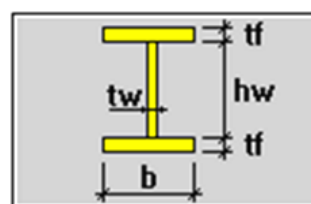
Numeryczną analizę stanu równowagi statecznej i stateczności wykonano za pomocą programu Autodesk Robot Structural Analysis [7] Metody Elementów Skończonych (MES) z elementami typu prętowego ze zdefiniowanym przekrojem blachownicowym dwuteowym oraz elementu powłokowego, przy zastosowaniu liniowych i nieliniowych związków geometrycznych, rozwiązując równania stateczne i stateczności

$$\begin{aligned} [K + K_{\sigma}(\Delta\sigma) + K_u(\Delta q)]\Delta q &= \Delta P, \\ [K + \alpha_{cr}\{K_{\sigma}(\sigma) + K_u(q)\}]q &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie K - macierz sztywności liniowej, K_{σ} - macierz sztywności geometrycznej, K_u - macierz sztywności przemieszczeniowej. Dokładny opis równań znajduje się w lit. [6].

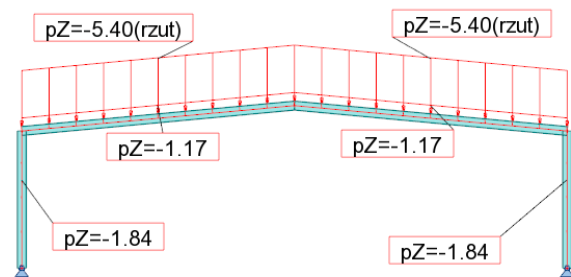
2 Prętowy model obliczeniowy ramy 2D i 3D

Rama prętowa płaska posiada przekrój blachownicy (Rys.2) o następujących wymiarach w [cm]



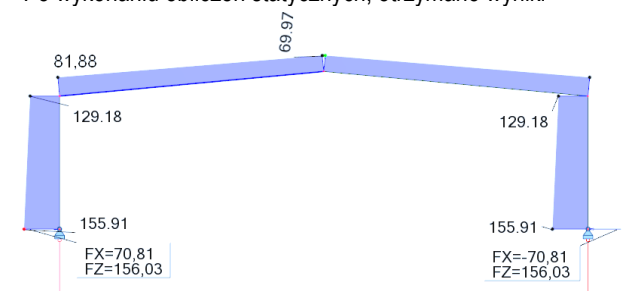
b =	36,0	36,0
hw =	50,0	50,0
tw =	0,8	0,8
tf =	1,8	1,8

Rys. 2. Wymiary przekroju blachownicy w [cm]

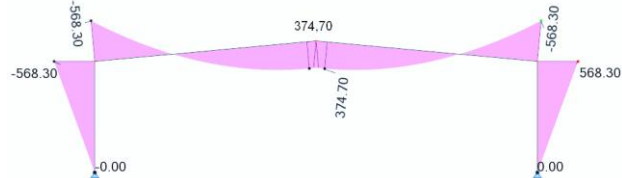


Rys. 3. Przyłożone obciążenie do ramy od kombinacji

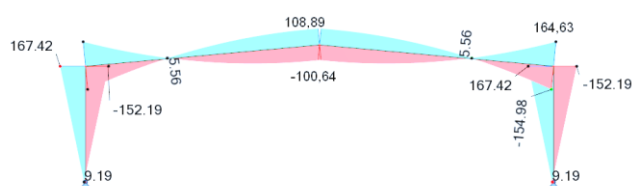
Po wykonaniu obliczeń statycznych, otrzymano wyniki



a) wykres sił normalnych



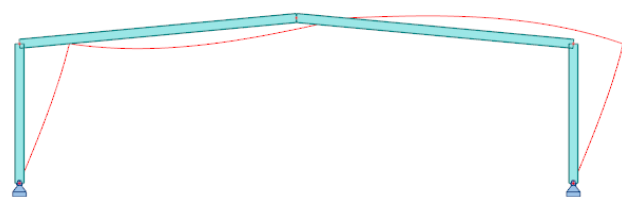
b) wykres momentów gnących



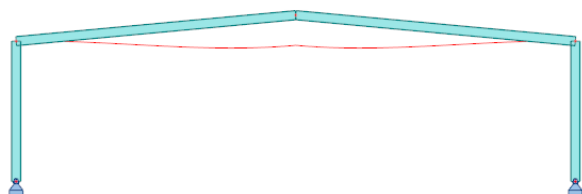
c) wykres naprężeń normalnych

Rys. 4. Wyniki obliczeń statycznych

Wymaganiem przez normę [5] dla wzorów normatywnych wymiarowania, jest wyznaczenie długości krytycznej poszczególnych elementów nośnych: słupów dla których występuje przechyłowa utrata stateczności (Rys.5) $\alpha_{cr} = 18,588$ i rygla dachowego $\alpha_{cr} = 77,832$ o nieprzechyłowej utracie stateczności (Rys.6), w płaszczyźnie geometrycznej ramy; poniżej wyniki z obliczeń stateczności dla modelu 2D.



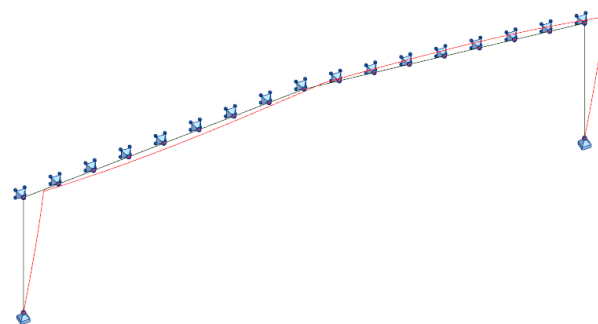
Rys. 5. Przechyłowa postać deformacji $\alpha_{cr} = 18,588$



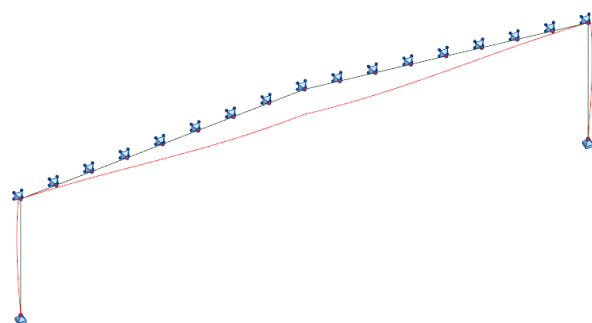
Rys. 6. Nieprzechyłowa postać deformacji $\alpha_{cr} = 77,832$

Następnie, dla modelu ramy 3D, po wprowadzeniu stężeń na przemieszczenia odbierane przez płatwie współczynniki wyboczenia α_{cr} dla przechyłowej i nieprzechyłowej utraci stateczności nie wiele się zmieniają w stosunku do modelu 2D, ale dochodzi jeszcze wyboczenie względem osi słabej z-z (Rys.9), deformacja poprzez

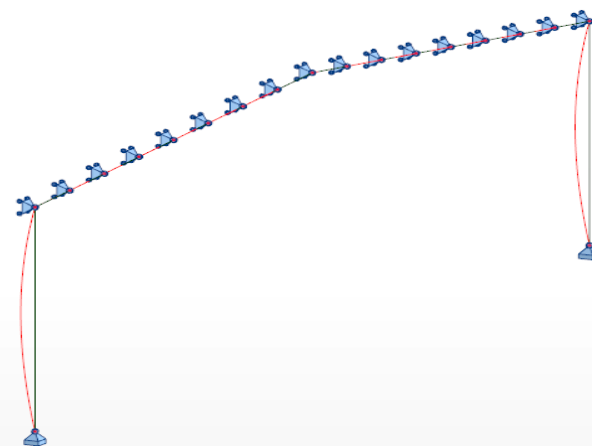
wyjście z płaszczyzny zginania $\alpha_{cr} = 24,041$. W przypadku braku stężeń dla słupa, długość krytyczna jest równa długości fizycznej, natomiast gdyby były stężenia dla słupa, to wówczas przydatny jest wynik α_{cr} aby dalej wyznaczyć l_{cr} , zwłaszcza gdy modelujemy stężenie przez rygiel ścienny jako podparcie sprężyste.



Rys. 7. Przechyłowa postać deformacji $\alpha_{cr} = 18,841$ - model 3D



Rys. 8. Nieprzechyłowa postać deformacji $\alpha_{cr} = 76,334$ - model 3D

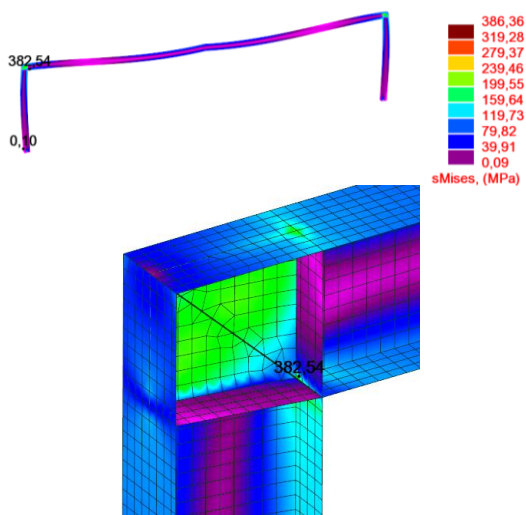


Rys.9. Wyboczenie słupów - wyjście z płaszczyzny zginania $\alpha_{cr} = 24,041$ - model 3D

3 Powłokowy model obliczeniowy ramy

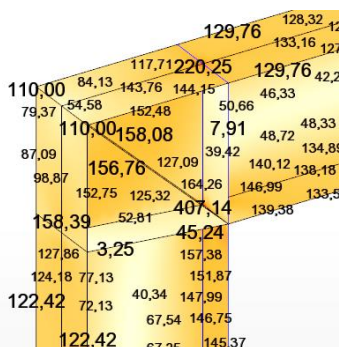
Błachownica została zamodelowana powierzchniowymi powłokowymi elementami skończonymi, ponieważ analizowany jest problem utraci stateczności, wygięcia pod działaniem naprężeń tarciowych, od obciążenia ściskającego w płaszczyznę środkową.

Z obliczeń statycznych (Rys.10) otrzymane naprężenie zredukowane z hipotezy Misesa wynosi 382,54 MPa, i jest to wartość za duża dla zastosowanego gatunku stali S355.



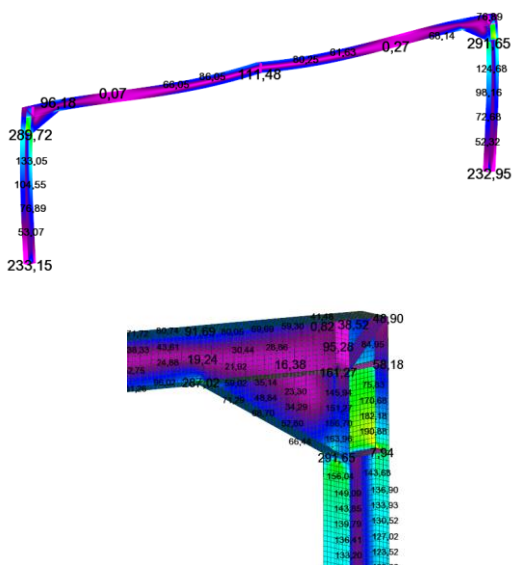
Rys. 10. Naprężenie maksymalne w narożu ramy

Wprowadzono zmianę grubości środnika 8mm, na taką samą jak grubość pasów 18mm, i otrzymano większą wartość naprężeń zredukowanych 407,14 MPa (Rys.11).



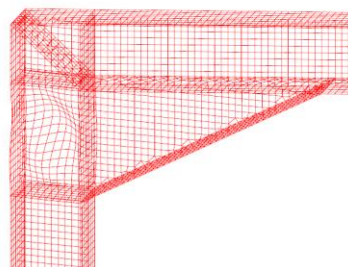
Ryc.11. Rozkład naprężeń zredukowanych

Dalej, wycofano zmianę grubości środnika na 8mm, natomiast w narożu słup-rygiel wprowadzono wzmocnienie i nastąpił spadek wartości naprężeń zredukowanych do poziomu 291,65 MPa (Rys.12).



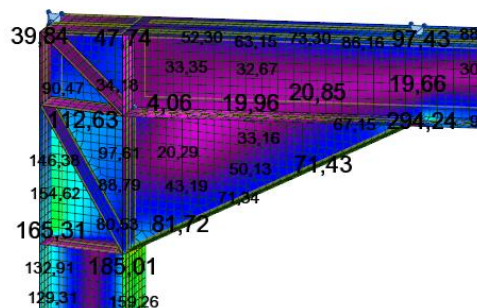
Rys. 12. Wyniki obliczeń statycznych ramy ze wzmocnieniem naroża

Z obliczeń utraty stateczności ramy otrzymana najmniejsza wartość $\alpha_{cr} = 4,667$ dotyczy miejscowej utraty stateczności (Rys.13) wybočenja fragmentu środnika słupa w obszarze wzmocnienia między dwoma żebrami.



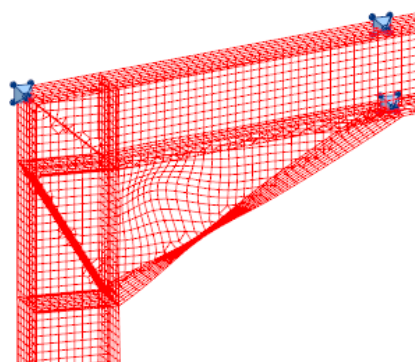
Rys. 13. Miejscowa utrata stateczności środnika słupa

Przeciwdziałaniem dla tego wybočenja jest wprowadzenie żebra w tym obszarze (Rys.14), które powoduje zmniejszenie naprężenia w dolnej części połączenia słup-wzmocnienie na wartość 185,01MPa z wartości 291,65 MPa.

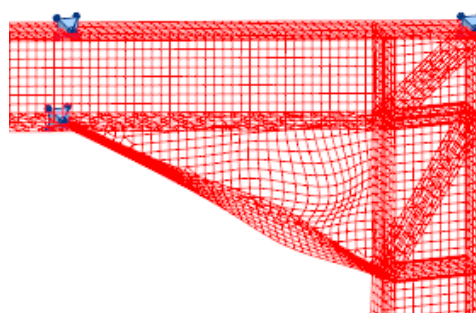


Rys. 14. Rozkład naprężeń ramy ze wzmocnieniem naroża i wprowadzeniem żebra

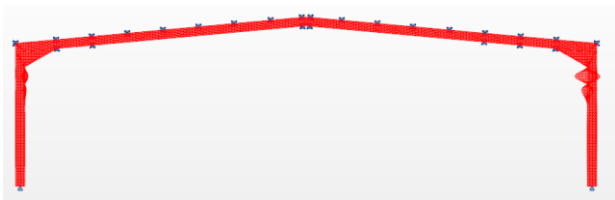
Następnie, wyniki obliczeń utraty stateczności ramy przedstawiono na Rys.15. Dla pierwszych sześciu postaci wyboczeń występuje miejscowa utrata stateczności ścianek w kolejności posiadających największe smukłości.



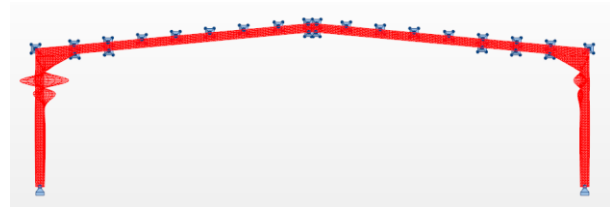
a) pierwsza postać dla $\alpha_{cr} = 6,754$



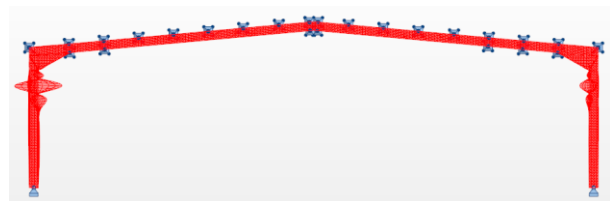
b) druga postać dla $\alpha_{cr} = 6,798$



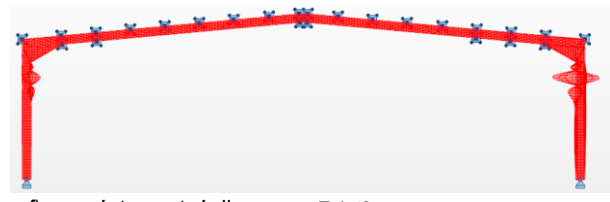
c) trzecia postać dla $\alpha_{cr} = 6,9049$



d) czwarta postać dla $\alpha_{cr} = 6,9053$



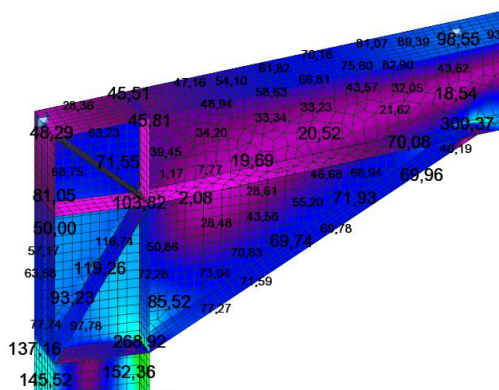
e) piąta postać dla $\alpha_{cr} = 7,168$



f) szósta postać dla $\alpha_{cr} = 7,169$

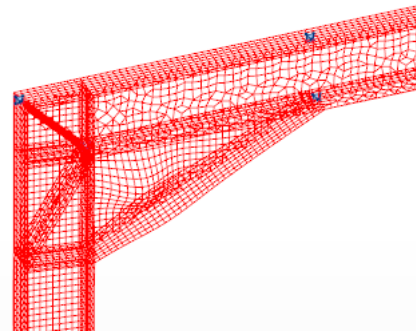
Rys. 15. Miejscowa utrata stateczności ścianek blachownicy

Zmiana umiejscowienia kierunku żebra (Rys.16) powoduje oczywiście zmiany wartości naprężeń w miejscach połączenia żebra z pasami słupa

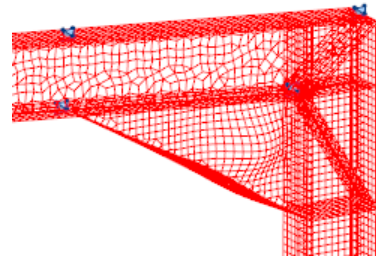


Rys. 16. Rozkład naprężeń ramy po zmianie usytuowania żebra

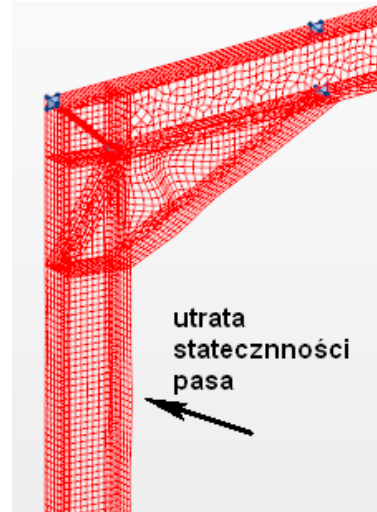
Zmiana usytuowania żebra nie wpływa jakościowo na miejsce wystąpienia miejscowej utraty stateczności, ale ma wpływ na wartość α_{cr} zmniejszając wartość najniższą.



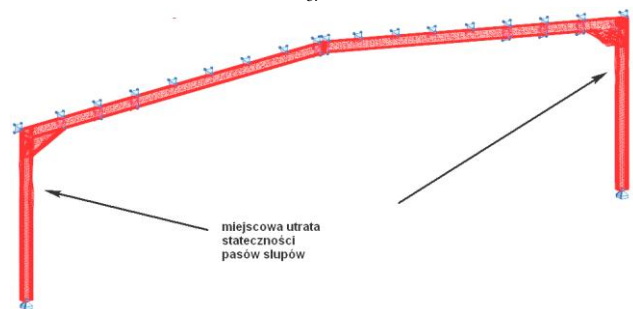
a) pierwsza postać $\alpha_{cr} = 5,555$



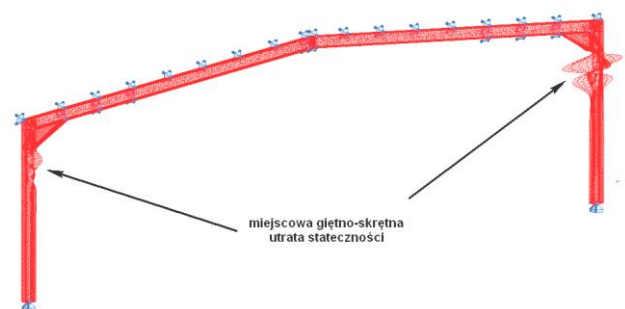
b) druga postać $\alpha_{cr} = 5,888$



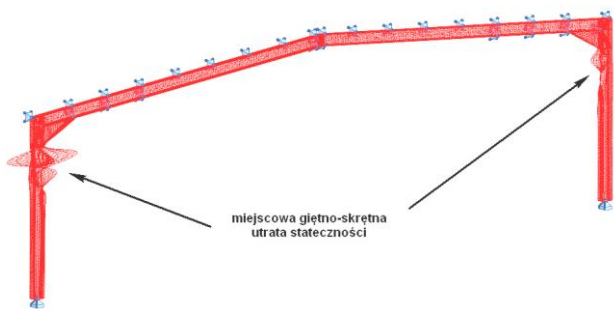
c) trzecia postać $\alpha_{cr} = 6,739$



d) postać czwarta $\alpha_{cr} = 6,755$



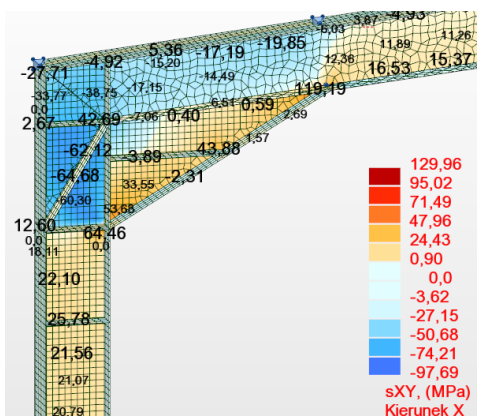
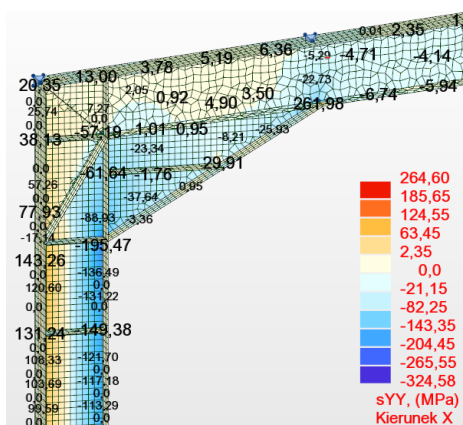
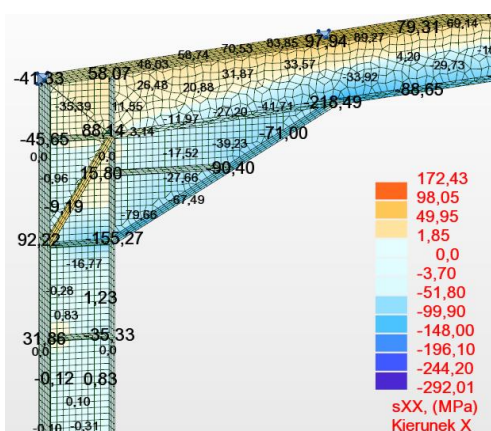
e) postać piąta $\alpha_{cr} = 6,945$



f) postać szósta $\alpha_{cr} = 6,947$

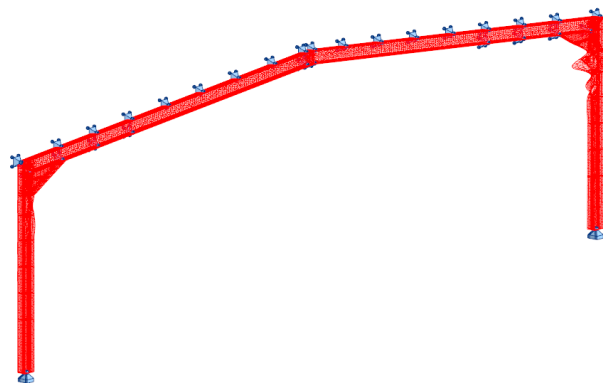
Rys. 17. Miejscowa utrata stateczności ścianek blachownicy

Praktycznie interesują nas takie zmiany konstrukcyjne, które spowodują wystąpienie globalnej utraty stateczności, wówczas wzrasta oporność konstrukcji na utratę stateczności, miarą tej odporności jest wartość obciążenia. Wprowadzono więc żebra na wzmocnieniu kierunek większych naprężeń sXX (Rys.18) oraz na słupach.

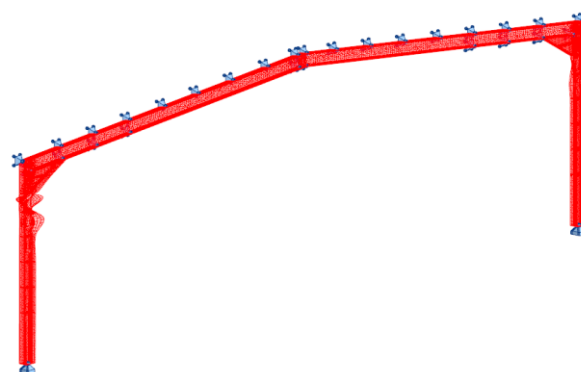


Rys. 18. Rozkłady naprężeń po wprowadzonych zmianach z dołączeniem żeber

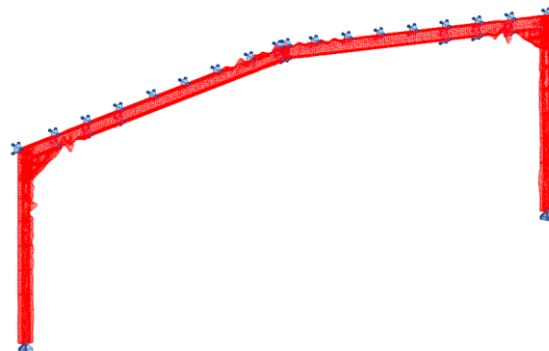
Wprowadzone zmiany nie przyczyniły się w sposób znaczący na zwiększenie odporności ramy na utratę stateczności, wartość współczynnika $\alpha_{cr} = 7,597$ przed zmianami $\alpha_{cr} = 5,555$, analogicznie jest dla drugiej postaci $\alpha_{cr} = 7,617$ i następných postaci



a) pierwsza postać $\alpha_{cr} = 7,597$



b) druga postać $\alpha_{cr} = 7,617$

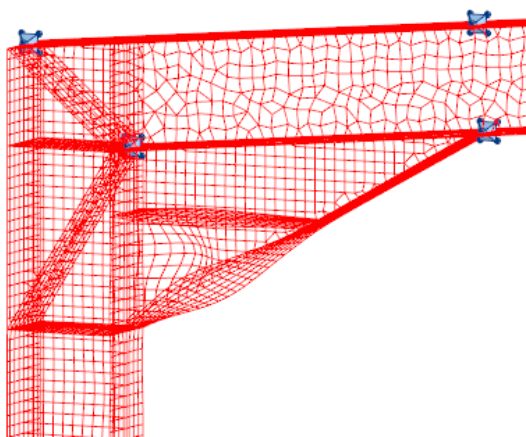


c) 166 postać $\alpha_{cr} = 18,879$

Rys. 19. Miejscowa utrata stateczności ścianek blachownicy

wyoboczenia - jest to miejscowa utrata stateczności, nie globalna, dla której wartość mnożnika była by zdecydowanie większa.

Miejscowa utrata stateczności wzmocnienia związana z pasem wzmocnienia (Rys.20) jest dla wartości $\alpha_{cr} = 9,727$ i jest to 13 postać wyoboczenia ramy.



Rys. 20. Miejscowa utrata stateczności ścianek wzmocnienia

Podsumowanie

W przedstawionych wynikach obliczeń z dwóch różnych sposobów zamodelowania ramy jako model prętowy (jednowymiarowy w opisie MES) z przekrojami blachownicy oraz modelu powłokowego (dwuwymiarowego w opisie MES) nie ma zgodności wyników. Zdecydowanie z modelu powłokowego otrzymuje się mniejsze wartości współczynnika α_{cr} , odpowiadające miejscowej utracie stateczności, a nie globalnej utracie stateczności, jak z wyników modelu prętowego.

Dlatego też, w obliczeniach normowych wymiarowania, z wyznaczeniem stopnia wyężenia przekroju, należy przeprowadzić obliczenia modelując ramę jako złożoną z prętów i jako złożoną z elementów powłokowych, jak również rozszerzyć zakres analiz na nieliniową geometrycznie i fizycznie z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych.

Można prowadząc wymiarowanie modelem prętowym wykorzystać rozwiązanie z modelu powłokowego np. do określenia długości krytycznej wybożenia fragmentu elementu nośnego, dla którego zachodzi miejscowa utrata stateczności.

Ogólnie wyniki z modelu powłokowego są bardzo pomocne dla właściwego wprowadzenia usztywnień np. w postaci żeber, jako eliminacja miejscowej utracie stateczności.

Bibliografia:

1. Timoshenko S.P., Gere J.M.: Teoria stateczności sprężystej, Arkady, Warszawa 1963.

2. Ahnlen M., Westlund J., Later Torsional Buckling of I-beams, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2013
3. Giżejowski M., Szczerba R., Gajewski M., Stachura Z., Analiza nośności stalowej ramy płaskiej o blachownicowych elementach smukłościennych, JCEEA, t.XXXII, z. 62 (4/15), 2015, s. 73-92
4. Misiak J., Stachura S., Wpływ żeber poprzecznych i podłużnych na stateczność blachownicy stalowej, Problemy Współczesnej Architektury i Budownictwa, ARCHBUD 2013, Zakopane
5. Norma PN-EN 1993-1-1: Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, PKN, Warszawa 2006.
6. Waszczyszyn Z., Cichoń Cz., Radwańska M., Metoda elementów skończonych w stateczności konstrukcji, Arkady, Warszawa 1990
7. Autodesk Robot Structural Analysis, licencja Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu ul. Malczewskiego 29

Static analysis and stability of the steel framework

The use of sheet metal plates for frame supports minimizes the thickness of the web, whose carrying capacity is only used in shear zones as a shear resistance, while in the center zones of the spans, where the bending moments dominate, and the lateral force tends to zero - the web's carrying capacity is minimized.

Sheet metal binders exhibit a high supercritical load capacity, which is particularly noticeable when using rigid belts and slim webs, the shear loads for this type of sheet metal can be significantly higher than the critical loads specified for ideal plate models and webs.

An analysis of the stability of the flat frame with carrier elements of I-section in the elastic range, including the ribbing of the web of columns, as a counteracting the phenomenon of local loss of web stability. Studies on the effects of concentrations on general structural, torsion and torsional collapse were performed. The analysis used bar and shell calculation models, which allows analysis of the local loss of stability of the individual sections of the sheet metal section.

Keywords: frame, stability, critical loads.

Autorzy:

dr inż. **Sławomir Stachura** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Mechaniczny w Radomiu, s.stachura@uthrad.pl