

Numeryczne badania wytrzymałości pomostów umieszczanych na rusztowaniach

Aleksander Robak

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail a.robak@pollub.pl*

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono metody modelowania numerycznego oraz komputerową analizę statyczną stalowych pomostów umieszczanych na rusztowaniach. Głównym problemem poruszonym w opracowaniu jest określenie nośności płyt pomostowych pod wpływem szczególnych przypadków obciążeń, oraz analiza uzyskanych wyników i osobliwości numerycznych, występujących w analizie liniowej.

Słowa kluczowe: rusztowania, płyty pomostowe, Metoda Elementów Skończonych, koncentracja naprężeń, osobliwości numeryczne, obliczenia statyczne, analiza komputerowa.

1. Wstęp

Rusztowania są elementem obecnym w niemal każdym procesie technologicznym, związanym ze wznoszeniem lub konserwacją obiektów budowlanych. W dzisiejszych czasach powstaje wiele budynków, przy których prace na rusztowaniach takie, jak np. montaż elewacji szklanych i kamiennych z elementów o znacznych wymiarach, montaż dużych urządzeń specjalistycznych czy też składowanie materiałów na paletach wymagają obciążenia pomostów w sposób nierównomierny. Obciążeń tych w żaden sposób nie możemy odnieść do zalecanego w normach i katalogach obciążenia równomiernie rozłożonego. W związku z tym w artykule przedstawiono podstawowe problemy związane nie tylko z samym obliczaniem płyt pomostowych metodami numerycznymi, ale także wpływem szczególnych przypadków obciążeń na pracę statyczną badanych elementów.

Podczas analizy dostępnych materiałów na temat projektowania i obciążeń rusztowań stwierdzono, że tematyka z tym związana jest pobieżnie traktowana przez obowiązujące normy jak i katalogi producentów, a także nie są dostępne żadne publikacje poruszające zagadnienia wytrzymałości pomostów w rusztowaniach. W obowiązującej normie [2], a także w poprzedzających ją odpowiednikach przy projektowaniu rusztowań dopuszcza się tylko zastępcze obciążenie równomiernie rozłożone a pomija się występowanie obciążeń skupionych. Tak, więc aby dowiedzieć się jakie siły wewnętrzne i naprężenia powstają podczas takiego obciążenia należy albo przeprowadzić badania laboratoryjne albo wykonać model komputerowy i stan naprężeń obliczyć metodami numerycznymi.

2. Opis płyt pomostowych

Pomosty w rusztowaniach są elementami pracującymi jednokierunkowo. Każdy element nośny jest oparty na poziomych ryglach za pomocą specjalnie wykształconych zaczepów, które zapewniają przegubowe połączenie tych elementów z rusztowaniem. Pomosty są elementami bezpośrednio przenoszącymi wszystkie obciążenia użytkowe, przekazując je na inne elementy konstrukcyjne rusztowania. Dodatkowo pomosty zwiększają sztywność rusztowania w płaszczyznach poziomych.

Obciążenia pomostów roboczych przyjmowane są według obowiązującej normy [2], i są to przede wszystkim obciążenia ciężarem własnym płyty pomostowej oraz obciążeniem użytkowym. W celu sprostania różnym warunkom pracy w obowiązującej normie wydzielono sześć klas obciążenia stref roboczych. Dla każdej z klas określone jest dopuszczalne, maksymalne obciążenie eksploatacyjne, które odpowiada charakterowi prac przeprowadzanych w strefach roboczych rusztowania. Każda strefa robocza powinna przenieść określone w Tab.1 obciążenie równomiernie rozłożone q_1 . Jednocześnie każdy element podestu powinien przenieść obciążenia F_1 i F_2 równomiernie rozłożone odpowiednio na powierzchniach o wymiarach 500 mm × 500 mm i 200 mm × 200 mm. Położenie każdego z obciążeń należy dobrać tak, by uzyskać najbardziej niekorzystny efekt. Dodatkowo każdy pomost klasy obciążenia 4, 5 i 6 powinien przenieść obciążenie części powierzchni q_2 , które jest obciążeniem większym niż równomiernie rozłożone obciążenie eksploatacyjne (dwie ostatnie kolumny w Tab.1).

Tabela 1. Obciążenie eksploatacyjne w strefach roboczych [2].

Table 1. Exploitation load in work areas [2].

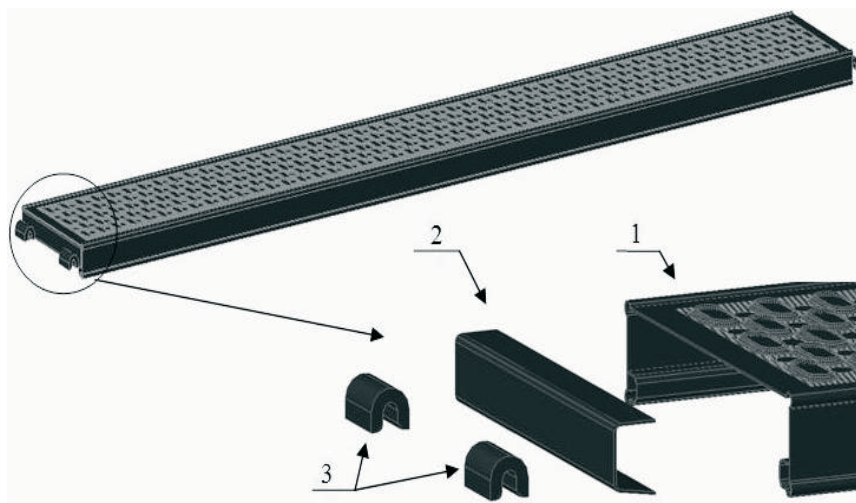
klasa obciążenia	Obciążenie rozłożone równomiernie	Obciążenie skupione na powierzchni 500 mm × 500 mm	Obciążenie skupione na powierzchni 200 mm × 200 mm	Obciążenie części powierzchni	
				q_2	Współczynnik części powierzchni a_p
	q_1	F_1	F_2	q_2	a_p
	[kN/m ²]	[kN]	[kN]	[kN/m ²]	
1	0,75	1,50	1,00	-	-
2	1,50	1,50	1,00	-	-
3	2,00	1,50	1,00	-	-
4	3,00	2,00	1,00	5,00	0,4
5	4,50	2,00	1,00	7,50	0,4
6	6,00	2,00	1,00	10,00	0,5

W sytuacjach nietypowych, wynikających ze specjalistycznych prac przeprowadzanych na danym obiekcie, rusztowania projektuje się na obciążenie podane przez użytkownika, przy jednoczesnym zachowaniu wszystkich zasad bezpieczeństwa. Najczęściej w takich nietypowych sytuacjach konstrukcja rusztowania przenosi obciążenie, ale ze względu na rozkład obciążenia na pomoście w samej konstrukcji płyt pomostowych może dojść do przekroczenia dopuszczalnych naprężeń.

W poniższym opracowaniu opisano pomosty stalowe firmy ALTRAD MOSTO-STAL, które wykonane są ze stali S235JRG2 o module Younga $E = 2.05 \cdot 10^8$ kPa,

ciężarze objętościowym $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$ i podwyższonej wytrzymałości obliczeniowej stali $f_d = 283 \text{ MPa}$. Pomosty dostępne są w dwóch szerokościach: 160 mm i 320 mm oraz w długościach: 732 mm, 1088 mm, 1572 mm, 2072 mm, 2572 mm, 3072 mm. Płyta pomostowa wykonana jest z trzech części, połączonych ze sobą za pomocą spawów.

Środkowym największym elementem płyty pomostowej, oznaczonym numerem 1 na Rys. 1, jest specjalnie wyprofilowana blacha o grubości 1,5 mm. Przekrój poprzeczny elementu pokazano na Rys. 2. W górnej części blacha ta jest poddana perforacji, co dodatkowo zwiększa jej sztywność, a jednocześnie zwiększa bezpieczeństwo i komfort pracy. Po obu stronach płyta pomostowa jest zakończona blachą grubości 1,5 mm uformowaną w kształcie ceownika. Element ten jest oznaczony numerem 2 na Rys. 1. Na obu końcach płyta pomostowa jest zakończona parą zaczepów, oznaczonych na Rys. 1 numerem 3. Zaczepy te wykonane są z blachy o grubości 4 mm. Elementy te są połączeniem płyty pomostowej z poziomym rygłem. Wyróżniamy dwa rodzaje zaczepów. Pierwszy umożliwia zawieszenie płyty pomostowej na u-profilu, natomiast drugi swoim kształtem jest dopasowany do o-rygla.



Rys. 1. Pomost stalowy firmy ALTRAD MOSTOSTAL.

Fig. 1. Steel deck by ALTRAD MOSTOSTAL.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny pomostu stalowego firmy ALTRAD MOSTOSTAL.

Fig. 2. Steel deck cross-section by ALTRAD MOSTOSTAL.

3. Model numeryczny płyty pomostowej

3.1. Wprowadzenie

Przed przystąpieniem do obliczeń należy przeanalizować w jaki sposób opracowywana konstrukcja pracuje, co wiąże się z przejściem odpowiedniego schematu statycznego pracy konstrukcji oraz warunków brzegowych [1]. Po przeprowadzeniu tej analizy i wybraniu odpowiedniego rodzaju modelu zastępczego można przystąpić do opracowania modelu numerycznego, oddającego (z przyjętą dokładnością) rzeczywistą charakterystykę pracy konstrukcji. Pierwszym etapem przygotowywania tego modelu jest dobór odpowiedniego rodzaju elementów MES (Metoda Elementów Skończonych). Każdy element opisany jest funkcją kształtu, która w zależności od skomplikowania odzwierciedla w różnym stopniu pracę konstrukcji. Istnieje wiele elementów, z których można skonstruować model. W niniejszym opracowaniu wykorzystane zostały elementy prętowe i powłokowe (elementy schell i beam biblioteki programu Algor [4]).

Podstawowym celem wykonywanych obliczeń jest określenie nośności pomostów. Wymagało to stworzenie modelu zastępczego, który z możliwie największą dokładnością będzie oddawał zachowanie się pomostów stalowych firmy ALTRAD MOSTOSTAL pod wpływem różnego rodzaju obciążeń. Dodatkowo ze względu na ograniczenia programu model zastępczy płyty pomostowej powinien być zbudowany z jak najmniejszej liczby elementów co umożliwi analizę całych zestawów tworzących podest roboczy. Poniżej zostanie omówione modelowanie i obliczanie metodą elementów skończonych oraz analiza otrzymanych wyników. Obliczenia zostały wykonane programem ALGOR opartym na Metodzie Elementów Skończonych (MES).

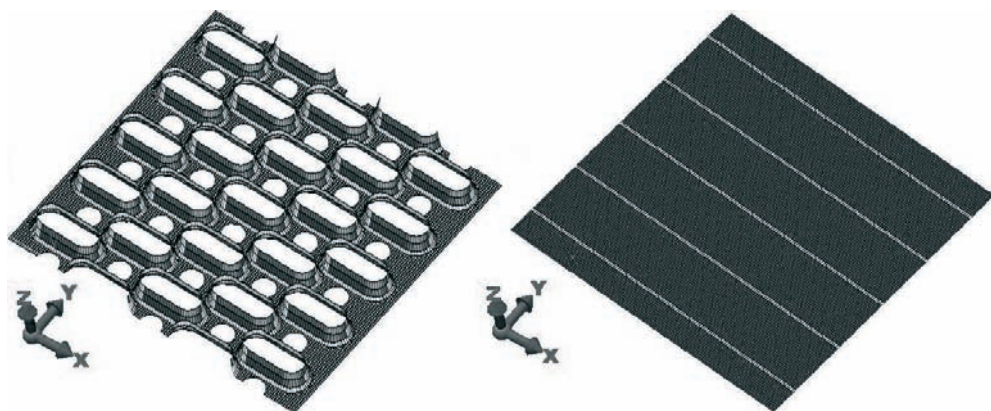
3.2. Opracowanie modelu uproszczonego płyty pomostowej

Analizę numeryczną pomostów stalowych zaczęto od wyznaczenia charakterystyk materiałowych i geometrycznych w modelu uproszczonym. Opracowanie takiego modelu wymagało stworzenia modelu dokładnego pomostu, który posłuży do sprawdzenia modelu uproszczonego.

Pierwszym etapem budowy modelu dokładnego było stworzenie dokładnego modelu wycinka blachy perforowanej. W celu wyznaczenia charakterystyk materiału zastępczego porównywano przemieszczenia odczytywane z modelu dokładnego wycinka blachy z przemieszczeniami modelu zastępczego dążąc do tego, aby różnica ugięć pomiędzy tymi dwoma modelami była jak najmniejsza. Blacha perforowana wykazywała inne właściwości przy obciążaniu w dwóch różnych kierunkach, co wymusiło stworzenie płytowo-prętowego modelu zastępczego. Następnie stworzono dokładny model pojedynczej płyty pomostowej i tak, jak w poprzednim etapie porównywano przemieszczenia odczytywane z modelu dokładnego z przemieszczeniami modelu zastępczego. Jest to metoda iteracyjna, a kolejne kroki iteracyjne pozwoliły na wyznaczenie właściwości materiałowych dla poszczególnych elementów modelu zastępczego, którego odpowiedź na obciążenie jest niemal identyczna jak modelu dokładnego.

Do wyznaczenia modelu zastępczego płyty wykorzystano kwadratowy model wycinka blachy perforowanej o wymiarach 250 mm × 250 mm, pokazany na

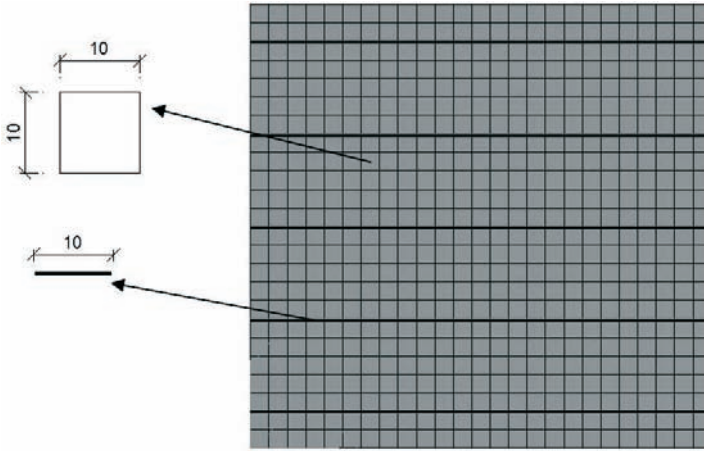
Rys. 3. W modelu MES użyto siatki o boku oczka równym 1,0 mm, co pozwoliło na dokładne odwzorowanie wszystkich krzywizn perforacji i jednocześnie spełniło ograniczenia nałożone przez używany do obliczeń program.



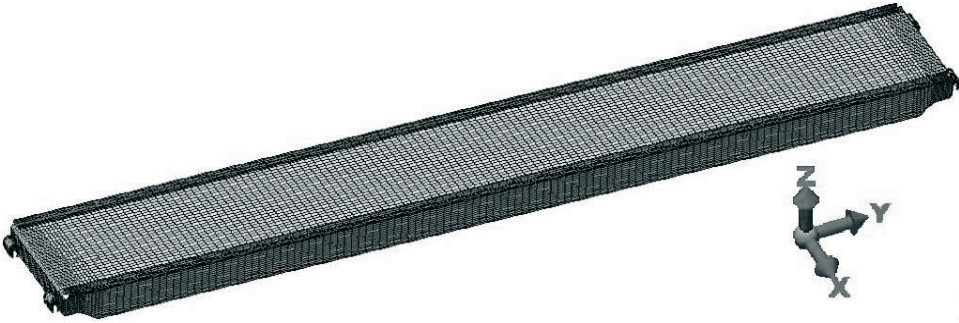
Rys. 3. Modele numeryczne wycinka blachy perforowanej: a) dokładny, b) zastępczy.
 Fig. 3. Numerical models of the part of perforated sheet: a) detailed, b) equivalent.

Następnie model ze sztywnym zamocowaniem z jednej strony obciążono siłami, przyłożonymi na jednej krawędzi modelu o wypadkowej wartości równej 1,0 kN. Przyjęto dwa przypadki obciążeń, przedstawiające pracę blachy w dwóch kierunkach. W pierwszym przypadku obciążenie przyłożono na krawędzi wspornika równoległej do długości płyty pomostowej. W drugim przypadku obciążenie przyłożono na krawędzi wspornika prostopadłej do długości płyty pomostowej. W modelu zastępczym w pierwszym kroku przyjęto grubość elementów płytowych oraz charakterystyki materiałowe takie same jak w modelu szczegółowym. Następnie przeprowadzono obliczenia dla poszczególnych przypadków obciążeń analogicznych, jak w modelu szczegółowym.

Kolejnym krokiem było poprawienie właściwości materiałów przekroju zastępczego. W tym celu porównywano przemieszczenia otrzymane z jednakowo obciążonego modelu dokładnego i uproszczonego. W kolejnych krokach obliczeń korygowano wartości właściwości materiału modelu zastępczego w celu osiągnięcia jak najmniejszej różnicy przemieszczeń. Pozwoliło to na uzyskanie właściwości materiału w modelu zastępczym szukanych dla pierwszego przypadku obciążenia. Z analizy wyników obliczeń oraz wizualnej oceny kształtu perforacji, wynika że płyty nie można traktować jako izotropowej. Dlatego w celu wyrównania przemieszczeń jednocześnie dla obu przypadków obciążenia do modelu płytowego dodano elementy prętowe, które zwiększają sztywność modelu w kierunku prostopadłym do długości płyty pomostowej. Właściwości materiału elementów prętowych także zostały ustalone metodą iteracyjną. Ostatecznie w zastępczym modelu MES blachy perforowanej dla elementów płytowych użyto siatki o boku oczka równym 10 mm. Elementy prętowe także mają długość 10 mm (por. Rys. 4).



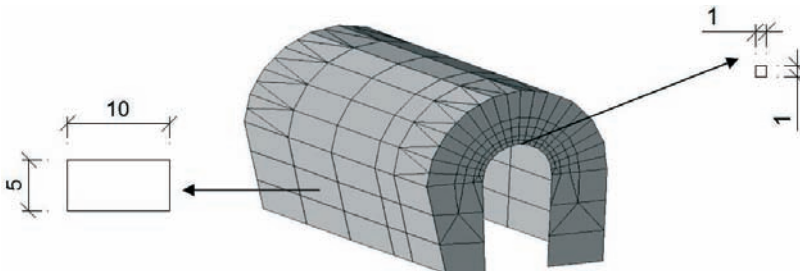
Rys. 4. Model MES blachy perforowanej.
Fig. 4. FEM model of perforated sheet.



Rys. 5. Model numeryczny płyty pomostowej.
Fig. 5. Numerical model of deck plate.

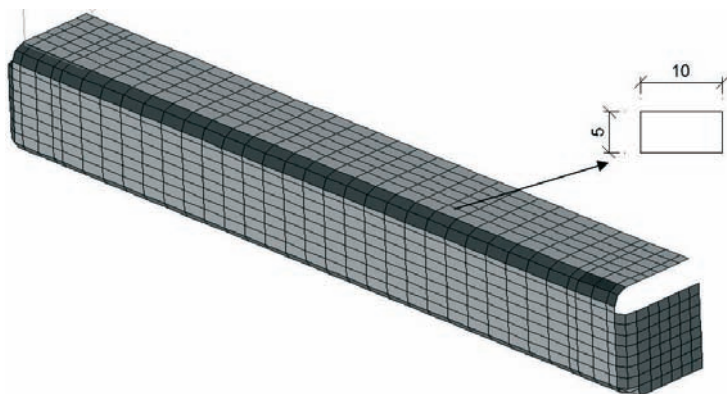
W dokładnym modelu płyty pomostowej pokazanym na Rys. 5 poszczególne elementy zostały zamodelowane w następujący sposób:

- element nr 1 (Rys. 1, Rys. 6) – zaczepek zamodelowany został siatką o boku oczka równym $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, która dodatkowo została zagęszczona w miejscu oparcia płyty pomostowej na ryglu tak, że boki elementów wynoszą $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$. Bez względu na długość i szerokość pomostów, we wszystkich pomostach stalowych wykorzystywane są identyczne zaczepek.



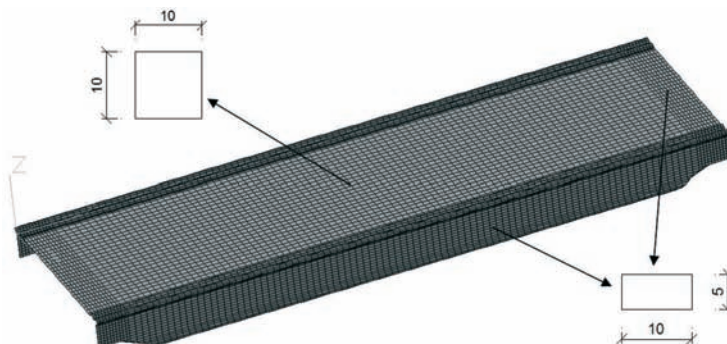
Rys. 6. Model zaczepek płyty pomostowej.
Fig. 6. The grip model.

- element nr 2 (Rys. 7) – blacha przednia płyty pomostowej zamodelowana została siatką o boku oczka równym 5 mm×10 mm. Zbudowane zostały dwa modele blachy przedniej różniące się między sobą jedynie długością, dopasowaną do płyt pomostowych o szerokości 160 mm i 320 mm.



Rys.7. Model blachy przedniej płyty pomostowej.
Fig. 7. Model of the front deck plate.

- element nr 3 (Rys. 8) – blacha środkowa zamodelowana została siatką o boku oczka równym 5 mm × 10 mm, a jej perforowana część elementami o wymiarze 10 mm × 10 mm. Wymiary modelu dopasowane zostały do wszystkich długości a także obu szerokości.

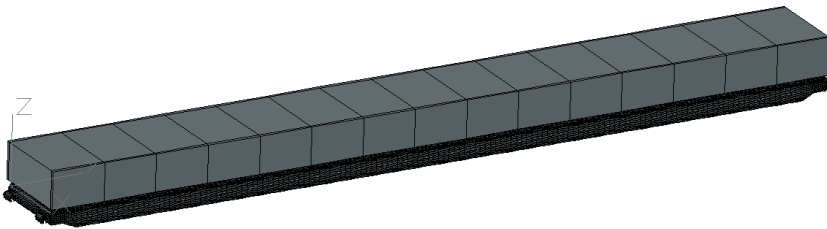


Rys. 8. Model blachy środkowej płyty pomostowej.
Fig. 8. Model of the central deck plate

Ograniczenia programu w zakresie liczby obsługiwanych elementów i węzłów, przy tak zamodelowanych elementach, umożliwiły stworzenie modeli płyt pomostowych o długości tylko do 1572 mm, dlatego w środkowej części elementu nr 3, tam gdzie nie zaobserwowano żadnych zaburzeń w rozkładzie naprężeń, zwiększono bok oczka siatki do 20 mm w kierunku długości płyty pomostowej. W celu sprawdzenia czy takie uproszczenie nie wprowadzi dodatkowych błędów porównano naprężenia otrzymane z jednakowo obciążonych płyt pomostowych zamodelowanych siatką o wstępnie przyjętym boku oczka oraz zwiększonym boku oczka. Otrzymane wyniki różniły się od siebie o mniej niż 0,01%, co pozwoliło uznać je za pomijalnie małe i do dalszych obliczeń wykorzystywać model elementu nr 3 wykonany z siatki o zwiększonym boku elementu.

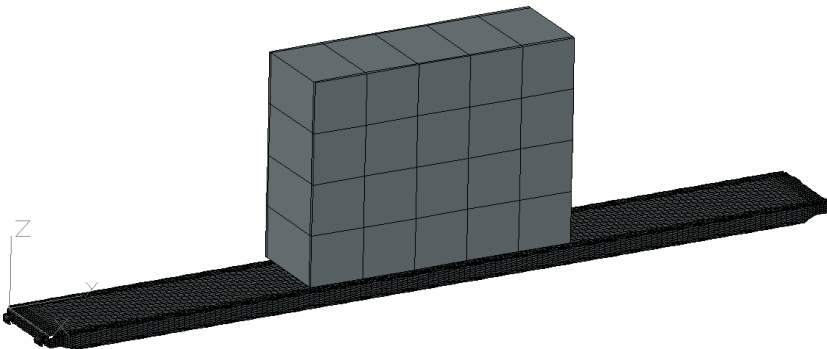
Opisany powyżej model niestety zawiera znaczną liczbę stopni swobody co powoduje, że nie można go wykorzystać w modelu pełnych pomostów roboczych, składających się z kilku płyt pomostowych. W związku z tym opracowano model zastępczy płyty pomostowej, w którym zaczepy, blachę przednią i boki płyty pomostowej zamodelowano, jako elementy prętowe. Natomiast środek zamodelowano elementami płytowo-prętowego modelu zastępczego omówionego powyżej. Pierwszym krokiem było wyznaczenie wstępnych właściwości materiału i charakterystyk elementów prętowych, polegające na przyjęciu charakterystyk geometrycznych przekrojów poszczególnych części płyty pomostowej. Następnie w celu wyznaczenia ostatecznych właściwości materiału w elementach modelu zastępczego porównywano przemieszczenia, otrzymane z jednakowo obciążonego modelu dokładnego i uproszczonego. Metoda ta jest metodą iteracyjną i polegała na korygowaniu wartości momentów bezwładności elementów prętowych dążąc do tego, aby różnica ugięć pomiędzy tymi dwoma modelami była jak najmniejsza. W celu stworzenia jak najbardziej uniwersalnego modelu analizowano trzy przypadki obciążeń:

- w pierwszym przypadku obciążeń na płytę pomostową przyłożono obciążenie równomiernie rozłożone na całej powierzchni o wartości $2,0 \text{ kN/m}^2$ (Rys. 9),



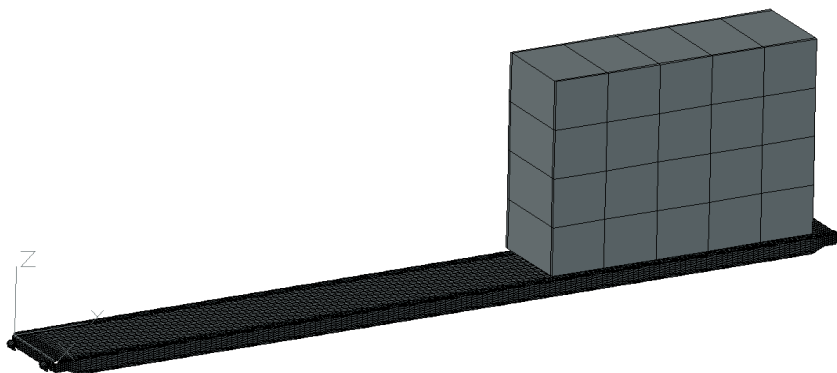
Rys. 9. Model obciążenia dla przypadku pierwszego.
Fig. 9. Load model for the case no. 1.

- w drugim przypadku obciążeń na płytę pomostową przyłożono obciążenie w środku jej rozpiętości na długości jednego metra o wartości $6,0 \text{ kN/m}^2$ (Rys. 10),



Rys. 10. Model obciążenia dla przypadku drugim.
Fig. 10. Load model for the case no. 2.

- w trzecim przypadku obciążeń na płytę pomostową przyłożono obciążenie na jednym z boków pomostu na szerokości jednego metra o wartości $6,0 \text{ kN/m}^2$ (Rys. 11).

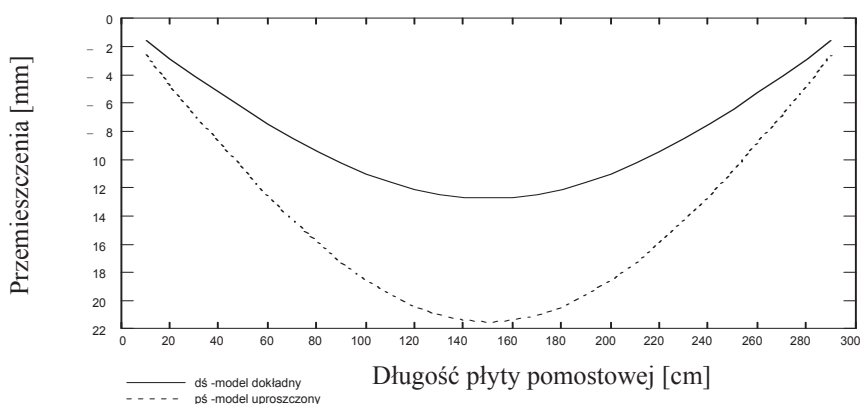


Rys. 11. Model obciążenia dla przypadku trzeciego.

Fig. 11. Load model for the case no. 3.

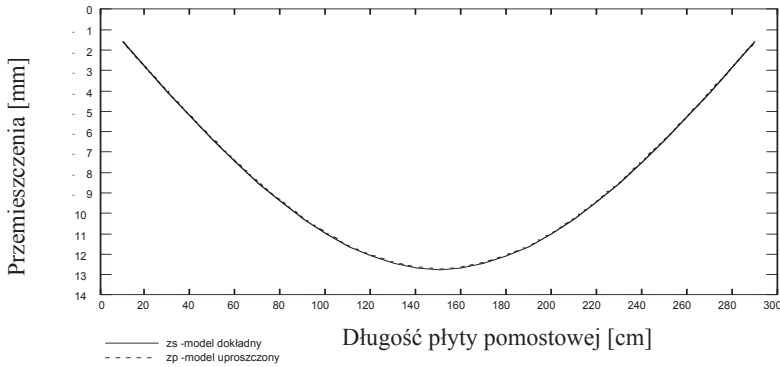
W każdym z wymienionych przypadków obciążenie wypadkowe z całej powierzchni płyty pomostowej było takie same.

Na przykładzie płyty pomostowej o wymiarach 3072 mm×320 mm pokazany zostanie szczegółowy tok postępowania, prowadzący do wyznaczenia modelu uproszczonego, a także analiza uzyskanych wyników. Pierwszym etapem było obciążenie modelu dokładnego i uproszczonego według trzech przypadków obciążeń opisanych powyżej. Następnie porównano przemieszczenia odczytane ze środka ciężkości boku płyty pomostowej w modelu dokładnym z odpowiadającymi im przemieszczeniami na boku modelu uproszczonego. Przykładowe porównanie zilustrowano na Rys.12. Kolejnym krokiem było wyznaczenie ostatecznych właściwości materiału w elementach modelu uproszczonego. Polegało to na korygowaniu wartości momentów bezwładności elementów prętowych dążąc do tego, aby różnica ugięć pomiędzy tymi dwoma modelami była jak najmniejsza. Przykładowe porównanie przemieszczeń z modelu dokładnego i uproszczonego z ostatecznie przyjętymi parametrami przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 12. Porównanie wartości przemieszczeń otrzymanych z obciążenia modelu dokładnego i uproszczonego ze wstępnie przyjętymi parametrami dla pierwszego przypadku obciążeń.

Fig. 12. Comparison of displacement values obtained for load acting on detailed model and simplified one with initial conditions assumed according to the first load case.



Rys. 13. Porównanie wartości przemieszczeń otrzymanych z obciążenia modelu dokładnego i uproszczonego z ostatecznie przyjętymi parametrami dla pierwszego przypadku obciążeń.

Fig. 13. Comparison of displacement values obtained for load acting on detailed model and simplified one with final conditions assumed according to the first load case.

Porównanie otrzymanych przemieszczeń wykazało różnice w zależności od przypadku obciążenia sięgają blisko 4% co wymusiło uwzględnienie tego faktu przy określaniu wartości naprężeń w płycie pomostowej. Polegało to na wprowadzeniu współczynnika korekcyjnego, zwiększającego wartości otrzymanych naprężeń o 5% tak, aby analizować stan naprężeń bezpieczniejszy dla konstrukcji.

4. Analiza statyczna pomostów na rusztowaniach

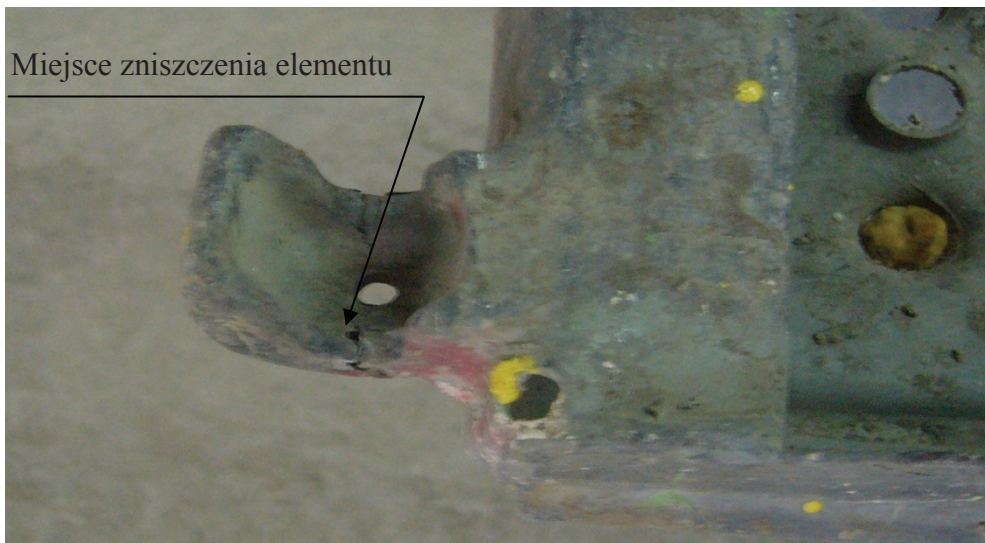
4.1. Metoda wykorzystania obu modeli w analizie statycznej

Po stworzeniu modelu uproszczonego kolejnym etapem w pracy było praktyczne zastosowanie tego modelu do zamodelowania podestu roboczego rusztowania o wymiarach 3,072 m × 3,072 m. Model tego segmentu rusztowania składał się z dziewięciu płyt pomostowych a ich obciążeniem była płyta o wymiarach 1000 mm × 1200 mm i łącznym ciężarze równym 10,0 kN. Taki model obciążenia odpowiada składowanym na palecie materiałom budowlanym, wykorzystywanym podczas eksploatacji rusztowania. W poszukiwaniu najbardziej niekorzystnego położenia rozpatrywanego obciążenia, obliczenia przeprowadzono w ośmiu wariantach, co pozwoliło na rozpatrzenie wszystkich możliwych położenia lokalizacji palety materiałów budowlanych. W celu wyznaczenia maksymalnych wartości i rozkładu naprężeń w płycie pomostowej, w modelu uproszczonym odczytano przemieszczenia z najbardziej wyiężonej płyty, i przeniesiono je na model dokładny w postaci wymuszeń przyłożonych w środku ciężkości boków elementu nr 3 płyty pomostowej. Dopiero tak obciążony model dokładny można było poddać końcowej analizie i sformułować wnioski, dotyczące naprężeń w płytach.

4.2. Analiza wyników obliczeń

Zgodnie z przypuszczeniami najbardziej wyiężonym miejscem okazał się punkt oparcia płyty pomostowej na ryglu oraz miejsce połączenia blachy przedniej i blachy środkowej. Zostało to potwierdzone podczas oględzin uszkodzonych

elementów, które zostały wycofane z użytku (Rys. 14 i Rys. 15). Miejsca w rzeczywistych elementach, w których zaobserwowano uplastycznienie stali pokrywają się z miejscami wystąpienia koncentracji naprężeń w modelu komputerowym (Rys. 15).



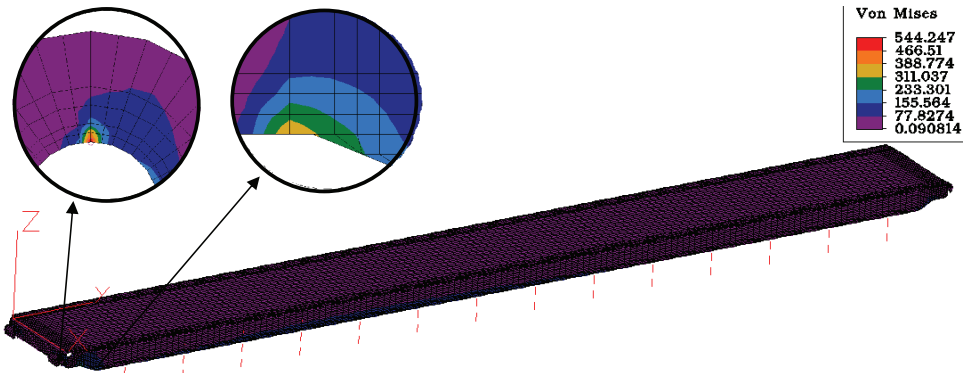
Rys. 14. Uszkodzenia zaczepu.

Fig. 14. Damage in fastener.



Rys. 15. Uszkodzenia w strefie połączenia blachy przedniej i środkowej.

Fig. 15. Damage in the place of front sheet and central one connection.



Rys. 16. Naprężenia zredukowane Hubera-Misesa [MPa] w najbardziej wyężonej pojedynczej płycie pomostowej wymiarach 3072 mm × 320 mm.

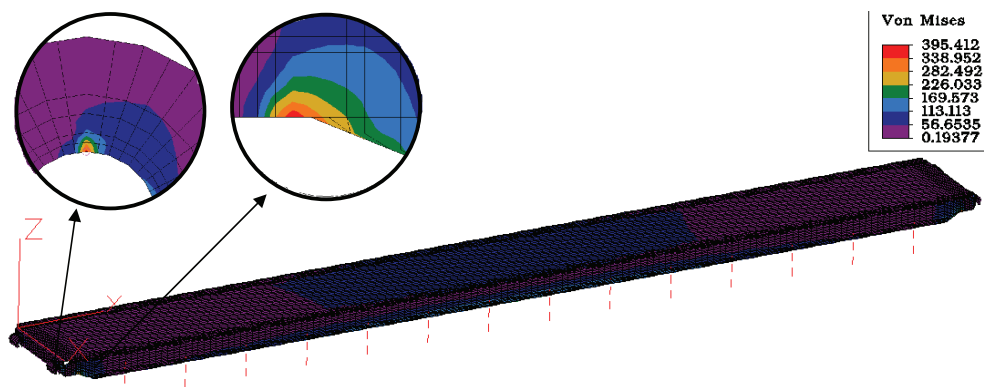
Fig. 16. Reduced stresses according to Huber-Mises hypothesis [MPa] in the most strain single deck plate of the dimensions 3072 mm × 320 mm.

W przypadku punktowego przyłożenia siły lub ostrego naroża generującego koncentrację naprężeń, z rozwiązań liniowej teorii sprężystości otrzymujemy naprężenia dążące do nieskończoności w miejscu ostrego naroża, czy też punktu przyłożenia siły lub podpory. Fakt znacznego zwiększania wartości naprężeń na bardzo małej powierzchni po zagęszczeniu siatki w modelu MES został potwierdzony w obliczeniach i pokazany na Rys. 16. W takiej sytuacji nie można otrzymanych naprężeń porównywać z dopuszczalnymi dla danego materiału. W miejscu koncentracji naprężeń w wyniku uplastycznienia materiału bardzo trudno otrzymać wiarygodne wyniki, które oddawałyby faktyczny stan naprężeń w elemencie. W celu dokładnego wyznaczenia wartości naprężeń w miejscu koncentracji należałoby przeprowadzić obliczenia nieliniowe. Jeżeli naprężenia wyznaczane są w zakresie obliczeń liniowych konieczne jest zastosowanie pewnych uproszczeń. Jedną z możliwości jest odrzucenie naprężeń na pewnym obszarze w miejscu wierzchołka karbu. Miejscowe uplastycznienie stali nie oznacza całkowitej utraty nośności całego elementu. Zasięg strefy uplastycznienia jest nieporównywalnie mały w stosunku do wymiarów całego elementu. Przekroczenie granicy plastyczności nie oznacza zniszczenia elementu a jedynie nieodwracalne zmiany w strukturze materiału jakim jest stal. Wyznaczając nośność elementu nie brano pod uwagę naprężeń występujących w miejscach ich koncentracji. Na Rys. 18 przedstawiono rozkład naprężeń po wyeliminowaniu miejsc koncentracji.

Ostateczne wartości naprężeń maksymalnych otrzymane w rozpatrywanych płytach są bardzo zbliżone do siebie. Różnice zaobserwować możemy jedynie w rozkładzie naprężeń w płytach pomostowych o różnych długościach oraz to, że w płycie pomostowej z obciążeniem w środku rozpiętości znacznie mniej wyężone są zaczepy.

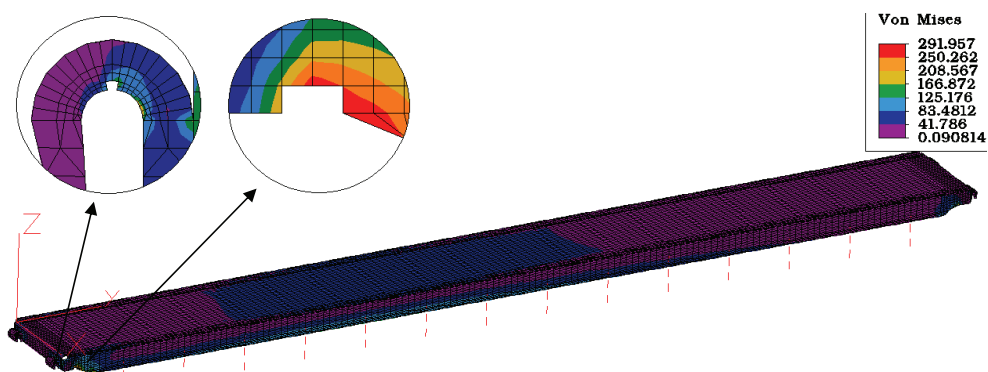
Wyniki otrzymane z analizy naprężeń pomnożono przez współczynnik korekcyjny, wynikający z porównywania przemieszczeń w dwóch rodzajach modeli pomostów, i zestawiono w drugiej kolumnie Tabeli 2. Obliczenia wykonywano w zakresie liniowym, a obciążenie wyjściowe wynosiło 10,0 kN, co umożliwiło w prosty sposób obliczenie całkowitego dopuszczalnego obciążenia rozłożonego na podeście roboczym. Dzieląc wytrzymałość obliczeniową stali, z której wykonane są

płyty pomostowe, przez wartość naprężeń otrzymanych przy obciążeniu równym 10,0 kN, otrzymujemy współczynnik (trzecia kolumna Tabeli 3, który pomnożony przez wartość obciążenia wyjściowego, określa całkowite dopuszczalne obciążenie pomostów (ostatnia kolumna Tabeli 3).



Rys. 17. Naprężenia zredukowane Hubera-Misesa [MPa] w najbardziej wyciążonej pojedynczej płycie pomostowej o wymiarach 3072 mm × 320 mm po zagęszczeniu sitaki modelu MES w miejscu koncentracji naprężeń.

Fig. 17. Reduced stresses according to Huber-Mises hypothesis [MPa] in the most strain single deck plate of the dimensions 3072 mm × 320 mm, after FEM model grid congested in the place of stress concentration.



Rys. 18. Naprężenia zredukowane Hubera-Misesa [MPa] w najbardziej wyciążonej pojedynczej płycie pomostowej o wymiarach 3072 mm × 320 mm po usunięciu elementów w miejscu koncentracji naprężeń.

Fig. 18. Reduced stresses according to Huber-Mises hypothesis [MPa] in the most strain single deck plate of the dimensions 3072 mm × 320 mm, after removing elements in the place of stress concentration.

Jak widać w Tabeli 3 najkrótsze pomosty o szerokości 160 mm mogą przenieść obciążenie o wartości wypadkowej równej 30,23 kN, a wykorzystanie w rusztowaniu pomostów o długości 1572 mm i szerokości 320 mm powoduje, że to obciążenie zmniejsza się o 44,28%. Jeżeli użytkownik rusztowania planuje wykorzystywać palety z materiałami, to dla bezpieczeństwa należałoby stosować pomosty o szerokości 160 mm.

Tabela 2. Maksymalne wartości naprężeń i przemieszczeń przy obciążeniu w najbardziej niekorzystnym wariancie.

Table 2. Maximum values of stresses and displacements in the most unfavorable case of the load.

Wymiar płyty pomostowej	Maksymalna wartość naprężeń uzyskanych podczas analizy	Maksymalna wartość przemieszczeń uzyskanych podczas analizy
[mm]	[MPa]	[mm]
3072 × 320	317,75	15,427
2572 × 320	286,46	9,087
2072 × 320	240,05	4,766
1572 × 320	164,98	1,839
3072 × 160	135,36	8,420
2572 × 160	130,81	4,942
2072 × 160	129,99	2,962
1572 × 160	89,15	1,064

Tabela 3. Maksymalne naprężenia i dopuszczalna wartość obciążenia.

Table 3. Maximum stresses and maximum load capacity.

Wymiar płyty pomostowej	Naprężenia maksymalne	Współczynnik obliczeniowy	Maksymalna, dopuszczalna wartość obciążenia
[mm]	[MPa]	[-]	[kN]
3072 × 320	333,63	0,848	8,48
2572 × 320	300,78	0,941	9,41
2072 × 320	252,05	1,123	11,23
1572 × 320	172,49	1,641	16,41
3072 × 160	142,12	1,991	19,91
2572 × 160	137,35	2,060	20,60
2072 × 160	135,64	2,086	20,86
1572 × 160	93,61	3,023	30,23

5. Wnioski

Podsumowując, należy podkreślić fakt, że mimo rosnącej liczby zastosowań rusztowań oraz coraz większej odpowiedzialności jaka spoczywa na tych tymczasowych konstrukcjach, nie ma opracowanej jednoznacznej metody ich obliczania, natomiast praca płyt pomostowych bardzo często jest pomijana. Przeprowadzona analiza statyczna płyt pomostowych stalowych wykazała, że przy niekorzystnym rozkładzie obciążenia na podeście roboczym naprężenia mogą osiągać znacznie większe wartości niż dla rozkładu równomiernego.

Wykonanie analiz statycznych wymagało opracowania modeli MES o różnej dokładności. Analizując przemieszczenia z kolejnych kroków, upraszczających model MES płyty pomostowej, stwierdzono, że modele uproszczone bardzo dobrze oddają pracę płyty nawet przy różnym schemacie obciążenia. Pozwoliło to na ograniczenie liczby elementów, tworzących model, przy jednoczesnym zachowaniu dokładności obliczeń. W konsekwencji stworzyło to możliwość analizy nawet do kilkunastu płyt jednocześnie. Każde uproszczenie modelu także znacznie skraca czas obliczeń, co okazuje się bardzo ważnym czynnikiem przy poszukiwaniu najbardziej niekorzystnego położenia rozpatrywanego obciążenia.

Podczas analizy naprężeń płyty pomostowej zaobserwowano koncentrację naprężeń, wynikającą z punktowego podparcia. Koncentracja naprężeń wystąpiła także w miejscu połączenia blachy przedniej i środkowej płyty pomostowej, a jest to efekt miejscowego pogrubienia przekroju oraz wystąpienia w tym samym miejscu ostrego naroża. W takiej sytuacji należałoby przeprowadzić obliczenia w zakresie nieliniowym, co pozwoliłoby określić zasięg strefy uplastycznienia stali, oraz umożliwiłoby określenie wpływu tego zaburzenia na stan naprężeń w elemencie.

Obecnie nośność płyt pomostowych określana jest jedynie na podstawie badań laboratoryjnych. Badania te przeprowadza się jednak tylko w odniesieniu do zaleceń obowiązujących norm, a badane płyty pomostowe są niszczone. Stworzenie modelu numerycznego płyty pomostowej także pozwala na określenie nośności płyt pomostowych, a cały proces z tym związany jest dużo tańszy od prac laboratoryjnych. Dodatkowym atutem obliczeń komputerowych jest możliwość wykorzystania raz opracowanego modelu do analizy naprężeń w odniesieniu do indywidualnego rodzaju obciążenia w każdym kolejnym projektowanym rusztowaniu.

Literatura

- [1] Podgórski J., Błazik-Borowa E., *Wprowadzenie do metody elementów skończonych w statyce konstrukcji inżynierskich*, IZT Sp. z o.o., Lublin, 2001.
- [2] PN-EN 12811-1. *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy: Rusztowania, warunki wykonania i ogólne zasady projektowania*.
- [3] Robak A., *Analiza statyczna pomostów umieszczanych na rusztowaniach*, Praca Magisterska, Lublin, 2010.
- [4] *Instrukcja obsługi programu Autodesk Algor Simulation 2011*, Autodesk Inc., marzec 2010.

The numerical research of the strength of scaffolding boards

Aleksander Robak

*Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, 20-618 Lublin, Nadbystrzycka 40, e-mail: a.robak@pollub.pl*

Abstract: Methods of the numerical modeling and the computer static analysis of scaffolding steel boards are presented in the paper. The main issue raised in the study is to determine the carrying capacity of scaffolding boards under the influence of special load cases, and analysis of results and the numerical singularity occurring in the linear analysis.

Keywords: scaffolding, steel platforms, Finite Element Method, stresses concentrations, numerical singularity, static calculations, computer analysis.

