

# Problemy związane z nośnością i statecznością podestów wiszących wykonanych w latach 90. ub. wieku

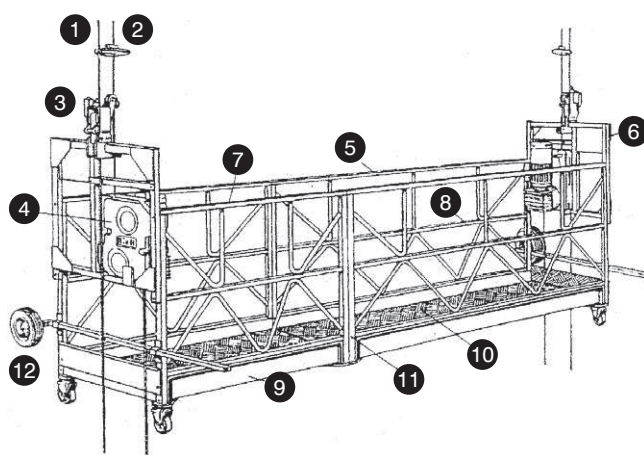
Dr inż. Bernard Kowolik, dr inż. Lesław Niewiadomski, dr hab. inż. Jan Zamorowski, Politechnika Śląska

## 1. Wprowadzenie

Podesty wiszące powinny być zaprojektowane, wykonane oraz użytkowane zgodnie z odpowiednimi przepisami normowymi i przepisami dozoru technicznego. Projekt z obliczeniami statyczno-wytrzymałościowymi, badania techniczne oraz ciągły nadzór techniczny mają wyeliminować zagrożenia i niebezpieczeństwa, które mogłyby wystąpić w czasie jego eksploatacji. W artykule zwrócono uwagę na powyższe zagadnienie, a w szczególności na problemy związane z nośnością, statecznością oraz połączeniami sworzniowymi między segmentami jednego z typów pomostów, wykonanego w latach 90. ubiegłego wieku. W obliczeniach przestrzennego modelu konstrukcji pomostu zastosowano zaawansowaną analizę statyczno-wytrzymałościową II rzędu ujmującą imperfekcje geometryczne i podatności węzłów.

## 2. Podesty ruchome wiszące (SAE)

Podesty ruchome wiszące SAE (*Suspended Access Equipment*) przeznaczone są do prac konserwacyjno-remontowych i montażowych wykonywanych na elewacjach budynków, płaszcach kominów, chłodniach kominowych, itp. Znajdują zastosowanie przy termorenowacji budynków, wykonywaniu i modernizacji elewacji oraz montażu ścian osłonowych. Podesty ruchome wiszące mogą być instalowane na stałe (tzw. BMU – zespoły konserwacyjne budynku) lub czasowo (TSP). W pierwszym przypadku są one związane z określonym budynkiem lub konstrukcją i służą do kontroli, czyszczenia i konserwacji budowli. W drugim zaś przypadku służą do wykonania określonego zadania i są montowane przed rozpoczęciem prac oraz demontowane po ich zakończeniu. Podesty ruchome wiszące składają się z platformy roboczej i konstrukcji nośnej. W przypadku podestów BMU konstrukcja nośna wraz z wciągarką może przemieszczać się po szynach lub innej powierzchni, a w przypadku podestów TSP jest montowana przed przystąpieniem do prac. Zgodnie z definicjami



**Rys. 1.** Przykład typowego podestu TSP [4]: 1 – lina bezpieczeństwa, 2 – lina nośna, 3 – chwytacz, 4 – wciągarka cierna, 5 – balustrada cierna, 6 – wieszak nośny, 7 – balustrada tylna, 8 – poprzeczka, 9 – krawężnik, 10 – pomost, 11 – słupek pionowy, 12 – odbój

zawartymi w normie PN-EN 1808:2002 „Wymagania bezpieczeństwa dotyczące podestów ruchomych wiszących. Obliczenia projektowe, kryteria stateczności, budowa. Badania” [4] platforma robocza to część podestu ruchomego przeznaczona do przenoszenia osób i ich wyposażenia (rys. 1). Zakres niniejszego artykułu ograniczono do platformy roboczej.

W tablicy 1 normy [4] zawarto wykaz kilkudziesięciu zagrożeń i niebezpiecznych sytuacji istotnych w przypadku podestów ruchomych SAE, które zostały zidentyfikowane na podstawie oceny ryzyka. Zagrożenia te wymagają podjęcia przeciwdziałań w celu wyeliminowania lub zmniejszenia ryzyka ich wystąpienia. Przed przystąpieniem do seryjnej produkcji podestów SAE przeprowadza się weryfikację danego typu na reprezentatywnej liczbie próbek. Polega ona na sprawdzeniu zgodności projektu z normą [4] i badaniach pod obciążeniem próbnym. Dokumentacja podestu powinna zawierać rysunki, opisy parametrów, informacje o zastosowanych materiałach, schematy elektryczne, hydrauliczne i pneumatyczne,

instrukcją obsługi oraz informacje umożliwiające sprawdzenie obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Z kolei badania danego typu powinny wykazać, że podest SAE jest stateczny, ma odpowiednią wytrzymałość konstrukcyjną oraz, że wszystkie jego funkcje są prawidłowo wykonywane. W przypadku platformy roboczej badania polegają na:

- sprawdzeniu maksymalnego odkształcenia przy podparciu platformy pod kabłąkiem; w przypadku najbardziej niekorzystnego położenia obciążenia strzałka ugięcia nie powinna przekroczyć 1/200 rozpiętości pomostu i 1/1000 rozpiętości pomostu po ustaniu obciążenia (odkształcenie resztkowe),
- wykonaniu próby statycznej platformy zawieszanej na kabłąkach w pozycji poziomej i nachylonej pod kątem 14° przy współczynniku przeciążenia równym 1,5; nie dopuszcza się awarii i widocznych uszkodzeń, a maksymalne ugięcia wynoszą odpowiednio 1/130 i 1/1000 rozpiętości,
- wykonaniu próby dynamicznej (30 cykli) podnoszenia i opuszczania platformy przy współczynniku przeciążenia równym 1,25; nie dopuszcza się awarii i widocznych uszkodzeń,
- wykonaniu próby platformy pod obciążeniem granicznym (przy współczynniku przeciążenia równym 3,0); dopuszcza się odkształcenia trwałe, przy czym części platformy nie mogą zostać zerwane,
- sprawdzeniu wytrzymałości poręczy na obciążenia poziome i pionowe.

W normie [4] zawarto ponadto zapis, który obliguje użytkownika do przeprowadzenia technicznego odbioru podestu TSP przez osobę kompetentną, w miejscu jego zainstalowania. Pomost powinien być również odpowiednio oznakowany.

Zgodnie z normą PN-M-45365.02:1982 „Dźwignice. Podesty ruchome wiszące. Ogólne wymagania i badania” [5], badaniom podlegał każdy podest wiszący. Do badań należało przedstawić kompletną dokumentację techniczną, atesty, protokoły odbioru materiałów, przyrządy pomiarowe oraz wycechowane obciążniki. Badania obejmowały:

- sprawdzenie materiałów, atestów,
- oględziny zewnętrzne,
- sprawdzenie wymiarów,
- sprawdzenie masy,
- sprawdzenie wytrzymałości poręczy,
- sprawdzenie instalacji elektrycznej,
- próbę bez obciążenia,
- próbę statyczną polegającą na równomiernym obciążeniu przez 10 min na wysokości co najmniej 0,2 m, masą równą 1,5 udźwigu,
- próbę dynamiczną polegającą na 3-krotnym podnoszeniu i opuszczaniu podestu roboczego z obciążeniem równym 1,1 udźwigu na wysokość nie mniejszą niż 20% maksymalnej wysokości podnoszenia pomostu,
- próbę dynamiczną mechanizmu jazdy poziomej (dotyczy dźwignic),

- sprawdzenie stateczności podestu ruchomego wiszącego.

Podesty ruchome zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów [6] podlegają dozorowi technicznemu.

W artykule przedstawiono analizę statyczno-wytrzymałościową jednego z podestów roboczych produkowanych w latach dziewięćdziesiątych XX wieku.

### 3. Konstrukcja platformy roboczej podestów

Częstym rozwiązaniem konstrukcyjnym były podesty segmentowe złożone z kilku modułów o łącznej długości  $m \cdot 3 \text{ m} + n \cdot 2 \text{ m}$ , nie przekraczającej 11,0 m – patrz rysunek 2. Segmenty składały się z nośnych, płaskich belek kratownicowych o wysokości 0,6 m (rys. 3) łączonych między sobą na sworznie za pośrednictwem poprzecznych ramek, których wymiary przedstawiono na rysunku 4. Podobnie łączono elementy balustrad.



Rys. 2. Fotografia pomostu przygotowanego do badania (zdjęcie UDT)



Rys. 3. Belki kratownicowe o długości 3,0 m

Na dolnych pasach belek kratownicowych oparto elementy podłogowe, a na końcach pomostu zamontowano elementy nośne, do których mocowano wciągarki służące do jego podnoszenia i opuszczania.

W jednym z takich podestów pasy kratownic wykonano z rur RP 50x40x3 mm, a krzyżulce i skrajne słupki z rur RK 25x25x2,5 mm. Słupki ramek poprzecznych były utworzone z rury RK 50x50x3 mm, a łącząca je dołem belka pozioma – z dwóch zespalanych ze sobą rur RK 50x50x3 mm i RP 50x40x3 mm. Do słupków ramek przyspawano elementy łączące tzw. ucha z otworami  $\varnothing 21 \text{ mm}$ , które wykonano z profilu ceowego o wymiarach przekroju poprzecznego wg rysunku 5. W uchach tych były umieszczone pasy kratownic i elementy balustrad, z otworami  $\varnothing 21 \text{ mm}$  na końcach. Sworznie

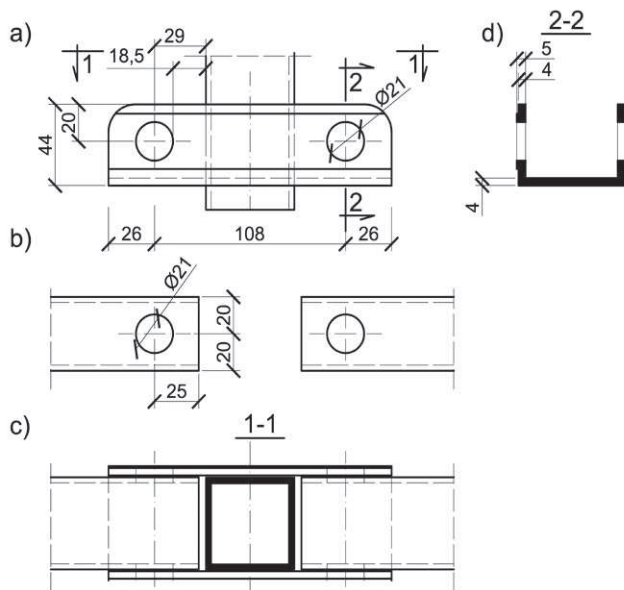
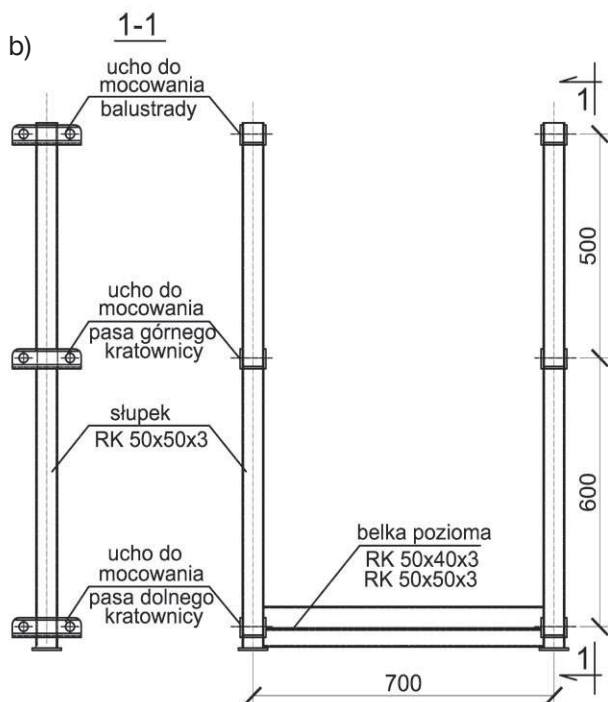


łączące kratownice i balustrady z ramkami miały średnice 20 mm. Rurowe elementy pomostu i ucha ramek zostały wykonane ze stopów aluminium odpowiednio ze stopu PA38 td i EN-AW 6063 T6.

Zgodnie z normami [4] i [5] dopuszczalne obciążenie pomostu powinno wynikać z analizy statyczno-wytrzymałościowej jej elementów oraz zostać potwierdzone badaniami każdego pomostu. W dokumentacji techniczno-ruchowej podestów podawano sumaryczny udźwig pomostu (np. 7,0 kN), maksymalne obciążenie 1 m<sup>2</sup> podłogi (np. 2,0 kN/m<sup>2</sup>), wysokość podnoszenia (np. 30,0 m) oraz maksymalną prędkość jazdy – podnoszenia i opuszczania (np. 8 m/min).



**Rys. 4.**  
Ramka łącząca segmenty pomostu:  
a) zdjęcie,  
b) rysunek



**Rys. 5.** Geometria połączenia pasa dolnego z uchem: a) ucho ze słupkiem, b) otwory na końcach pasów, c) widok z góry, d) przekrój przez ucho

#### 4. Ocena nośności (stateczności) podestów roboczych

W obecnie obowiązującej normie [4] zaleca się wymiarowanie elementów pomostu zgodnie z metodą naprężeń dopuszczalnych. Naprężenia otrzymane z analiz statyczno-wytrzymałościowych nie powinny przekroczyć naprężeń dopuszczalnych  $\sigma_a$  uzyskanych z podzielenia granicy plastyczności przez współczynnik bezpieczeństwa  $\nu_E$ . Jednocześnie w normie [4] dopuszcza się stosowanie metody stanów granicznych pod warunkiem uzyskania tego samego stopnia bezpieczeństwa użytkowania pomostu. Rozważa się trzy przypadki obciążenia. W przypadku 1 – obciążenia w warunkach pracy SAE – uwzględnia się masę własną, udźwig nominalny, obciążenie wiatrem w czasie pracy i siły wywierane przez ludzi (wszystkie ze współczynnikiem przeciążenia 1,25); współczynnik  $\nu_E$  wynosi 1,5. W drugim przypadku – obciążenia w warunkach spotykanych sporadycznie (np. badania statyczne i dynamiczne) – uwzględnia się masę własną pomostu roboczego i nominalny udźwig ze współczynnikiem przeciążenia 1,33; współczynnik  $\nu_E$  wynosi 1,5. Przypadek 3 – obciążenia w warunkach krańcowych (np. zadziałanie chwytacza) – ujmuje masę własną i udźwig, ze współczynnikami 2,5; współczynnik  $\nu_E$  wynosi 1,0. W obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych należy wykazać, że nie nastąpi zniszczenie w skutek przekroczenia naprężeń dopuszczalnych lub krytycznego obciążenia wybaczącego, a także granicy wytrzymałości na zmęczenie.

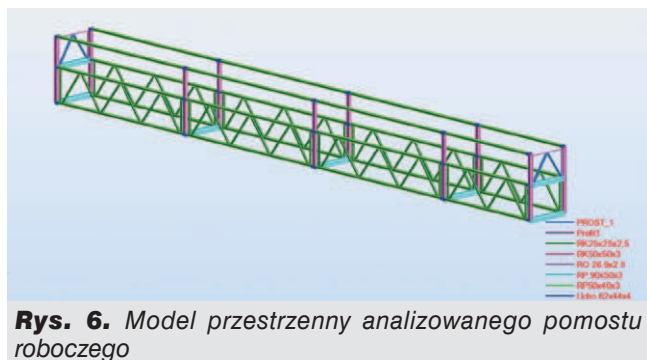
W czasie projektowania podestów w latach 90. w zakresie konstrukcji aluminiowych obowiązywała norma [7], oparta na metodzie naprężeń dopuszczalnych. W metodzie tej zestawia się na konstrukcje tzw. obciążenia normowe

(odpowiednik obciążeń charakterystycznych) i dla tak ustalonych obciążeń sprawdza się, czy dla danego przypadku wytrzymałościowego (np. rozciągania, ściskania, zginania, zginania ze ściskaniem) naprężenia w przekroju nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych  $k$ .

Obecnie podest można analizować korzystając z przestrzennego modelu obliczeniowego (rys. 6), w którym zazwyczaj uwzględnia się:

- ciągłość pasów na długości segmentów 3 i 2-metrowych,
- mimośrodę w połączeniach krzyżulców z pasami i pasów z uchami,
- przegubowe połączenia pasów z ramkami typu „U” w płaszczyźnie kraty oraz alternatywnie przegubowe połączenie z uwzględnieniem podatności na przesuw.

W modelu tym można jeszcze rozważać schematy sta-



Rys. 6. Model przestrzenny analizowanego pomostu roboczego

tyczne, w których w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny kratownicy pasy będą połączone z uchami w sposób:

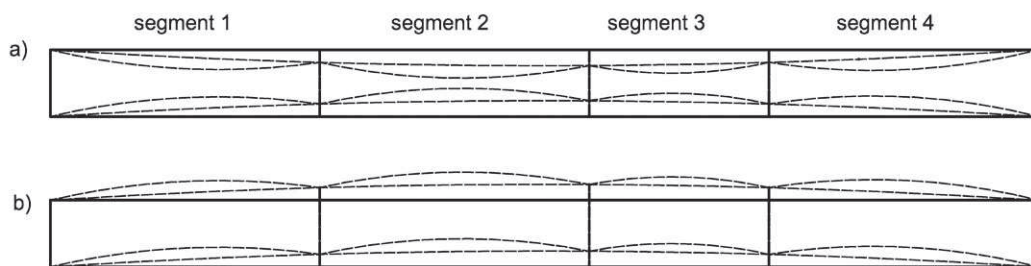
- przegubowy; ustrój przestrzenny jest wtedy geometrycznie zmienny,
- sztywny, przyjmując do wymiarowania długości wybo- czeniowe górnych pasów z płaszczyzny w trojaki sposób, jako: odległości między ramkami (stężeniami) [8], otrzymane z programu komputerowego ROBOT, otrzymane z analizy jak dla mostów otwartych wg [1], [9],
- podatny.

Zakładając sztywne połączenie pasów kratownicy z uchami w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny kratownicy, konieczne staje się określenie długości wybo- czeniowej ściskanych pasów z płaszczyzny kratownicy. W przypadku wystarczająco sztywnych ramek (co należy stwierdzić wzorami normowymi [8]) można przy- jąć, że długość ta jest równa odległości między ramkami traktowanymi jako stężenia (punkty bocznego podpar- cia). Takie podejście może być bezpieczne i ostrożne na etapie projektowania. Analizując eksploatowany pod- dest czasami może zająć potrzeba przeprowadzenia dokładniejszych obliczeń. Autorzy niniejszego artykułu wykorzystując moduł analizy wybo- czeniowej programu ROBOT otrzymali dla podestu jak na rysunku 6 współ- czynnik długości wybo- czeniowej równy  $\mu = 0,872$  od- niesiony do odległości między poprzecznymi ramka- mi. O wartości tego współczynnika decyduje sztywność

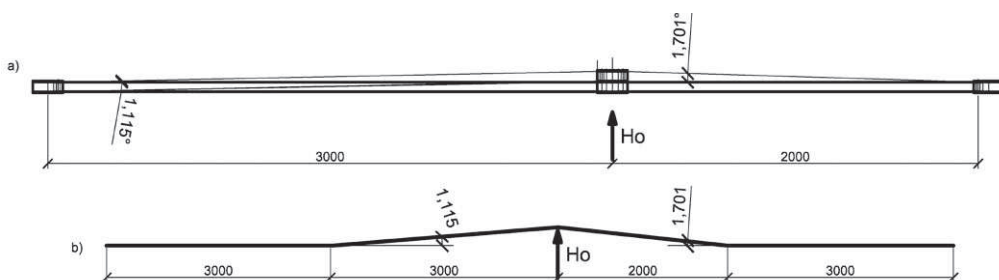
słupków ramek na zginanie i najniższy element ściska- nych pasów kratownic. W publikacji [1] oraz w Euroko- dzie [9] podano sposób wyznaczenia długości wybo- czeniowej dla ściskanego pasa mostu otwartego, przy założeniu, że zapewniona jest ciągłość pasa przy pół- ramach. Korzystając z tego sposobu otrzymano  $\mu = 0,570$ . Z kolei na podstawie normy [7] i [8] (obowiązu- jących w czasie projektowania tych pomostów) można było dobrać wartość współczynnika wybo- czeniowego w dwojaki sposób bądź na podstawie przepisów ogólnych jako odległość między punktami bocznych przytrzy- mań (poprzecznymi ramkami), bądź też jak dla prętów sprężyste podpartych (np. pasów mostów otwartych). W pierwszym przypadku należało przyjąć współczynnik długości wybo- czeniowej  $\mu = 1,0$ . Sposób postępowania w drugim przypadku polegał na określeniu maksymalnej wartości współczynnika wybo- czeniowego jako stosunku siły osiowej do nośności przekroju, a nastę- pnie sprawdzeniu, czy ramki są na tyle sztywne, by za- pewnić taką wartość współczynnika wybo- czeniowego. W tym przypadku została zapewniona wartość  $\mu = 0,50$ . Opisanie wyżej sposoby analizy wymagały zapewnienia ciągłości pasów. Można by to uzyskać tylko przez mo- dyfikację połączeń pasów z ramkami.

Rzeczywiste połączenie pasów z ramkami kwalifikuje się jako podatne. W kolejnym schemacie statycznym uwzględniono wpływ podatności węzła na przesuw i obrót z płaszczyzny kratownicy. Współczynniki sztywności wyznaczono na podstawie normy [10] i pozycji [2] jak dla połączenia dwuciętego. Otrzymano sztywność na prze- suw wzdłuż osi pasów  $K_s = 11,33$  kN/m oraz na obrót  $S_i = 50,9$  kNm/rad. Przy takich założeniach otrzymano, na podstawie obliczeń programem ROBOT, współczynnik długości wybo- czeniowej górnego pasa przy wybo- czeniu z płaszczyzny kratownicy równy  $\mu = 0,79$ . W dalszych analizach statyczno-wytrzymałościowych wyeliminowa- no konieczność wprowadzania do obliczeń współczynni- ka długości wybo- czeniowej górnego pasa, wprowadzając do analizy nieliniowej model obliczeniowy konstrukcji przestrzennej z imperfekcjami i podatnymi połączeniami pasów z uchami. Zgodnie z normami [11], [12] w obli- czeniach uwzględniono imperfekcje globalne w postaci wygięć górnych pasów kratownicy na całej ich długości, o strzałce  $L/500$  oraz imperfekcje lokalne w postaci wy- gięć pasów między ramkami, o strzałce  $l/200$  lub  $l/100$ . Strzałkę  $l/100$  określono przy założeniu, że swobodny obrót końców pręta jest możliwy aż do ich zaklinowania się w uchach. Uwzględniono przy tym rzeczywiste wartości luzów w połączeniach. Spośród kilku kombinacji imper- fekcji globalnych z lokalnymi imperfekcjami łukowymi, decydującymi o wymiarowaniu konstrukcji, okazały się układy symetryczny i antysymetryczny (rys. 7).

W kolejnym schemacie przyjęto geometrię ściskanych pasów kratownicy w postaci linii łamanej (rys. 8), któ- rą uzyskano uwzględniając możliwe swobodne prze- suwy i obroty pasów w węzłach, wynikające z luzów w połączeniach.



**Rys. 7.**  
Imperfekcje w układzie symetrycznym (a) i antysymetrycznym (b)



**Rys. 8.**  
a) Możliwe swobodne obroty pasów, b) geometria pasów w postaci linii łamanej

W przypadku nieliniowej analizy konstrukcji z imperfekcjami globalnymi i lokalnymi, nośność elementów sprawdza się porównując naprężenia z granicą plastyczności w przypadku metody stanów granicznych lub z naprężeniami dopuszczalnymi w przypadku analizy metodą naprężeń dopuszczalnych. W efekcie takich obliczeń miernikiem wyężenia pasa były naprężenia obliczone od sumarycznych wpływów ściskania i zginania. W wyniku analizy okazało się, że naprężenia te są równoważne naprężeniom przy współczynniku długości wybozczeniowej  $\mu = 0,40$ .

Uzyskane współczynniki wyężenia ściskanego pasa kratownicy w zależności od schematu statycznego i rodzaju analizy przedstawiono w tabeli 1.

## 5. Nośność połączeń segmentów z ramkami

Belki kratowe i balustrady połączono z słupkami ramek za pomocą sworzni  $\varnothing 21$  mm przechodzących przez kwadratowy profil pasa i ceowy profil ucha – patrz rysunki 4 i 5. W analizowanym podejściu otwory na sworznie zlokalizowano blisko swobodnych krawędzi profilu ceowego ucha. Odległość od krawędzi równoległej do osi pasa wynosiła  $e_2 = 20$  mm, a do krawędzi prostopadłej  $e_1 = 26$  mm. W normach [7] i [8], na podstawie których powinien być zaprojektowany pomost, nie sprecyzowano wymagań w zakresie odległości osi otworu na sworznie do krawędzi elementu równoległej do kierunku działania siły. Podano jedynie wymagania dla połączeń na nity i śruby dotyczące obu odległości, przy czym w normie [7] wymagania te dotyczyły jedynie odległości od osi łącznika do krawędzi prostopadłej do kierunku działania siły. Z kolei w normie [13] obowiązującej dla konstrukcji stalowych od 1990 r. podano minimalne odległości od obu krawędzi dla nitów, śrub i sworzni. W obecnie obowiązujących przepisach Eurokodów [10] i [11] zamieszczono dodatkowe wymagania

dotyczące lokalizacji otworów w połączeniach na sworznie w zależności od wartości siły działającej w połączeniu. Zestawienie wymaganych, minimalnych odległości osi otworu na nity, śruby i sworznie od krawędzi elementu zamieszczono w tabelach 2 i 3.

W analizowanym przypadku, zgodnie z normą [11], odległości  $a$  i  $c$  od krawędzi prostopadłej i równoległej do osi ceownika powinny wynosić odpowiednio 22 mm i 15 mm zamiast 15,5 mm i 9,5 mm. W tym podejściu nie spełniono również wymagań zawartych w tabeli 2. W efekcie przyjęta odległość osi otworu od krawędzi elementu równoległej do kierunku działania siły była za mała.

W związku z tak bliskim usytuowaniem otworu względem krawędzi blachy może nastąpić koncentracja naprężeń przy brzegu otworu. W normach z lat 62 i 64 oraz obecnie obowiązujących pomija się wpływ koncentracji naprężeń przy otworze, przy czym obecnie otwór sytuuje się dalej od krawędzi blachy. Koncentrację naprężeń przy otworze można oszacować na podstawie literatury, np. [3]. W analizowanym przypadku wartość współczynnika spiętrzenia naprężeń przy otworze oszacowano na 2,2. Uzyskane współczynniki wyężenia osłabionego przekroju ucha w porównaniu z jego nośnością zestawiono w tabeli 4.

Należy jeszcze zwrócić uwagę na problem nośności połączenia ze względu na docisk łącznika do ścianki otworu. Zgodnie z normami PN-B-03200:1962 [8] i PN-B-03220:1964 [7] wytrzymałość na docisk łącznika do ścianki otworu nie zależy od lokalizacji otworu względem krawędzi elementu. Z kolei w normie PN-B-03200:1990 [13] nośność na docisk uzależniono jedynie od odległości pomiędzy krawędzią elementu a osią otworu w kierunku działania siły. Wszystkie te wzory można uznać za prawidłowe tylko w przypadku zachowania minimalnych odległości osi otworu od krawędzi elementów. W Eurokodzie [10] podano bardziej precyzyjny sposób określenia nośności na docisk łącznika do ścianki otworu uzależniając go od odległości osi otworu od obu



**Tabela 1.** Współczynniki wyężenia ściskanego pasa kratownicy

Lp.	Schemat statyczny	Rodzaj analizy	Długość wyboczeniowa	Współczynniki wyężenia ( $\sigma/k$ )
1	2	3	4	5
1	Pasy przegubowo połączone z „uchami” w płaszczyźnie kratownicy, pasy sztywno połączone z „uchami” z płaszczyzny kratownicy	liniowa	w płaszczyźnie między węzłami, z płaszczyzny między ramkami	3,11
			wyznaczona programem Robot	2,37
			Wyznaczona na podstawie normy [9] jak dla mostów otwartych	1,15
2	Pasy przegubowo połączone z „uchami” w płaszczyźnie kratownicy z uwzględnieniem podatności na przesuw wzdłuż osi pręta, pasy połączone podatnie na obrót z „uchami” z płaszczyzny kratownicy	nieliniowa P-delta	wyznaczona programem Robot	1,55
3	Jak poz. 2 z uwzględnieniem wstępnych imperfekcji łukowych w postaci zastępczych obciążeń	nieliniowa P-delta	uwzględnienie wstępnych imperfekcji łukowych	0,53
4	Jak w poz.2 z uwzględnieniem rzeczywistych luzów w połączeniach w postaci wygięcia pręta	nieliniowa P-delta	uwzględnienie imperfekcji łukowych	0,63
5	Jak poz.2 z uwzględnieniem luzów w połączeniach w postaci linii łamanej	nieliniowa P-delta	uwzględnienie imperfekcji łukowych	0,60

**Tabela 2.** Minimalne i zalecane odległości osi otworu od krawędzi elementu

Lp.	Norma	Minimalne (zalecane)* odległości osi otworu od krawędzi elementu		
		nity	śruby	sworznie
1	2	3	4	5
1	PN-B-03220:1964	$e_1 = 2 \cdot d$ $e_2$ nie podano	$e_1 = 4 \cdot g$ $e_2$ nie podano	$e_1$ nie podano $e_2$ nie podano
2	PN-B-03200:1962	$e_1 = 2,0 \cdot d$ $e_2 = 1,5 \cdot d$	$e_1 = 2,0 \cdot d$ $e_2 = 1,5 \cdot d$	$e_1$ nie podano $e_2$ nie podano
3	PN-B-03200:1990	$e_1 = 1,5 \cdot d$ $e_2 = 1,5 \cdot d$	$e_1 = 1,5 \cdot d$ $e_2 = 1,5 \cdot d$	$e_1 = 1,5 \cdot d$ $e_2 = 1,5 \cdot d$
4	PN-EN 1999-1-1: 2011	$e_1 = 1,2 \cdot d_o$ (2,0·do)* $e_2 = 1,2 \cdot d_o$ (1,5·do)*	$e_1 = 1,2 \cdot d_o$ (2,0·do)* $e_2 = 1,2 \cdot d_o$ (1,5·do)*	Patrz tab.3.

d – średnica łącznika, do – średnica otworu, g – grubość z cieńszych z łączonych części

**Tabela 3.** Wymagania geometryczne dla połączeń sworzniowych na podstawie [10]

Lp.	Połączenie sworzniowe	Wymagania geometryczne
1	2	3
1	<p>Gdy określona jest grubość elementu i średnica otworu</p>	$a = \frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{2 t f_o} + \frac{2}{3} d_o$ $a = \frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{2 t f_o} + \frac{1}{3} d_o$ <p><math>t</math> – grubość blachy, <math>f_o</math> – wartość charakterystyczna umownej granicy plastyczności</p>
2	<p>Gdy określone są proporcje w planie</p>	$t = 0,7 \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{f_o}}$ $d_o = 1,75 \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{f_o}}$

**Tabela 4.** Współczynniki wyężenia przekroju ucha

Lp.	Schemat statyczny	Współczynniki wyężenia ( $\sigma/k$ )		
		na krawędzi ucha	przy otworze bez uwzględnienia koncentracji naprężeń	przy otworze z uwzględnieniem koncentracji naprężeń
1	2	3	4	5
1	Zgodnie z poz. 1 w tabl. 1.	1,14	0,92	1,39
2	Zgodnie z poz. 2 w tabl. 1.	1,04	0,84	1,26

**Tabela 5.** Współczynniki wyężenia materiału ze względu na docisk sworzni do ścianek pasa i ucha

Lp.	Norma	Współczynniki wyężenia materiału w sworzniowym styku ze względu na docisk	
		trzcienia do ścianki pasa	trzcienia do ścianki ucha
1	2	3	4
1	PN-B-03220:1964 PN-B-03200:1962	1,08	0,53
2	PN-B-03200:1990	1,21	0,64
3	PN-EN 1999-1-1: 2011	1,53	2,00

krawędzi – w kierunku działania siły i w kierunku prostopadłym. W tabeli 5 przedstawiono współczynniki wyężenia sworzniowego styku między elementami podestu, które uzyskano ze wzorów zamieszczonych w normach wyszczególnionych w kolumnie 2.

Zgodnie z normami [10] i [11] w przypadku sworzni wymiennalnych sprawdza się również naprężenia stykowe. Zależą one od wartości siły działającej w połączeniu, modułu sprężystości sworzni, materiału elementu i grubości jego ścianki, średnicy sworzni oraz różnicy średnic otworu i sworzni. Im większa ta różnica, tym większe wystąpią naprężenia stykowe. Przekroczenie naprężeń stykowych oraz ciągły montaż i demontaż podestu może powodować rozkalibrowanie otworu, a to w konsekwencji prowadzi do narastania naprężeń stykowych i awarii. Sposób określania naprężeń stykowych nie był ujęty we wcześniejszych normach. W analizowanym przypadku, przy założeniu nominalnej średnicy otworu większej o 1 mm od średnicy sworzni, naprężenia stykowe są przekroczone o 55% w ściance pasa oraz o 20% w ściance ucha. Z kolei w przypadku, gdy na skutek rozkalibrowania otworu różnica ta wyniesie 2 mm, to przekroczenia naprężeń stykowych wyniosłyby odpowiednio 79% i 29%.

## 6. Podsumowanie

Zaawansowana analiza statyczno-wytrzymałościowa konstrukcji jest konieczna w przypadku potrzeby dokładniejszego odwzorowania zachowania się konstrukcji lub potrzeby wyeliminowania w projektowaniu arbitralnie przyjmowanych wartości, np. opartych na niedoskonałych przepisach. W analizowanym przypadku uwzględniając podatność węzłów uzyskano schemat statyczny bardziej zbliżony do rzeczywistej konstrukcji pomostu roboczego. Z kolei wprowadzenie do obliczeń globalnych i lokalnych

imperfekcji wyeliminowało potrzebę wyznaczania współczynnika wyboeczeniowego ściskanych pasów kratownic, którego właściwą wartość było trudno określić na podstawie obowiązujących przepisów w czasie projektowania pomostu, z uwagi na ich niedoskonałość.

W wyniku obliczeń statyczno-wytrzymałościowych przestrzennego modelu pomostu z imperfekcjami globalnymi i lokalnymi, w którym uwzględniono podatność węzłów w połączeniach sworzniowych, nie stwierdzono przekroczenia naprężeń dopuszczalnych w prętach kratownic segmentów pomostu dla obciążeń dopuszczonych w dokumentacji techniczno-ruchowej podestu. Natomiast prosta analiza liniowa płaskiej konstrukcji wykazywała znaczne przekroczenia nośności pasów kratownic.

W artykule zwrócono również uwagę na połączenia sworzniowe pomiędzy elementami pomostu roboczego. Przyjęcie zbyt małej odległości osi sworzni od krawędzi elementu może powodować koncentrację naprężeń w przekroju osłabionym a zastosowane wzory na sprawdzenie nośności połączenia ze względu na docisk mogą być nieadekwatne do rzeczywistego wyężenia styku. W przypadku połączeń na sworznie wymienne istotne również jest określenie naprężeń stykowych, gdyż ich przekroczenie może powodować rozkalibrowanie połączenia.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Mendera Z., Stateczność ściskanych pasów stalowych mostów otwartych. Inżynieria i Budownictwo nr 9/2009
- [2] Zamorowski J., Przestrzenne konstrukcje prętowe z geometrycznymi imperfekcjami i podatnymi węzłami. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2013
- [3] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów. Tom II. Wydawnictwa Naukowo- Techniczne. Warszawa 1997
- [4] PN-EN 1808:2002. Wymagania bezpieczeństwa dotyczące podestów ruchomych wiszących. Obliczenia projektowe, kryteria stateczności, budowa. Badania
- [5] PN-M-45365.02:1982. Dźwignice. Podesty ruchome wiszące. Ogólne wymagania i badania
- [6] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 7 grudnia 2012 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu. Dziennik Ustaw z dnia 27 grudnia 2012 r., poz. 1468
- [7] PN-B-03220:1964. Konstrukcje aluminiowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [8] PN-B-03200:1962. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [9] PN-EN 1993-1-2. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2: Mosty
- [10] PN-EN 1993-1-8:2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów
- [11] PN-EN 1999-1-1: 2011. Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-1: Reguły ogólne
- [12] PN-EN 1993-1-1: 2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [13] PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie