

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

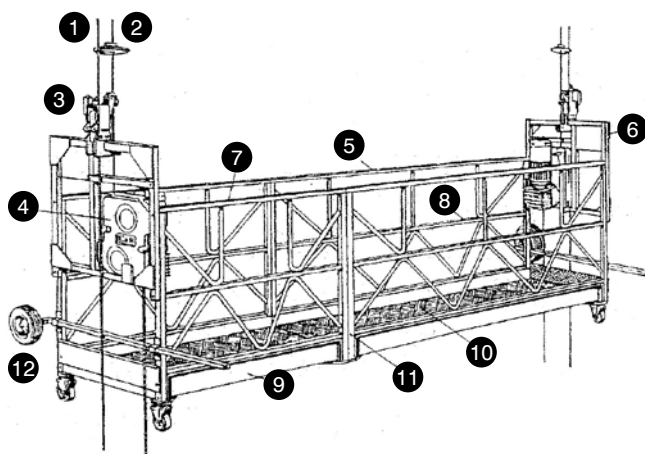
Dr inż. Bernard Kowolik, dr inż. Lesław Niewiadomski, dr hab. inż. Jan Zamorowski, Politechnika Śląska

## 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, płaszczach 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 – linę bezpieczeństwa, 2 – linę nośną, 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,

instrukcję 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.

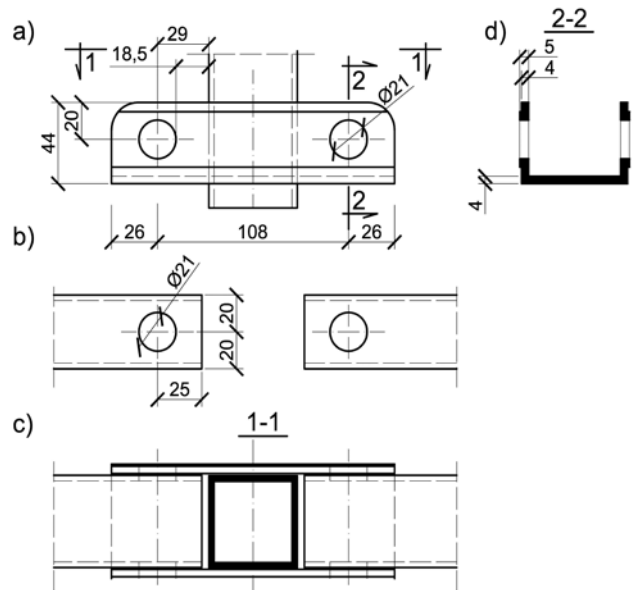
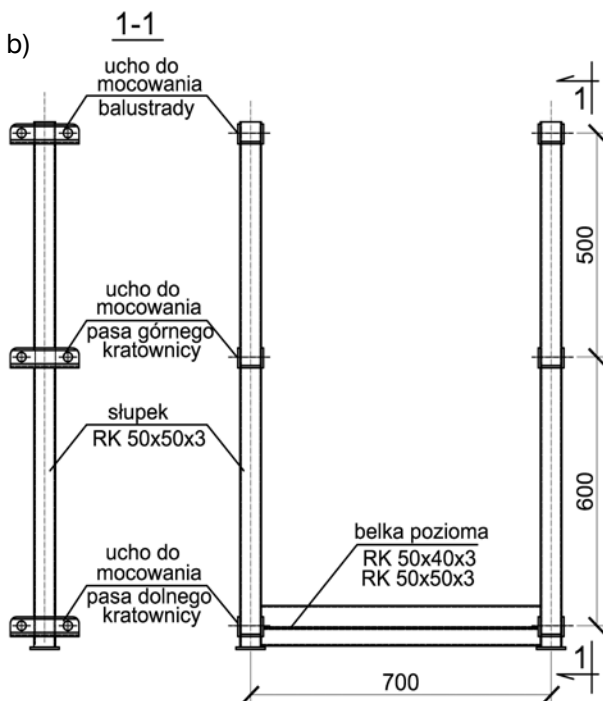
W jednym z takich podestów pasy kratownic wykonano z rur RP 50x40x3 mm, a krzyżulce i skrajne słupki z rur RK 25x25x2,5 mm. Słupki ramek poprzecznych były utworzone z rury RK 50x50x3 mm, a łącząca je dołem belka pozioma – z dwóch zespawanych ze sobą rur RK 50x50x3 mm i RP 50x40x3 mm. Do słupków ramek przyspawano elementy łączące tzw. ucha z otworami  $\varnothing 21$  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  $\varnothing 21$  mm na końcach. Sworznie

łącznie 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.

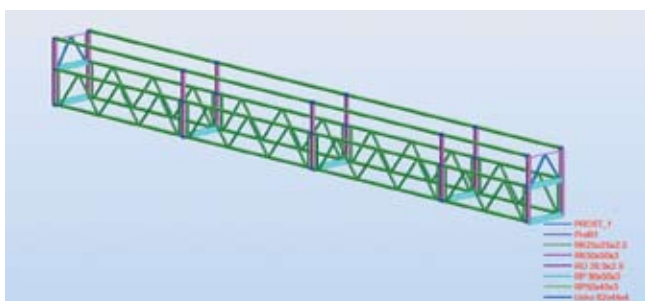
W czasie projektowania podestów w latach 90. w zakresie konstrukcji aluminiowych obowiązywała norma [7], oparta na metodzie naprężeń dopuszczalnych. W metodzie tej zestawia się na konstrukcje tzw. obciążenia normowe

(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 rozważyć 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:

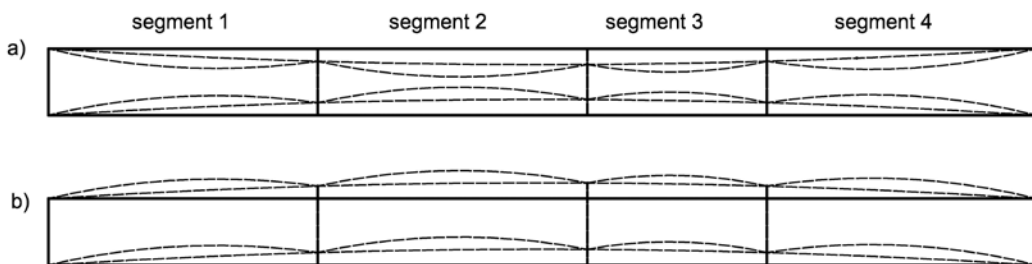
- przegubowy; ustrój przestrzenny jest wtedy geometrycznie zmienny,
- sztywny, przyjmując do wymiarowania długości wybocheniowe górnych pasów z płaszczyzny w trojaki sposób, jako: odległości między ramkami (stężeniami) [8], otrzymane z programu komputerowego ROBOT, otrzymane z analizy jak dla mostów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

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

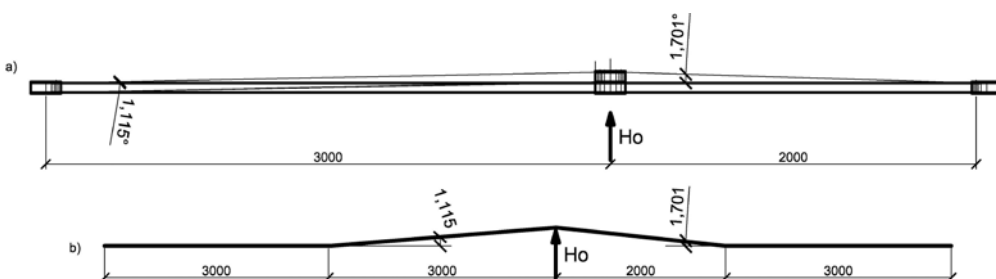
słupków ramek na zginanie i najniższy element ściskanych pasów kratownic. W publikacji [1] oraz w Eurokodie [9] podano sposób wyznaczenia długości wybocheniowej dla ściskanego pasa mostu otwartego, przy założeniu, że zapewniona jest ciągłość pasa przy półramach. Korzystając z tego sposobu otrzymano  $\mu = 0,570$ . Z kolei na podstawie normy [7] i [8] (obowiązujących w czasie projektowania tych pomostów) można było dobrać wartość współczynnika wybocheniowego w dwojaki sposób bądź na podstawie przepisów ogólnych jako odległość między punktami bocznych przytrzymań (poprzecznymi ramkami), bądź też jak dla prętów sprężyste podpartych (np. pasów mostów otwartych). W pierwszym przypadku należało przyjąć współczynnik długości wybocheniowej  $\mu = 1,0$ . Sposób postępowania w drugim przypadku polegał na określeniu maksymalnej wartości współczynnika wybocheniowego jako stosunku siły osiowej do nośności przekroju, a następnie sprawdzeniu, czy ramki są na tyle sztywne, by zapewnić taką wartość współczynnika wybocheniowego. W tym przypadku została zapewniona wartość  $\mu = 0,50$ . Opisane wyżej sposoby analizy wymagały zapewnienia ciągłości pasów. Można by to uzyskać tylko przez modyfikację 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 dwuczętowego. Otrzymano sztywność na przesuw 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 wybocheniowej górnego pasa przy wyboczeniu z płaszczyzny kratownicy równy  $\mu = 0,79$ . W dalszych analizach statyczno-wytrzymałościowych wyeliminowano konieczność wprowadzania do obliczeń współczynnika długości wybocheniowej górnego pasa, wprowadzając do analizy nieliniowej model obliczeniowy konstrukcji przestrzennej z imperfekcjami i podatnymi połączeniami pasów z uchami. Zgodnie z normami [11], [12] w obliczeniach uwzględniono imperfekcje globalne w postaci wygięć górnych pasów kratownicy na całej ich długości, o strzałce  $L/500$  oraz imperfekcje lokalne w postaci wygięć 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 imperfekcji 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), którą uzyskano uwzględniając możliwe swobodne przesuw 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 tamanej

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 wybozeniowej  $\mu = 0,40$ .

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 połączone 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

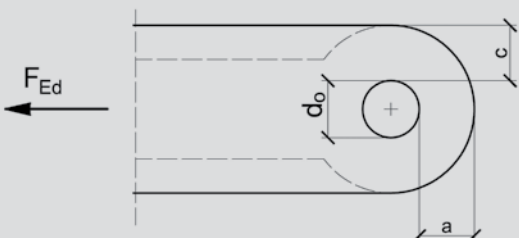
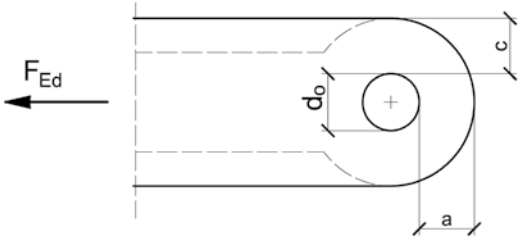
Lp.	Schemat statyczny	Rodzaj analizy	Długość wyboczeniowa	Współczynniki wyężenia ( $\sigma/k$ )
1	2	3	4	5
1	Pasy przegubowo połączone z „uchami” w płaszczyźnie kratownicy, pasy sztywno połączone z „uchami” z płaszczyzny kratownicy	liniowa	w płaszczyźnie między węzłami, z płaszczyzny między ramkami	3,11
			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 tamanej	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 $\cdot d_o$ )* $e_2 = 1,2 \cdot d_o$ (1,5 $\cdot d_o$ )*	$e_1 = 1,2 \cdot d_o$ (2,0 $\cdot d_o$ )* $e_2 = 1,2 \cdot d_o$ (1,5 $\cdot d_o$ )*	Patrz tab.3.

d – średnica łącznika,  $d_o$  – 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> 	$a = \frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{2t f_o} + \frac{2}{3} d_o$ $a = \frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{2t f_o} + \frac{1}{3} d_o$ <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 sworznia 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 wymieniających sprawdza się również naprężenia stykowe. Zależą one od wartości siły działającej w połączeniu, modułu sprężystości sworznia, materiału elementu i grubości jego ścianki, średnicy sworznia oraz różnicy średnic otworu i sworznia. 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 sworznia, 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 wybocheniowego 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 sworznia 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 wymieniające 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