

# Porównanie słupów stożkowo-rurowych jedno- i dwupowłokowych stosowanych w układach trakcji tramwajowej

Mgr inż. Damian Kowalski, Politechnika Krakowska, Europeles Kromiss sp. z o. o.

## 1. Wprowadzenie

Producenci stalowych konstrukcji wsporczych dla trakcji tramwajowej stosują szereg rozwiązań technicznych o sporym zróżnicowaniu. W niniejszym artykule podjęto próbę porównania pracy statycznej dwóch typów rozwiązań, stosowanych w Polsce równolegle:

- standardowego rozwiązania w postaci przekroju zamkniętego okrągłego, wykonanego z pojedynczej powłoki, zwanego dalej jednopowłokowym, oraz
- rozwiązania alternatywnego – dwupowłokowego – w postaci dwóch płaszczy stalowych, o różnych średnicach, umieszczonych koncentrycznie, ze szczeliną pomiędzy nimi, o nominalnej szerokości wynoszącej 5 mm.

## 2. Charakterystyka konstrukcji wsporczych trakcji tramwajowej i trolejbusowej

Konstrukcje wsporcze trakcji tramwajowej i trolejbusowej mają najczęściej postać pionowych wsporników, sztywno zamocowanych przy podstawie. Są one wykonywane najczęściej z profili zamkniętych, okrągłych lub wielokątnych, o przekroju skokowo i/lub jednostajnie zmiennym. Zwykle są to ustroje jednopowłokowe, jednak zdarzają się również słupy złożone z dwóch i większej liczby powłok, połączonych ze sobą zwykle przez spawanie, na obydwu zakończeniach profili. W przypadku słupów jednopowłokowych przekroje są zwykle krępe, co pozwala na nieuwzględnienie wpływu zjawiska niestateczności lokalnej na nośność. Inaczej sytuacja wygląda w odniesieniu do konstrukcji wielopowłokowych, w których smukłości ścianek przekroju są znacznie większe, a obciążenie krytyczne niższe. Fakt ten czyni zadanie porównania pracy statycznej obydwu wymienionych konstrukcji zadaniem nietrywialnym. Innym częstym rozwiązaniem stosowanym w trakcji są słupy z dwuteowników szerokostopowych. W tym przypadku nie stosuje się zmiany przekroju na wysokości słupa.

Słupy trakcyjne mają wysokości zwykle nieprzekraczające 15 metrów. Ich główne obciążenie stanowi pozioma siła, wywołana naciągami przewodów trakcyjnych, mocowanych do słupa, w pobliżu jego górnego wierzchołka. Pozostałe obciążenia, takie jak wiatr czy oblodzenie, stanowią pomijalnie małą część całkowitego obciążenia omawianych konstrukcji. Zasadniczo stosuje się dwie metody posadowienia słupów:

- bezpośrednie wkopanie w grunt, odpowiednio zabezpieczonego

antykorozyjnie, dolnego końca, a następnie jego obetonowanie,

- przykręcanie do fundamentów żelbetowych, najczęściej prefabrykowanych, zaopatrzonych w odpowiednie do tego celu śruby kotwiące, służące do połączenia z blachą podstawy słupa.

Wybór każdego z tych rozwiązań jest uzależniony od warunków gruntowo-wodnych w miejscu posadowienia oraz od siły naciągu przewodów trakcyjnych.

W praktyce często łączy się funkcję podpór trakcyjnych z funkcją oświetleniową – mamy wówczas do czynienia ze słupami trakcyjno-oświetleniowymi (rys. 1). Ponadto łączy się je także z podporami sygnalizacji świetlnej – są to wówczas słupy trakcyjno-sygnalizacyjne. Spotykane są też połączenia tych dwóch typów, w postaci słupów trakcyjno-oświetleniowo-sygnalizacyjnych (rys. 2).

Projektowanie konstrukcji wsporczych trakcji tramwajowej nie zostało dotychczas objęte odrębnym opracowaniem normowym. W związku z tym projektując konstrukcję słupów trakcyjnych, można posilkować się normami ogólnymi, dotyczącymi projektowania konstrukcji stalowych [1, 2]. Ponadto pewien niewielki zasób informacji jest do dyspozycji projektantów w opracowaniu Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej [3] oraz w praktycznym poradniku Labochy i Paluszyńskiego [4]. Pomocne mogą być również normy zakładowe z zakresu projektowania słupów stalowych [9] oraz żelbetowych [10] dla trakcji kolejowej. W niniejszym artykule wykorzystano w szczególności postanowienia eurokodu, dotyczącego projektowania powłok stalowych [5], oraz podręczniki



Rys. 1. Przykład słupa trakcyjno-oświetleniowego



Rys. 2. Przykład słupa trakcyjno-oświetleniowo-sygnalizacyjnego

obsługi systemu obliczeniowego Nastran [6, 7, 8]. Modele powłokowo-bryłowe wykonano za pomocą programu Femap, natomiast modele prętowe utworzono programem Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

### 3. Założenia i metody analizy

Istnieją praktyczne przesłanki do wykonania analizy porównawczej rozważanych rozwiązań słupów trakcyjnych. Ponieważ słupy te pracują głównie na zginanie od siły naciągu przewodów trakcji, dlatego czynnikiem warunkującym nośność tego rodzaju konstrukcji jest przede wszystkim wskaźnik wytrzymałości przekroju na poziomie dolnej krawędzi wnęki bezpiecznikowej. Zwiększanie tegoż wskaźnika można uzyskać głównie poprzez zwiększanie średnicy słupa bądź grubości ścianki płaszczka. Często ma miejsce sytuacja, w której ze względów estetycznych lub użytkowych inwestor narzuca określoną średnicę zewnętrzną słupa. W takim przypadku jedynym parametrem geometrycznym, za pomocą którego można w praktyczny sposób regulować nośność, pozostaje grubość blachy, z jakiej formowany jest płaszcz słupa. Zwiększanie grubości blachy może odbywać się wyłącznie w zakresie możliwości technologicznych producenta słupów. Płaszcz słupa zwykle formuje się na zimno za pomocą pras. I właśnie rodzaj prasy, a dokładniej nominalny nacisk, najczęściej narzuca maksymalną grubość stosowanego materiału. Tu pojawił się pomysł obejścia tego ograniczenia poprzez zastosowanie konstrukcji dwupłaszczkowej, o wspólnej osi, ze szczeliną pomiędzy płaszciami.

Należy tutaj podkreślić, że charakterystyki wytrzymałościowe nie powinny być jedynymi czynnikami warunkującymi ocenę celowości stosowania któregośkolwiek z omawianych rozwiązań. Aby potraktować problem całościowo, należałoby uwzględnić również takie czynniki jak łatwość wykonania, pracochłonność, możliwa do uzyskania jakość połączeń itp. Wykonanie konstrukcji jednopłaszczkowej o grubych ściankach jest niewątpliwie prostsze i mniej pracochłonne, jednak wymaga pras o większych naciskach. Odmienna jest też praca statyczna i rozkład naprężeń w spoinach połączeń płaszczka (płaszczki) z pozostałymi elementami konstrukcji. Zbadać należałoby wzajemny wpływ spoin wykonywanych w swoim bezpośrednim sąsiedztwie w przypadku konstrukcji dwupłaszczkowej. Kwestie te wybiegają poza zakres objęty niniejszym artykułem ze względu na jego ograniczoną objętość.

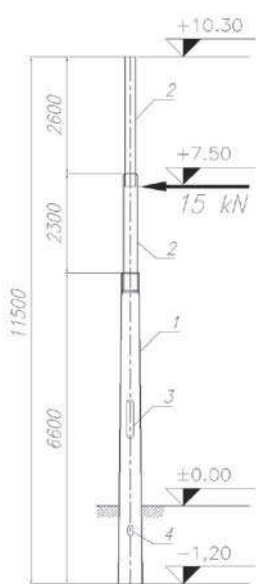
W celu porównania charakterystyk wytrzymałościowych wymienionych konstrukcji wykonano modele numeryczne obydwu słupów w całości. Przyjęto schemat pracy wspornika utwierdzonego sztywno w fundamencie. Konstrukcje modelowano za pomocą elementów powierzchniowych opisywanych liniowymi funkcjami kształtu, tj. elementów trójkątnych trójwęzłowych oraz czworokątnych czterowęzłowych. Elementy łączące trzony w miejscach zmiany przekroju (pierścienie) modelowano za pomocą elementów bryłowych sześciociennych (hexahedral), opisanych, podobnie jak w przypadku elementów powierzchniowych, liniowymi funkcjami kształtu. Ponadto w modelu zastosowano dwa typy specjalnych elementów skończonych jednowymiarowych: połączenie sztywne (rigid

link) oraz szczelina (GAP). Pierwszy z nich użyto w celu odzwierciedlenia pracy spoin, zaś drugi – aby uwzględnić wpływ sił docisku na styku elementów niepołączonych ze sobą fizycznie. Dodatkowo wykonano uproszczony model prętowy konstrukcji jednopowłokowej w celu określenia jego przydatności do przyszłych analiz tego typu.

Celem możliwie najpełniejszego porównania pracy statycznej analizowanych konstrukcji wykonano szereg analiz numerycznych modelu bryłowo-powłokowego, począwszy od analizy statycznej liniowo-sprężystej (LA), poprzez liniową analizę wyboczeniową (LBA), a skończywszy na analizie geometrycznie i materiałowo nieliniowej (GMNA). Porównano przemieszczenia wierzchołka słupa i naprężenia zredukowane Von Misesa w analizie LA, współczynniki krytyczne przy wyboczeniu liniowym LBA oraz mnożniki obciążeń w analizie GMNA. Do obliczeń wykorzystano system obliczeniowy Nastran w wersji 8.5.

Z kolei uproszczony model prętowy wykonano w programie Autodesk Robot 2011. Tu zrealizowano dwa typy analiz statycznych: analizę liniową oraz analizę uwzględniającą teorię dużych przemieszczeń.

Trudność w modelowaniu układu dwupowłokowego, z niewielką szczeliną pomiędzy umieszczonymi koncentrycznie powłokami stożkowymi, wynika z tego, że powłoki te wskutek znacznie większej smukłości ścianek przekroju w stosunku do konstrukcji jednopowłokowych tracą stateczność przy zdecydowanie mniejszym obciążeniu. Aby porównanie było miarodajne, należy więc rozpatrzyć również stan pokrytyczny konstrukcji dwupowłokowej. Po utracie stateczności, powłoki wchodzi w kontakt ze sobą i dalej już nie pracują niezależnie. Uwzględnienie tego zjawiska w analizie statycznej wymaga użycia specjalnych nieliniowych elementów skończonych. W analizie „Static nonlinear” programu Nastran służą ku temu elementy typu GAP. Pozwalają one na uwzględnienie wpływu sił docisku oraz tarcia na powierzchni styku dwóch, niezależnie pracujących, brył lub powłok. Są to elementy typowo nieliniowe, gdyż przenoszą one ściskanie wywołane dociskiem, natomiast nie przenoszą rozciągania, umożliwiając rozwarcie styku. I choć system Nastran pozwala na wykonanie analizy liniowej z użyciem elementów typu GAP, to jednak stosuje on przy tym podejście iteracyjne, celem uwzględnienia nieliniowości zagadnień kontaktowych. To z kolei powoduje, iż czas analizy jest znacznie dłuższy, gdy w modelu są zdefiniowane elementy typu GAP. Ponadto proces tworzenia modelu zawierającego te elementy jest bardziej skomplikowany. Ponieważ nie znamy a priori obszaru, na którym powłoki wejdą w kontakt, dlatego elementy typu GAP trzeba zadać na wszystkie rejony potencjalnego kontaktu. To z kolei powoduje, że model może osiągnąć znaczne rozmiary. Alternatywnie można wykonać analizę wstępną, na podstawie której będzie możliwe określenie obszarów modelu, w których powłoki ulegną zetknięciu pod zadanym obciążeniem. W szczególnych przypadkach może być konieczne postępowanie iteracyjne, jako że występowanie kontaktu w określonych obszarach może wpływać na pojawianie się lub brak kontaktu w innych częściach modelu.



**Rys. 3.** Schemat słupa trakcyjnego stożkowo-rurowego: 1 – segment stożkowy, 2 – segmenty rurowe, 3 – wnęka bezpiecznikowa, 4 – otwór kablowy

Z kolei w liniowej analizie wyboczeniowej w stosowanym systemie nie ma możliwości użycia elementów typu GAP, a kontakt pomiędzy powierzchniami można zrealizować za pomocą definiowanych w programie powierzchni kontaktowych (regions). Wymusiło to utworzenie dwóch niezależnych modeli dla wariantu dwupowłokowego: jeden do przeprowadzenia analizy statycznej, a drugi – do analizy wyboczenia liniowo-sprężystego.

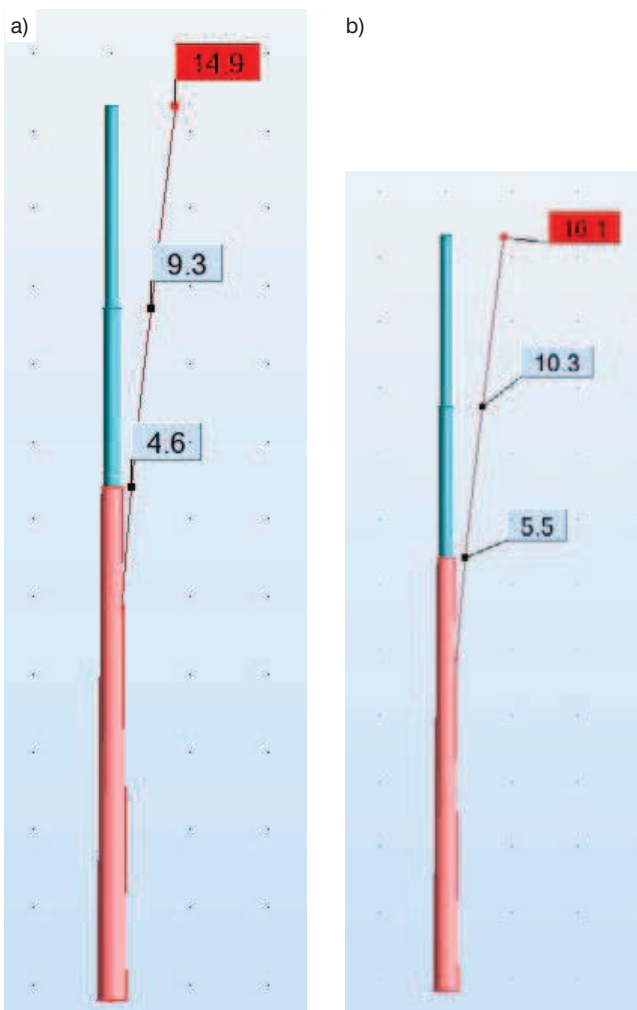
Do przeprowadzenia analizy został wybrany, zaprojektowany uprzednio, słup trakcyjno-oświetleniowy, jednopowłokowy. Jest on złożony z 3 segmentów – dolnego, stożkowego, o średnicach dolnej i górnej, odpowiednio 380 i 270 mm i grubości płaszczka wynoszącej 10 mm, oraz

dwóch pozostałych, wykonanych z rur okrągłych 219,1×8 i 168,3×5 mm. Długości netto segmentów (z pominięciem wpustów) wynoszą – począwszy od spodu słupa – 6,6 m, 2,3 m oraz 2,6 m. Konstrukcję posadowiono bezpośrednio w gruncie i ustabilizowano przez obetonowanie. Obciążenie w postaci siły skupionej, skierowanej prostopadłe do osi słupa, o wartości 15 kN, przyłożono na wysokości 7,5 m od projektowanego poziomu wierzchu fundamentu. Schemat słupa, obciążenie oraz zamocowanie przedstawiono na rysunku 3.

Geometrię konstrukcji dwupowłokowej otrzymano natomiast przez modyfikację opisanego wyżej słupa w taki sposób, aby średnica zewnętrzna obydwu słupów pozostała jednakowa w obydwu wariantach. Płaszcz segmentu dolnego (stożkowego), o grubości 10 mm, zastąpiono dwiema powłokami o grubości 5 mm każda, ze szczeliną nominalną pomiędzy nimi, wynoszącą 5 mm.

#### 4. Podstawowe wyniki analizy

W pierwszej kolejności dokonano porównania przemieszczeń otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych konstrukcji jednopowłokowej modelowanej za pomocą elementów powłokowych i bryłowych, z uproszczonym modelem prętowym. Wartość przemieszczenia pod obciążeniem nominalnym, tj. 15 kN, wyniosła według analizy LA 151,9 mm, według analizy GMNA – 151,6 mm. Z analogicznego modelu prętowego i analizy pierwszego rzędu otrzymano 149 mm, natomiast po uwzględnieniu teorii dużych przemieszczeń w programie Robot uzyskano przemieszczenie o wartości 161 mm. (rys. 4). Wartość ta wydaje się być zawyżona, jeżeli weźmiemy pod uwagę fakt, iż analizowana konstrukcja pod zadany

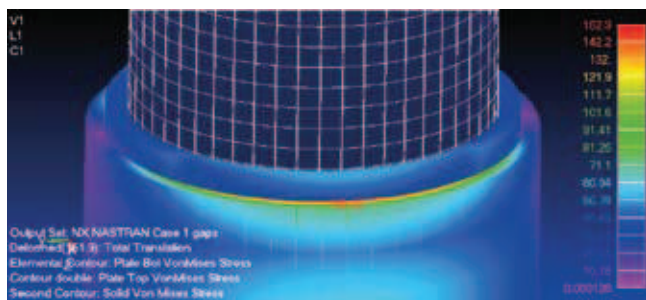


**Rys. 4.** Przemieszczenia modelu prętowego: a) model liniowy, b) model uwzględniający teorię dużych przemieszczeń; wartości przemieszczeń podano w cm

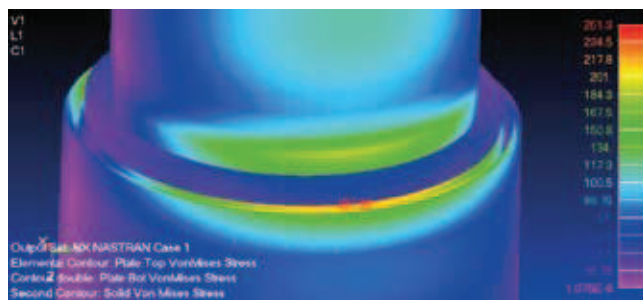
obciążeniem pozostaje w sprężystym zakresie pracy materiału słupa, a wpływ ściskającej siły podłużnej na wyężenie konstrukcji jest pomijalnie mały. Wziąwszy powyższe pod uwagę, należy uznać model powłokowo-bryłowy za bardziej miarodajny, w szczególności w zakresie analiz nieliniowych. Z tego też powodu w dalszych porównaniach wzięto pod uwagę wyłącznie modele bryłowo-powłokowe.

W ramach wykonanej analizy porównano przemieszczenia wierzchołków oraz ekstremalne naprężenia zredukowane Hubera-Misesa w słupie jedno- i dwupowłokowym, według analizy liniowo-sprężystej. O ile różnica przemieszczeń jest niewielka – 152 mm w modelu jednopowłokowym oraz 156 mm w modelu dwupowłokowym – o tyle różnica w naprężeniach jest już znacznie wydatniejsza, bowiem w modelu jednopowłokowym jest to 152,35 MPa (rys. 5), zaś w dwupowłokowym – 251,3 MPa (rys. 6), co oznacza, że większa z tych dwóch wartości przewyższa tę drugą aż o 60,35%. Naprężenia te pojawiają się na styku płaszczka (płaszczki) z pierścieniem redukującym średnicę, w miejscu skokowej zmiany przekroju słupa.

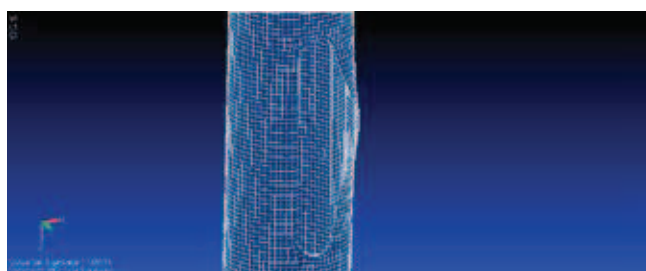
Kolejny typ analizy, którą wykonano dla obydwu rozwiązań, była liniowa analiza bifurkacyjna (LBA). Tutaj pojawia się problem,



**Rys. 5.** Ekstremalne naprężenia zredukowane w połączeniu segmentu stożkowego z pierścieniem redukującym średnicę w wariancie jednopowłokowym



**Rys. 6.** Ekstremalne naprężenia zredukowane w połączeniu segmentu stożkowego z pierścieniem redukującym średnicę w wariancie dwupowłokowym



**Rys. 7.** Postać wyboczenia zewnętrznej ścianki słupa w rejonie wnęki bezpiecznikowej

ARTYKUŁY PROBLEMOWE

charakterystyczny dla analiz, które prowadzą do wyznaczenia wartości własnych. Otóż w przypadku rozwiązywania problemów kontaktowych, które są problemami nieliniowymi, wyznaczone wartości własne mogą być obarczone błędem, jeśli są znacznie większe lub znacznie mniejsze od jedności. Podręcznik systemu Nastran [6] określa przedział, w którym wartości współczynnika krytycznego są wyznaczane z akceptowalną dokładnością. Jest to przedział  $<0,9; 1,1>$ . Aby więc otrzymać dokładne wartości wyznaczanych współczynników, należało przeskalować zadane obciążenie tak, aby wyznaczony współczynnik znalazł się we wspomnianym przedziale. Po uwzględnieniu powyższego otrzymano następujące wartości najniższego współczynnika krytycznego:

- konstrukcja jednopowłokowa – 26,1,
- konstrukcja dwupowłokowa – 10,92.

Różnica wynosi ponad 100% mniejszej wartości. W obydwu przypadkach utrata stateczności rozpoczyna się w rejonie wnęki bezpiecznikowej. Tak duża różnica we współczynnikach daje się wytłumaczyć dwukrotnie większą smukłością ścianek konstrukcji dwupowłokowej, której powłoki w momencie utraty stateczności pracują niezależnie, gdyż zewnętrzna powłoka wybacza się na zewnątrz słupa (patrz rys. 7).

Ponadto sprawdzono również wpływ obecności kontaktu pomiędzy powłokami na wielkość współczynnika krytycznego w liniowej analizie wyboczeniowej (LBA), w konstrukcji dwupowłokowej. Otrzymany współczynnik krytyczny, zgodnie z przewidywaniami, jest wyższy dla modelu uwzględniającego zagadnienia kontaktowe. Jednakże różnica ta jest niewielka – 10,88 versus 10,92. Różnica względna wynosi w tym przypadku zaledwie 0,37%. Tak niewielką różnicę tłumaczy fakt, iż konstrukcja traci stateczność w rejonie, w którym nie występuje fizyczny kontakt między powłokami.

Ostatnim wykonanym typem analizy była analiza geometryczna i materiałowo nieliniowa (GMNA), której celem jest wyznaczenie granicznego mnożnika obciążenia. Wyniósł on w przypadku konstrukcji jednopowłokowej 4,05, natomiast dla słupa dwupowłokowego otrzymano wartość 3,62. Tutaj różnice już

**Tabela. 1.** Dane liczbowe określające wielkość utworzonych modeli numerycznych

		Konstrukcja jednopowłokowa			Konstrukcja dwupowłokowa		
		Analiza LA	Analiza LBA	Analiza GMNA	Analiza LA	Analiza LBA	Analiza GMNA
Liczba węzłów		57237			95849		
Liczba elementów skończonych	Elementy jednowymiarowe	437			35419	317	35419
	Elementy powierzchniowe	56259			94924		
	Elementy bryłowe	288			288		
Liczba równań równowagi		339230		340710	570490		571610
Czas obliczeń [min.]		4,5	4	37	8,5	82	62

nie są tak spektakularne, jak to miało miejsce w poprzednich analizach (różnica względna wynosi 11,9%), niemniej, wyniki wszystkich wykonanych analiz jednoznacznie wskazują na bezpieczniejszą pracę statyczną konstrukcji jednopowłokowych, bowiem mają większy zapas nośności.

Skróconą statystykę liczbową dotyczącą charakterystycznych parametrów utworzonych modeli numerycznych podano w tabeli 1. Obliczenia wykonano na komputerze 8-rdzeniowym, z procesorem Intel Core i7, o taktowaniu zegara 3,5 GHz, wyposażonym w 32 GB pamięci RAM.

## 5. Podsumowanie

W niniejszym artykule opisano analizę porównawczą, którą wykonano w celu wykazania różnic w pracy statycznej dwóch, stosowanych zamiennie, rozwiązań technicznych słupów trakcyjnych stożkowo-rurowych.

Rozwiązanie słupów trakcyjnych w postaci dwóch koncentrycznie połączonych powłok stożkowych jest statycznie mniej korzystne od wykonania jednopowłokowego, między innymi ze względu na znacznie większe koncentracje naprężeń w niewrażliwych punktach powłok słupa dwupowłokowego. Różnica względna wynosi tu 26%. Najwydatniej różnica jakościowa tych rozwiązań ujawnia się po wykonaniu liniowej analizy bifurkacyjnej. Współczynnik krytyczny dla rozwiązania jednopowłokowego jest tu aż o 139% większy od analogicznego współczynnika dla konstrukcji dwupłaszczyznowej. Natomiast mnożnik obciążenia dla tego typu w analizie geometrycznej i materiałowo nieliniowej (GMNA) jest większy o 12%. Przemieszczenia w obydwu wariantach nie różnią się aż tak bardzo (2,6%), jednak i tu stosowanie rozwiązania jednopowłokowego jest bardziej uzasadnione. Niewielką różnicę w przemieszczeniach można wytłumaczyć równie niedużą różnicą w sztywnościach sprężystych obydwu porównywanych rozwiązań oraz pozostawanie obciążenia charakterystycznego, przyjętego w SGU, w zakresie pracy liniowo-sprężystej.

Szereg przeprowadzonych analiz pozwala na sformułowanie jednoznacznej opinii dotyczącej uzasadnienia stosowania konstrukcji jednopowłokowych, które przy jednakowych gabarytach konstrukcji i niemal jednakowej masie osiągają znacznie korzystniejsze parametry wytrzymałościowe, oferując przy tym również nieznacznie większą sztywność. Różnice te uwydatniają się jeszcze bardziej w przypadku słupów posadowionych bezpośrednio w gruncie, poprzez wkopanie w podłoże. Przy takim posadowieniu teoretyczny środek obrotu słupa jednopowłokowego znajduje się w gruncie, na pewnej wysokości, pomiędzy poziomem posadowienia a poziomem terenu. W przypadku słupów dwupowłokowych środek obrotu wewnętrznej powłoki w konfiguracji początkowej (przed odkształceniem) znajduje znacznie bliżej podstawy słupa (tj. poziomu jego posadowienia). Dzieje się tak dlatego, że grunt stawia opór wyłącznie poboczniczy powłoki zewnętrznej. Przesunięcie wypadkowego środka obrotu słupa niżej przyczynia się do dodatkowego zwiększenia ugięcia oraz zwiększenia momentu zginającego wskutek wydłużenia ramienia działania siły od naciągu przewodów trakcyjnych. Efektu tego nie analizowano na potrzeby niniejszego artykułu, ze względu na jego

ograniczoną objętość. Niemniej jednak wzmacnia on dodatkowo wnioski wyciągnięte z wykonanych analiz.

Wykonanie konstrukcji dwupowłokowych następczo pewnych trudności technologicznych w wykonawstwie. Niektóre z nich to: konieczność układania spoin w swoim bliskim sąsiedztwie, wymagana duża dokładność wykonania ze względu na konieczność koncentrycznego umieszczenia powłoki mniejszej wewnątrz większej, trudności w konstruowaniu połączenia dwupowłoki z przyległym segmentem słupa. Istnieje jednak również pewna zaleta tego rozwiązania, mianowicie stosowanie cieńszych blach pozwala na ich kształtowanie na mniejszych prasach. Jednakże producenci w Polsce dysponują już od wielu lat parkiem maszynowym, który pozwala na wyginanie na zimno blach o grubościach nawet do 40 mm.

Na zakończenie należałoby jeszcze wspomnieć, iż niejednokrotnie warunkiem decydującym o doborze konstrukcji wsporczych dla traktacji jest stan graniczny użytkowania. Gdy nośność decyduje o parametrach konstrukcji, wówczas rozwiązanie jednopowłokowe jest bezkonkurencyjne. Natomiast w przypadku, gdy decyduje SGU, wówczas ze względu na fakt, iż różnica przemieszczeń jest niewielka, decydujące o wyborze rozwiązania mogą być w tym przypadku inne czynniki. Ważniejsze z nich wymieniono w rozdziale 3 niniejszego artykułu. Podsumowując – rozwiązanie jednopowłokowe analizowanego słupa jest rozwiązaniem pewniejszym, posiadającym większy zapas nośności. Zapas ten może uratować słup przed zniszczeniem, np. w przypadku wystąpienia oddziaływań wyjątkowych, jakie mają miejsce w przypadku tych typów konstrukcji, tj. kolizji z nadjeżdżającym pojazdem. Ponadto trwałość konstrukcji jednopowłokowych jest większa, gdyż postęp zjawisk korozyjnych ma mniejszy wpływ na wytrzymałość konstrukcji.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [2] PN-EN 1993-3-2:2008 Eurokod. 3 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-2: Wieże, maszty i kominy – Kominy
- [3] Konstrukcje wsporcze traktacji tramwajowej. Wymagania. Projektowanie i weryfikacja
- [4] Labocha S., Paluszyński J., Stalowe słupy powłokowe, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2017
- [5] PN-EN 1993-1-6:2009 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych
- [6] NX Nastran User's Guide, Siemens PLM Software, 2014
- [7] Basic Nonlinear Analysis User's Guide, Siemens PLM Software, 2014
- [8] Element Library Reference, Siemens PLM Software, 2014
- [9] ZN-87/MTZiŁ-CBP-11 Sieć trakcyjna kolejowa. Stalowe konstrukcje wsporcze. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [10] ZN-89/MTZiŁ-CBP-10 Sieć trakcyjna kolejowa. Słupy żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie

## WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [11] Dokumentacja projektowa słupa trakcyjno-oświetleniowego KRO/SR-15/11,5/1,2 wykonana na podstawie Projektu Trasy Mostu Północnego. Eurocoles Kromiss, Częstochowa, 2010