

dr inż. Sławomir Labocha¹⁾

ORCID: 0000-0003-0331-4585

dr inż. Jarosław Paluszyński^{2)*}

ORCID: 0000-0002-2434-3812

Badania gniazd zakładkowych poprzeczników słupów powłokowych

Field tests of lap type querbeam socket of shell poles

DOI: 10.15199/33.2022.08.15

Streszczenie. W artykule zaprezentowano badania polowe nowych typów gniazd zakładkowych poprzeczników słupów powłokowych. Przedstawiono metodę badań oraz budowę stanowiska testowego. Testy obejmowały statyczne próby obciążeniowe gniazd wykonanych w skali 1:1. Celem badań była weryfikacja nośności granicznej węzłów z uwzględnieniem niestateczności lokalnej. Zaprezentowano kluczowe wyniki z dwóch testów gniazd przeznaczonych dla elektroenergetycznych słupów przelotowych. Uzyskano dobrą powtarzalność wyników będącą podstawą walidacji badań numerycznych z wykorzystaniem zaawansowanej metody elementów skończonych (MES).

Słowa kluczowe: słupy powłokowe; słupy linii elektroenergetycznych; testy poligonowe; gniazda przyłączeniowe; stateczność lokalna; nośność graniczna.

Abstract. In the article field tests of new solutions of lap type joint querbeam socket for steel transmission poles it is presented. The methodology of research and construction of the test stand was presented. Tests included static load tests of joint sockets performed in the scale 1:1. The purpose of the research was the verification of the limit capacity of the sockets considering the effect of local instability. The key results of two tested socket for transmission suspension poles were presented. Good repeatability of results was obtained for validation of numerical research with the use of advanced finite element method (FEM).

Keywords: shell poles; transmission poles; field tests; connecting sockets; local stability; limit capacity.

Konstrukcje wsporcze elektroenergetycznych linii napowietrznych wysokich (tj. od 45 do 110 kV) i najwyższych napięć (220 kV i wyższych) są z reguły kształtowane w postaci ustrojów stalowych, jako wieże kratowe lub słupy powłokowe (pełnościenne, rurowe). Zasady projektowania i obliczeń tych konstrukcji sprecyzowane zostały w normach PN-EN 50341-1:2013 [1] oraz PN-EN 50341-2-22:2016 [2]. Specyficzną grupą wśród omawianych konstrukcji są słupy powłokowe, wyróżniające się znaczną odmiennością zarówno ze względu na swoiste zasady kształtowania konstrukcyjnego, jak i metodę obliczeń. Widok typowego słupa powłokowego, w funkcji wsporczej elektroenergetycznej linii napowietrznej wraz z charakterystycznymi gniazdami przyłączeniowymi poprzeczników przedstawiono na fotografii 1. Tego typu konstrukcje są także powszechnie stosowane w ustrojach wsporczych reklam, wież oświetleniowych, wież radiowo-telewizyjnych i wież antenowych sieci komórkowych. Podstawy obliczeń słupów rurowych, przede wszystkim o przekrojach poprzecznych wielokątnych można znaleźć w pracach [3, 4]. Technologię ich produkcji, zasady montażu oraz kształtowania przedstawiono w [5].

Szczegółne zasady obliczeń słupów powłokowych związane są z ich cienkościenną budową, tj. kształtowaniem płaszcza rurowego w postaci kołowego lub wielokątnego przekroju o bardzo dużej smukłości lokalnej. Ze względu na duże wartości stosunku nominalnego promienia przekroju do grubości płaszcza najczęściej klasyfikuje się przekroje poprzeczne tych



Fot. 1. Słup powłokowy linii 110 kV: a) widok ogólny; b) gniazda
Photo 1. Shell pole of 110 kV transmission line: a) general view; b) sockets

słupów do 4. klasy wg PN-EN 1993-1-1:2006 [6], co formalnie obliguje do obliczeń zgodnie z zasadami PN-EN 1993-1-6:2009 [7].

Problematykę nośności cienkościennych przekrojów wielokątnych płaszcza słupów opisano m.in. w pracach [8, 9]. Nieco odmienne ujęcie zagadnień nośności przekrojów kołowych można znaleźć w [10]. Weryfikację nośności przekrojów poprzecznych słupów powłokowych uwzględniającą wpływ niestateczności lokalnej z wykorzystaniem charakterystyk efektywnych (poła przekroju i wskaźnika wytrzymałości na zginanie) podaje PN-EN 50341-1:2013 [1]. Potrzeby użytkowe, bez względu na funkcje tych słupów, wymagają jednak dołączania poprzecznych elementów transmitujących obciążenia w sposób wywołujący bardzo duże lokalne obciążenia ich cienkościennych

¹⁾ Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach; Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych

²⁾ Politechnika Częstochowska; Wydział Budownictwa

* Adres do korespondencji: jaroslaw.paluszynski@pcz.pl

nych płaszczy. Nie opracowano dotychczas jednolitych zasad kształtowania i obliczania tego typu połączeń, nazywanych najczęściej gniazdami. Dotyczy to przede wszystkim słupów zbieżnych o wielokątnych przekrojach poprzecznych. Węzły tego typu można obliczać wyłącznie z wykorzystaniem zaawansowanej metody MES, uwzględniającej nieliniowości zarówno geometryczne, jak i materiałowe, przy czym jej adekwatność powinna być weryfikowana badaniami. Przedmiotem artykułu jest prezentacja badań jednego z typów gniazd stosowanych do montażu poprzeczników do słupów powłokowych.

Badania połowe gniazd poprzeczników słupów powłokowych

W ramach realizacji projektu badawczego NCBIR Nr POIR. 01.01.01-00-1686/20-00 pt. *Innowacyjne Gniazda Słupów Powłokowych* przeprowadzono w 2022 r. badania gniazd typu zakładkowego. Klasyczne rozwiązania, najpowszechniej stosowane, to gniazda poprzeczników różnych odmian w wersji doczołowej, z silnym zewnętrznym uźebrowaniem poziomym (fotografia 1). Cechą znaną połączenia zakładkowego jest wykorzystanie pionowych blach pełniących nie tylko rolę płaszczyn mocowania łączników śrubowych, ale również elementu usztywniającego węzeł przez wstawanie blach na wskroś i połączenie przeciwnych powierzchni powłokowego trzonu.

Wykonano poligonowe, statyczne badania niszczące sześciu gniazd, w przypadku trzech kombinacji obciążeń krytycznych związanych z odmiennymi ich typami i funkcjami. W artykule opisano tylko badania gniazd przeznaczonych do słupów tzw. przelotowych, w których, zgodnie z ich funkcją użytkową, dominują oddziaływania pionowe. Unikatowość wykonanych badań polegała na przeprowadzeniu testów niszczących gniazd w skali 1:1, zapewniających odwzorowanie rzeczywistej geometrii wraz z realnymi imperfekcjami wykonawczymi. Dotychczas nie prowadzono badań gniazd w skali

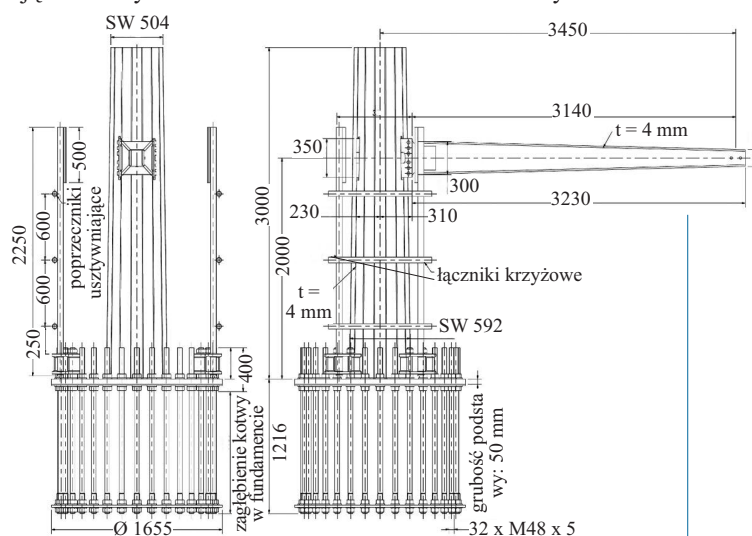


Fot. 2. Stanowisko badawcze z modelem testowym
Photo 2. Research pole with testing sample

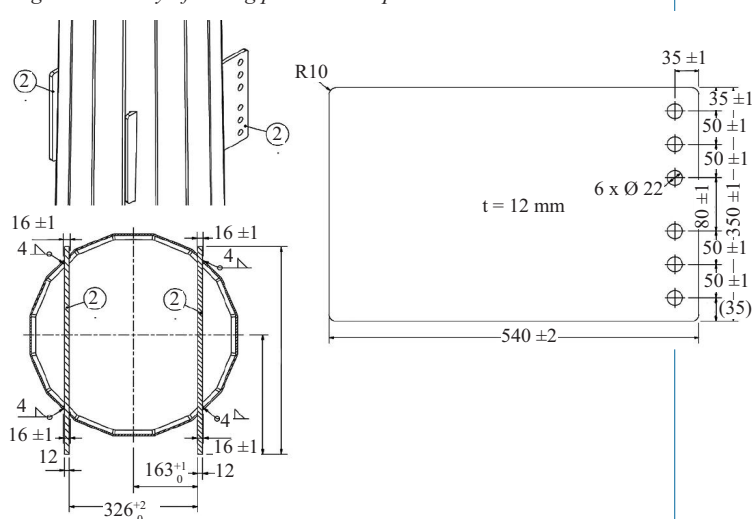
naturalnej. Nieliczne były również badania nośności samych trzonów. Opisano je w pracy [11].

Widok jednego z modeli testowych na stanowisku badawczym pokazano na fotografii 2. Stanowisko badawcze składało się z żelbetowego oporowego fundamentu monopolowego oraz silnie uźebrowanego adaptera stalowego mocowanego do fundamentu za pomocą 32 kotew M48 ze stali S355. Montaż elementów testowych do adaptera zrealizowano za pomocą 16 śrub M33 klasy 8.8. Trzon oraz poprzecznik wykonano ze stali S355. W połączeniu zakładkowym poprzecznika wykorzystano 12 śrub M20 klasy 8.8. Wymiary gabarytowe stanowiska testowego i modelu badawczego pokazano na rysunku 1, a na rysunku 2 szczegóły konstrukcyjne badanych gniazd.

Podstawowym celem badań było zweryfikowanie rzeczywistej nośności gniazd, uwzględniającej wpływ niestateczności lokalnej miejscowych stref uplastycznienia oraz podatności całego gniazda. Badania realizowano zgodnie z wymaganiami najnowszego wydania PN-EN IEC 60652:2022-04 [12]. Obciążenia przykładano w odpowiednich krokach, przyjmując oddziaływania odniesione do wartości nominalnych okre-



Rys. 1. Wymiary stanowiska i badanych modeli
Fig. 1. Geometry of testing pole and samples



Rys. 2. Szczegóły konstrukcyjne badanych gniazd
Fig. 2. Structural details of tested sockets

ślonych wg PN-EN 50341-2-22:2016 [2], stosując kolejno wartości procentowe: 50; 75; 90; 95; 100%, a następnie odciążenie i kolejne przyrosty powyżej 100% co 5% do 130% oraz co 10% aż do zniszczenia. Prezentowane badania obejmowały testy gniazd o dominującym wpływie obciążeń pionowych. Wartość nominalną pionowego obciążenia testowego w przypadku słupów przelotowych przyjęto na poziomie ok. 24 kN (23,89 kN). Siłę tej odpowiadała pozioma składowa obciążenia o nominalnej wartości 1,56 kN. Wielkości przyjętych sił wynikały wprost z normy PN-EN 50341-2-22:2016 [2] i dotyczyły kombinacji tzw. 2a, obejmującej ciężar przewodów, izolacji i oblodzenia, w przypadku typowej linii 110 kV. Przyjęto przewody AFLs-10-310, naciąg w temperaturze +10°C o wartości 13 kN oraz strefę 1 obciążenia oblodzeniem.

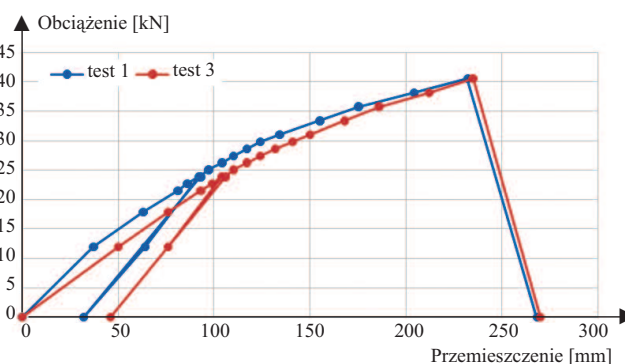
Podczas badań dokonywano pomiarów geodezyjnych przemieszczeń końca wspornika, mocowania poprzecznika, wierzchołka trzonu oraz deformacji płaszcza trzonu i poprzecznika za pomocą zegarowych czujników o dokładnościach 0,01 mm, których rozmieszczenie przedstawiono na rysunku 3. Dwa z nich (nr 7 i 8) znajdowały się na poprzeczniku, a pozostałe (nr 1 do nr 6) po obu stronach na trzonie w rejonie gniazda. Obciążenia zadawano z użyciem ręcznych przyciągarek o udźwigu 9 T kotwionych łańcuchami w podłożu. Pomiaru siły dokonywano dynamometrami podłużnymi instalowanymi bezpośrednio w sąsiedztwie punktów zaczepienia oddziaływać reprezentujących siły skupione na końcu wspornika.

Rys. 3. Lokalizacja punktów pomiarowych deformacji
 Fig. 3. Localisation of points of deflection measurements

Zniszczenie gniazd nastąpiło na poziomie 170% obciążeń nominalnych (projektowych), tj. siły ok. 41 kN (40,61 kN). Zniszczenie obejmowało deformacje blach zakładkowych i lokalnie płaszcza oraz utratę stateczności ściskanej ścianki poprzecznika. Deformacje blach i płaszcza nie przekraczały na ogół 1 mm w przypadku obciążeń nominalnych oraz ok. 5 mm po utracie stateczności, natomiast deformacje poprzecznika, które były początkiem zniszczenia gniazda, nie przekraczały 10 mm w przypadku obciążeń nominalnych, a w stanie granicznym osiągały wartość ok. 20 mm (w sąsiedztwie czujników nr 7 i 8). W przypadku awarii taka postać zniszczenia pozwala dokonać wymiany uszkodzonego poprzecznika bez uszkodzenia gniazd powodującego trudną lokalną naprawę słupa. Zniszczenie poprzecznika w rejonie gniazda pokazano na fotografii 3, a na rysunku 4 ścieżki równowagi statycznej uzyskane z badań dwóch modeli testowych słupów przelotowych, oznaczonych jako nr 1 i nr 3 (o identycznych parametrach geometrycznych i obciążeniach). Uzyskano bardzo dobrą powtarzalność wyników, które stały się podstawą do walidacji modeli numerycznych MES gniazd do celów optymalizacji oraz weryfikacji w przypadku innych kombinacji obciążeń. Postać zniszczenia konstrukcji charakteryzowała



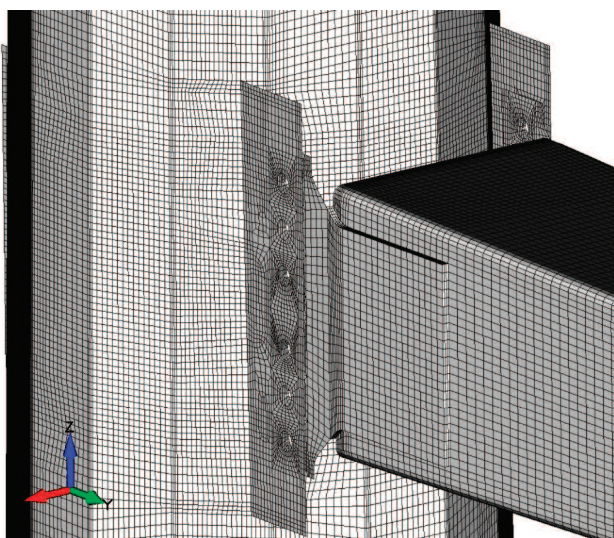
Fot. 3. Deformacja konstrukcji po badaniach
 Photo 3. Structure deformation after tests



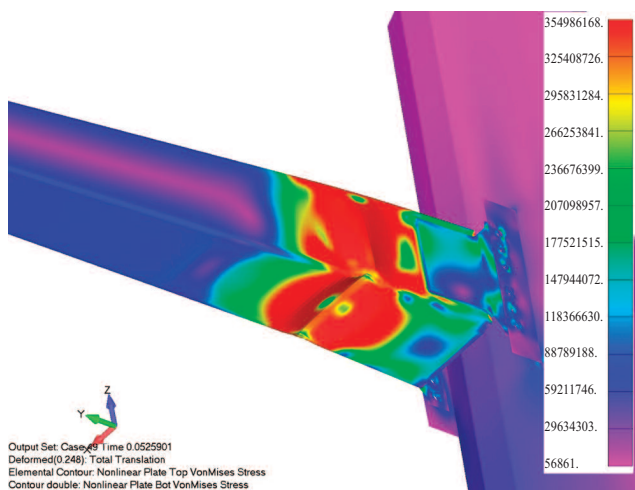
Rys. 4. Ścieżki równowagi statycznej uzyskane z badań
 Fig. 4. Load-displacement paths from tests

się szybką utratą nośności po osiągnięciu obciążeń granicznych związanych z niestatecznością lokalną ścianek poprzecznika.

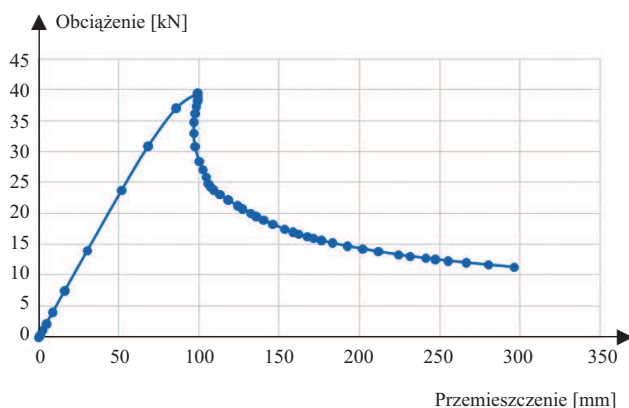
W ramach projektu badawczego przeprowadzono wiele analiz numerycznych gniazd słupów z wykorzystaniem metody MES zaimplementowanej do programu FEMAP/Nastran. Do badań poligonowych wytypowano jedno z optymalnych rozwiązań. Ze względu na bardzo dużą sztywność podstawy możliwe było, bez utraty dokładności wyników, pominięcie w analizach adaptera i przyjęcie w obliczeniach sztywnego podparcia dolnej krawędzi modelu. Widok siatkowania MES kluczowego rejonu gniazda poprzecznika w finalnym modelu przedstawiono na fotografii 4. Cały model składał się z 131 366 powłokowych elementów skończonych, 25 transmisyjnych elementów sztywnych oraz 12 elementów prętowych odwzorowujących łączniki śrubowe. Przeprowadzono sprężysto-plastyczną nieliniową analizę typu GMNA, zakładając moduł sprężystości podłużnej stali 210 GPa, granicę plastyczności 355 MPa oraz współczynnik Poissona 0,3. Na fotografii 5 pokazano schemat deformacji w przypadku stanu granicznego, gdzie skala na mapach naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa wyrażona jest w paskalach, natomiast przemieszczenie w metrach, a na rysunku 5 numerycznie obliczoną ścieżkę równowagi statycznej reprezentującą zależność siły od pionowego ugięcia końca poprzecznika. Porównując ścieżki równowagi statycznej przedstawione na rysunkach 4 i 5, stwierdzono dobrą zbieżność obu otrzymanych rezultatów. Uzyskana metodą MES wartość graniczna obciążenia



Fot. 4. Siatka MES obszaru gniazda
Photo 4. FE-mesh of socket area



Fot. 5. Schemat deformacji w stanie granicznym nośności
Photo 5. Deflection at ultimate limit state



Rys. 5. Ścieżka równowagi statycznej uzyskana z analizy MES
Fig. 5. Load-displacement path from FE analysis

nia wynosząca 39,4 kN jest mniejsza od otrzymanej z badań tylko o ok. 3%. Należy podkreślić, że w modelu MES stal konstrukcyjną odwzorowano modelem sprężysto-plastycznym z pominięciem efektu jej wzmocnienia. Jednocześnie model

MES charakteryzuje się małymi przemieszczeniami przed utratą stateczności badanego ustroju, a następnie ich dużym przyrostem po przekroczeniu punktu granicznego. Schemat deformacji konstrukcji określony numerycznie jest jednak bardzo zbliżony do zaobserwowanego podczas badań, co pokazują fotografie 3 i 5.

Podsumowanie

Badania poligonowe modeli w skali rzeczywistej gniazd poprzeczników słupów powłokowych typu zakładkowego pozwoliły na kalibrację tych modeli w obliczeniach MES w kierunku zwiększenia jej wiarygodności w ocenie nośności granicznej węzłów oraz ekstrapolacji na inne rozwiązania o zbliżonej geometrii i innych kombinacjach obciążeń krytycznych. W przypadku badanych rozwiązań przy obciążeniach głównie pionowych, krytyczną formą zniszczenia była lokalna niestateczność poprzeczników, natomiast w przypadku dominujących obciążeń poziomych, nieomawianych w artykule, plastyczna deformacja blach węzłowych. Przeprowadzenie stosownych testów w skali 1:1 pozwala na najbardziej wiarygodną ocenę nośności granicznej gniazda, którą ze względu na właściwości powłokowe nie zawsze można w pełni wiarygodnie określić tylko na drodze analiz numerycznych. Jednocześnie powtarzalność wyników uzyskana w przedmiotowych badaniach pozwala wnioskować o małym wpływie imperfekcji geometrycznych na nośność testowanego typu gniazd.

Literatura

- [1] PN-EN 50341-1:2013 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1. Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [2] PN-EN 50341-2-22:2016. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22. Zbiór normatywnych warunków krajowych. Normatywne warunki krajowe Polski.
- [3] Cannon DD, LeMaster RA. Local buckling strength of polygonal tubular poles. Research Report, Transmission Line Mechanical Research Center, Electric Power Research Institute, Haslet Texas, 1987.
- [4] Quattordio G. Sostegni Tubolari di Acciaio. Pitagora Editrice, Bologna, 1997.
- [5] Labocha S, Paluszyński J. Słupy powłokowe. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
- [6] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [7] PN-EN 1993-1-6:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6. Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [8] Migita Y, Aoki T, Fukumoto Y. Local and interaction buckling of polygonal section steel columns, Journal of Structural Engineering (ASCE). 1992; 118 (10): 2659 – 2676.
- [9] Teng JG, Smith ST, Ngok LY. Local buckling of thin-walled tubular polygon columns subjected to axial compression or bending. In: Proceedings of Advances in Steel Structures. 1999, Elsevier Steel Structures Division: Hong Kong. p. 109 – 115.
- [10] Mendera Z. Nośność cienkościennych stalowych słupów rurowych, Inżynieria i Budownictwo. 8-9/90: 287 – 289.
- [11] Reinke T, Knoedel P, Ummenhofer T. Steel poles with polygonal sections in bending. 7th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel 2014.
- [12] PN-EN IEC 60652:2022-04 Konstrukcje linii napowietrznych. Badania obciążeniowe.

Przyjęto do druku: 11.07.2022 r.