

dr inż. Sławomir Labocha^{1*)}

ORCID 0000-0003-0331-4585

dr inż. Jarosław Paluszyński¹⁾

ORCID: 0000-0002-2434-3812

Field tests of crossbeam socket with whole crossbeams of shell poles of transmission lines

Badania gniazd przyłączeniowych wraz z poprzecznikami słupów powłokowych linii elektroenergetycznych

DOI: 10.15199/33.2026.02.02

Summary. The article presents field tests of new solutions of joint crossbeam socket for steel transmission poles. 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 socket for polygonal cross section of crossbeam of the overlapping type and head-end-type, and sockets for lattice crossbeam were subjected to testing. 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 18 tested socket for transmission suspension and tension 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.

The article summarizes research work related to the design and strength verification of innovative shell post sockets, mainly intended for supporting structures of high-voltage power lines. **Sockets are referred to as the points where structural cross elements are attached to the pole shaft.** In the case of domestic structures, these are most often head plate joints, and less frequently lap joints. The specifics of the mechanics of power line tubular pole structures, called shell poles due to the significant slenderness of their shaft walls, are presented, for example, in [1÷4]. These studies only detail general issues of the load-bearing capacity of pole shafts and crossarms. The issue of optimizing the stability of sockets has so far not received broader attention.

The interaction of the crossbeam and its support was analyzed. However, the crossbeam itself, whether with a rectangular or polygonal cross-section, can be calculated taking into account local stability according to PN-EN 1993-1-5:2008 [5] and PN-EN 50341-1:2013 [6]. A key element in these studies is considering the flexibility of the sockets themselves, which is not described in the standards.

Until now, sockets have been designed in a safe way as heavily ribbed, allowing the use of the load-bearing theory of a system composed of rigid components. Conventional solutions include connections of polygonal crossbars mounted end-to-end on horizontally ribbed, and sometimes even vertically ribbed,

Streszczenie. Artykuł prezentuje badania polowe nowych typów gniazd poprzeczników słupów powłokowych. Przedstawiono metodę badań oraz budowę stanowiska testowego. Testy obejmowały statyczne próby obciążeniowe gniazd wykonanych w skali 1:1. Badaniom poddano gniazda poprzeczników pełnościennych typu zakładkowego i doczołowego oraz gniazda poprzeczników kratowych. Celem badań była weryfikacja nośności granicznej węzłów z uwzględnieniem niestateczności lokalnej. Zaprezentowano wyniki z osiemnastu testów gniazd przeznaczonych do elektroenergetycznych słupów przelotowych i mocnych. Uzyskano dobrą powtarzalność wyników stanowiącą podstawę do 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.

W artykule podsumowano prace badawcze związane z projektem oraz weryfikacją wytrzymałości innowacyjnych gniazd słupów powłokowych przeznaczonych głównie na konstrukcje wsporcze linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia. **Gniazdami nazywane są miejsca mocowania konstrukcyjnych elementów poprzecznych dochodzących do trzonu słupa.** W przypadku konstrukcji krajowych najczęściej są to podłączenia typu doczołowego, rzadziej zakładkowego. Specyfikę mechaniki konstrukcji elektroenergetycznych słupów rurowych, nazywanych powłokowymi ze względu na znaczną smukłość ścianek trzonów, przedstawiono np. w [1÷4]. Prace te ujmują szczegółowo tylko ogólne zagadnienia nośności trzonów słupów i poprzeczników. Problematyce optymalizacji stateczności gniazd nie poświęcano dotychczas szerszej uwagi.

Analizowano interakcję poprzecznika i jego mocowania. Sam poprzecznik, zarówno o przekroju prostokątnym, jak i wielokątnym można obliczyć z uwzględnieniem lokalnej stateczności wg PN-EN 1993-1-5:2008 [5] oraz PN-EN 50341-1:2013 [6]. Kluczowym elementem w przedmiotowych badaniach jest uwzględnienie podatności samych gniazd, co nie zostało opisane w normach.

Dotychczas gniazda były projektowane w bezpieczny sposób jako mocno uźebrowane, pozwalające na wykorzystanie teorii nośności układu złożonego z komponentów sztywnych. Klasyczne rozwiązania obejmują podłączenia poprzeczników wielokątnych mocowanych doczołowo do uźebrowanych poziomo, a czasami nawet pionowo gniazd lub zakładkowe pod-

¹⁾ Akademia Śląska, Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych

^{*)} Correspondence address: slawomir.labocha@akademiaslaska.pl

sockets, or lap joint connections of crossbars on vertical plates with additional horizontal ribs. The subject of the research project was innovative and optimized solutions for power pole sockets of shell structures, based on theoretical analyses and full-scale field tests.

The article presents the complete results of static tests. A preliminary report on research of a new type of joints, including lap joints (6 tests), with two selected ones described in detail, was presented in [7]. The optimization of lap joint solutions was mainly related to modifications arising from the use of rectangular cross-section crossbeams and an in-depth stability analysis of the system consisting of the shell and new forms of load-bearing plates, while maximally reducing the number of joint elements from a technological standpoint. The next stage of research in the project involved head plate joints and lattice beam joints, with new, innovative, and optimized solutions.

In the case of head plate sockets, the ribbing systems were optimized and an octagonal arrangement of bolts securing the crossarm to the socket was used, whereas in the case of lattice sockets, a very rarely encountered connection system in Poland was applied. This solution is very promising, as it allows combining the compact structure of a shell pole with a lattice crossarm, which is more functional in terms of usage. As part of the project, an innovative form of the full-wall crossarm structural solution was also studied, but with a hinged connection to the shaft with additional support from a suspension system.

A key element of the research was to determine the ultimate bearing capacity of the sockets, allowing for the specification of permissible increases in design loads and consideration when designing new combinations of actions required for supporting structures of power lines in accordance with the currently applicable standards PN-EN 50341-1:2013 [6] and PN-EN 50341-2-22:2022 [8]. The implementation of these standards has significantly changed the conditions under which these structures are designed compared to the previously applicable standards. The substantive content of the basic standards for the design of steel structures, e.g., PN-EN 1993-1-1:2006 [9] and PN-EN 1993-1-8:2006 [10], is not sufficient for the design of shell pole sockets, especially with a polygonal cross-section.

More appropriate guidelines, mainly based on the advanced finite element method (FEM), are provided in the standard PN-EN 1993-1-6:2009 [11]. The standard defines general guidelines, essentially limited to cylindrical shells, which do not fully correspond to the solutions for shell poles structures made using cold-forming technology in the form of polygonal cross-sections. The specific load-bearing behavior of thin-walled polygonal sections, described in [12÷14], requires particularly careful consideration, as it focuses on the strength of the segments outside the zone of the actual sockets. Significant geometric disturbances resulting from the shaping of the sockets were not taken into account in the analyses.

Therefore, regardless of the level of advancement of FEM numerical models, it is extremely important to verify the actual ultimate load-bearing capacity of the joints, which can only be achieved through physical testing, preferably on full-scale 1:1 models. Such tests can then serve as a basis for calibrating FEM numerical models for further modifications or opti-

łączenia poprzeczników na blachy pionowe z dodatkowymi żebrawami poziomymi. **Przedmiotem projektu badawczego były innowacyjne i zoptymalizowane rozwiązania gniazd elektroenergetycznych słupów powłokowych bazujące na analizach teoretycznych i badaniach poligonowych w skali 1:1.**

Artykuł prezentuje wyniki badań statycznych. Wstępne sprawozdanie z badań nowego typu gniazd, obejmujące gniazda typu zakładkowego (6 testów) przedstawiono w [7]. Optymalizacja rozwiązań gniazd zakładkowych była związana głównie z modyfikacją wynikającą z zastosowania poprzeczników o przekroju prostokątnym oraz pogłębionej analizy stateczności układu złożonego z płaszcza i nowych form blach nośnych, przy maksymalnym technologicznym zmniejszeniu liczby elementów gniazd. Kolejnym etapem badań były gniazda typu doczołowego oraz gniazda poprzeczników kratowych, o nowych, innowacyjnych i zoptymalizowanych rozwiązaniach. W przypadku gniazd doczołowych zoptymalizowano system uźebrowań oraz zastosowano oktagonalne rozmieszczenie śrub mocujących poprzecznik do gniazda, natomiast w przypadku gniazd kratowych bardzo rzadko spotykany w Polsce system ich podłączenia. Rozwiązanie to jest bardzo obiecujące, gdyż pozwala łączyć kompaktową budowę słupa powłokowego z poprzecznikiem kratowym, bardziej funkcjonalnym pod względem użytkowym. W ramach projektu zbadano również innowacyjną formę rozwiązania konstrukcyjnego poprzecznika pełnościennego, ale przy przegubowym połączeniu z trzonem i dodatkowym wsparciu układem podwieszającym.

Kluczowym elementem badań było określenie nośności granicznej gniazd, pozwalającej na sprecyzowanie dopuszczalnego obciążenia projektowego oraz uwzględnienie przy wymiarowaniu nowych kombinacji oddziaływań wymaganych w przypadku konstrukcji wsporzecznych linii elektroenergetycznych zgodnie z normami PN-EN 50341-1:2013 [6] i PN-EN 50341-2-22:2022 [8]. Wdrożenie tych norm zmieniło istotnie warunki, na które projektowane są te konstrukcje w stosunku do uprzednio stosowanych norm. Zawartość merytoryczna norm podstawowych dotyczących projektowania konstrukcji stalowych, np. PN-EN 1993-1-1:2006 [9] i PN-EN 1993-1-8:2006 [10], nie jest wystarczająca do projektowania gniazd słupów powłokowych, zwłaszcza o poprzecznym przekroju wielokątnym. Bardziej adekwatne wskazania, bazujące głównie na zaawansowanej metodzie elementów skończonych (MES), zostały zawarte w PN-EN 1993-1-6:2009 [11]. Norma określa wytyczne ogólne, zasadniczo ograniczone do powłok walcowych, niezupełnie przystające do rozwiązań konstrukcji słupów powłokowych wykonywanych w technologii kształtowania na zimno w formie przekrojów wielokątnych. Specyfika nośności cienkościennych przekrojów wielokątnych, opisana w [12÷14], wymaga szczególnie uważnego podejścia, gdyż koncentruje się na nośności trzonów poza strefą samych gniazd. W analizach nie uwzględniono istotnych zaburzeń geometrii wynikających z kształtowania gniazd. W związku z tym bez względu na stopień zaawansowania modeli numerycznych MES niezwykle istotna jest weryfikacja rzeczywistej nośności granicznej gniazd, jaką można uzyskać wyłącznie na drodze badań fizycznych, najlepiej na modelach w skali 1:1. Badania takie mogą stanowić podstawę kalibracji modeli numerycz-

mization of structural solutions. The subject of this article is the results of field tests of joints and their analysis, conducted in the years 2022–2023 as part of the research project titled “Innovative Shell Poles Joints,” co-financed by the National Centre for Research and Development from the European Regional Development Fund.

Field test of sockets

Field studies were preceded by numerical FEM analyses, which led to the development of preliminarily optimized solutions for various types of crossarm sockets. Based on these analyses, full-scale 1:1 research prototypes of the support structures were prepared, consisting of a section of the pole shaft with the socket and the entire crossarm. The studies included tests of the attachment of crossarm beams to the pole shaft, serving as mounting points for high-voltage 110 kV line conductors, for different types of poles. In total, static field tests were conducted on eighteen sockets (six tests for each type of socket):

- type I – lap joint type sockets,
- type II – head plate type sockets,
- type III – lattice-type and suspended crossbeam.

For all three types of sockets, tests were conducted on various versions of them:

- GP and GPP sockets (suspended), intended for suspension poles,
- GM sockets, intended for tension poles,
- GK sockets, intended for tension poles in an end functionality.

Destructive tests of the sockets were conducted on a 1:1 scale, ensuring the replication of the actual geometry of the pole and crossarm structures for 110 kV overhead lines, but due to the geometric proportions used in practice, the conclusions from the research can also be extrapolated to the structures of 220 kV line poles.

The initial assumptions provided for two GP, GM, GK sockets for each series of six type tests. The authors of the tests already had a relatively good understanding of the sockets' behavior from previous numerical analyses. Based on FEM analyses, it was expected that lap-type sockets would be suitable for suspension poles; hence, four GP sockets tests and one GM and one GK test were reasonably carried out. In the case of type III, however, GP sockets (nos. 5 and 6) were not tested, only GPP nos. 7 and 8.

The test station consisted of a reinforced concrete moor-pile foundation and a heavily ribbed steel adapter mounted to the foundation with 32 M48 anchors made of S355 steel. The assembly of the test elements onto the adapter was carried out using 16 M33 bolts of grade 8.8. A detailed description of the field test station is given in [7]. Photographs 1÷3 show prototypes with the analyzed sockets.

Figures 1÷3 show the construction details of the sockets subjected to tests. In the case of type III GP sockets, which are simple trusses mainly loaded vertically, testing was omitted and replaced with tests of GPP sockets, i.e., with a C-section beam and a suspending tie without bracing.

nych MES w celu dalszej modyfikacji czy optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych.

Przedmiotem artykułu są wyniki badań poligonowych gniazd oraz ich analiza, które przeprowadzono w latach 2022–2023 w ramach projektu badawczego pt. „Innowacyjne gniazda słupów powłokowych” współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Badania poligonowe gniazd

Badania polowe zostały poprzedzone analizami numerycznymi MES, które doprowadziły do opracowania wstępnie zoptymalizowanych rozwiązań gniazd poprzeczników różnych typów. Na ich podstawie przygotowano prototypy badawcze konstrukcji wsporczych w skali 1:1, które były złożone z fragmentu trzonu słupa z gniazdem oraz całego poprzecznika. Badania obejmowały testy mocowania na trzonie belek poprzecznych pełniących rolę punktów mocowania przewodów linii wysokiego napięcia 110 kV w przypadku różnych odmian słupów. Wykonano poligonowe badania statyczne osiemnastu gniazd (po sześć badań każdego typu gniazda):

- typ I – gniazda typu zakładkowego,
- typ II – gniazda typu doczołowego,
- typ III – gniazda typu kratowego i podwieszanego.

W przypadku wszystkich trzech typów gniazd prowadzono testy różnych ich odmian:

- gniazda GP i GPP (podwieszane), przeznaczone do słupów tzw. przelotowych,
- gniazda GM, przeznaczone do słupów tzw. mocnych,
- gniazda GK, przeznaczone do słupów mocnych w funkcji krańcowej.

Przeprowadzono testy niszczące gniazd w skali 1:1, zapewniające odwzorowanie rzeczywistej geometrii konstrukcji słupów i poprzeczników do linii napowietrznych 110 kV, ale ze względu na stosowane w praktyce konstrukcyjnej proporcje geometryczne, wnioski z badań mogą być ekstrapolowane także na konstrukcję słupów linii 220 kV.

Założenia początkowe przewidywały po dwa gniazda GP, GM, GK w przypadku każdej serii sześciu badań typu. Autorzy badań już z wcześniejszych analiz numerycznych mieli relatywnie dobrze rozpoznaną pracę gniazd. Po analizach MES spodziewano się, że gniazda typu zakładkowego będą predysponowane do słupów przelotowych, stąd racjonalnie zrealizowano cztery badania gniazd GP i po jednym GM i GK. Z kolei w przypadku typu III nie badano gniazd GP (nr 5 i 6), tylko GPP nr 7 i 8.

Stanowisko badawcze składało się z żelbetowego oporowego fundamentu monopalowego oraz silnie uźebrowanego adaptera stalowego mocowanego do fundamentu kotwami M48 ze stali S355 w liczbie 32 szt. Montaż elementów testowych do adaptera zrealizowano za pomocą 16 śrub M33 klasy 8.8. Szczegółowy opis poligonowego stanowiska badawczego przedstawiono w [7]. Na fotografiach 1÷3 zaprezentowano prototypy z analizowanymi gniazdami.

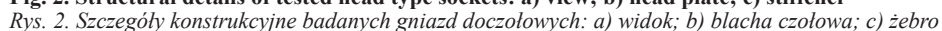
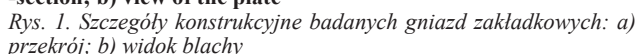
Na rysunkach 1÷3 przedstawiono detale konstrukcyjne gniazd poddanych testom. W przypadku rozwiązań typu III



Photo 3. View of the prototype with truss type socket III-GM-4

Fot. 3. Widok prototypu z gniazdem kratowym III-GM-4

Gniazda GM i GK badano przy działaniu kompletu sił wynikających z PN-EN 50341-2-22:2022 [8], symulując składową pionową siłę i obie składowe poziome. Siły były generowane przyciągarkami ręcznymi i mierzone dynamometrami elektronicznymi. Wielkości przyjętych „nominalnych” sił wynikały



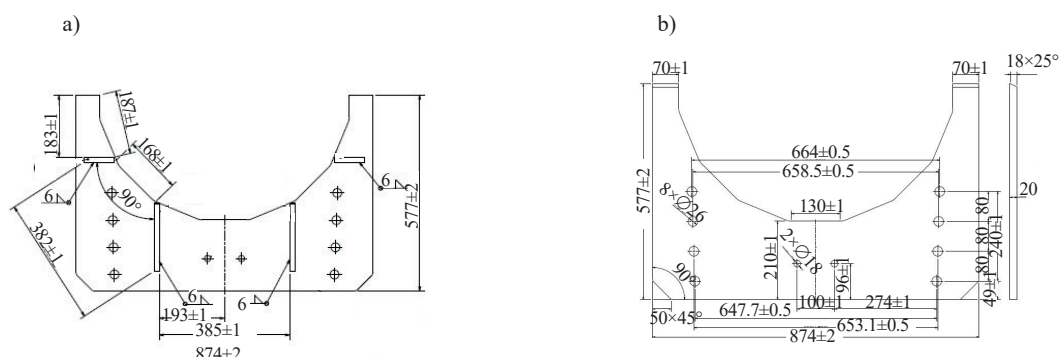


Fig. 3. Structural details of tested truss type sockets: a) assembly; b) horizontal stiffener

Rys. 3. Szczegóły konstrukcyjne badanych gniazd kratowych: a) złożenie; b) żebro poziome

95%, and 100% of the values, followed by loads above 100% in increments of 5% up to 130%, and then in increments of 10% until failure or reaching the limit level assumed in the testing program. Loads were applied using manual winches with a 9 T capacity anchored with chains to the ground and a specially designed reaction frame. Force measurements were taken using longitudinal dynamometers installed directly near the points of action that represented concentrated forces at the end of the cantilever (photograph 1).

GM and GK sockets were tested under the action of the full set of forces specified in the PN-EN 50341-2-22:2022 standard [8], simulating the vertical component of the forces and both horizontal components. The forces were generated using hand winches and measured with electronic dynamometers.

The magnitudes of the adopted „nominal” forces resulted directly from the standard PN-EN 50341-2-22:2022 [8], for the appropriate combinations of loads including the weight of conductors, insulators, and icing, suitable for a typical 110 kV line. To determine the forces for AFLs-10–310 conductors, a tension at a temperature of +10°C with a value of 13 kN and 1st icing load zone was assumed. The magnitudes of nominal forces adopted as leading reference values (without accompanying forces) in the critical directions of action for all fittings (vertical forces for GP and GPP fittings, and horizontal forces for GM and GK) are summarized in the table. It also includes the basic results of static tests, covering the values of achieved ultimate loads and their corresponding factors. Due to the simple design of the GPP fittings and the assumed design safety level, these fittings did not formally fail during the tests. The obtained equilibrium path was almost linear, and therefore the new specific fittings are not described in detail.

During the study, geodetic measurements were taken of the displacement of the end of the cantilever (point G1), the area of the crossbeam attachment (point G2), and the top of the column shaft (point G3). The arrangement of geodetic measurement points, using the example of a prototype of butt-type sockets, is shown in Figure 4. The displacement values at the end of the crossbeams (point G1) as a function of changes in primary loads were the basis for constructing static equilibrium paths (SEP).

z PN-EN 50341-2-22:2022 [8], dla odpowiednich kombinacji obciążeń obejmujących ciężar przewodów, izolacji i oblodzenia, adekwatnych dla typowej linii 110 kV. W celu określenia sił przyjęto przewody AFLs-10–310, naciąg w temperaturze +10°C o wartości 13 kN oraz 1 strefę obciążenia oblodzeniem. Wielkości sił nominalnych przyjętych jako wiodące wartości odniesienia (bez sił towarzyszących) na krytycznych kierunkach działania w przypadku wszystkich gniazd (siły pionowe dla gniazd GP i GPP, a siły poziome dla GM i GK) zestawiono w tabeli. Zamieszczono w niej również podstawowe wyniki testów statycznych obejmujące wartości osiągniętych obciążeń granicznych i odpowiadających im mnożników. Ze względu na prostą konstrukcję gniazd GPP i przyjęty projektowy poziom bezpieczeństwa gniazda, formalnie nie uległy one zniszczeniu podczas testów. Uzyskana ścieżka równowagi była prawie liniowa i dlatego nie opisano szczegółowo nowych specyficznych gniazd.

Podczas badań dokonywano pomiarów geodezyjnych przemieszczeń końca wspornika (punkt G1), rejonu mocowania poprzeczника (punkt G2) i wierzchołka trzonu słupa (punkt G3). Rozmieszczenie geodezyjnych punktów pomiarowych na przykładzie prototypu gniazd doczołowych pokazano na rysunku 4. Wielkości przemieszczeń na końcu poprzeczników (punkt G1) w funkcji zmiany obciążeń wiodących były podstawą do zbudowania ścieżek równowagi statycznej (SRS).

Dokonywano także pomiarów deformacji płaszcza trzonu i poprzeczника za pomocą czujników zegarowych o dokładnościach 0,01 mm. Rozmieszczenie punktów pomiarowych czujników zegarowych odpowiadało spodziewanym ekstremalnym deformacjom płaszcza trzonu i zakończenia poprzeczника w rejonie gniazda. Pomiary te stanowiły jakościowe porównanie w odniesieniu do map deformacji uzyskiwanych z analiz MES.

Na fotografiach 4÷6 zaprezentowano charakterystyczne formy zniszczenia trzech różnych odmian prototypów. Za nośność graniczną gniazd uznawano maksymalne siły odczytane na dynamometrach, w przypadku których udało się utrzymać obciążenie napinające.

Forma zniszczenia gniazd zakładkowych przyjmowała następującą postać:

Summary of basic test results of the sockets

Zestawienie podstawowych wyników testów gniazd

Socket type/ Typ gniazda	Test designation/ Oznaczenie testu	Material/ Material	Design load/ Obciążenie obliczeniowe [kN]	Maximum load factor/ Mnożnik obciążenia maksymalnego –	Limit load/ Obciążenie graniczne [kN]	Deflection end of crossbeam/ Przemieszczenie końca poprzecznika [mm]
Lap-joint type/ Zakładkowe	I-GP-1	S355	23.89	1.70	40.61	268
	I-GP-2	S235	23.89	1.30	31.06	158
	I-GP-3	S355	23.89	1.70	40.61	235
	I-GP-4	S355	23.89	2.20	52.56	363
	I-GK-5	S355	5.70	2.60	14.82	367
	I-GM-6	S355	5.20	1.25	6.50	128
Head-plate type/ Doczołowe	II-GP-1	S355	28.0	2.10	58.8	145
	II-GM-2	S355	24.0	1.90	45.6	130
	II-GK-3	S355	32.0	2.00	64.0	212
	II-GP-4	S355	28.0	2.50	70.0	197
	II-GM-5	S355	24.0	2.50	60.0	235
	II-GK-6	S355	32.0	2.00	64.0	209
Truss/Suspended/ Kratowe/podwieszane	III-GK-1	S235	27.35	1.05	28.72	224
	III-GK-2	S355	27.35	1.40	38.29	244
	III-GM-3	S235	41.66	1.05	43.74	60
	III-GM-4	S355	41.66	1.40	58.32	84
	III-GPP-5 (7)	S235	16.26	1.05	17.07	20
	III-GPP-6 (8)	S355	16.26	1.50	24.39	30

Measurements of the deformation of the shaft and crossbeam casing were also carried out using dial gauges with an accuracy of 0.01 mm. The placement of the dial gauge measurement points corresponded to the expected extreme deformations of the shaft casing and the end of the crossbeam in the area of the socket. These measurements essentially provided a qualitative comparison with respect to the deformation maps obtained from FEM analyses.

Photographs 4÷6 show characteristic forms of damage in representatives of three different prototype variants.

The ultimate load-bearing capacity of the joints was considered to be the maximum forces recorded on the dynamometers, for which it was possible to maintain the tensile load.

The form of destruction of lap joints took the following shape:

- at the sockets of suspension poles, very slight deformation of the post shell and lap plates (about 5 mm) was observed, as well as significant deformation (amplitude up to about 25 mm) of the four-sided crossbar (photo 4) in the form of bulges on the side walls and the collapse of the bottom wall;

- at the sockets of the tension poles, significant deformation of the lap plates in the horizontal plane (up to about 34 mm) was observed;

• **in the case of head-plate sockets:**

- significant deformation was observed at the sockets of suspension poles in the form of a sagging of the lower and side walls of the crossbeam with an octagonal cross-section (amplitude approx. 18 mm) and flexural deformations of the lower peripheral rib of the socket;

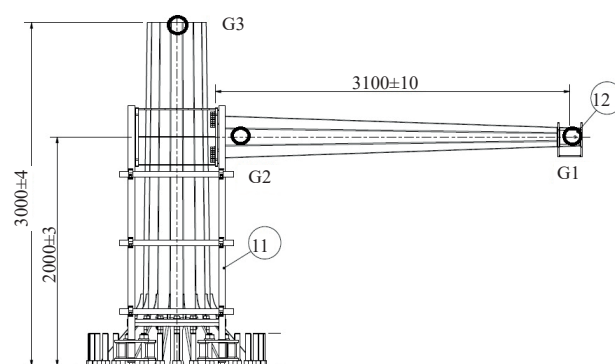


Fig. 4. The location of geodetic measurement points

Rys. 4. Lokacja geodezyjnych punktów pomiarowych

- przy gniazdach słupów przelotowych zaobserwowano bardzo nieznaczną deformację płaszcza słupa i blach zakładkowych (ok. 5 mm) oraz znaczną (amplituda do ok. 25 mm) deformację czworosiecznego poprzecznika (fotografia 4) w formie wybrzuszeń na ściankach bocznych oraz zapadnięcia się ścianki dolnej;

- przy gniazdach słupów mocnych zaobserwowano znaczną deformację blach zakładkowych w płaszczyźnie poziomej (do ok. 34 mm);

• **w przypadku gniazd doczołowych:**

- przy gniazdach słupów przelotowych zaobserwowano znaczną deformację w formie zapadnięcia dolnej i bocznych ścianek poprzecznika o przekroju poprzecznym ośmiokątnym (amplituda ok. 18 mm) oraz giętne odkształcenia dolnego obwodowego żebra gniazda;



Photo 4. Deformation scheme of the lap joint type socket of suspension pole (I-GP-1)

Fot. 4. Schemat deformacji gniazda zakładkowego słupa przelotowego (I-GP-1)



Photo 5. Deformation scheme of the head joint type socket of tension pole (II-GM-2): a) compression zone, b) tension zone

Fot. 5. Schemat deformacji gniazda doczołowego słupa mocnego (II-GM-2): a) strefa ściskana, b) strefa rozciągana



Photo 6. Deformation scheme of the truss type socket of tension pole (III-GM-4)

Fot. 6. Schemat deformacji gniazda kratowego słupa mocnego (III-GM-4)

– significant deformation of the crossbeam was observed near the sockets of the tension poles (photo 5a) in the form of bulges and depressions on the side and bottom walls (amplitude approx. 25 mm), as well as bending of the front plate beyond the area of screw attachment, and also flexural deformations (amplitude up to approx. 6 mm) of the peripheral ribs of the socket (photo 5b);

• **in the case of truss and suspended sockets (GPP):**

– at the suspensions poles sockets (GPP), very slight deformations of the socket elements (below 1 mm) were observed on the pole and relatively small deformations of the crossbeam itself, where the resultant displacements were essentially the effect of deformations of the suspension elements;

– near the tension pole sockets, significant deformation of the lower crossbeam was observed (photo 6) in the form of bending-torsion (amplitude approx. 25 mm), whereas the deformations of the socket elements were minor (up to approx. 5 mm), except for vertical displacements of the outer edges of the bottom plate reaching up to approx. 12 mm;

In all test cases, no screw breakage or shearing was observed, and only relatively minor deformation of the screw holes was noted.

After completing the field tests of the sockets, steel samples were taken to conduct basic studies of the material's mechanical properties in accordance with the requirements of the PN-EN ISO 6892-1:2020-05 standard [16]. For all samples, tensile strength, yield strength, and elongation were determined. The obtained parameter values met the relevant requirements for the specific types of steel used in the prototype construction in accordance with the requirements of the PN-EN 10025-2:2019-11 standard [17]. The actual values of the steel's mechanical parameters were used in the verification FEM models.

Numerical FE analysis of the sockets

As part of the research project, numerical analyses of pole sockets were carried out using FEM in the implementation in the FEMAP/Nastran program. Modifications of the models involved various solutions differing in the number and thickness of the stiffening elements used, the number of connectors, or the types of steel employed, i.e., S235 and S355. For field tests, numerically optimized structural solutions were preliminarily

– przy gniazdach słupów mocnych zaobserwowano znaczną deformację poprzeczника (fotografia 5a) w formie wybrzuszeń i wklęsnięć na ściankach bocznych i dolnych (amplituda ok. 25 mm) oraz wygięcie blachy czołowej poza obszarem przylegania śrub, a także odkształcenia giętne (amplituda do ok. 6 mm) obwodowych żeber gniazda (fotografia 5b);

• **w przypadku gniazd kratowych i podwieszonych (GPP):**

– przy gniazdach słupów przelotowych (GPP) stwierdzono bardzo nieznaczne deformacje elementów gniazda (poniżej 1 mm) na słupie i relatywnie nieduże deformacje samego poprzeczника, gdzie wypadkowe przemieszczenia były zasadniczo efektem odkształceń elementów podwieszenia;

– przy gniazdach słupów mocnych zaobserwowano znaczną deformację pasa dolnego poprzeczника (fotografia 6) w formie giętno-skrętnej (amplituda ok. 25 mm), natomiast deformacje elementów gniazda były nieznaczne (do ok. 5 mm) z wyjątkiem pionowych przemieszczeń zewnętrznych krawędzi blachy dolnej dochodzących do ok. 12 mm.

We wszystkich przypadkach nie zanotowano zerwania lub ścięcia śrub i zaobserwowano relatywnie nieznaczne deformacje otworów na śruby.

Po zakończeniu testów poligonowych gniazd pobierano próbki stali celem przeprowadzenia badań podstawowych właściwości mechanicznych materiału zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6892-1:2020-05 [16]. W przypadku wszystkich próbek określono wytrzymałość na zerwanie, granicę plastyczności oraz wydłużenie względne. Uzyskane wartości parametrów spełniały wymagania dotyczące poszczególnych gatunków stali wykorzystanych w budowie prototypów zgodnie z PN-EN 10025-2:2019-11 [17]. Rzeczywiste wartości parametrów mechanicznych stali zostały wykorzystane w modelach weryfikacyjnych MES.

Analizy numeryczne MES gniazd

W ramach projektu badawczego wykonano analizy numeryczne gniazd słupów z wykorzystaniem MES w implementacji w programie FEMAP/Nastran. Modyfikacje modeli polegały na wariantowych rozwiązaniach różniących się liczbą i grubością stosowanych elementów usztywniających, liczbą łączników czy gatunkami stosowanej stali, tj. S235 i S355. Do

selected. The article presents representative final FEM models reflecting the conducted field tests.

Finite element models were built using shell, four-node finite elements representing the pole shaft, crossbeam, and socket components. Bolt connections were modeled using beam elements connected to the rest of the structure through rigid link elements. Contact issues in the socket elements were resolved using automatically generated contact elements available in the software or, alternatively, using one-sided gap elements. This approach allowed the behavior of the structure to be represented in contact areas where separation of the contacting elements was possible. In the case of lattice crossbeam sockets, only the area near the socket and the end were modeled with shell elements, while the inner part of the crossbeam was modeled using beam elements with cross-sections corresponding to rolled angles.

Nonlinear elastic-plastic GMNA-type analyses were performed. The steel material model included a longitudinal modulus of elasticity of 210 GPa and a Poisson's ratio of 0.3. In the GMNA analyses, two variants of the steel model were considered due to its plasticization:

- elastic-rigid-plastic model with nominal yield parameters,
- four-line elastic-plastic model with hardening according to the proposal of the EN 1993-1-14 [18] project, taking into account the actual mechanical parameters of steel from material tests.

The total number of nodes and finite elements used in the models ranged from approximately 130,000 to about 210,000.

In the presented models, elements of simplified representation of bolt connectors were used effectively. A two-node beam element simulated a bolt connector connected to node plates by radial rigid elements. This simplified method of representing connectors, which greatly facilitates modeling, proved to be sufficiently accurate in the considered cases, among others, due to compliance with standard design requirements concerning bolt spacing.

As a result of FEM calculations, complete information is obtained regarding displacement, stress, and strain fields in the structural model. Figures 5-7 show representative maps of effective (equivalent) Huber-Mises stresses for all three types of joints. In the case of lap-joint and head-plate-joint models, the presented maps are expressed in Pa, while for lattice joints, they are shown in MPa due to certain program simplifications arising from the use of beam elements. It was noted

badan poligonowych wytypowano wstępnie zoptymalizowane numerycznie rozwiązania konstrukcyjne. W artykule zaprezentowano reprezentatywne modele finalne MES, odwzorowujące przeprowadzone testy poligonowe.

Zbudowano modele MES złożone z powłokowych, czterowęzłowych elementów skończonych reprezentujących trzon słupa, poprzecznik oraz elementy gniazda. Łączniki śrubowe odwzorowano elementami prętowymi połączonymi z resztą konstrukcji za pośrednictwem transmisyjnych elementów sztywnych. Problemy stykowe elementów gniazda rozwiązywano za pomocą generowanych automatycznie elementów kontaktowych dostępnych w programie lub alternatywnie z wykorzystaniem elementów jednostronnych typu gap. Odwzorowano zachowanie się konstrukcji w obszarach kontaktowych, gdzie możliwa była separacja stykających się elementów. W przypadku gniazd poprzeczników kratowych elementami powłokowymi odwzorowano tylko strefę przy gnieździe oraz zakończenie, natomiast wewnętrzną część poprzecznika zamodelowano z wykorzystaniem elementów prętowych o przekroju poprzecznym adekwatnych kątowników walcowanych.

Przeprowadzono sprężysto-plastyczne nieliniowe analizy typu GMNA. Model materiałowy stali uwzględniał moduł sprężystości podłużnej 210 GPa oraz współczynnik Poissona 0,3. W analizach GMNA uwzględniono dwie odmiany modelu stali ze względu na jej uplastycznienie:

- model sprężysto-sztywno-plastyczny o nominalnych parametrach plastyczności,
- model sprężysto-plastyczny czteroliniowy ze wzmocnieniem wg pr EN 1993-1-14 [18], z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów mechanicznych stali z badań materiałowych.

Sumaryczna liczba węzłów i elementów skończonych wykorzystanych przy budowie modeli wynosiła od ok. 130 do 210 tys. W prezentowanych modelach efektywnie wykorzystano elementy uproszczonego odwzorowania łączników śrubowych. Dwuwęzłowy element prętowy symulował łącznik śrubowy połączony radialnymi elementami sztywnymi z blachami węzłowymi. Ten uproszczony sposób odwzorowania łączników, znacznie ułatwiający modelowanie, okazał się wystarczająco dokładny w rozważanych przypadkach m.in. z tytułu zachowania w rozwiązaniach konstrukcyjnych normowych wymagań dotyczących rozmieszczania śrub.

Z obliczeń MES uzyskano dane dotyczące przemieszczeń, naprężeń i odkształceń w modelu konstrukcji. Na rysunkach 5-7

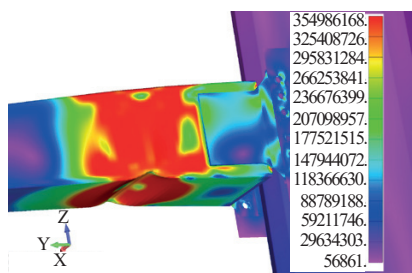


Fig. 5. Map of effective stresses of model I-GP-1 [Pa]

Rys. 5. Mapa naprężeń efektywnych modelu I-GP-1 [Pa]

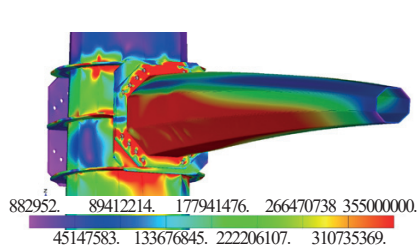


Fig. 6. Map of effective stresses of model II-GM-2 [Pa]

Rys. 6. Mapa naprężeń efektywnych modelu II-GM-2 [Pa]

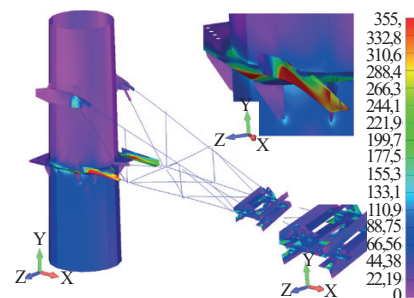


Fig. 7. Map of effective stresses of model III-GM-4 [MPa]

Rys. 7. Mapa naprężeń efektywnych modelu III-GM-4 [MPa]

that the structural deformation patterns observed during field tests correspond to the deformations of the models determined numerically using the FEM. However, the most important and reliable result of nonlinear FEM calculations is the static equilibrium paths (SEP), presenting the relationships of displacement changes of selected points of the structure as a function of load increments. For constructing the SEPs of the analyzed structures, nodal displacements of points located at the tip (end) of the crossbeam.

The article presents characteristic curves in terms of features or representative for individual groups of node constructions.

Figure 8 compares the SEP in the case of the I-GP-1 test. The empirical curve represents the force-displacement relationship obtained from experiments. The numerical curve was obtained from a model representing steel as an elastic-rigid-plastic material with a nominal yield strength. The ultimate load obtained from experiments was 40.61 kN, while in the FEM model it was 39.46 kN. The difference, on the safe side, is only about 3%. At the same time, from the SEP functions shown in Figure 8, a significant difference can be observed in the displacements recorded corresponding to the ultimate load. This is due to the limitations of the FEM model, where the connectors were represented without clearances and the peripheral fastening omitted only the one-sided interaction of the bolts with the plates. The ultimate load capacity was determined in the FEM model with sufficient accuracy even with a simplified steel model, even when assuming the nominal yield strength. This was related to the dominant influence of local instability of the crossbeam walls still in elastic range.

An example SEP for ead-plate sockets of the II-GM-2 model is shown in Figure 9. The FEM model, taking into account the elastic-plastic steel model with a nominal yield strength of 355 MPa, safely estimates the ultimate load-bearing capacity of the socket. The calculated value corresponding to a force of 41.33 kN is approximately 5% lower than the test value of 43.2 kN. The lower stiffness of the FEM model results from the use of rigid elements at the connectors with released rotational constraints. Figure 10 shows the influence of the steel model on the ultimate load-bearing capacity of the butt socket estimated using the FEM method. The SEP course for the II-GM-5 socket is shown for three steel model options: elastic-rigid-plastic with nominal yield strength (S355) and

przedstawiono reprezentatywne mapy naprężeń efektywnych (zastępczych) Hubera-Misesa wszystkich trzech typów gniazd. W przypadku modeli gniazd zakładkowych oraz doczołowych prezentowane mapy wyrażono w Pa, natomiast gniazd kratowych w MPa ze względu na pewne uproszczenia programowe z tytułu wykorzystania elementów prętowych. Zauważono, że schematy deformacji konstrukcji zaobserwowane podczas badań poligonowych zgadzają się z deformacjami modeli określonymi numerycznie metodą MES. Najważniejszym, najbardziej wiarygodnym, rezultatem nieliniowych obliczeń MES są ścieżki równowagi statycznej (SRS) prezentujące zależność zmiany przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji w funkcji przyrostu obciążenia. Do budowy SRS analizowanych konstrukcji wybrano przemieszczenia węzłowe punktów znajdujących się na wierzchołku (końcu) poprzeczników.

W artykule zaprezentowano charakterystyczne krzywe ze względu na cechy szczególne lub reprezentatywne dla poszczególnych grup konstrukcji węzłów.

Na rysunku 8 porównano SRS w przypadku testu I-GP-1. Krzywą empiryczną reprezentuje zależność siła–przemieszczenie uzyskana z badań. Krzywą numeryczną otrzymano z modelu odwzorowującego stal jako materiał sprężysto-sztwno-plastyczny z nominalną granicą plastyczności. Obciążenie graniczne uzyskane z badań to 40,61 kN, a w modelu MES 39,46 kN. Różnica, po stronie bezpiecznej, wynosi tylko ok. 3%. Jednocześnie na podstawie przedstawionych na rysunku 8 funkcji SRS można zauważyć znaczną różnicę zarejestrowanych przemieszczeń odpowiadających obciążeniu granicznemu. Wynika to z niedostatku modelu MES, w którym łączniki odwzorowano z pominięciem luzów oraz obwodowego zamocowania z pominięciem tylko jednostronnego oddziaływania śrub z blachami. Nośność graniczna w modelu MES została określona wystarczająco dokładnie nawet przy uproszczonym modelu stali i przyjęciu nominalnej granicy plastyczności. Związane to było z dominującym wpływem lokalnej niestateczności ścianek poprzecznika jeszcze w zakresie sprężystym.

Przykładową SRS w przypadku gniazd doczołowych modelu II-GM-2 przedstawiono na rysunku 9. Model MES uwzględniający sprężysto-plastyczny model stali o nominalnej wartości granicy plastyczności 355 MPa bezpiecznie szacuje nośność gra-

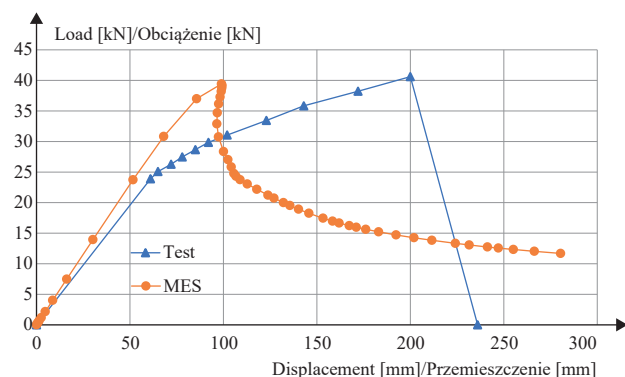


Fig. 8. Load-displacement paths for test I-GP-1

Rys. 8. Ścieżki równowagi statycznej w przypadku testu I-GP-1

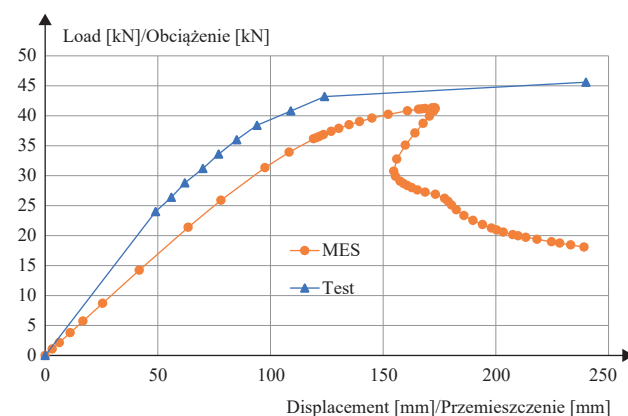


Fig. 9. Load-displacement paths for test II-GM-2

Rys. 9. Ścieżki równowagi statycznej w przypadku testu II-GM-2

elastic-plastic, quad-linear, defined by the yield strength from material tests (S415). In the case of the S415 model, the difference resulting from the release (PIN) or locking (RIG) of rotational degrees of freedom for the rigid connecting elements is also presented.

Due to the use of crossbeams with thicker walls, the effects of local buckling did not appear. The change in the slope of the curve in the tests at loads of approximately 30 kN (multiplier about 1.25), as shown in Figure 10, resulted from increased displacements caused by slippage of the connectors in the holes (sockets and bases of the shaft) as well as the chain in this test. The ultimate load capacity obtained from the FEM calculations, despite using the real mechanical properties of the steel, still remains on the safe side compared to the test results (table).

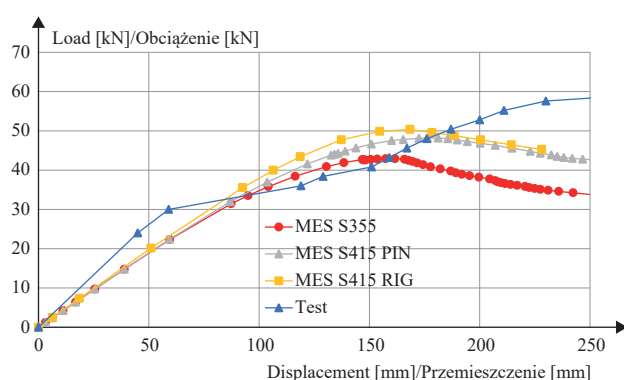


Fig. 10. Load-displacement paths for test II-GM-5

Rys. 10. Ścieżki równowagi statycznej w przypadku testu II-GM-5

In the case of latticed (truss) joints, the SEP was obtained in the form of monotonically increasing curves. In such a case, the computational ultimate load capacity can be estimated, for example, using the so-called tangent method, in which the load capacity is assumed to be the intersection point of tangents to the SEP curve determined for its initial and final sections. For the III-GM-4 joint, the numerically determined value is 66.03 kN (Figure 11) and is about 13% higher than the test value of 58.32 kN (table). At the same time, the displacement values recorded during the tests almost doubled the numerically determined values. This effect resulted from the omission of slip effects at the crossbeam bolt joints in the model.

It should be noted that it is possible to prepare more complex FEM models that better reflect full-scale field tests of structures. One of the aims of this work was to demonstrate that even relatively simple numerical FEM models, capturing only the basic features of the analyzed structures, can also be effectively used to assess the ultimate load-bearing capacity of slender systems.

The results presented in the article, in the form of stress-determined values of ultimate loads, fulfilled the objectives of the project. The final catalog solutions for the connections also took into account other supplementary standard criteria. The final adjustment resulted, among other things, from the

niczną gniazda. Obliczona wartość odpowiadająca sile 41,33 kN jest mniejsza od wartości z testów 43,2 kN o ok. 5%. Mniejsza sztywność modelu MES wynika z zastosowania elementów sztywnych przy łącznikach o zwolnionych obrotowych więzach. Na rysunku 10 przedstawiono wpływ modelu stali na nośność graniczną gniazda doczołowego szacowaną metodą MES. Pokazano przebieg SRS gniazda II-GM-5 w przypadku trzech opcji modelu stali: sprężysto-sztywno-plastycznego z nominalną granicą plastyczności (S355) oraz sprężysto-plastycznego, quadro-liniowego, opisanego granicą plastyczności z testów materiałowych (S415). W przypadku modelu (S415) dodatkowo przedstawiono różnicę wynikającą ze zwolnienia (PIN) lub zablokowania (RIG) obrotowych stopni swobody elementów sztywnych mocujących łączniki śrubowe. Ze względu na zastosowanie poprzeczników z grubszyimi ściankami efekty lokalnej niestateczności nie uwidoczniły się. Widoczna na rysunku 10 zmiana nachylenia krzywej z badań w przypadku obciążeń ok. 30 kN (mnożnik ok. 1,25) wynikała ze zwiększonych przemieszczeń wywołanych poślizgiem łączników w otworach (gniazda i podstawy trzonu) oraz łańcucha w tym badaniu. Otrzymana z obliczeń MES wartość nośności granicznej mimo wykorzystania realnych właściwości mechanicznych stali nadal znajduje się po stronie bezpiecznej w stosunku do wyników badań (tabela).

W przypadku gniazd kratowych otrzymano SRS w postaci krzywych monotonicznie rosnących. Obliczeniową nośność graniczną można oszacować w takim przypadku, np. stosując tzw. metodę stycznych, w której za wartość nośności przyjmuje się punkt przecięcia stycznych do krzywej SRS wyznaczonych dla początkowego i końcowego jej odcinka. W przypadku gniazda III-GM-4 wyznaczona numerycznie wartość wynosi 66,03 kN (rysunek 11) i jest o ok 13% większa od wartości z badań równej 58,32 kN (tabela). Jednocześnie wartości przemieszczeń rejestrowanych podczas testów prawie dwukrotnie przekroczyły wielkości określone numerycznie. Efekt ten wynikał z pominięcia w modelu efektów poślizgów na stykach śrubowych poprzeczника.

Należy zaznaczyć, iż możliwe jest przygotowanie bardziej złożonych modeli MES jeszcze lepiej odwzorowujących badania poligonowe konstrukcji w skali 1:1. Jednym z celów pracy było wykazanie, że nawet relatywnie proste modele numeryczne MES, ujmujące tylko podstawowe cechy analizowa-

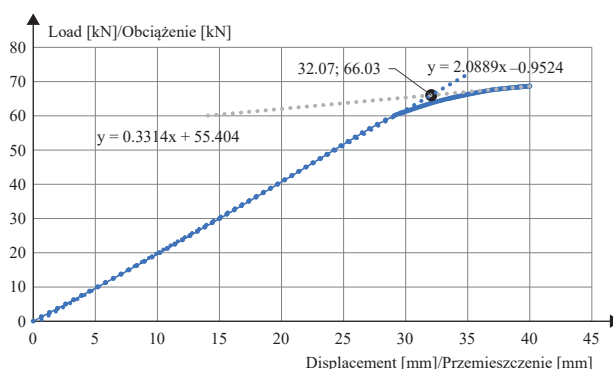


Fig. 11. Load-displacement paths for test III-GM-4 from FEM analysis

Rys. 11. Ścieżki równowagi statycznej w przypadku testu III-GM-4 z analizy MES

requirement to limit the calculated strain values in the structure to a nominal level of 5%, as indicated by the standard PN-EN 1993-1-5:2008 [5], and due to the requirements regarding the load-bearing capacity of bolted fasteners.

Summary and conclusions

The results of eighteen full-scale prototype field tests and finite element method (FEM) numerical analyses of various types of cross-arm sockets for transmission line steel poles of 110 kV were presented. The project covered structural solutions for suspension and tension poles sockets, shaped as lap joints, head plate joints, and lattice or suspended cross-arm connections. The test results allowed for verification of the actual behavior of the socket structures under load and served as the basis for validating their FEM models, enabling multi-variant analyses leading to the final optimization of the solutions. The influence of local instability of the socket components and of the cross-arm in the mounting area was determined.

Conclusions drawn from numerical analyses and field tests conducted as part of the research project titled “Innovative Shell Pole Sockets”:

- concerning the effectiveness of the FEM method
 - a) field tests allowed for the calibration of FEM numerical models towards increasing their reliability in assessing the ultimate load-bearing capacity of the analyzed joints and extrapolating the results to other solutions with similar geometry and different load combinations;
 - b) the use of a nonlinear elastic-plastic steel model with a bi-linear characteristic in FEM calculations leads to a safe and practically sufficient assessment of the ultimate load capacity of the type of joint analyzed;
 - c) relatively simple FEM modeling methods for bolted connections using beam elements allow for a sufficiently accurate assessment of the stress in a complex shell structure; more advanced FEM modeling methods for connectors, including welds, are possible and necessary if bolts and welds are not additionally verified by analytical methods.
 - d) limiting design strains in the socket structure to 5% in accordance with PN-EN 1993-1-5:2008 [5] constitutes a safe margin of safety, as the tested structures were capable of accumulating higher strain values without losing coherence;
 - e) in the numerical FEM assessment of the bearing capacity of the sockets, the simplest known approach using the tangent method was effectively used; in the case of monotonically increasing SEP curves, more advanced bearing capacity estimates described in [19] can be applied;
- from field tests
 - a) in all field tests, the ultimate load capacity of the tested structures made of S355 steel was higher than the declared design standard load, with a safety factor in the range of approximately 1.5 to 2.5, except for prototypes made of lower strength S235 steel, for which the factor was 1.05;
 - b) in all cases, the form of destruction of the test models was plastic, mainly in the form of deformation of parts of the crossbeams in the socket area, thus providing a proper path for the structure's failure;

nich konstrukcji, także mogą być efektywnie wykorzystane w ocenie nośności granicznej ustrojów smukłych. Przedstawione w artykule rezultaty w postaci określonych naprężeń oraz wartości obciążeń granicznych spełniły cele projektu. Ostateczne rozwiązania katalogowe gniazd uwzględniły także inne uzupełniające kryteria normowe. Finalna korekta wyników m.in. z wymagania ograniczenia obliczeniowych wartości odkształceń w konstrukcji do umownego poziomu 5%, wskazanego przez normę PN-EN 1993-1-5:2008 [5] oraz wymagań dotyczących nośności łączników śrubowych.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono wyniki osiemnastu badań poligonowych prototypów w skali 1:1 oraz analizy numeryczne MES różnych typów gniazd poprzeczników słupów powłokowych elektroenergetycznych linii napowietrznych 110 kV. Projekt obejmował rozwiązania konstrukcyjne gniazd słupów tzw. przelotowych oraz mocnych, kształtowanych w postaci styków zakładkowych, doczołowych oraz styków poprzeczników kratowych i podwieszanych. Wyniki badań pozwoliły na weryfikację rzeczywistego zachowania się konstrukcji gniazd pod obciążeniem i stały się podstawą do walidacji ich modeli numerycznych MES, pozwalających na wielowariantowe analizy prowadzące do ostatecznej optymalizacji rozwiązań. Określono wpływ niestateczności lokalnej elementów składowych gniazd i samego poprzecznika w rejonie mocowania.

Wnioski wynikające z analiz numerycznych oraz testów poligonowych przeprowadzonych w ramach projektu badawczego pt. „Innowacyjne gniazda słupów powłokowych”:

- dotyczące efektywności metody MES
 - a) badania poligonowe pozwoliły na kalibrację modeli numerycznych MES w kierunku zwiększenia ich wiarygodności w ocenie nośności granicznej analizowanych węzłów oraz ekstrapolacji wyników na inne rozwiązania o zbliżonej geometrii i innych kombinacji obciążeń;
 - b) zastosowanie nieliniowego modelu sprężysto-plastycznego stali o bi-liniowej charakterystyce w obliczeniach MES prowadzi do bezpiecznej i wystarczającej do celów praktycznych oceny nośności granicznej analizowanego typu gniazd;
 - c) relatywnie proste metody modelowania MES łączników śrubowych z wykorzystaniem elementów prętowych pozwalają na wystarczająco dokładną ocenę wyężenia złożonej konstrukcji powłokowej; bardziej zaawansowane sposoby modelowania MES łączników, w tym również spoin, są możliwe i niezbędne, jeżeli śrub i spoin nie weryfikuje się dodatkowo metodami analitycznymi;
 - d) ograniczenie projektowych odkształceń w konstrukcji gniazd do wartości 5% zgodnie z PN-EN 1993-1-5:2008 [5] stanowi bezpieczny margines bezpieczeństwa, gdyż badane konstrukcje były zdolne przenieść bez utraty spójności większe wartości odkształceń;
 - e) przy numerycznej ocenie MES nośności gniazd wykorzystano efektywnie najprostsze znane podejście metodą stycznych; w przypadku monotonicznie rosnących krzywych SRS można stosować bardziej zaawansowane estymacje nośności opisane w [19];

c) conducted studies of joints clearly favor lap-type connections for suspension poles, whereas head-plate type connections are preferable for tension poles; lattice crossbeams can be used effectively for both types of poles, while their variant in the form of suspended crossbeam is mainly suitable only for suspension poles;

d) reducing the number of socket components has significantly improved the technological aspects of production while maintaining the required load capacity.

Photo: authors

• z badań poligonowych

a) we wszystkich badaniach poligonowych uzyskana nośność graniczna konstrukcji ze stali S355 była większa niż deklarowane obliczeniowe obciążenie normowe z mnożnikiem z przedziału ok 1,5÷2,5, z wyjątkiem prototypów wykonanych ze stali o obniżonej wytrzymałości S235, w przypadku których mnożnik wyniósł 1,05;

b) we wszystkich przypadkach forma zniszczenia modeli testowych była plastyczna, głównie w postaci deformacji części poprzeczników w rejonie gniazda, zapewniając tym samym właściwą ścieżkę destrukcji konstrukcji;

c) przeprowadzone badania gniazd wyraźnie predysponują połączenia typu zakładkowego do słupów przelotowych, natomiast połączenia typu doczołowego do słupów mocnych; poprzeczniki kratowe mogą być stosowane w przypadku obu typów słupów, a ich odmiana w postaci poprzeczników podwieszonych głównie tylko w przypadku słupów przelotowych;

d) zmniejszenie liczby podzespołów gniazd znacznie poprawiło technologiczne aspekty produkcyjne przy zachowaniu wymaganej nośności.

Fotografie: autorzy

*Received: 17.11.2025
Revised: 29.12.2025
Published: 20.02.2026*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 17.11.2025 r.
Otrzymał poprawiony po recenzjach: 29.12.2025 r.
Opublikowano: 20.02.2026 r.*

Literature

- [1] 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.
- [2] Quattordio G. Sostegni Tubolari di Acciaio. Pitagora Editrice, Bologna, 1997.
- [3] Mendera Z. Nośność cienkościennych stalowych słupów rurowych, Inżynieria i Budownictwo Nr 8–9/90, s. 287–289.
- [4] Labocha S, Paluszyński J. Słupy powłokowe. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
- [5] PN-EN 1993-1-5:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–5. Blachownice.
- [6] PN-EN 50341-1:2013 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1kV. Część 1. Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [7] Labocha S, Paluszyński J. Badania gniazd zakładkowych poprzeczników słupów powłokowych. Materiały Budowlane 2022; 8 (4): 84–87.
- [8] PN-EN 50341-2-22:2022. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2–22 Zbiór normatywnych warunków krajowych. Normatywne warunki krajowe Polski.
- [9] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [10] PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–8. Projektowanie węzłów.
- [11] PN-EN 1993-1-6:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–6. Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [12] 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
- [13] 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.
- [14] Reinke T, Knoedel P, Ummenhofer T. Steel poles with polygonal sections in bending. 7th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel 2014.
- [15] PN-EN IEC 60652:2022-04 Konstrukcje linii napowietrznych. Badania obciążeniowe.
- [16] PN-EN ISO 6892-1:2020-05 Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
- [17] PN-EN 10025-2:2019-11 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.
- [18] prEN 1993-1-14 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1–14: Design assisted by finite element analysis.
- [19] Doerich C, Rotter JM. Accurate determination of plastic collapse loads from finite element analysis. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 133, February 2011.