

ZAKŁAD KONSTRUKCJI METALOWYCH  
INSTYTUTU BUDOWNICTWA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

oraz

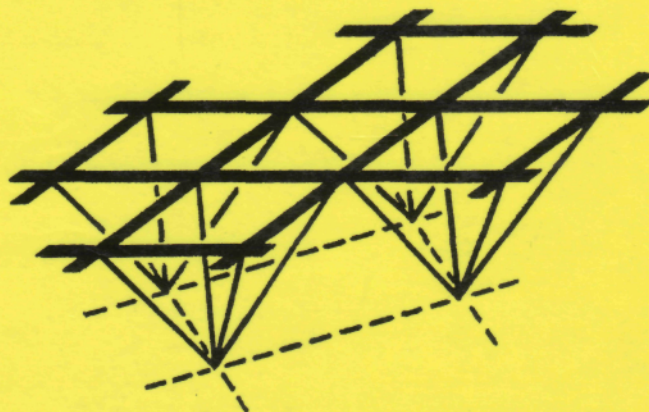
SEKCJA KONSTRUKCJI METALOWYCH  
KOMITETU INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

KONFERENCJA NAUKOWA

# BADANIA NOŚNOŚCI GRANICZNEJ KONSTRUKCJI METALOWYCH

połączona z obchodami 70-lecia

Prof. zw. dra hab. inż. **Zbigniewa KOWAŁA**



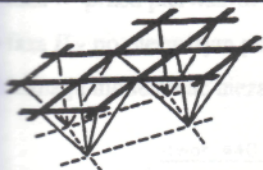
**MATERIAŁY KONFERENCYJNE**

POD REDAKCJĄ ANTONIEGO BIEGUSA

WROCŁAW - SZKLARSKA PORĘBA

23-25 października 1998 r.





KONFERENCJA NAUKOWA  
**BADANIA NOŚNOŚCI GRANICZNEJ  
KONSTRUKCJI METALOWYCH**  
WROCLAW - SZKLARSKA PORĘBA, 23 - 24 października 1998

Prof. zw. dr hab. inż. Jan KARCZEWSKI

Politechnika Warszawska

Dr inż. Eligiusz POSTEK

IPPT PAN

Mgr inż. Stanisław WIERZBICKI

Politechnika Warszawska

**MODELOWANIE ZACHOWANIA SIĘ NAKŁADKOWEGO,  
SPRĘŻONEGO POŁĄCZENIA ŚRUBOWEGO**

**1. Wprowadzenie**

Odształcalność stalowej konstrukcji nośnej budynków, wynikająca z odkształceń jej elementów i połączeń, w zasadniczej części przypadków, jest ograniczona czynnikami eksploatacyjnymi. W przypadku połączeń śrubowych występujące luzy między trzpieniami i otworami są przyczyną zwiększonej podatności konstrukcji. Wstępne sprężenie tego typu połączenia powoduje znaczną redukcję odkształcalności samego połączenia a co za tym idzie także konstrukcji. Zjawisko to wykorzystano w szeroko obecnie stosowanych połączeniach ciernych. Wadą tych połączeń jest przyjęcie założenia, w którym pojawienie się stanu granicznego nośności utożsamia się z pierwszym poślizgiem. W rzeczywistości sprężone połączenie śrubowe nadal jest zdolne do przyjęcia dodatkowego przyrostu obciążenia. Wyniki szeregu prac, głównie doświadczalnych [2], [3], potwierdzają to spostrzeżenie. Zgodnie z nimi, przy możliwości dalszego przyjmowania obciążenia, odkształcalność połączenia po pierwszym poślizgu była nadal znacznie mniejsza od odkształceń analogicznych połączeń śrubowych niesprężonych.

W pracy przedstawiono model nakładkowego połączenia śrubowego, wstępnie

sprężonego. Zastosowano w nim jedną śrubę (wstępne ujęcie). Miało to na celu uzyskanie dobrych warunków poznania zachowania się takich połączeń.

## 2. Ogólna koncepcja modelu

W modelu sprężonego połączenia śrubowego założono, że powinny w nim być uwzględnione wszystkie czynniki, mające znaczący wpływ na zachowanie się takiego połączenia. Można wyróżnić dwie grupy takich czynników:

1) *czynniki materiałowe, geometryczne, wytrzymałościowe i obliczeniowe, m.in.:* rodzaj stali, z której wykonane jest połączenie, rodzaj i klasa śrub sprężających, sztywności łączonych elementów, imperfekcje w kształcie powierzchni przylegania, rozkład naprężeń w połączeniu zarówno od samego sprężenia jak i w fazie późniejszej, od obciążeń głównych, tarcie statyczne, tarcie kinematyczne, docisk trzpieni śrub do ścianek otworów oraz związane z tym powstawanie i rozwój stref plastycznych w strefie docisku, odkształcenia powierzchni przylegania, zjawiska reologiczne (głównie spadek siły sprężającej w śrubie).

2) *czynniki związane z wykonaniem połączeń i ich obciążeniem m.in.:* rodzaj powierzchni przylegania (sposób ich przygotowania), rodzaj i kształt połączenia, ilość śrub w połączeniu i ich rozmieszczenie, luzu w otworach, wielkość siły sprężającej oraz sposób sprężania, sposób obciążania połączenia.

Ze wzg. na silne zróżnicowanie tych czynników, niektóre z nich, mniej aktywne pominięto przyjmując jednocześnie następujące założenia upraszczające:

- gatunek stali, ma wpływ jedynie na nośność graniczną połączenia,
- wartość siły sprężającej, ma znaczący wpływ na zachowanie się sprężonego połączenia śrubowego.
- praktycznie występujące imperfekcje kształtu powierzchni przylegania nie wpływają na zachowanie się połączenia,
- powierzchnie przylegania są w stanie naturalnym, nie są specjalnie przygotowane,
- wielkość luzu w otworach nie wpływa znacząco na zachowanie się połączenia,
- tarcie kinematyczne ma znaczący wpływ na zachowanie się połączenia,
- w analizie nie uwzględnia się zjawisk reologicznych.

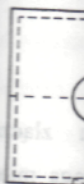
Kształt analizowanego połączenia przedstawiono na rys. 1.

Zachowanie się sprężonego połączenia śrubowego można podzielić na dwie zasadniczo różniące się fazy:

- faza I -

- faza II -

Można je



60



Związek por

gdzie:  $u$  - od

W fazie I za

gdzie:  $\lambda, \mu$  - st

Bardziej s

a odkształcen

obciążeniom z

powierzchniac

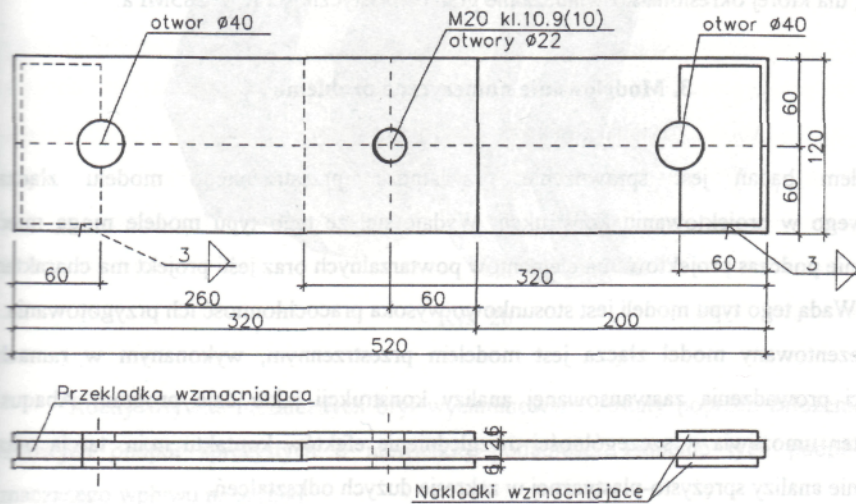
opisanie zacho

numerycznych.



- faza I - przed pierwszym poślizgiem łączonych elementów
- faza II - po pierwszym poślizgu obejmująca fazę sprężystą i sprężysto-plastyczną.

Można je modelować niezależnie.



Rys.1

Związek pomiędzy obciążeniem i odkształceniem można zapisać w postaci funkcji:

$$u = f(P) \quad (1)$$

gdzie:  $u$  - odkształcenie elementu,  $P$  - siła obciążająca

W fazie I zależność tą można przedstawić w postaci prawa HOOKE'A:

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \epsilon \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot \epsilon_{ij} \quad (2)$$

gdzie:  $\lambda, \mu$  - stałe sprężystości Lamego.

Bardziej skomplikowane zależności pomiędzy siłą a przemieszczeniem oraz naprężeniami a odkształceniami występują w fazie II, w części sprężysto-plastycznej. Opór przeciw obciążeniu zewnętrznym jest tu wypadkową dwu składników: tarcia kinematycznego na powierzchniach przylegania i docisku trzpieni śrub do ścianek otworów. Matematyczne opisanie zachodzących w tej fazie zjawisk jest bardzo trudne. W tej sytuacji sięgnięto do metod numerycznych.



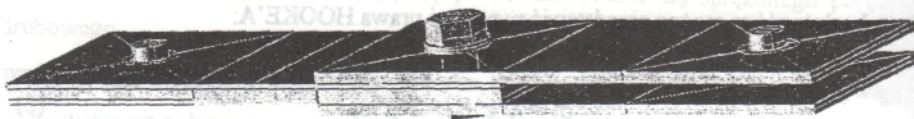
Analizie numerycznej poddano połączenie przedstawione na rys.1, w którym element środkowy wykonano z blachy o grubości 12mm, nakładki zaś z blachy o grubości 6mm. Jako łącznik zastosowano śrubę kl. 10.9(10). Jako materiał elementów połączenia przyjęto stal z grupy St3, dla której określona doświadczalnie granica plastyczności  $R_e = 285\text{MPa}$ .

### 3. Modelowanie numeryczne problemu

Celem badań jest sprawdzenie przydatności przestrzennego modelu złącza nakładkowego w projektowaniu konstrukcji. Wydaje się, że tego typu modele mogą mieć zastosowanie podczas projektowania elementów powtarzalnych oraz jeśli projekt ma charakter studialny. Wadą tego typu modeli jest stosunkowo wysoka pracochłonność ich przygotowania.

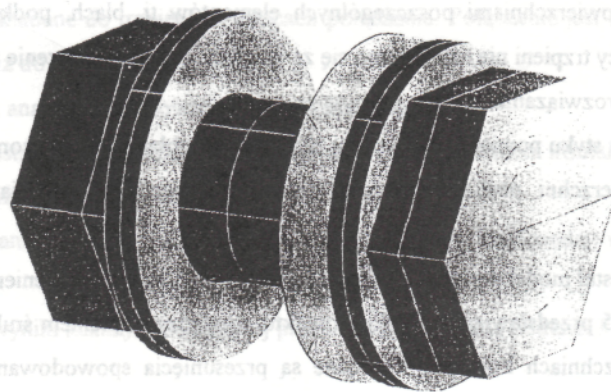
Prezentowany model złącza jest modelem przestrzennym, wykonanym w ramach możliwości prowadzenia zaawansowanej analizy konstrukcji jakie daje program Abaqus. Program ten umożliwia w szczególności uwzględnienie efektów kontaktu m.in. tarcia oraz prowadzenie analizy sprężysto-plastycznej w zakresie dużych odkształceń.

Prezentowany model składa się z niezależnych części, a mianowicie nakładek, blachy środkowej, śruby, podkładek i trzpieni służących do przekazania obciążenia zewnętrznego. Założono istnienie niewielkich luzów pomiędzy elementami. Geometria połączenia przygotowana została przy użyciu preprocesora programu Abaqus Abapre opartego na systemie generacji geometrii PATRAN. Widok ogólny modelu geometrycznego konstrukcji został przedstawiony na rys. 2a. Rysunek 2b, zaś, przedstawia model geometryczny śruby.



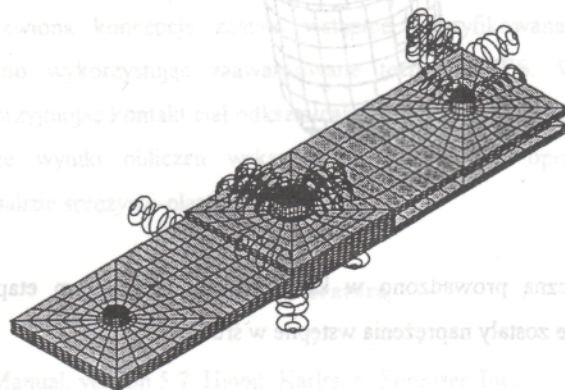
Rys. 2a

Model matematyczny konstrukcji w konwencji metody elementów skończonych został przedstawiony na rys. 3a i 3b. Wszystkie części modelu zostały zdyskretyzowane ośmiowęzłowymi trójwymiarowymi elementami izoparametrycznymi. Model składa się z około 8000 elementów skończonych oraz liczy około 30000 stopni swobody. Konstrukcja zdyskretyzowana metodą elementów skończonych została przedstawiona na rys. 3a, 3b.

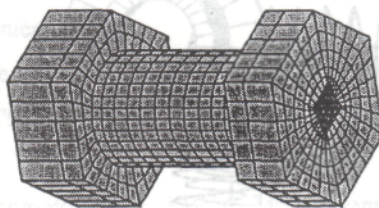


Rys. 2b

Ruchy sztywne niezależnych brył wyeliminowane zostały poprzez założenie istnienia liniowych podpór sprężystych o niewielkiej podatności. Istnienie tych podpór nie ma znaczącego wpływu na wyniki.



Rys. 3a



Rys. 3b

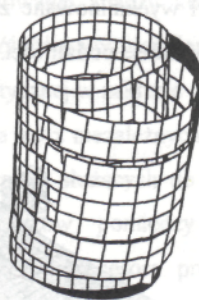


Efekty kontaktu i tarcia uwzględnione są poprzez założenie możliwości zaistnienia kontaktu między powierzchniami poszczególnych elementów tj. blach, podkładek i śruby. Kontaktem w okolicy trzpieni nie zajmowano się ze względu na małe znaczenie tego problemu dla spodziewanego rozwiązania.

W obszarach styku powierzchni bocznej śruby i blach połączenia założone zostały małe poślizgi. Dla powierzchni poślizgu blach założono możliwość wystąpienia skończonych poślizgów.

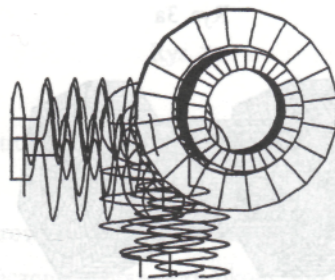
Założony został model materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem.

Rysunki 4 i 5 przedstawiają zjawisko kontaktu pomiędzy trzpieniem śruby a ściankami otworu. na powierzchniach kontaktu widoczne są przesunięcia spowodowane wzajemnym przesunięciem blach. (Rys. 4).



Rys. 4

Analizę numeryczną prowadzono w kilku etapach. Pierwszym etapem była analiza sprężenia. Wprowadzone zostały naprężenia wstępne w śrubie.



Rys. 5

Drugą fazą jest wprowadzenie obciążenia kinematycznego (wymuszonego przemieszczenia), które jest przykładane do trzpieni na końcach połączenia. Połączenie jest obciążane w sposób przystosowy, aż do jego zniszczenia.

Wyniki analizy prezentowane będą w kilku etapach:

- etap I - przedstawiona zostanie analiza sprężysta z uwzględnieniem kontaktu i tarcia,
- etap II - analiza sprężysto-plastyczna
- etap III - analiza sprężysto-plastyczna przy założeniu możliwości wystąpienia dużych odkształceń.

Pełne wyniki analizy numerycznej przedstawione zostaną podczas konferencji.

#### 4. Uwagi końcowe

Przedstawiona koncepcja modelu zawiera wszystkie najistotniejsze czynniki mające wpływ na zachowanie się nakładkowego sprężonego połączenia śrubowego. Przeprowadzone dotychczas prace wskazują na możliwość numerycznego opracowania problemu przy wykorzystaniu programu Abaqus.

Przedstawiona koncepcja została wstępnie zweryfikowana obliczeniowo. Model zdyskretyzowano wykorzystując zaawansowane techniki MES. Wykorzystano elementy przestrzenne, przyjmując kontakt ciał odkształcalnych pomiędzy powierzchniami przylegania.

Wstępne wyniki obliczeń wskazują na przydatność opracowanego modelu w zamierzonej analizie sprężysto-plastycznej.

#### Literatura

- [1] Abaqus Manual, version 5.7. Hibbit, Karlsson, Sorensen Inc.
- [2] Karczewski J.A., Wierzbicki S., Odształcalność wybranego typu sprężonych połączeń śrubowych pod obciążeniem zmiennym, Proc. XLI Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB, 4, 1995, Krynica, 22-28,
- [3] Hou Z., He X.: The deformation criteria of high-strength bolt connections subjected to shearing load, PSSC'95, 4th Pacific Structural Steel Conference, s.137-142, Singapore 1995,
- [4] Raport z grantu promotorskiego KBN, „Modelowanie nakładkowych, sprężonych śrubowych z uwzględnieniem fazy sprężysto-plastycznej.



# MODELLING OF THE PRESTRESSED DOUBLE PLATED BOLTED CONNECTION

## Summary


Deformability of the building structure being result of its elements and connection deformation in majority of cases is limited by needs of exploitation. Deformability of the bolted connections increase because there exists the gaps among bolts and walls of the holes. If one prestressed such connections their deformability can be reduced significantly. This phenomena is confirmed by results of experiments [2], [3]. Discussed connections are able to take additional increment of loading even after first slight.

The paper dill with presentation of the mathematical and numerical model above mentioned connection. It can be used for analytical approximation of the results obtain in further experiments. It can allows to built formulas well fitted to the needs of practical design such a connections.

Wstępny wynik obliczeń wskazuje na przydatność opracowanego modelu w komputerowej analizie sprężyno-plastycznej.

Wprowadzenie: Wpływ na zachowanie się konstrukcyjnego połączenia śrubowego...

[1] Abaqus Manual, version 5.7, Hibbit, Karlsson, Sorensen Inc.  
 [2] Karcewski J.A., Wierzbicki S., Odstępczość wytrzymałościowa przy sprężonych połączeniach śrubowych pod obciążeniem zginającym, Proc. XII Conf. Nauk. KILiW PAN i KILiW PZITB, 4, 1992, Krynica, 23-24.  
 [3] Hou Z., He X., The deformation capacity of bolted connections subjected to shearing load, PSC'95, 4th Pacific Structural Steel Conference, 2:137-142, Singapore, 1995.  
 [4] Raport z grantu promocyjnego KBN, Modelowanie naskładkowych, sprężonych śrubowych z uwzględnieniem fazy sprężyno-plastycznej.

  
 Prof. zw.  
 Dr inż. M.  
 Politec  
 WPLY  
 między in  
 ścisłanych  
 osiowych  
 metodę R  
 W pracy [   
 wykorzys  
 prętów ci  
 znaczenie  
 właściwoś  
 gętną noś  
 których na  
 C  
 skrajnej n