

## Numeryczne i eksperymentalne badanie wytrzymałości ochroniacza pępowiny

Ewelina Ciba, Julita Dopke

Katedra Projektowania Okrętów i Robotyki Podwodnej, Politechnika Gdańska  
email: eweciba1@pg.gda.pl, juldopke@pg.gda.pl

**STRESZCZENIE:** Praca podejmuje problem modelowania numerycznego konstrukcji ochroniacza pępowiny. Porównując wyniki symulacji z badaniami doświadczalnymi przeprowadzono walidację pierwotnie zastosowanego modelu numerycznego oceniając wpływ sztywności kontaktu na końcowe rezultaty. Dokonano oceny wytrzymałości analizowanej konstrukcji i bezpieczeństwa jej eksploatacji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** ochroniacz pępowiny, ROV, modelowanie numeryczne, sztywność kontaktu w MES

### 1. Przedmiot i zakres pracy

Przedmiotem opracowania jest badanie wytrzymałości ochroniacza pępowiny w stanie roboczym (rozłożonym), w sytuacji obciążenia wynikającego z warunków jego pracy. Ochroniacz to stalowo-laminatowa konstrukcja służąca do osłony kabla zasilającego pojazdu typu ROV, w skład której wchodzi m. in. zespół elementów nazwany teleskopem. Przeprowadzono analizę numeryczną w celu oceny wytrzymałości teleskopu oraz zbadano go eksperymentalnie. Z użyciem metody elementów skończonych dokonano analizy statycznej, przygotowano model nieliniowy uwzględniający kontakty, a laminat zamodelowano jako ortotropową konstrukcję warstwową.

### 2. Model numeryczny

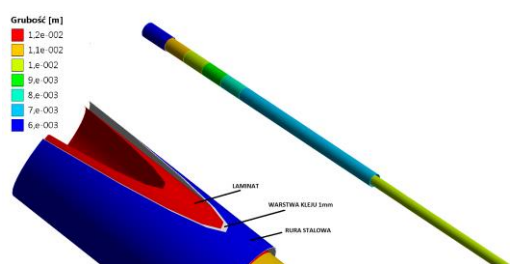
Konstrukcja modelowana – teleskop składa się z połączonych ze sobą dwóch rur laminatowych, o średnicach wewnętrznych  $\phi 200$  mm i  $\phi 144$  mm, wklejonych w rurę stalową. Zarówno rury z kompozytu, jak i stalową zamodelowano elementami typu SHELL. Klej odwzorowano jedną warstwą 20-sto węzłowych elementów 3D, ponieważ w całej rozpiętości kleju (z wyjątkiem tych zupełnie skrajnych) spodziewano się jednakowego po grubości rozkładu odkształceń i naprężeń. Materiały użyte do budowy obiektu to laminat węglowo-epoksydowy oraz stal nierdzewna 316L, a także klej 3M Resin 2131. Przyjęto liniowe modele materiałowe.

Tabela 1. Stałe materiałowe

| Materiał  | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $E$ [GPa] | $\nu$ [-] |
|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|
| stal 316L | 8000                        | 200       | 0.3       |
| 3M 2131   | 1217                        | 3.2e-3    | 0.4       |

|         | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $E_x$ [GPa] | $E_y$ [GPa] | $\nu_{xy}$ [-] | $G_{xy}$ [GPa] |
|---------|-----------------------------|-------------|-------------|----------------|----------------|
| laminat | 1580                        | 131         | 8.96        | 0.304          | 8.07           |



Rys. 1. Model obliczeniowy konstrukcji

Pojedyncza warstwa laminatu ma grubość 0,2 mm, 70% warstw posiada włókna ułożone naprzemiennie pod kątem  $12^\circ/-12^\circ$ , pozostałe 30% pod kątem  $90^\circ$ . Liczba warstw zależna jest od grubości rur, która zmienia się zgodnie z rys. 1.

Celem wykonania właściwej analizy należało określić jakim obciążeniem pochodzącym od wody poddany jest teleskop. Obliczenia sił hydrodynamicznych wykonano w osobnej analizie CFD w przypadku złożenia ruchu postępowego okrętu, na którym mocuje się obiekt, z prędkością 2 m/s i kołysań o okresie  $T=5,7$  s. Wyniki symulacji zebrano w tab. 2. Siły i momenty to wypadkowe ciśnienia działającego na teleskop, są więc przyłożone do całych powierzchni rur.

Tabela 2. Obciążenia konstrukcji

| Rura          | $F_x$ [N]  | $F_y$ [N]  | $F_z$ [N]  |
|---------------|------------|------------|------------|
| $\phi 200$ mm | 1598       | -1491      | 2          |
| $\phi 144$ mm | 1880       | -1257      | -10        |
|               | $M_x$ [Nm] | $M_y$ [Nm] | $M_z$ [Nm] |
| $\phi 200$ mm | -3838      | -4033      | 11         |
| $\phi 144$ mm | -9210      | -14424     | 5          |

Ponadto, konstrukcja na wolnym końcu obciążona jest siłą o wartości  $F_{sk} = 2500$  N wywołaną naciąganiem kabla.

W rzeczywistej konstrukcji rury połączone są w sposób umożliwiający złożenie ich jedna w drugą. Wykorzystano do tego stalowe tuleje, zapobiegające możliwości wysunięcia się mniejszej rury, jednak umożliwiające niewielkie ruchy na boki (luzy wynikające z przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego). Na potrzeby analizy połączenie to zamodelowano za pomocą kontaktu, sklejono ze sobą obie rury na odcinku o długości w przybliżeniu odpowiadającym wymiarowi podłużnemu tulei.

### 3. Badania eksperymentalne

Badania doświadczalne przeprowadzono na konstrukcji rzeczywistej wykonanej w jej naturalnej skali. Sposób obciążania polegał na dociążaniu jej wolnego końca siłami w dwóch kierunkach - pionowo w dół i w bok. Wartości sił obciążających wyznaczono numerycznie na modelu analogicznym do opisanego wyżej, zastępując siły hydrostatyczne siłami umieszczonymi na końcu rury o mniejszej średnicy (wartości sił - tab. 3), tak aby sposób i wielkość wyężenia konstrukcji były jednakowe z otrzymanymi w wyniku obciążania konstrukcji siłami hydrostatycznymi.

Tabela 3. Wyliczone wartości obciążenia konstrukcji do badań eksperymentalnych

|                  | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] |
|------------------|-----------|-----------|
| siła od pępowiny | 2500      | -         |
| siły dodatkowe   | 3900      | -1900     |



Rys. 2. Badania eksperymentalne, po lewej: konstrukcja w położeniu wyjściowym z oznaczonymi punktami pomiarowymi, po prawej: sposób podparcia konstrukcji

Pomiarów przemieszczenia konstrukcji (w obu kierunkach) dokonano w każdym z dwóch punktów, w miejscu za połączeniem rur laminatowych – punkt P2 oraz na końcu – punkt P1 (rys. 2). Próbę powtórzono pięciokrotnie, wyniki końcowe ustalono jako wartość średnią.

#### 4. Porównanie i analiza wyników

Analizując otrzymane rezultaty (tab. 4) stwierdzono, że przemieszczenia otrzymane na drodze obliczeń numerycznych są niższe w porównaniu z tymi z pomiarów doświadczalnych. W przypadku punktu P1 różnice są znaczne, zwłaszcza na kierunku X. Patrząc na rzeczywisty sposób odkształcenia teleskopu widać, że bardzo odchyła się rura o mniejszej średnicy, za punktem P2 występuje punkt przegięcia odkształcenia. Natomiast w wyniku analizy numerycznej otrzymano gładko odchylającą się konstrukcję na całej długości.

Tabela 4. Porównanie wyników przemieszczeń w punktach kontrolnych z analizy numerycznej i badań doświadczalnych

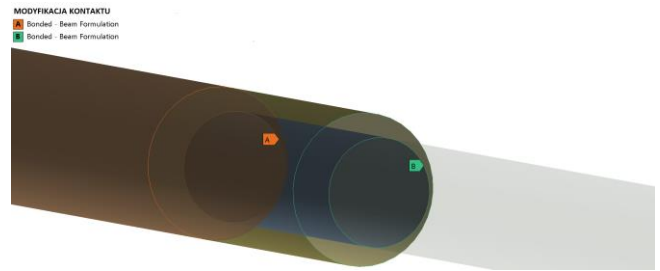
| Przemieszczenia [mm] na kierunku X/Y | Analiza numeryczna | Badania doświadczalne |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| w punkcie P1                         | 661 / -281         | 914 / -328            |
| w punkcie P2                         | 196 / -85          | 281 / -132            |

W związku z powyższym wywnioskowano, że zastosowany w obliczeniach kontakt pomiędzy rurami ma zbyt dużą sztywność w porównaniu z zachowaniem się rzeczywistej konstrukcji w tym miejscu. Należało dokonać zmian parametrów modelu obliczeniowego.

#### 5. Walidacja modelu numerycznego i wnioski

Analiza otrzymanych rezultatów wykazała, że model MES jest niepoprawny. Na skutek tego zastosowany

wcześniej kontakt zastąpiono nowym, powodującym „zszycie” wybranych węzłów z wykorzystaniem liniowych, bezmasowych elementów belkowych o odpowiedniej sztywności (rys. 3). Zmiana ta miała odzwierciedlenie w wartościach przemieszczeń (tab. 5)



Rys. 3. Połączenie rur teleskopu elementami belkowymi

Tabela 5. Rezultaty po zmianie modelu numerycznego

|              | Przemieszczenia [mm] na kierunku X/Y | Wartości [mm] do porównania |
|--------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| w punkcie P1 | 941 / -394                           | (914/-328)                  |
| w punkcie P2 | 207 / -90                            | (281/-132)                  |

Pomimo nadal występujących różnic w porównywanych wielkościach, poprawiony model numeryczny uznano za dobrze opisujący badane zjawisko. Biorąc pod uwagę znaczne gabaryty konstrukcji (rozpiętość wzdłużna teleskopu ponad 9 m) oraz nie w pełni sztywną podporę zastosowaną w doświadczeniu, a także dokładność wykonania rur z kompozytu otrzymane wyniki są zgodne i miarodajne. Wobec powyższego zasadne jest wykorzystanie modelu do dalszej analizy rozpatrywanej konstrukcji.

#### 6. Podsumowanie

Poprawność modelu pozwoliła określić wielkość naprężeń powstających w konstrukcji. Badania laboratoryjne pokazały, że konstrukcja wytrzyma zadane obciążenie, jednak brak próby niszczącej uniemożliwił ocenę zapasu bezpieczeństwa. Prawidłowy model MES dał możliwość wyznaczenia współczynnika bezpieczeństwa (tab. 6). Eksploatacja konstrukcji jest w pełni bezpieczna.

Tabela 6. Maksymalne, lokalne naprężenia powstające w konstrukcji; zapas bezpieczeństwa

| Naprężenie [MPa]           | Wartości referencyjne [MPa] | Wsp. bezp. |     |
|----------------------------|-----------------------------|------------|-----|
| na kierunku X (warstwa 50) | -370                        | 2034/-1241 | 3.3 |
| na kierunku Y (warstwa 49) | 45                          | 60/-195    | 1.3 |

#### Literatura

- [1] Kurnik W., Tylikowski A., *Mechanika elementów laminowanych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [2] Godzimirski J., *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Fundacja "Książka Naukowo-Techniczna", Warszawa 2002.
- [3] Dokumentacja programu ANSYS.