

## ANALIZA NUMERYCZNA NOŚNOŚCI STOŻKOWYCH POŁĄCZEŃ WTLACZANYCH

Jolanta ZIMMERMAN\*, Lucjan ŚNIEZEK\*\*

\*Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Mechaniki i Poligrafii, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

\*\*Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Budowy Maszyn, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

[jolz@wip.pw.edu.pl](mailto:jolz@wip.pw.edu.pl), [lsniezek@wat.edu.pl](mailto:lsniezek@wat.edu.pl)

**Streszczenie:** Praca dotyczy badań nośności stożkowego połączenia wtlaczanego obciążonego momentem skręcającym za pomocą metody elementów skończonych. Zagadnienie zostało rozwiązane jako przestrzenne, nieliniowe, z uwzględnieniem kontaktu elementów połączenia. Wyniki obliczeń pozwoliły ustalić zależność granicznej wartości momentu skręcającego od osiowej siły wcisku użytej do realizacji połączenia.

### 1. WSTĘP

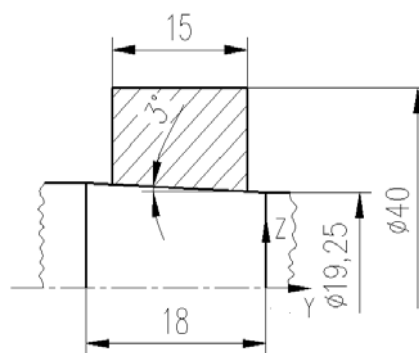
Głównymi przyczynami zniszczenia połączenia wciskowego są mikropoślizgi występujące na powierzchni współpracujących czopa wałka i tulei oraz korozja cierna, których zakres powiązany jest z panującym w połączeniu stanem odkształceń i naprężeń (Grudziński i Gąska, 1995; Guzowski, 2003). Badania poświęcone analizie powyższych zjawisk na różnych etapach realizacji połączenia i ich wpływ na nośność skojarzenia są prowadzone od kilkadziesiąt lat w wielu ośrodkach badawczych. Obserwowany w ostatnich latach rozwój i doskonalenie istniejących systemów obliczeniowych wykorzystujących metodę elementów skończonych umożliwia coraz dokładniejszą analizę zagadnień związanych z ustaleniem stanu odkształceń i naprężeń w coraz bardziej złożonych konstrukcjach (Kimm i Lee, 2006). Pozwala to na modelowanie i bardziej zaawansowane badanie zjawisk towarzyszących realizacji i użytkowania stożkowych połączeń wtlaczanych.

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie analizy stanu odkształcenia i naprężenia oraz mikropoślizgów w stożkowym połączeniu wtlaczanym z uwzględnieniem uplastycznienia tulei i tarcia na powierzchni kontaktu w warunkach obciążenia momentem skręcającym.

Tak sformułowany cel pracy wymagał przeprowadzenia obliczeń odkształceń i naprężeń w czopie i tulei podczas procesu realizacji połączenia i po realizacji wcisku, określenia rozkładów odkształceń i naprężeń w elementach połączenia po przyłożeniu liniowo narastającego momentu skręcającego, aż do utraty nośności połączenia, ustalenia przemieszczenia względnego wałka i tulei w funkcji narastającego momentu skręcającego oraz określenia zależności nośności połączenia od siły wcisku.

### 2. GEOMETRIA POŁĄCZENIA. MODEL OBLICZENIOWY

Analizę numeryczną poprzedzono badaniami doświadczalnymi skojarzenia o geometrii przedstawionej na rysunku 1.

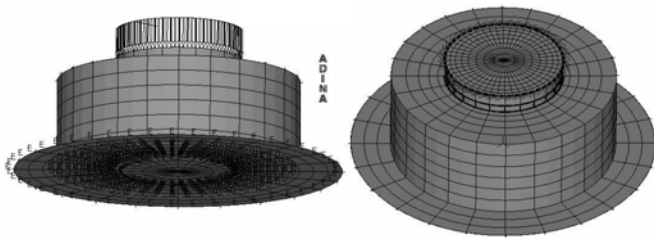


Rys. 1. Geometria połączenia wciskanego przyjęta do analizy

W pierwszym etapie badań doświadczalnych zrealizowano połączenie, a po pierwszym wcisku połączenie zdemontowano i wykonano powtórnie. Podczas realizacji połączenia, na maszynie wytrzymałościowej mierzono siłę wcisku w funkcji osiowego przemieszczenia, co umożliwiło określenie współczynnika tarcia na powierzchni kontaktu. W tym celu wykonano wielokrotne obliczenia wykorzystując metodę elementów skończonych, przy założonych, różnych współczynnikach tarcia, aż uzyskano zbieżność wykresów siły wcisku w funkcji przemieszczenia osiowego otrzymanych podczas eksperymentu i obliczeń. Na tej podstawie ustalono wartość współczynnika tarcia  $\mu=0,18$ . Połączenie zamodelowano przy użyciu programu ADINA 8.5.1 jako zagadnienie przestrzenne. Siatka elementów modelu tulei i wałka składa się z 1488 elementów prostopadłościennych (3D), 27-mio węzłowych oraz ze 168 elementów powłokowych 9-cio węzłowych (miejsce przyłożenia obciążenia i podparcia). Siatka MES została rozpięta na 13697 węzłach. W ten sposób uzyskano równomierny, zagęszczony podział na elementy na powierzchni kontaktu czopa wałka i tulei.

Uniemożliwiono przesunięcie dolnej, czołowej powierzchni tulei w kierunku osiowym (warunek B) oraz podparto tuleję na powłoce, dla której zablokowano przemieszczenia na jej zewnętrznej krawędzi kierunku x i y (warunek E). Wałek jest w kontakcie z tuleją. Na rysunku 2

pokazano sposób podparcia modelu oraz jego obciążenie w kolejnych etapach na tle siatki MES.



Rys. 2. Siatka MES oraz sposób podparcia i obciążenia modelu

Obciążenie tak zamodelowanych połączeń realizowano w trzech etapach:

- liniowo narastająca siła przyłożona do czołowej powierzchni umożliwiaiąca uzyskanie założonego wcisku,
- odciążenie połączenia;
- przyłożenie liniowo narastającego momentu skręcającego aż do utraty nośności połączenia.

Moment skręcający realizowano poprzez przyłożenie węzłowych sił stycznych do okręgu konturowego czołowej, górnej powierzchni wałka o promieniu  $r=10,474$ [mm].

Podczas analizy nośności badanych połączeń włączanych założono obecność odkształceń sprężysto-plastycznych, dlatego do obliczeń przyjęto model materiału „plastic multilinear”. Został on opracowany na podstawie wyników statycznej próby rozciągania próbek z normalizowanej stali 45.

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia przeprowadzono dla sił wcisku zamieszczonych w tabelicy 1, dla których przyporządkowano odpowiednie osiowe przemieszczenia wałka w tulei „z”.

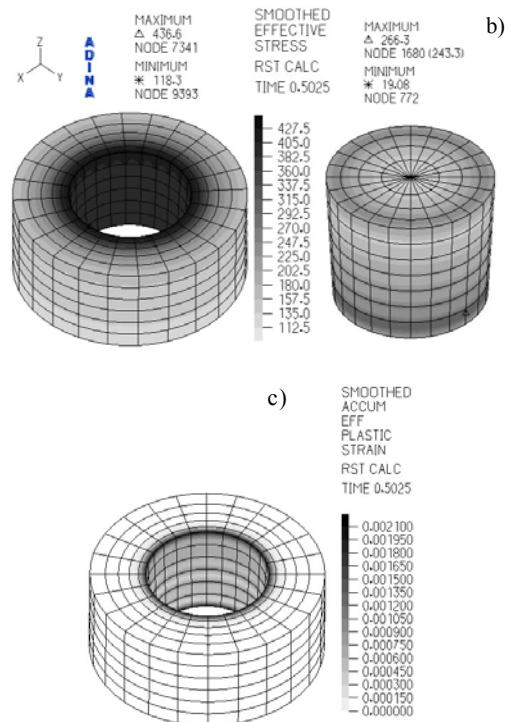
Tab. 1. Wartości sił wcisku F i odpowiadające im przemieszczenia osiowe wałka „z”

Sila wcisku F[kN]	Przemieszczenie osiowe z[mm]
15,2	0,20
19,4	0,25
23,1	0,30
26,8	0,35
30,5	0,40
34,2	0,45
37,9	0,50
40,8	0,55
44,1	0,60

Podczas symulacji realizacji połączenia włączanego z rosnącą liniowo siłą wcisku określono graniczną wartość siły włączającej, po przekroczeniu której w tulei zaczynają występować odkształcenia plastyczne. Wartość ta wynosi 23,1kN. Na rysunku 3 zaprezentowano wybrane wyniki obliczeń odpowiednio: naprężeń zredukowanych w tulei (a) i w wałku (b), odkształceń plastycznych w tulei (c), odpowiadające sile wcisku  $F=44,1$ kN.

Maksymalne naprężenia zredukowane w tulei wyliczone według hipotezy Huber-Mizes-Henky są zlokalizowane

w obszarze wejścia w kontakt z czopem i wynoszą 440MPa. Naprężenia zredukowane w wałku nie przekraczają w tym przypadku 266MPa. Dla rozpatrywanej wartości siły obserwujemy plastyczne odkształcenie tulei obejmujące około 30% grubości tulei.



Rys. 3. Naprężenia zredukowane w tulei (a) i w wałku (b) i odkształcenia plastyczne w tulei (c) przy sile wcisku  $F=44,1$ kN

Po odjęciu siły wciskającej wartość maksymalnych naprężeń własnych w łączonych elementach wynosi odpowiednio 407MPa w tulei i 400MPa w wałku.

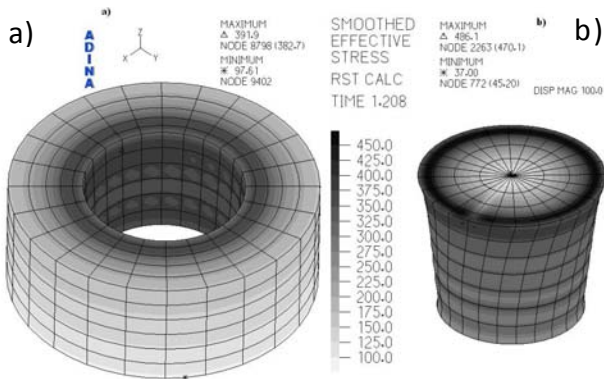
Na rysunku 4 przedstawiono pasma naprężeń zredukowanych w tulei (rysunek 4a) i w wałku na tle zdeformowanej siatki MES wałka przy powiększeniu 100x (rysunek 4b) po obciążeniu połączenia momentem skręcającym równym 392 N·m. Wyznaczone za pomocą programu ADINA wartości sił kontaktowych pozwalają na obliczenie z zależności (1) maksymalnego momentu tarcia na powierzchni współpracujących elementów połączenia wciskowego.

$$M_T = \mu \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{(F_{x_i}^2 + F_{y_i}^2 + F_{z_i}^2)} \cdot \sqrt{(x_i^2 + y_i^2)} \quad (1)$$

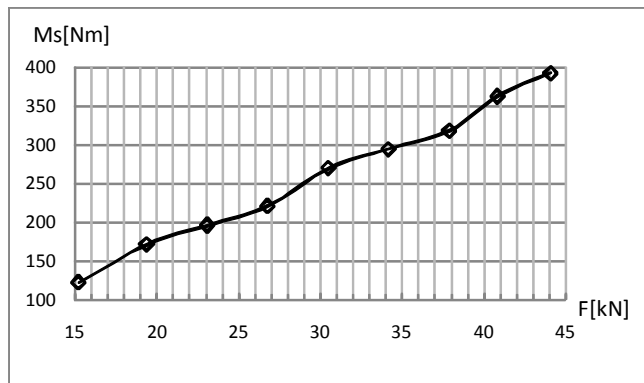
gdzie:  $i$  – numer węzła na powierzchni tulei będącej w kontakcie z powierzchnią wałka,  $F_{x_i}, F_{y_i}, F_{z_i}$  – składowe sił kontaktowych w  $i$ -tym węźle,  $x_i, y_i$  – składowe aktualnych współrzędnych węzłów po przemieszczeniu.

Wyliczona na podstawie (1) wartość momentu tarcia wynosi  $M_T=409,1$ N·m. Moment skręcający  $M_s$  jakim obciążono wałek podczas obliczeń numerycznych, odpowiadający utracie nośności analizowanego połączenia wynosił 392,08N·m. Zatem wartości  $M_T$  i  $M_s$  różnią się o 4%. Na rysunku 5 przedstawiono uzyskaną z obliczeń numerycznych zależność przenoszonego momentu skręcającego

od osiowej siły wcisku użytej do realizacji połączenia. Widoczny jest wzrost przenoszonego momentu skręcającego przez rozpatrywane połączenie właczane wraz ze zwiększaniem osiowej siły wciskającej.



Rys. 4. Naprężenia zredukowane w tulei (a) i w wałku (b) podczas obciążenia połączenia momentem skręcającym  $M_s=392\text{N}\cdot\text{m}$



Rys. 5. Zależność przenoszonego momentu skręcającego od siły wcisku

W dalszych pracach zaplanowano eksperymentalne określenie nośności połączenia. W oparciu o wyniki symulacji numerycznej i badań doświadczalnych nośności połączenia, możliwa będzie weryfikacja wartości przyjętego w obliczeniach współczynnika tarcia przy skręcaniu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonej analizy numerycznej stożkowych połączeń właczanych o założonej geometrii wykazały wzrost nośności badanych połączeń obciążonych momentem skręcającym wraz ze wzrostem siły wcisku. W badaniach uwzględniono obecność odkształceń sprężysto-plastycznych występujących w tulei po przekroczeniu granicznej siły wcisku  $F=21,3\text{kN}$ . Analizę nośności połączenia prowadzono w warunkach uplastycznienia tulei sięgającego 30% jej grubości. Wykorzystując program ADINA 8.5.1 obliczono przemieszczenia obwodowe węzłów sąsiadujących, należących do tulei i wałka co pozwoliło na oszacowanie wielkości mikroślizgów. Wyniki badań umożliwiły ustalenie zależności między przenoszonym momentem skręcającym a siłą osiową użytą do realizacji połączenia.

#### LITERATURA

1. **Grudziński K., Gaska A.** (1995), Obliczanie nośności płaskiego połączenia wciskowego przy uwzględnieniu poślizgów lokalnych, *XVII Sympozjum PKM*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin-Nałęczów, 301-306.
2. **Guzowski S.** (2003), *Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych*, Seria: Mechanika, Monografia 284, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
3. **Kimm S. S., Lee D. G.** (2006), *Design of the hybrid composite journal bearing assembled by interference fit*, Elsevier, Composite Structures, 222-230.

#### NUMERICAL ANALYSIS OF LOAD-CARRYING CAPABILITY OF CONICAL FORCED-IN JOINTS

**Abstract:** The paper concerns the investigation of the conical interference fit joint load capacity subjected to torsion using FEM. The problem has been solved as a three dimensional, nonlinear with contact between joined elements. Using the calculated results, the dependence between the limiting twisting moment and axial interference force, which was used to carry out the connection, was established.