

## Modelowanie nacisku na powierzchni styku wargowego pierścienia uszczelniającego z wałem

### Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono metodykę wyznaczenia nacisku na powierzchni styku wargowego pierścienia uszczelniającego z wałem za pomocą metody elementów skończonych. Omówiono budowę modelu MES węzła uszczelniającego. Przedstawiono przykładowe wyniki analizy z uwzględnieniem stanu naprężenia spowodowanego montażem pierścienia uszczelniającego na wale, ciśnienia oleju oraz statusu elementów kontaktowych.

### Summary

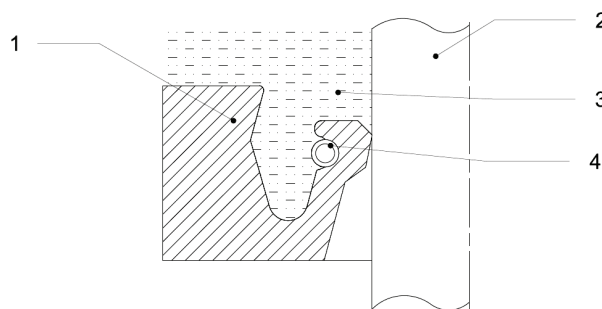
Methodology for determination of pressure on the contact surface of sealing ring with shaft using the Finite Elements Method (FEM) is presented. FEM model of the sealing node is discussed. Some results of analysis, including stress caused by installation of sealing ring on the shaft, oil pressure and status of contact elements, are given.

## 1. Wprowadzenie

Z obserwacji eksploatacyjnych współpracy pierścieni uszczelniających z wałem wynika, że czas pracy węzła uszczelniającego pomiędzy kolejnymi wymianami pierścienia jest krótszy, niekiedy znacznie krótszy od czasu prognozowanego [2]. Na obserwowane zjawisko mają wpływ parametry pary tribologicznej, takie jak: ciśnienie oleju, prędkość wału, nacisk pierścienia uszczelniającego, właściwości zastosowanego elastomeru i warstwy wierzchniej wału. Jednym spośród czynników wpływających istotnie na trwałość węzła uszczelniającego jest wartość nacisku jednostkowego pierścienia uszczelniającego na wał. Zależy ona nie tylko od cech geometrycznych pierścienia uszczelniającego, ale również od właściwości sprężystych elementów węzła uszczelniającego i ciśnienia oleju w przestrzeni roboczej, ograniczonej przez węzeł uszczelniający [4]. Nacisk na styku pierścienia uszczelniającego i wału, oprócz zapewnienia szczelności węzła uszczelniającego ma również wpływ na trwałość warstwy wierzchniej wału, szczególnie w przypadku, gdy została ona poddana regeneracji [1]. Wyznaczenie nacisku jednostkowego jest więc niezbędne do analizy trwałości węzła uszczelniającego. W niniejszym artykule przedstawiono metodykę wyznaczenia nacisku jednostkowego pierścienia uszczelniającego na wał, z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

## 2. Właściwości sprężyste elementów węzła uszczelniającego

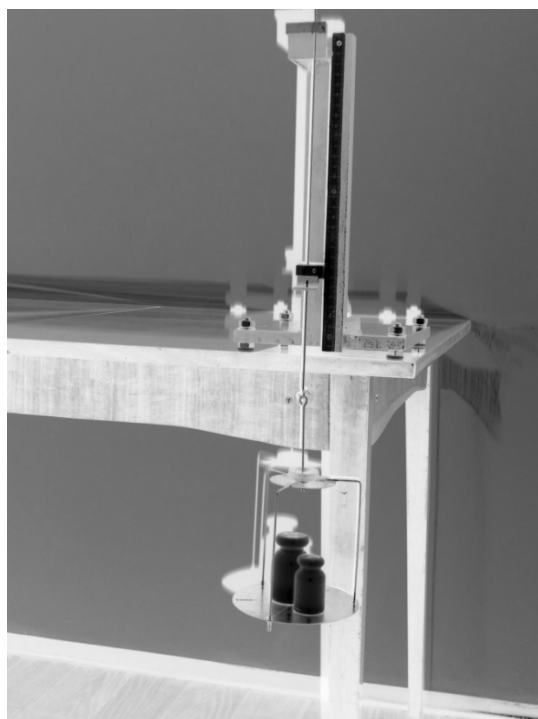
Przedmiotem analizy jest węzeł uszczelniający, którego przekrój przedstawiono na rysunku 1.



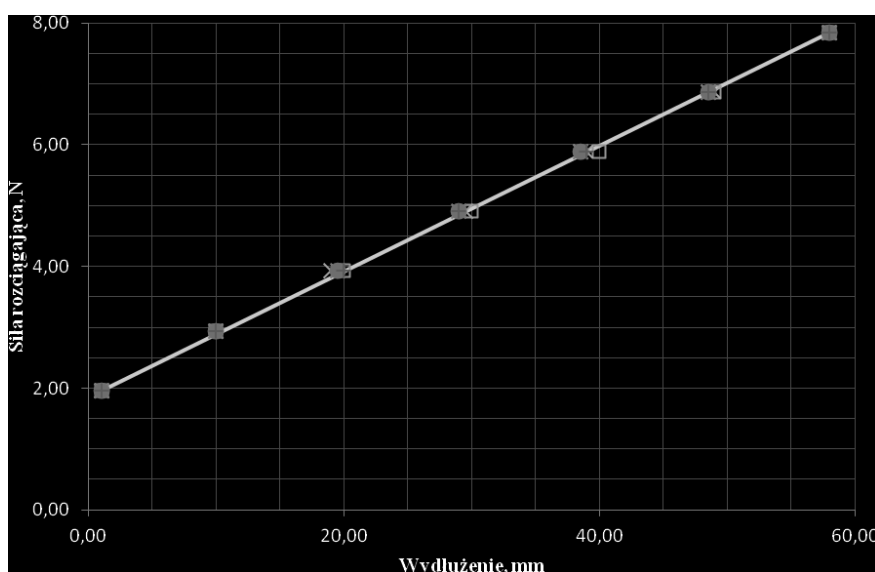
Rys.1. Przekrój węzła uszczelniającego [opracowanie własne]; 1 - wargowy pierścień uszczelniający 2 - wał, 3 - przestrzeń robocza wypełniona olejem, 4 - sprężyna

Materiały elastomerowe stosowane do produkcji uszczelnień wargowych mają charakterystykę nieliniową. Styczny moduł sprężystości podłużnej zmienia się w zależności od typu elastomeru w przedziale od 5 do 20 MPa, wytrzymałość elastomeru na rozciąganie wynosząca od 12 do 20 MPa jest osiągana przy wydłużeniu jednostkowym od 200% do 400% [1, 5]. Drugim elementem węzła uszczelniającego, wpływającym na nacisk pierścienia na wał, jest sprężyna. Producenci tych sprężyn podają wartość sztywności jednostkowej sprężyny (ang.: spring rate) –  $s_r$  wyrażonej w N/mm/mm. W zależności od cech geometrycznych sprężyn stosowanych w węzłach uszczelniających wały, współczynnik  $s_r$  sprężyny wynosi od 15 N/mm/mm do 60 N/mm/mm [1, 5].

Wartość współczynnika  $s_r$  sprężyny wyznaczono doświadczalnie na stanowisku przedstawionym na rysunku 2. Jak wynika z wykresu rozciągania sprężyny, przedstawionego na rysunku 3, charakterystyka sprężyny w badanym zakresie wydłużenia odcinka pomiarowego o długości 200 mm jest liniowa.



Rys.2. Wyznaczanie współczynnika  $s_r$  sprężyny - stanowisko pomiarowe [opracowanie własne]



Rys.3. Wykres rozciągania sprężyny o długości  $l_0 = 20$  cm [opracowanie własne]

W wyniku przeprowadzonych pomiarów, na poziomie ufności 95% stwierdzono, że wartość średnia sztywności jednostkowej  $s_r$  badanej sprężyny mieści się w przedziale:

$$20,87 \text{ N/mm/mm} \leq s_r \leq 21,00 \text{ N/mm/mm}$$

Znając długość  $l_0$  nieodkształconej sprężyny o sztywności jednostkowej  $s_r$  oraz cechy geometryczne wargowego pierścienia uszczelniającego, można wyznaczyć siłę rozciągającą sprężynę po osadzeniu pierścienia uszczelniającego na wale. Zakładając następnie równomierny nacisk sprężyny na ścianki rowka wykonanego w pierścieniu wyznaczono średni

nacisk jednostkowy  $p_{sp}$  sprężyny na pierścień uszczelniający, korzystając z zależności:

$$p_{sp} = \frac{2s_r(\pi D_{sp} - l_0)}{D_{sp} d l_0} ; \text{MPa}$$

gdzie:

- $s_r$  – sztywność jednostkowa sprężyny [N/mm/mm],
- $D_{sp}$  – średnica pierścienia uszczelniającego zamontowanego na wale wyznaczona w osi sprężyny [mm],
- $l_0$  – długość nieodkształconej sprężyny [mm],
- $d$  – średnica zwicia sprężyny [mm].

Omówione powyżej parametry charakteryzujące właściwości sprężyste wężła uszczelniającego wykorzystano przy budowie jego modelu MES.

### 3. Model wężła uszczelniającego

Budując model wężła uszczelniającego wykorzystano osiową symetrię obiektu badań. Na rysunku 4 przedstawiono model wężła uszczelniającego przed osadzeniem pierścienia na wale.

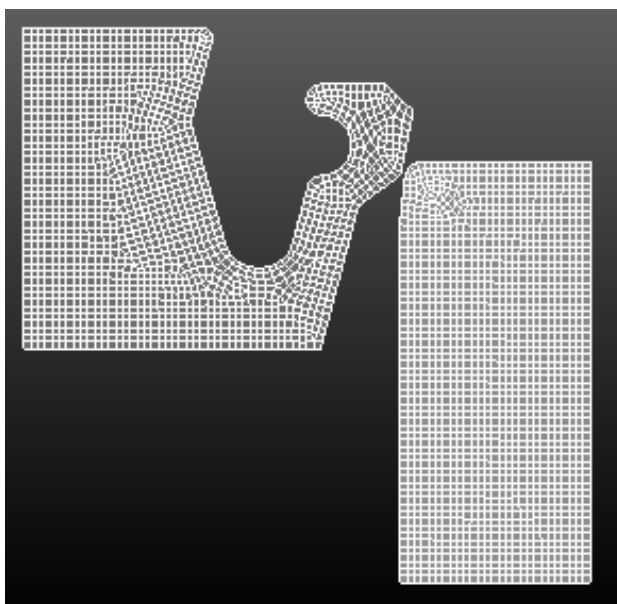
Budując model wężła uszczelniającego wykorzystano cechy geometryczne standardowego pierścienia uszczelniającego produkowanego przez wiodącego producenta uszczelnień. Dyskretyzację obu ciał sprężystych przeprowadzono wykorzystując elementy typu pierścieniowego. Ponieważ średnica wewnętrzna wargi pierścienia uszczelniającego jest mniejsza od średnicy wału, z którym współpracuje, to modelowanie obciążenia

poprzedzono symulacją komputerową montażu wężła uszczelniającego. Składała się ona z 2 etapów:

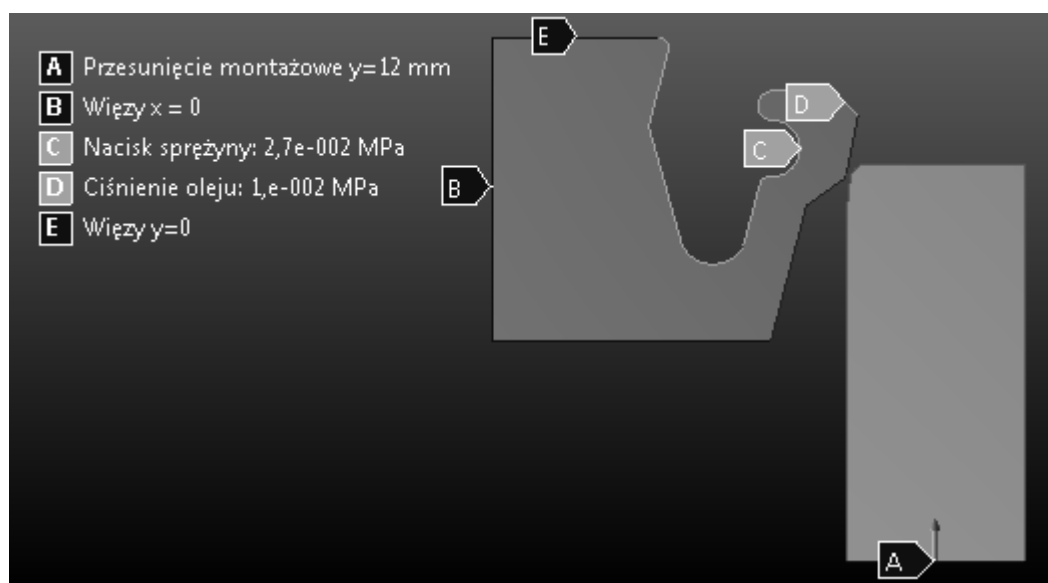
- Etap 1, podczas którego pierścień uszczelniający nie jest obciążony, a oba ciała są nieruchome.
- Etap 2, podczas którego realizowane jest pionowe przemieszczenie montażowe wału. Wał przemieszcza się ze stałą prędkością o 12 mm. Równocześnie pierścień jest obciążony naciskiem jednostkowym sprężyny, zmieniającym się od 0 do  $p_{sp}$ , gdzie  $p_{sp}$  średni nacisk jednostkowy, wyznaczony ze wzoru (1).

Po zakończeniu montażu wężła uszczelniającego realizowane są kolejne dwa etapy:

- Etap 3, podczas którego powierzchnia wewnętrzna pierścienia obciążana jest ciśnieniem oleju, o wartości zwiększającej się od 0 do wartości  $p_o$ .



Rys.4. Dyskretyzacja modelu MES pierścienia uszczelniającego i wału [opracowanie własne]



Rys.5. Warunki przemieszczeniowe oraz schemat obciążenia modelu [opracowanie własne]

- Etap 4, podczas którego obciążenie modelu wężła uszczelniającego jest stałe.

Założono, że w trakcie etapów 2. i 3. obciążenie modelu rośnie quasi statycznie.

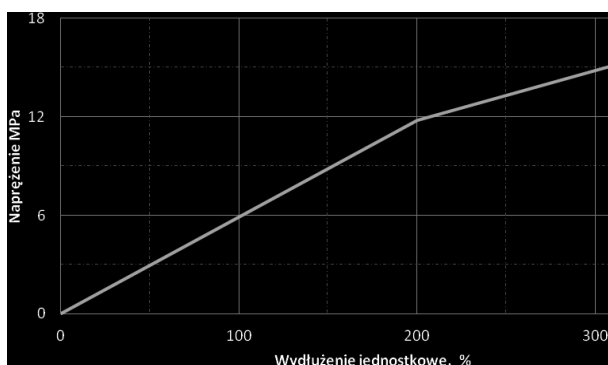
Na rysunku 5 zaznaczono schematycznie krawędzie modelu, w których:

- A – wymuszono przemieszczenie montażowe wału o 12 mm w górę,
- B – odebrano przemieszczenie węzłów w kierunku poziomym,
- E – odebrano przemieszczenia węzłów w kierunku pionowym,
- C – przyłożono nacisk jednostkowy sprężyny –  $p_{sp}$ ,
- D – przyłożono ciśnienie oleju –  $p_o$ .

Model opisany powyżej wykorzystano do przykładowego wyznaczenia nacisku wargi pierścienia uszczelniającego na wał.

#### 4. Przykładowe wyznaczenie nacisku pierścienia uszczelniającego na wał

Celem zilustrowania metodyki modelowania pracy wężła uszczelniającego przyjęto biliniową charakterystykę materiałową elementów modelujących pierścień uszczelniający, przedstawioną na rysunku 6.



Rys.6. Charakterystyka materiałowa pierścienia uszczelniającego, przyjęta w obliczeniach [opracowanie własne na podstawie [1, 3]

Pierścień uszczelniający charakteryzują następujące właściwości wytrzymałościowe:

- moduł sprężystości  $E_s = 5,9$  MPa
- moduł umocnienia  $E_p = 2,88$  MPa
- naprężenie na granicy plastyczności  $R_e = 11,8$  MPa
- naprężenia na granicy wytrzymałości  $R_m = 16,6$  MPa

Założono, że pierścień współpracuje ze stalowym wałem o średnicy 160 mm. Przyjęto, że ciśnienie oleju wypełniającego węzeł uszczelniający wynosi  $p_o = 0,01$  MPa, a średni nacisk sprężyny o sztywności jednostkowej  $s_r = 21$  N/mm/mm na pierścień uszczelniający, wynosi  $p_{sp} = 0,0109$  MPa. Założono, że

wał nie obraca się, natomiast sprężenie cierne pomiędzy wargą pierścienia a wałem charakteryzuje współczynnik tarcia  $\mu = 0,01$ .

Na rysunku 7 przedstawiono mapy przemieszczenia pierścienia podczas kolejnych faz montażu wężła uszczelniającego. Cienką czarną linią zaznaczono początkowe położenie wału oraz nieodkształcony pierścień uszczelniający.

Na rysunku 8 przedstawiono mapę rozkładu naprężenia promieniowego –  $\sigma_x$  po osadzeniu pierścienia uszczelniającego na wale. W miejscu styku wargi pierścienia uszczelniającego z wałem występuje największe naprężenie promieniowe wynoszące 0,606 MPa.

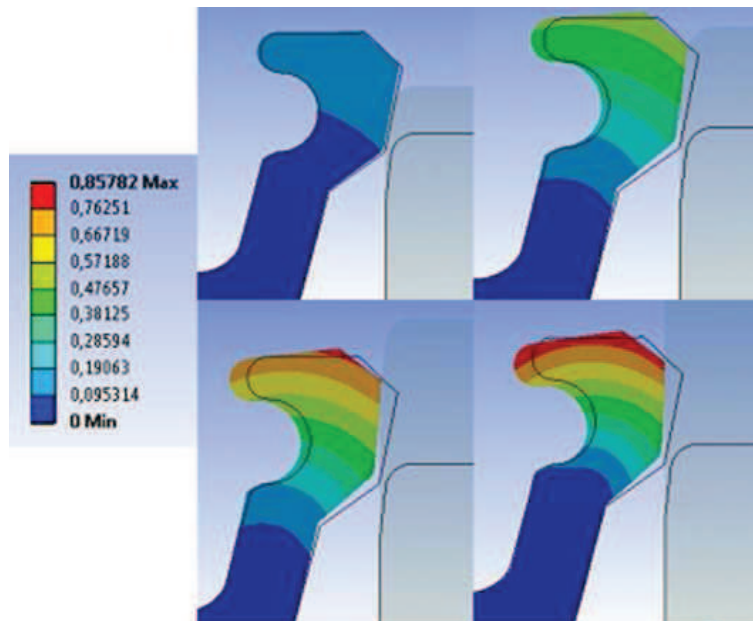
Zwiększenie sztywności jednostkowej sprężyny z 21 N/mm/mm na 52 N/mm/mm skutkuje niewielkimi zmianami stanu naprężenia w węźle uszczelniającym. Z mapy naprężenia promieniowego, (rys. 9) wynika, że ponad dwukrotne zwiększenie współczynnika sprężyny spowodowało zwiększenie wartości bezwzględnej maksymalnego naprężenia promieniowego z 0,606 MPa do 0,636 MPa. Zmiana charakterystyki sprężyny nieznacznie wpływa również na rozmiary powierzchni styku wargi i wału.

Mapę naprężenia promieniowego w rejonie styku wargi pierścienia z wałem po zadaniu ciśnienia oleju, wynoszącego 0,01 MPa przedstawiono na rysunku 10. Ciśnienie działające na wewnętrzną część uszczelnienia powoduje nieznaczne zmniejszenie naprężenia w strefie styku pierścienia uszczelniającego z wałem, (w porównaniu z mapą  $\sigma_x$  na rys. 8).

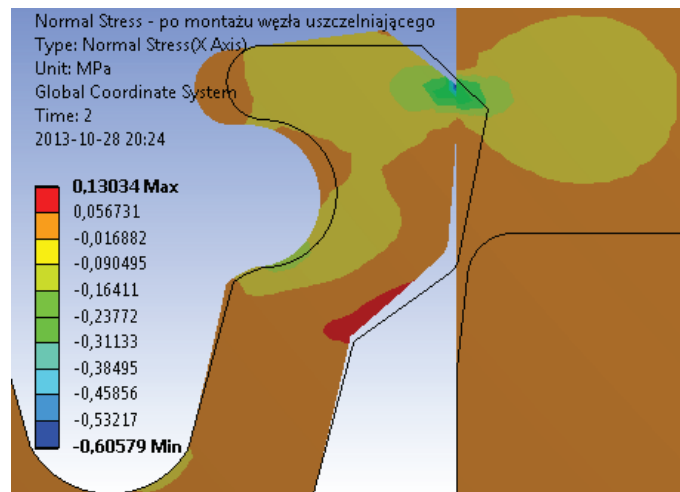
Na rysunku 11 przedstawiono status strefy kontaktu po montażu pierścienia uszczelniającego na wale. Z wykresu statusu elementów kontaktowych wynika, że styk wargi pierścienia z wałem występuje tylko na krótkim odcinku strefy kontaktu typu „Sliding”, zaznaczonym kolorem pomarańczowym. W tej strefie, oprócz naprężenia normalnego do powierzchni, występuje naprężenie styczne o wartości ograniczonej do naprężenia spowodowanego przez tarcie rozwinięte na powierzchni styku, wynikające ze współczynnika tarcia o wartości 0,01.

Działanie ciśnienia oleju na pierścień uszczelniający (rys. 12) spowodowało nieznaczne zwiększenie powierzchni styku wargi z wałem. Większość elementów kontaktowych znajdujących się na tej powierzchni ma status „Sticking”, charakteryzujący się brakiem względnych przemieszczeń stycznych współpracujących powierzchni modelu.

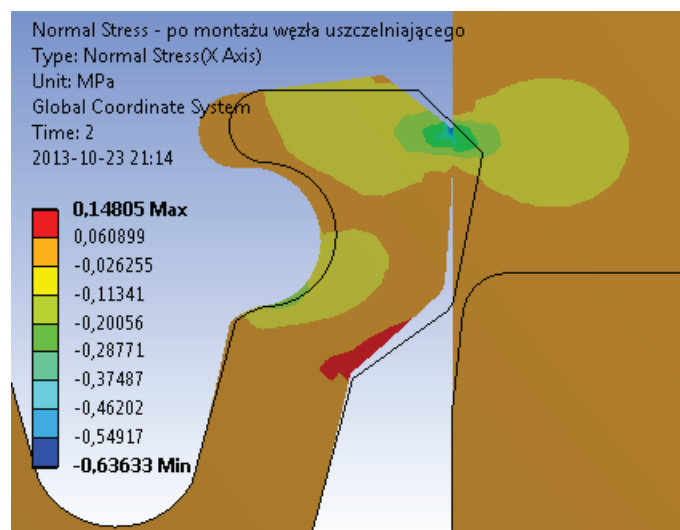
Rozkład naprężenia zredukowanego w pierścieniu uszczelniającym i wale przedstawiono na rysunku 13.



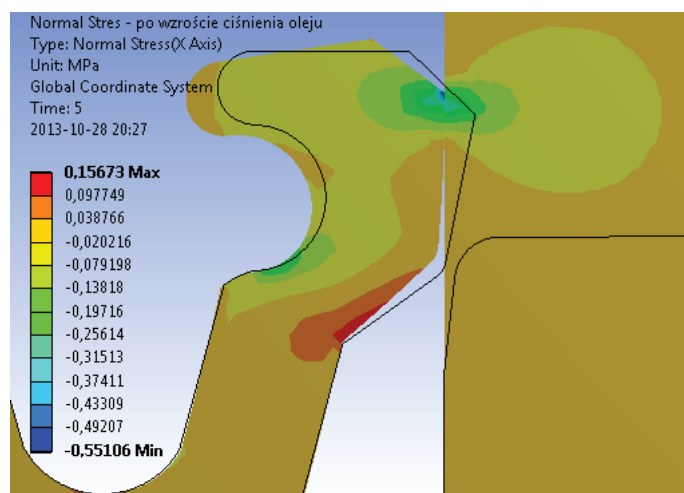
Rys.7. Mapy przemieszczenia pierścienia uszczelniającego podczas symulacji montażu węzła uszczelniającego [opracowanie własne]



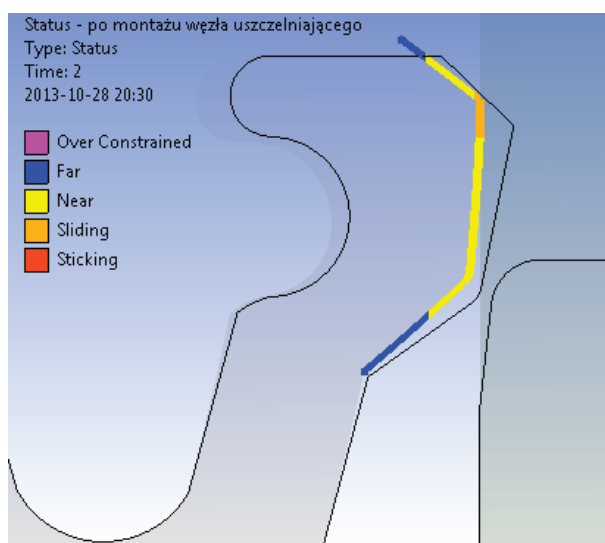
Rys.8. Mapa naprężenia normalnego  $\sigma_x$  po osadzeniu pierścienia uszczelniającego na wale [opracowanie własne]



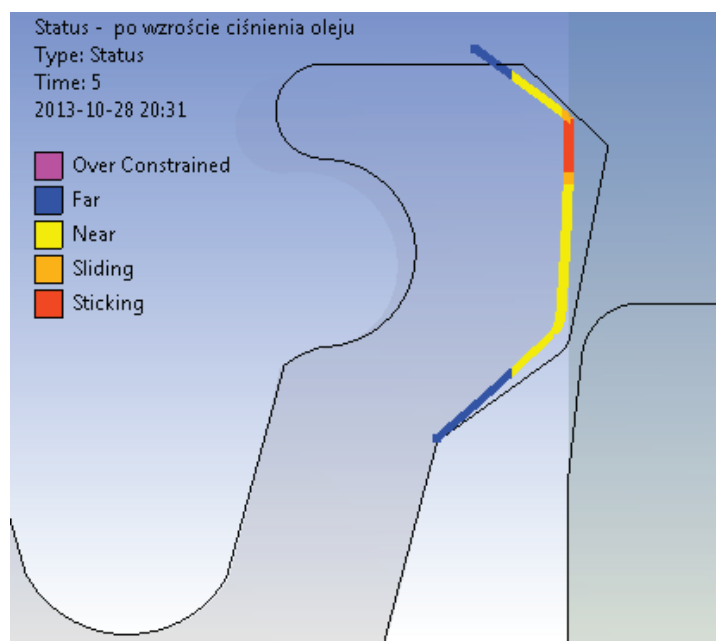
Rys.9. Mapa naprężenia normalnego  $\sigma_x$  po osadzeniu pierścienia uszczelniającego na wale, w przypadku, gdy sztywność jednostkowa sprężyny wynosi 52 N/mm/mm [opracowanie własne]



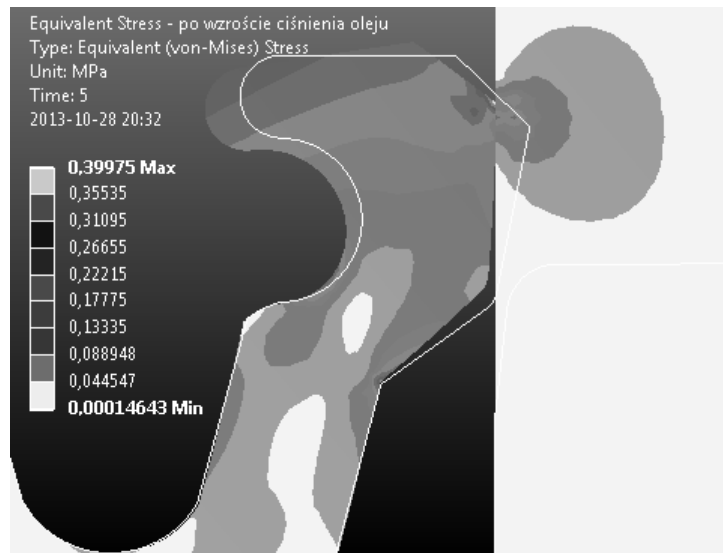
Rys.10. Mapa naprężenia normalnego  $\sigma_x$  w zmontowanym węźle uszczelniającym obciążonym ciśnieniem oleju [opracowanie własne]



Rys.11. Status kontaktu po osadzeniu pierścienia uszczelniającego na wale [opracowanie własne]



Rys.12. Status kontaktu po przyłożeniu ciśnienia oleju [opracowanie własne]



Rys.13. Mapa naprężenia zredukowanego obciążonego węzła uszczelniającego [opracowanie własne]

Obszar występowania największego naprężenia zredukowanego obejmuje krawędź wargi pierścienia. Ponieważ w tej strefie występuje również kontakt typu „Sticking” wargę pierścienia może być narażona na uszkodzenie.

## 5. Podsumowanie

Jak założono we wstępie niniejszego artykułu jego celem było opracowanie narzędzia umożliwiającego wyznaczenie nacisku na styku wargi pierścienia uszczelniającego z wałem. Jakkolwiek model MES węzła uszczelniającego nie został zwalidowany za pomocą metod doświadczalnych to analizując wyniki obliczeń omawianych w punkcie 4. można stwierdzić, że są one zbieżne z doświadczeniem użytkowników i konstruktorów uszczelnień. Wynika z nich bowiem, że istotny wpływ na naprężenie pierścienia i rozkład nacisku, ma stan naprężenia spowodowany osadzeniem pierścienia na wale, przy czym właściwości sprężyste sprężyn mają niewielki wpływ na wartości naprężenia promieniowego w miejscu styku. Ponad dwukrotne zwiększenie sztywności jednostkowej –  $s$ , sprężyny — z 21 N/mm/mm na 52 N/mm/mm spowodowało nieznaczny wzrost wartości naprężenia promieniowego, wynoszący około 5%. Z przykładu obliczeniowego przedstawionego w punkcie 4 wynika również, że ciśnienie oleju ma drugorzędny wpływ na rozkład nacisku pomiędzy wargą a powierzchnią wału.

Maksymalne naprężenie promieniowe w wyniku działania ciśnienia oleju zmniejszyło swoją wartość z 0,606 MPa do 0,551 MPa. Pojawiła się jednak strefa „szczepienia”, elementów kontaktowych w otoczeniu krawędzi wargi pierścienia. Jakkolwiek naprężenie promieniowe w strefie styku ma małą wartość w porównaniu z granicą plastyczności elastomeru, to występowanie strefy kontaktu typu „Sticking”, wskazuje na możliwość uszkodzenia wargi w tej strefie, co potwierdzają także doświadczenia praktyczne.

## Literatura

1. Flitney R.: Seals and sealing handbook. Elsevier, 2007.
2. Gawliński M.: Lokalne warunki styku a opory tarcia elastomerowych wargowych pierścieni uszczelniających, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004.
3. Nagdi K.: Rubber as an engineering material. Hanser, Munchen, 1993.
4. Sala W.: Promieniowe uszczelnienia ślizgowe, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.
5. Prospekty firmy Freudenberg Sealing Technologies Simrit. 2005 – 2012.

*Artykuł wpłynął do redakcji w grudniu 2013 r.*