

mgr inż. Radosław SIECZKOWSKI **
prof. dr hab. inż. Jacek STADNICKI*

OPTIMALIZACJA PRZEKROJU POPRZECZNEGO USZCZELKI WIELOKRAWĘDZIOWEJ W POŁĄCZENIU KOŁNIERZOWO-ŚRUBOWYM

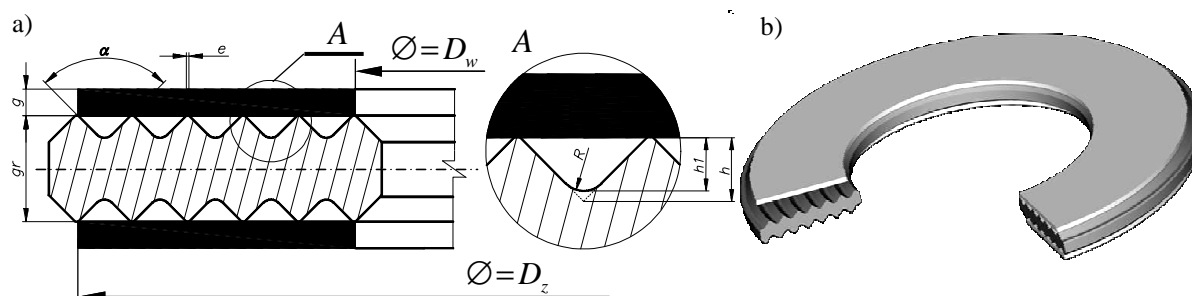
Streszczenie: W pracy opisano zweryfikowany doświadczalnie model MES uszczelki wielokrawędziowej z nakładami grafitowym. Z uwagi na technologię wykonania wyspecyfikowano zbiór możliwych wariantów wymiarowych uszczelki, dla których przeprowadzono symulacje pracy w połączeniu kołnierzo-śrubowym. W rezultacie sformułowania zadania optymalizacji opracowano metodykę wyboru najlepszego wariantu poprawiającego bezpieczeństwo i niezawodność eksploatacji połączenia.

OPTIMISATION OF A CROSS SECTION OF MULTI GROOVE GASKET IN FLANGE SCREW JOINT

Summary: Experimentally verified FEM model of a multi groove gasket having graphite jackets has been described in the paper. According to the production engineering process the set of permissible dimension variants of gaskets have been specified and then the simulations of their work in flange screw joint have been performed. In consequence of defining of a task of optimisation a methodology of selection of the best variant of gasket which improves safe and reliable exploitation of the joint has been elaborated.

1. WSTĘP

Uszczelki wielokrawędziowe (rys.1) służą do uszczelniania połączeń kołnierzo-śrubowych urządzeń ciśnieniowych takich jak: rurociągi, wymienniki ciepła, zbiorniki i aparaty w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, energetyce ciepłej i zawodowej, górnictwie



naftowym i gazownictwie. Stosuje się je szczególnie tam, gdzie należy zachować szczelność przesyłanych gazów i cieczy palnych, wybuchowych, pary wodnej i innych mediów w zakresie ciśnień do ok. 400bar oraz temperatur do ok. 550°C. Zaletami uszczelki wielokra-

** SPETECH sp. z o.o. w Bielsku-Białej,

* Katedra Podstaw Budowy Maszyn Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej,

wędziowych są: bardzo wysoka szczelność, przenoszenie dużych obciążeń zewnętrznych (naciśk dopuszczalny do 500MPa), mała wrażliwość na drgania, odporność na przerwanie nakładki grafitowej w wyniku działania ciśnienia uszczelnianego medium (tzw. „wydmuchanie”) i działanie wysokich temperatur. Formowanie uszczelki wielokrawędziowej podczas montażu, polegające na jej ścisaniu między przylgami połączenia kołnierzo-śrubowego, ma na celu wciśnięcie miękkich nakładek w nierówności przylg oraz takie ich zagęszczenie w rowkach metalowego rdzenia, aby uzyskać wymaganą szczelność połączenia i odporność uszczelki na „wydmuchanie”.

Po to, aby poprawnie zaprojektować uszczelkę – dobrać wymiary jej przekroju poprzecznego, należy zbadać wpływ tych wymiarów na naprężenia i odkształcenia uszczelki w połączeniu, bowiem mają one decydujący wpływ na bezpieczeństwo i niezawodność połączenia. W rozwiązaniu zadania zastosowano metodę elementów skończonych, z pomocą której opracowano model MES uszczelki w połączeniu, który następnie wykorzystano do przeprowadzenia potrzebnych symulacji.

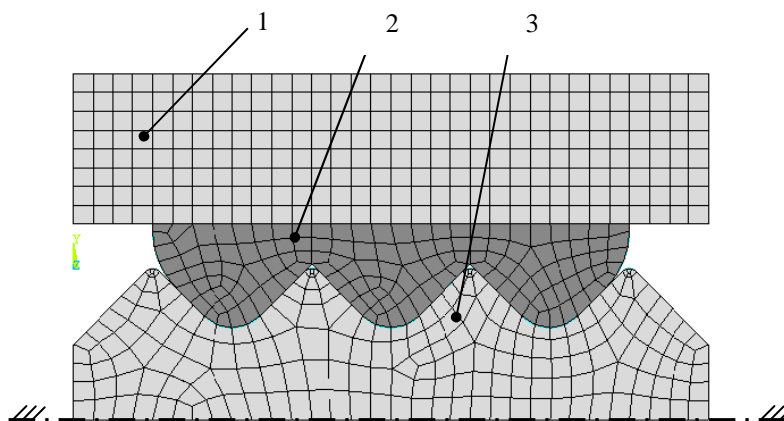
2. MODEL OBLICZENIOWY

Model MES uszczelki w połączeniu (rys.2) zbudowano w środowisku ANSYS przyjmując następujące założenia:

- model jest płaski, co wynika z osiowej symetrii uszczelki,
- model ma płaszczyzną symetrii (linia punktowa rys.2),
- grafitowe nakładki są uformowane wstępnie i wypełniają rowki rdzenia*,
- materiał nakładek potraktowano jako izotropowe ciało sprężysto-plastyczne; moduł sprężystości E przyjęto za [2] wg zależności:

$E_G = E_0 + K_1 \cdot Q_0$, w której: $E_0 = 1\text{MPa}$, $K_1 = 26$, $Q_0 = 160\text{MPa}$ oraz przyjęto za [4] współczynnik Poissona $\nu = 0,43$,

- przylga jest wykonana z materiału liniowo-sprężystego izotropowego – stal konstrukcyjna: $E = 2,1 \cdot 10^5\text{MPa}$, $\nu = 0,3$,
- rdzeń uszczelki wykonany jest z materiału liniowo-sprężysto-plastycznego – stal austenityczna AISI 316L o dwuliniowej charakterystyce z umowną granicą plastyczności $Re_{0,2} = 320\text{MPa}$ i stycznym modułem sprężystości $X = 1500\text{MPa}$,
- do dyskretyzacji elementów modelu wykorzystano elementy skończone typu *PLANE 183*,
- styk nakładek grafitowych z przylgami oraz rdzeniem potraktowano jako działanie jednostronnych więzi z tarciem suchym – do dyskretyzacji zastosowano elementy kontaktowe typu linia-linia *CONTA 172*, ze współczynnikiem tarcia grafit-stal $\mu = 0,1$ [3],
- uwzględniono możliwość przecięcia nakładki przez krawędzie rdzenia – do dyskretyzacji zastosowano elementy kontaktowe jak wyżej ze współczynnikiem tarcia stal-stal $\mu = 0,16$.



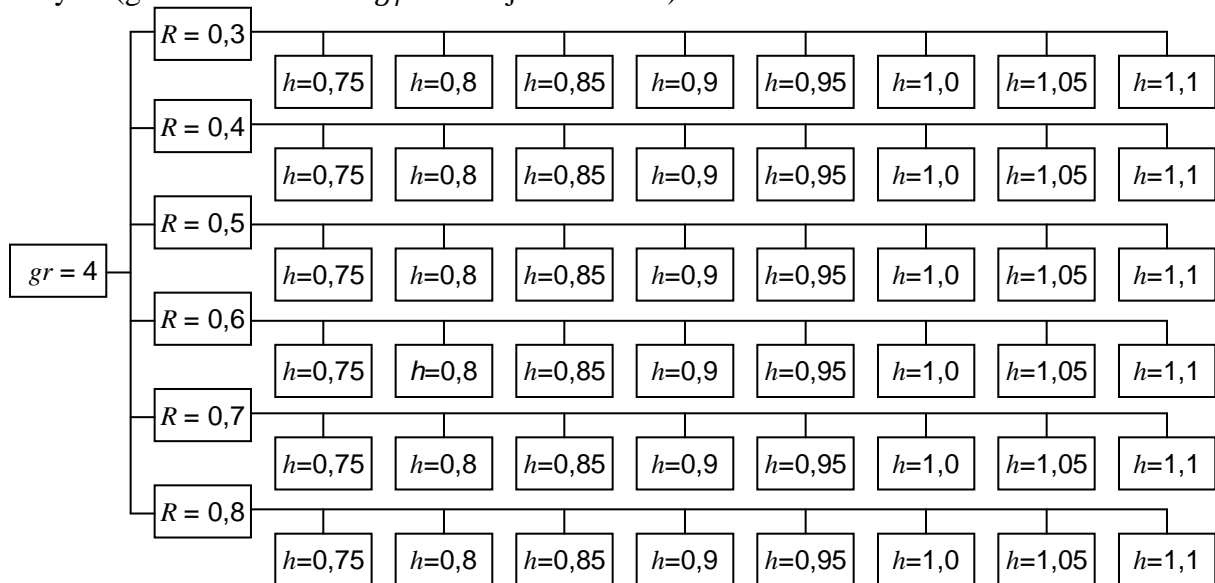
Rys. 2 Model MES uszczelki; 1 przylga, 2 rdzeń, 3 nakładka

* modelowanie procesu wypełniania rowków rdzenia przez nakładkę jest przedmiotem symulacji odrębnego modelu.

Model zbudowany wg powyższych założeń wykorzystano do wyznaczenia charakterystyki nacisk powierzchniowy-odkształcenie, którą porównano z charakterystyką wyznaczoną doświadczalnie na specjalnym stanowisku badawczym. Szczegółowy opis symulacji obliczeniowych i eksperymentu podano w [5]. Ponieważ uzyskano dobrą zgodność symulacji i eksperymentu, można przyjąć, że opracowany model MES uszczelki jest poprawny i został doświadczalnie zweryfikowany.

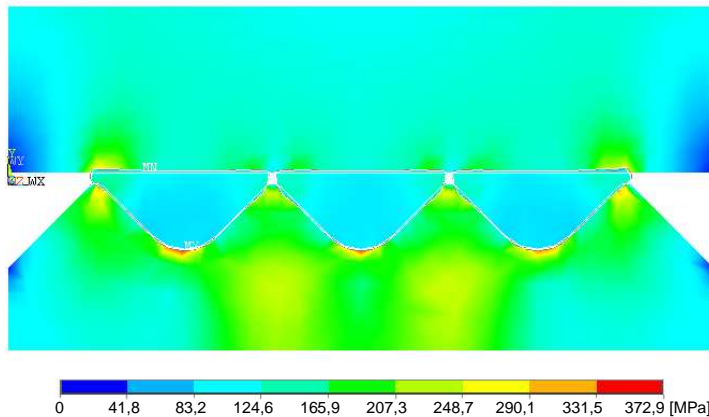
3. OPTIMALIZACJA PRZEKROJU POPRZECZNEGO USZCZELKI

Uwzględniając technologię wykonania rdzenia uszczelki, a w szczególności możliwość zmiany wymiarów przekroju poprzecznego, przyjęto, iż pojedynczy wariant uszczelki będzie identyfikowany wektorem $\{w\} = [g_r, R, h]^T$, którego składowe oznaczają odpowiednio grubość rdzenia, promień zaokrąglenia dna rowka oraz głębokość rowka (rys.1). Zbiór technicznie akceptowalnych wartości składowych wektora $\{w\}$ umożliwił wygenerowanie 48 kombinacji wektora dla każdej z dwóch stosowanych grubości rdzenia $g_r=3\text{mm}$ i 4mm , które łącznie dały 96 wariantów wymiarowych uszczelki pokazanych w formie grafu wariantów dla $g_r=4\text{mm}$ na rys.3 (graf wariantów dla $g_r=3\text{mm}$ jest taki sam) .



Rys. 3 Graf wariantów wymiarowych uszczelki o grubości rdzenia $g_r=4\text{mm}$

Z pomocą opracowanego modelu MES uszczelki przeprowadzono symulacje komputerowe ściskania poszczególnych wariantów uszczelki z nakładkami między przyłgami połączenia kołnierzowo-śrubowego. Każdy wariant poddano działaniu czterech reprezentatywnych wartości równomiernie rozłożonego nacisku powierzchniowego $p = 160, 120, 80$ i 40MPa [1]. Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju uszczelki pokazano na rys.4.



Rys. 4 Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju uszczelki dla wariantu $\{w\} = [3 \ 0,4 \ 0,75]^T$ i nacisku $p=160\text{MPa}$

Każdy wariant poddano działaniu czterech reprezentatywnych wartości równomiernie rozłożonego nacisku powierzchniowego $p = 160, 120, 80$ i 40MPa [1]. Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju uszczelki pokazano na rys.4.

ZBIÓR WARIANTÓW DOPUSZCZALNYCH:

Za warianty dopuszczalne uznano te, które spełniają następujące ograniczenia:

1° naprężenia zredukowane na dnie rowka nie mogą przekroczyć wytrzymałości materiału rdzenia – warunek bezpieczeństwa (wytrzymałości uszczelki i połączenia),

$$\sigma(\{w\}) \leq \frac{Re_{0,2}}{b} = \frac{320}{1,5} = 213\text{MPa}, \text{ gdzie } b = 1,5 \text{ [6] współczynnik bezpieczeństwa,}$$

2° krawędzie rdzenia uszczelki powinny przeciąć grafitową nakładkę, po to aby zetknąć się z przylgą, przy czym głębokość „wbicia” krawędzi w przylgę nie powinna przekroczyć zalecanej chropowatości przylg $R_z = 50\mu\text{m} = 0,05\text{m}$ wg EN 1092-1 – warunek niezawodności (szczelności połączenia),

$$0 \leq x(\{w\}) \leq 0,05\text{mm}.$$

W rezultacie ze zbioru 96 wariantów pozostało dla:

$g_r = 3\text{mm}$:

- jeden wariant dopuszczalny dla $p = 160\text{MPa}$,
- 10 wariantów dopuszczalnych dla $p = 120\text{MPa}$,
- 14 wariantów dopuszczalnych dla $p = 80\text{MPa}$,
- 4 warianty dopuszczalne dla $p = 40\text{MPa}$,

a dla $g_r = 4\text{mm}$:

- 8 wariantów dopuszczalnych dla $p = 160\text{MPa}$,
- 15 wariantów dopuszczalnych dla $p = 120\text{MPa}$,
- 14 wariantów dopuszczalnych dla $p = 80\text{MPa}$,
- 6 wariantów dopuszczalnych dla $p = 40\text{MPa}$,

co łącznie stanowi 72 warianty dopuszczalne spełniające warunki wytrzymałości i szczelności.

WYBÓR WARIANTU OPTYMALNEGO:

W celu wyboru wariantu optymalnego ze zbioru wariantów dopuszczalnych wprowadzono kryterium – funkcję celu, którym był tzw. powrót sprężysty uszczelki. Przez powrót sprężysty rozumie się zwiększenie całkowitej wysokości uszczelki razem z nakładkami (odległości między przylgami) po zmniejszeniu wartości nacisku p do 1/3 wartości początkowej [1]. Powrót sprężysty pozwala zachować szczelność połączenia kołnierzowo-śrubowego, które podczas zmian ciśnienia i temperatury medium roboczego podlega odkształcaniu. Ma to szczególne znaczenie wtedy, gdy zmniejszenie ciśnienia lub zmniejszanie temperatury medium roboczego powoduje odciążenie uszczelki w połączeniu kołnierzowo-śrubowym zwiększając ryzyko nieszczelności – przecieku. Z tego powodu powrót sprężysty uszczelki podczas odciążania powinien być jak największy, co zapewni szczelność połączenia, a tym samym poprawi jego niezawodność podczas eksploatacji. Ponieważ nie dostrzeżono jednoznacznej zależności wariantów optymalnych $\{\hat{w}\}_p$ od nacisku p , nie można podać rozwiązania optymalnego niezależnego od nacisku p . Uznano zatem, że warianty optymalne $\{\hat{w}\}_p$ należy wyznaczać dla danego nacisku powierzchniowego p , który wynika z warunków eksploatacji uszczelki w połączeniu. Wariantami optymalnymi są uszczelki:

$$\begin{array}{ll} \text{dla } g_r = 3\text{mm} & \{\hat{w}\}_{160} = [3 \quad 0,6 \quad 1,05]^T, & \text{dla } g_r = 4\text{mm} & \{\hat{w}\}_{160} = [4 \quad 0,5 \quad 1,00]^T, \\ & \{\hat{w}\}_{120} = [3 \quad 0,8 \quad 1,10]^T, & & \{\hat{w}\}_{120} = [4 \quad 0,6 \quad 1,00]^T, \\ & \{\hat{w}\}_{80} = [3 \quad 0,7 \quad 1,05]^T, & & \{\hat{w}\}_{80} = [4 \quad 0,7 \quad 1,05]^T, \\ & \{\hat{w}\}_{40} = [3 \quad 0,3 \quad 1,05]^T, & & \{\hat{w}\}_{40} = [4 \quad 0,6 \quad 1,10]^T. \end{array}$$

Warianty optymalne uszczelki gwarantują oprócz spełnienia warunków wytrzymałości (bezpieczeństwa) i szczelności (niezawodności), największy powrót sprężysty (tj. niewrażliwość na zmiany warunków eksploatacji wywołane zmianami ciśnienia i temperatury medium roboczego). Opisane postępowanie, prowadzące do wyboru optymalnego wariantu uszczelki w połączeniu, można uznać za metodykę doboru wymiarów przekroju poprzecznego uszczelki dla nacisku p wynikającego z rzeczywistych warunków eksploatacyjnych.

4. PODSUMOWANIE

Urządzenia ciśnieniowe – w tym połączenia kołnierzowo-śrubowe, należą do odpowiedzialnych urządzeń, które należy projektować ze szczególną dbałością o ich bezpieczeństwo (wytrzymałość). Postęp i doskonalenie metod analizy w dziedzinie komputerowego wspomagania obliczeń inżynierskich CAE spowodował, że dyrektywy Unii Europejskiej dotyczące obliczeń wytrzymałościowych urządzeń ciśnieniowych [6], dopuszczają stosowanie zweryfikowanych modeli MES w obliczeniach projektowych jako równoważnych badaniom doświadczalnym prototypów tych urządzeń. Zastosowanie symulacji numerycznych istotnie zmniejsza koszty opracowywania projektu, a co ważniejsze często umożliwia obliczenie ważnych wielkości (np. naprężeń) w miejscach, w których ich zmierzenie jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Opisana w artykule metodyka wyboru optymalnego wariantu wymiarowego uszczelki wielokrawędziowej z grafitowymi nakładkami realizuje następujący schemat postępowania:

- opracowanie modelu MES uszczelki;

Opisany nieliniowy model wykorzystujący elementy kontaktowe musi być odpowiedni do prowadzenia analiz dla zmiennych warunków obciążenia (*transient analysis*), co jest podyktowane tym, iż nakładka z grafitu ekspandowanego podlega znacznym deformacjom, gdy podczas formowania pod wpływem nacisku wypełnia rowki stalowego rdzenia uszczelki,

- weryfikacja doświadczalna modelu MES uszczelki;

Poprawność założeń modelu MES zweryfikowano porównując charakterystyki nacisk–odkształcenie otrzymane w wyniku symulacji komputerowych i eksperymentu przeprowadzonego na specjalnym stanowisku badawczym [5].

- sparametryzowanie przekroju poprzecznego uszczelki i wyspecyfikowanie zbioru technicznie akceptowalnych wariantów wymiarowych uszczelki,
- przeprowadzenie analiz MES dla wszystkich wariantów zbioru,
- sformułowanie zadania optymalizacji, którego rozwiązaniem jest wariant optymalny uszczelki dla przyjętej grubości rdzenia uszczelki i przyjętego nacisku, wynikającego z warunków eksploatacji;

Zbiór wariantów dopuszczalnych wyznaczyły warunki wytrzymałości rdzenia uszczelki i szczelności połączenia, a kryterium wyboru była niewrażliwość na zmienne warunki eksploatacji uszczelki połączeniu, tj. zmiany ciśnienia i temperatury medium roboczego.

W efekcie zastosowania opisanej metodyki optymalizacji przekroju poprzecznego uszczelki wielokrawędziowych przez ich wytwórcę, uzyskano poprawę bezpieczeństwa i niezawodności połączeń kołnierzowo-śrubowych, w których są wykorzystywane.

5. LITERATURA

[1] PN-EN 13555:2005

[2] PN-EN 1591-2:2002

[3] *Sigraflex products manufactured from flexible graphite foil*. SGL Carbon Group, 12 2002/1 2NA

[4] Andreev B., Burmistrov B., Povalyev A., Bortnikov M., Shepelev V.: *Stress and strain state characteristics research of graphite sealing rings*, Valve World, Volume 9, Issue 5, October 2004

[5] Sieczkowski R., Stadnicki J.: *Formowanie uszczelki wielokrawędziowej z miękką nakładką*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 7-8, 2006,

[6] Dyrektywa 97/23/WE dotycząca urządzeń ciśnieniowych