Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

1. **Imię i nazwisko.**

   Przemysław Jaszak

2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

   - Dyplom ukończenia studiów wyższych magisterskich. Tytuł: magister inżynier. Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, kierunek mechanika i budowa maszyn, specjalność: Maszyny i urządzenia energetyczne, temat pracy dyplomowej: *Projekt pompy diagonalnej dużej mocy*, 2009.

   - Stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, specjalność: technika uszczelniania maszyn i urządzeń, nadany uchwałą Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 29 października. 2014 roku; tytuł rozprawy doktorskiej: *Zmiana stanu obciążenia złącza kołnierzowego w warunkach wymuszonych drgań i jego wpływ na szczelność.*

3. **Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.**

   - Od 2013 do 2014 referent techniczny w Zakładzie Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska.
   - Od 2015 roku do 2019 roku adiunkt naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych, Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechnika Wrocławska.
   - Od 2019 roku do obecnie adiunkt naukowo-dydaktyczny w Katedrze Inżynierii Konwersji Energi, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska.

4. **Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).**

a) Tytuł osiągnięcia naukowego:

Cykl publikacji powiązanych tematycznie: **„Wybrane zagadnienia modelowania, konstruowania i eksploatacji węzłów uszczelniających w rurociągach przemysłowych"**

Jaszak

b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

A1. **Jaszak Przemysław:** A new solution of the semi-metallic gasket increasing tightness level. Open Engineering vol. 9 s. 329-337, DOI: https://doi.org/10.1515/eng-2019-0030 (**LF**, punktacja MNiSW: **70**).

A2. **Jaszak Przemysław:** The elastic serrated gasket of the flange bolted joints. International Journal of Pressure Vessel and Piping vol. 176 pp. 1-32. (2019), DOI: 10.1016/j.ijpvp.2019.103954 (**LF, IF: 2.230,** punktacja MNiSW: **140**).

A3. **Jaszak Przemysław:** Optimized design of a semimetal gasket operating in flange-bolted joints. Open Engineering, DOI: https://doi.org/10.1515/eng-2021-0004, (**LF**, punktacja, MNiSW: **70**).

A4. **Jaszak Przemysław:** Modeling of the elastic properties of compressed expanded graphite - A material used in spiral wound gaskets. International Journal of Pressure Vessels and Piping vol. 187 pp. 1-32. (2020) DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104158 (**LF, IF: 2.028**, punktacja MNiSW: **140**).

A5. **Jaszak Przemysław:** Adaptation of a highly compressible elastomeric material model to simulate compressed expanded graphite and its application in the optimization of a graphite-metallic structure. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. vol. 42, pp. 1-22. (2020) DOI: https://doi.org/10.1007/s40430-020-02311-8 (**LF**, IF: **2.220**, punktacja MNiSW: **70**,).

A6. **Jaszak Przemysław**, Adamek Konrad: Design and analysis of the flange-bolted joint with respect to required tightness and strength. Open Engineering vol. 9 pp. 338-349, DOI: https://doi.org/10.1515/eng-2019-0031, (**LF**, punktacja MNiSW: **70**). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu badań eksperymentalnych i przeprowadzeniu obliczeń numerycznych oraz interpretacji uzyskanych wyników. Mój udział procentowy szacuję na 90 %. W załączniku nr 3 zamieściłem deklarację współautora o jego wkładzie w przygotowanie tej pracy.

A7. **Jaszak Przemysław:** Prediction of the durability of the gasket operating in bolted-flange-joint subjected to cyclic bending. Engineering Failure Analysis Vol. 120, February 2021, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105027 (**LF**, IF =**3,634**, punktacja MNiSW: **100**).

Łączna suma punktów MNiSW w obszarze osiągniecia naukowego: **660**
Łączna suma Impact Factor w obszarze osiągniecia naukowego: **10,112**

Jaszak

c) **Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:**

Wstęp

Wprowadzona w 1996 roku dyrektywa IPPC (ang. Integrated Pollution Prevention and Control), dotycząca zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom i ich kontroli, wymusiła m.in. konieczność monitorowania postępu technologicznego pod względem nowych rozwiązań w zakresie ograniczenia emisji lub jej eliminacji u źródła. Zgodnie z wymogami tej dyrektywy, każda instalacja procesowa (w tym rurociągowa), emitująca zanieczyszczenia do środowiska naturalnego powinna być projektowana i użytkowana w sposób wykorzystujący najlepsze dostępne techniki BAT (ang. Best Available Techniques). Pojęcie BAT, w kontekście uszczelnień i techniki uszczelniania maszyn i urządzeń przemysłowych odnosi się zarówno do procedur dotyczących projektowania, sposobu montażu, użytkowania i wycofania z eksploatacji instalacji ciśnieniowych, jak również do wykorzystania w tych instalacjach najnowszych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych dotyczących uszczelnień. Idea BAT ma znaczenie długo falowe i szeroko horyzontalne, które ma na celu eksplorację coraz to nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, przyczyniających się do poprawy i ochrony środowiska naturalnego. Jednym ze sposobów ograniczenia emisji z instalacji przemysłowych jest stosowanie nowoczesnych systemów uszczelnień oraz zachowanie odpowiedniej procedury projektowania i kontroli stanu technicznego węzłów uszczelniających. Połączenie kołnierzowo-śrubowe to powszechnie stosowany rodzaj węzła uszczelniającego w instalacjach rurociągowych. Informacje dotyczące różnorodności rozwiązań konstrukcyjnych połączeń tego typu, a także stosowanych w nich uszczelnień znajdują się w normach projektowych i materiałowych. Stosowanie konkretnego typu rozwiązania kołnierzy, śrub i co najważniejsze rodzaju uszczelnienia zależy od parametrów technicznych instalacji oraz rodzaju transportowanego lub przechowywanego w tych instalacjach medium. Jednym z podstawowych kryteriów podziału uszczelnień stosowanych w połączeniach kołnierzowo-śrubowych jest klasa ciśnienia. Na podstawie tego kryterium wyróżnia się trzy grupy uszczelnień jako: niskociśnieniowe, średniociśnieniowe i wysokociśnieniowe. Pierwszą grupę stanowią tak zwane uszczelnienia miękko materiałowe. Uszczelnienia te wykonuje się zazwyczaj z politetrafluoroetylenu, grafitu ekspandowanego oraz kombinacji elastomerów z różnymi rodzajami włókien naturalnych bądź syntetycznych. Druga grupa średniociśnieniowa to tak zwane uszczelnienia semi-metalowe. Składają się one z połączenia jednego z wyżej wymienionych materiałów uszczelnień należących do grupy pierwszej oraz metalu. Element metalowy w zależności od konstrukcji uszczelnienia może stanowić wewnętrzne wzmocnienie miękkiego materiału w postaci siatki bądź rdzenia lub znajdować się na zewnątrz, tworząc jego osłonę. Trzecią grupę, wysokociśnieniową, stanowią uszczelnienia typowo metalowe.

Tematyka zbioru prac osiągnięcia naukowego dotyczy zagadnień modelowania, projektowania, eksploatacji i optymalizacji konstrukcji uszczelnień stosowanych w połączeniach kołnierzowo-śrubowych instalacji rurociągowej niskiego i średniego ciśnienia.

W aspekcie prezentowanego zbioru prac skupiłem się na trzech zasadniczych zagadnieniach:

- Konstrukcyjne sposoby poprawy szczelności uszczelnień semi-metalowych.

Jasek

- Modelowanie właściwości sprężystych materiałów stosowanych w uszczelnieniach semi-metalowych.
- Problemy konstrukcyjno-eksploatacyjne uszczelnień stosowanych w połączeniach kołnierzowo-śrubowych.

Konstrukcyjne sposoby poprawy szczelności uszczelnień semi-metalowych

Jak zaznaczono we wstępie, najpowszechniej stosowanymi rodzajami uszczelnień w instalacjach rurociągowych średniego ciśnienia są uszczelnienia semi-metalowe. Specyfika konstrukcji tych uszczelnień wynika ze sposobu połączenia dwóch materiałów charakteryzujących się zróżnicowanymi, względem siebie, właściwościami fizyko-chemicznymi. Element metalowy nadaje uszczelnieniu odpowiednią wytrzymałość mechaniczną oraz sztywność, podczas gdy element miękko materiałowy (stanowiący uszczelnienie właściwe) odpowiada za zapewnienie szczelności. Jednym z głównych problemów konstrukcyjnych tych uszczelnień jest uzyskanie właściwej sztywności osiowej, powrotu sprężystego oraz równomiernego rozkładu nacisku na powierzchni uszczelniającej co bezpośrednio przekłada się na szczelność. Te trzy zasadnicze parametry, wpływające na jakość uszczelnienia, zostały w pewien sposób zwiększone lub zoptymalizowane, wprowadzając nowe lub modyfikując standardowe konstrukcje rozwiązań uszczelnień, co zaprezentowałem w pracach od A1 do A3.

W pracy A1 *„A new solution of the semi-metallic gasket increasing tightness level"* skupiłem się na zwiększeniu szczelności i powrotu sprężystego uszczelnienia wielokrawędziowego pokrytego ekspandowanym grafitem. Podjęcie tego tematu wynikało głównie z analizy pracy[1], w której stwierdzono, że zbyt sztywne uszczelnienie wpływa bardzo niekorzystnie na pracę połączenia kołnierzowo-śrubowego. Jednym z takich niekorzystnych efektów jest nadmierna deformacja kołnierzy, która nasila się wraz ze wzrostem napinania śrub. Im sztywność uszczelnienia jest większa tym deformacja kołnierzy wzrasta. W skutek tego zmniejsza się powierzchnia styku uszczelnienia, co w konsekwencji powoduje wzrost wycieku. W pracy A1 zaproponowałem i przeanalizowałem nowe rozwiązanie konstrukcji uszczelnienia wielokrawędziowego (według patentu P1 - „Rdzeń uszczelnienia wielokrawędziowego" – mojego autorstwa), charakteryzujące się zwiększoną elastycznością oraz zwiększonym powrotem sprężystym. Oba te parametry bezpośrednio wpłynęły na zwiększenie szczelności połączenia kołnierzowo-śrubowego. W sposób eksperymentalny oraz numeryczny przeanalizowałem warunki pracy trzech konstrukcji uszczelnienia wielokrawędziowego. Obiektem referencyjnym było standardowe uszczelnienie wielokrawędziowe z nakładkami wykonanymi z grafitu ekspandowanego. Bazując na tym rozwiązaniu zaproponowałem dwie modyfikacje konstrukcji, które polegały na odpowiednim ukształtowaniu przekroju metalowego rdzenia, zmniejszając jego sztywność. Pierwsza modyfikacja polegała na symetrycznym podcięciu bocznych ścian rdzenia. Druga modyfikacja posiadała podcięcie tylko na zewnętrznej powierzchni ściany bocznej. W pierwszej części pracy przeprowadziłem badania eksperymentalne polegające na pomiarze szczelności trzech wyżej wspomnianych

[1] Bouzid A, Derenne M., Distribution of the gasket contact stress in bolted flanged connections. Journal of Pressure Vessel and Piping, 1997; 354: 185-193.

Jaszak

rozwiązań konstrukcji uszczelnienia. Badania prowadziłem na stanowisku składającym się ze złącza kołnierzowo-śrubowego z uszczelnieniem, z odpowiednio kontrolowanym naciągiem śrub oraz spektrometrycznym pomiarem wycieku. Program badawczy zakładał przeprowadzenie pomiarów szczelności złącza z danym uszczelnieniem przy różnym poziomie obciążenia (napięcia śrub). Obciążenie to wywoływałem poprzez dokręcanie i odkręcanie nakrętek. Wyniki pomiarów wykazały, że modyfikowane rozwiązania konstrukcji rdzenia znacząco poprawiają szczelność połączenia (nawet o rząd wielkości) w stosunku do rozwiązania referencyjnego (standardowego). Ponadto, okazało się, że wariant konstrukcji z symetrycznym nacięciem rdzenia wykazał nieco mniejszą szczelność w stosunku do wariantu z zewnętrznym podcięciem. Przy maksymalnie stosowanym obciążeniu wynikającym z napięcia pojedynczej śruby, uszczelnienie referencyjne (standardowe) uzyskało szczelność na poziomie $4.7 \cdot 10^{-5}$ mg/s·m podczas gdy szczelność uszczelnienia z niesymetrycznym i symetrycznym podcięciem wyniosła odpowiednio $4.1 \cdot 10^{-6}$ mg/s·m i $1.1 \cdot 10^{-5}$ mg/s·m. W dalszej części przeprowadziłem obliczenia numeryczne bazując na metodzie elementów skończonych, odzwierciedlając warunki panujące podczas badań eksperymentalnych. Model złącza rozpatrywałem w trzech konfiguracjach różniących się konstrukcją rdzenia uszczelnienia. Wyniki tych obliczeń pozwoliły na wyznaczenie rozkładu nacisku na styku powierzchni uszczelnienia z przylgami kołnierzy. Zaobserwowałem, że modyfikowany rdzeń uszczelnienia znacząco poprawia równomierność rozkładu nacisku stykowego w kierunku obwodowym i promieniowym, co bezpośrednio przyczyniło się do zwiększenia efektywnej powierzchni styku uszczelnienia. Bazując na ilościowej ocenie uzyskanych wyników obliczeń numerycznych stwierdziłem, że obszar równomierności rozkładu nacisku stykowego w uszczelnieniach z modyfikowanym rdzeniem znacząco wzrósł w stosunku do rdzenia standardowego. W przypadku uszczelnienia z symetrycznym podcięciem obszar ten stanowił około 30% szerokości uszczelnienia podczas gdy w uszczelnieniu z zewnętrznym podcięciem rdzenia, obszar ten zajmował ponad 70%. W przypadku uszczelnienia standardowego obszar ten wynosił około 20%. Obszary zajmowane przez równomierny rozkład nacisku przyjąłem jako efektywną szerokość uszczelnienia. Dalsza analiza wykazała, że zdecydowany wzrost szczelności uszczelnienia z zewnętrznym podcięciem rdzenia może być wynikiem przeniesienia się strefy wyższego nacisku na wewnętrzną stronę uszczelnienia (odwrotnie niż miało to miejsce w przypadku standardowego rozwiązania). W celu próby wyjaśnienia tego efektu przeprowadziłem analizę wpływu położenia czynnej szerokości uszczelnienia (czyli strefy o równomiernym nacisku) na wartość wycieku. Analizę przeprowadziłem w oparciu o model Darcy'ego, odwzorowujący wyciek płynu ze złoża porowatego w postaci pierścienia. Parametrami wprowadzonymi do tego modelu były wyznaczone na podstawie obliczeń numerycznych promienie (wewnętrzny i zewnętrzny) determinujące położenie strefy o równomiernym rozkładzie nacisku na powierzchni uszczelniającej. Na podstawie tak przyjętej metody ustaliłem, że bardziej korzystnym przypadkiem ulokowania strefy równomierności nacisku jest ta znajdująca się bliżej powierzchni wewnętrznej uszczelnienia.

Ważniejsze wnioski z tej pracy można przedstawić w następujący sposób:

- Sztywność uszczelnienia wielokrawędziowego znacząco wpływa na rozkład nacisku na powierzchni styku uszczelnienia z uszczelnianymi powierzchniami.
- Efektywną szerokość uszczelnienia można skojarzyć ze strefą, w której występuje równomierny rozkład nacisku stykowego.

Jasek

- O intensywności wycieku decyduje obszar zajmowany przez strefę o równomiernym rozkładzie nacisku stykowego oraz jej położenie względem nominalnej szerokości uszczelnienia. Im położenie strefy o równomiernym nacisku stykowym znajduje się bliżej wewnętrznej średnicy uszczelnienia tym wyciek maleje.
- Modyfikując przekrój rdzenia uszczelnienia można w sposób konstrukcyjny wpływać na wielkość obszaru i położenie efektywnej szerokości uszczelnienia, regulując w ten sposób intensywność wycieku.
- Niesymetryczne podcięcie rdzenia uszczelnienia czyli podcięcie po stronie jego średnicy wewnętrznej wpłynęło na powiększenie efektywnej szerokości uszczelnienia (zajmującej ponad 70% szerokości nominalnej) oraz zwiększyło szczelność dziesięciokrotnie w stosunku do rozwiązania standardowego.

Kontynuując problematykę wyżej opisanego zagadnienia, w pracy A2 „*The elastic serrated gasket of the flange bolted joints*" podjąłem temat jakościowego wyjaśnienia efektu zwiększonej szczelności uszczelnienia wielokrawędziowego z rdzeniem modyfikowanym. Postępem w tej pracy, w stosunku do prezentowanych wyników badan zawartych w pracy A1, był bardziej dokładnie odzwierciedlony kształt uszczelnienia w modelu numerycznym. Uszczegółowienie modelu numerycznego polegało na zamodelowaniu ząbkowanych powierzchni rdzenia (w pracy A1 powierzchnię czołową rdzenia zamodelowałem jako płaską). Tylko w ten sposób można było wyznaczyć bardziej zbliżony do rzeczywistego rozkład nacisku na powierzchni styku kołnierzy z uszczelnieniem. Ponadto w pracy przedstawiłem i przeanalizowałem właściwości sprężyste i uszczelniające grafitu ekspandowanego, stanowiącego pokrycie powierzchni czołowych rdzenia uszczelnienia. Badania eksperymentalne warstwy grafitowej pozwoliły ustalić istotną zależność, a mianowicie iż przy pewnej wartości odkształcenia (tj. około 77%) jej przepuszczalność ustala się na stałym poziomie wynoszącym $1{,}05 \cdot 10^{-18}$ m^2. Wyznaczone w sposób numeryczny mapy rozkładu nacisku i odkształcenia na powierzchni uszczelnienia, pozwoliły wyznaczyć strefy, w których warstwa grafitu odkształca się powyżej 77%. Strefy te przyjąłem jako efektywną szerokość uszczelnienia. Po przyjęciu powyższej zależności ustaliłem, że strefa efektywnej szerokości uszczelnienia ze standardowym rdzeniem wynosi około 10% w stosunku do szerokości nominalnej. W przypadku uszczelnienia z rdzeniem symetrycznie podciętym i podciętym na zewnętrznej powierzchni, efektywna szerokość zajmowała odpowiednio 20% i 60% szerokości nominalnej uszczelnienia. Po przyjęciu termodynamicznych parametrów czynnika badawczego (helu), a także wyznaczonej efektywnej szerokości uszczelnienia, obliczyłem wyciek w oparciu o równanie Darcy'ego dla trzech analizowanych konstrukcji uszczelnienia. Zestawienie wycieków obliczonych modelem Darcy'ego z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie wykazały bardzo dobrą korelację (Maksymalne odchylenie pomiędzy tym modelem a wynikami uzyskanymi z badań eksperymentalnych nie przekraczało 10 procent).

Ważniejsze wnioski z tej części pracy można przedstawić w następujący sposób:

- Badanie grafitu ekspandowanego stanowiącego zewnętrzne pokrycie powierzchni uszczelnienia wykazały, że przy odkształceniu 77% jej przepuszczalność ustala się na poziomie $1{,}05 \cdot 10^{-18}$ m^2.

Jaszdr

- Strefę rozkładu nacisku stykowego na powierzchni uszczelnienia, w których warstwa grafitu odkształciła się powyżej 77% można potraktować jako efektywną powierzchnią uszczelnienia.
- Zastosowanie modelu Darcy'ego w powiązaniu z wyznaczoną efektywną szerokością uszczelnienia, oraz termodynamicznymi parametrami uszczelnianego płynu daje bardzo dobre odwzorowanie ilości wycieku w stosunku do wartości wyznaczonych eksperymentalnie.

Odmienny rodzaj konstrukcji uszczelnienia semi-metalowego, stanowi rozwiązanie przedstawione w opisie patentowym P2 mojego autorstwa („*Uszczelnienie metaloplastyczne połączeń kołnierzowo-śrubowych*"). Wyniki pracy związane z optymalnym zaprojektowaniem tego rozwiązania zaprezentowałem w pracy A3 „*Optimized design of a semimetal gasket operating in flange-bolted joints*". Idea tego rozwiązania polegała głównie na zwiększeniu powrotu sprężystego uszczelnienia czyli parametru, który ma decydujące znaczenie w przypadku gdy złącze kołnierzowo-śrubowe poddane jest zmiennemu obciążeniu w czasie eksploatacji. W pierwszej części pracy przeprowadziłem analizę wpływu sztywności uszczelnienia na rozkład obciążenia śrub złącza oraz na zacisk resztkowy powierzchni uszczelniającej. Z analizy tej wynikało, że optymalne rozwiązanie konstrukcji uszczelnienia powinno charakteryzować się niską sztywnością osiową, oraz wysokim powrotem sprężystym. Wszystkie obecnie stosowane materiały uszczelniające wykazują bardzo dużą nieliniowość w relacji naprężenia od odkształcenia. Ponadto wykazują też dużą plastyczność, która jest cechą pożądaną ze względu na zdolność do wypełniania nierówności uszczelnianych powierzchni lecz w trakcie eksploatacji, większe odkształcenie plastyczne wpływa na zmniejszenie powrotu sprężystego uszczelnienia. Relację pomiędzy odkształceniem sprężystym, plastycznym i powrotem sprężystym wyznacza się na podstawie charakterystyki ściskania uszczelnienia. Charakterystyka ta przedstawia zapis relacji nacisku wywartego na powierzchnię uszczelnienia w funkcji odkształcenia. Zapis relacji nacisku stykowego od odkształcenia uszczelnienia podczas pierwszej próby obciążenia zwany jest powszechnie krzywą obciążenia. W przypadku zmniejszania obciążenia zapis tej relacji nazywany jest krzywą odciążenia. Im uszczelnienie wykazuje większą plastyczność tym krzywa odciążenia w większym stopniu odchyla się od krzywej obciążenia (większy stopień rozproszenia energii) czego efektem jest większe odkształcenie trwałe. To z kolei pociąga za sobą zmniejszenie powrotu sprężystego. Na podstawie graficznej prezentacji wpływu sztywności uszczelnienia na powrót sprężysty wykazałem, że optymalne rozwiązanie uszczelnienia powinno cechować się małym kątem pochylenia krzywej odciążenia względem osi odciętych na charakterystyce siła-przemieszczenie zwaną dalej charakterystyką sztywności. Bazując na zaproponowanej nowej konstrukcji uszczelnienia, przeprowadziłem jego optymalizacje. Parametryczny model optymalizacji konstrukcji uszczelnienia wiązał ze sobą geometryczne relacje opisujące kształt rdzenia uszczelnienia z otrzymywaną w sposób numeryczny charakterystyką sztywności. Jako funkcję celu optymalnej konstrukcji przyjąłem minimalny kąt odchylenia krzywej odciążenia od osi odciętych charakterystyki sztywności. Aparat optymalizacji zakładał też pewne ograniczenia, wynikające z nieprzekroczenia dopuszczalnych, granicznych wartości naprężenia materiału metalowego rdzenia oraz grafitu ekspandowanego, a także uzyskania minimalnego nacisku stykowego na powierzchni uszczelniającej. Zagadnienie rozwiązywałem w sposób numeryczny bazując na metodzie elementów skończonych. Model numeryczny odzwierciedlał osiowosymetryczną geometrię uszczelnienia, usytuowaną w przestrzeni dwóch płyt

Jasde

reprezentujących powierzchnie prasy hydraulicznej, wywołującej ściskanie uszczelnienia. Na podstawie przyjętych granicznych przedziałów wartości relacji geometrycznych kształtu rdzenia, wyłoniłem siedem z pośród dwustu dziesięciu modeli konstrukcji, które spełniały narzucone ograniczenia. Na podstawie analizy rozkładu naprężenia w uszczelnieniu stwierdziłem, że zwiększenie elastyczności rdzenia powoduje przekroczenie dopuszczalnego naprężenia w jego materiale. Ostatecznie, najbardziej korzystnym rozwiązaniem okazała się konstrukcja, w której naprężenie zredukowane w graficie ekspandowanym wynosiło 48,2 MPa, w metalowym rdzeniu uszczelnienia 507,8 MPa, natomiast nacisk stykowy na powierzchni uszczelniającej wynosił 21,3 MPa. Optymalne rozwiązanie konstrukcji uszczelnienia zostało wykonane i przebadane eksperymentalnie. Uzyskana w wyniku eksperymentu charakterystyka ściskania wykazała nieznaczne różnice od tej uzyskanej w sposób numeryczny (błąd ten nie przekraczał 10 procent). Przeprowadzony test tego rozwiązania wykazał bardzo wysoką szczelność, która przy maksymalnym stosowanym obciążeniu wyniosła $3.7 \cdot 10^{-3}$ g/s·m. Także zadowalające rezultaty uzyskano w próbie odciążania (przy zmniejszaniu nacisku). Przy poziomie odciążenia zmniejszonego do wartości 10 kN uszczelnienie wykazało szczelność na poziomie $1 \cdot 10^{-1}$ g/s·m.

Ważniejsze wnioski z tej pracy można przedstawić w następujący sposób:

- Właściwe ukształtowanie rdzenia uszczelnienia ma zasadniczy wpływ na jego elastyczność, a także na ilość pochłanianej i rozpraszanej energii, która determinuje poziom odkształcenia plastycznego i powrotu sprężystego.
- Nadmierny wzrost elastyczności uszczelnienia prowadzi do wzrostu naprężenia w rdzeniu metalowym.
- Optymalna konstrukcja uszczelnienia zapewniła umiarkowane naprężenie w graficie ekspandowanym (48,2 MPa) oraz w rdzeniu metalowym (507,8 MPa), ale co ważniejsze przy maksymalnym stosowanym ściśnięciu, wynoszącym 3 mm, nacisk na powierzchni uszczelniającej wyniósł 21,3 MPa.
- Wyniki badań eksperymentalnych optymalnego rozwiązania uszczelnienia wykazały, że charakterystyka sztywności otrzymana z obliczeń numerycznych nieznacznie różni się od charakterystyki wyznaczonej eksperymentalnie. Te różnice mogą być spowodowane przez zastosowanie w modelu numerycznym izotropowego modelu materiału grafitu ekspandowanego, w którym wprowadzono (orientacyjną, bazując na tematycznie powiązanych pracach naukowych) wartość modułu sprężystości.

Modelowanie właściwości sprężystych materiałów stosowanych w uszczelnieniach semi-metalowych.

Tematyka podjęta w pracach A4 i A5 wynikała głównie z problemów dotyczących numerycznego modelowania materiałów uszczelnień wykazujących nieliniowe właściwości sprężysto-plastyczne. W większości przypadków, modelując materiał uszczelniający z wykorzystaniem programów obliczeniowych takich jak ANSYS lub ABAQUS, użytkownik korzysta z przyjętego modelu materiału typu „GASKET". Zdefiniowanie takiego modelu wymaga wprowadzenia eksperymentalnie wyznaczonej charakterystyki opisującej relacje pomiędzy naprężeniem a odkształceniem uszczelnienia, zwaną dalej charakterystyką ściskania. Model ten ma jednak pewne ograniczenia, ponieważ geometria przekroju uszczelnienia musi

Jaszcz

być w kształcie prostokątnym. Do modelowania właściwości sprężysto-plastycznych grafitu ekspandowanego, stanowiącego nakładki na czołowych powierzchniach w uszczelnieniu wielokrawędziowym wykorzystanie modelu „GASKET" jest najbardziej odpowiednim rozwiązaniem. Problem pojawia się w przypadku modelowania bardziej złożonych geometrii, chociażby takiej jaką posiada profil taśmy materiału wypełniającego w uszczelnieniu spiralnym. Do zdefiniowania takiej geometrii wspomniany powyżej model „GASKET" nie ma zastosowania. W większości prac dotyczących modelowania numerycznego uszczelnień spiralnych, m.in. w pracy[2] przyjęto, że grafit ekspandowany można potraktować jako materiał izotropowy o sprężystych właściwościach liniowych. Niemniej jednak w dalszym ciągu pojawia się problem dotyczący przyjęcia odpowiedniej uśrednionej wartości modułu elastyczności. Jak wspomniano wcześniej relacja naprężenia od odkształcenia materiałów uszczelniających jest nieliniowa. Zatem problemem staje się znalezienie i zaproponowanie sposobu wyznaczania uśrednionej wartości modułu elastyczności grafitu ekspandowanego w przedziale rozpatrywanego poziomu odkształcenia. W pracy A4 „*Modeling of the elastic properties of compressed expanded graphite - A material used in spiral wound gaskets*" zaproponowałem pięć sposobów wyznaczenia uśrednionej wartości modułu elastyczności grafitu ekspandowanego. Każdy z pięciu proponowanych sposobów znalezienia uśrednionej wartości bazował na eksperymentalnie wyznaczonej charakterystyce ściskania grafitu ekspandowanego. Pierwszy ze sposobów (Metoda A) polegał na przyjęciu, iż średnią wartość modułu elastyczności wyznacza stosunek maksymalnego nacisku stykowego (otrzymanego z charakterystyki ściskania) do maksymalnego odkształcenia. W drugim sposobie (Metoda B) uśrednioną wartość modułu elastyczności obliczyłem na podstawie średniej arytmetycznej stosunku nacisku do odkształcenia, obliczonych w dziesięciu punktach równomiernie rozłożonych w przedziale maksymalnego odkształcenia. W trzecim sposobie (Metoda C) średnią wartość modułu elastyczności obliczyłem jako pochodną funkcji opisującej linię krzywą na charakterystyce ściskania w punkcie maksymalnego odkształcenia, podzieloną przez dwa. W czwartym sposobie (metoda D) uśrednienie wartości modułu elastyczności, w pierwszej kolejności polegało na zastąpieniu pola powierzchni znajdującego się pod krzywą charakterystyki ściskania grafitu, na równoważne mu pole trójkąta o boku równym maksymalnemu odkształceniu. Na podstawie otrzymanego w ten sposób trójkąta, wartość średnią modułu elastyczności obliczyłem jako stosunek pionowego boku trójkąta do poziomego boku. W piątym sposobie (metoda E) wartość średnią modułu elastyczności obliczyłem jako stosunek nacisku do odkształcenia, których współrzędne wynikały ze środka ciężkości figury wyznaczonej przez krzywą na charakterystyce ściskania oraz linię przechodzącą przez początkowy i końcowy punkt tej krzywej. Odmiennym sposobem modelowania grafitu, prezentowanym w tej pracy było wykorzystanie hiper-sprężystego modelu materiału Blatz-Ko. Idea wykorzystania tego modelu wynikała bezpośrednio z podobieństwa pewnych właściwości mechanicznych grafitu do poliuretanu o wysokim stopniu spienienia, dla którego model Blatz-Ko znajduje zastosowanie. Ponadto zaletą wykorzystania modelu Blatz-Ko jest to, że wymaga on jedynie zdefiniowania jednego parametru, którym jest moduł odkształceń poprzecznych Kirchhoffa. Na podstawie obliczeń numerycznych ustaliłem, że dla rozpatrywanej charakterystyki ściskania ekspandowanego grafitu, model Blatz-Ko daje najlepsze odwzorowanie po przyjęciu wartości modułu Kirchhoffa równej 15 MPa. Wartość tego parametru oraz uśrednione wartości modułu elastyczności otrzymane na podstawie pięciu

[2] G. Mathan, N. Siva Prasad, Evaluation of effective material properties of spiral wound gasket through homogenization, Int. J. Pres. Ves. Pip. 87 (2010) 704–713.

Jarzd

wyżej opisanych metod, zastosowałem w symulacji ściskania uszczelnienia spiralnego, którą przeprowadziłem przy użyciu metody elementów skończonych. Na podstawie porównania danych otrzymanych z symulacji z eksperymentalnie wyznaczoną charakterystyką ściskania uszczelnienia spiralnego stwierdziłem, że najlepszym odwzorowaniem właściwości sprężystych grafitu jest model Blatz-Ko. Średni, maksymalny i minimalny względny błąd wyniku numerycznego od danych eksperymentalnych dla tego modelu wyniósł odpowiednio 24,4%, 69,6% oraz 0%. Drugim ze sposobów zamodelowania grafitu, dającego najlepsze przybliżenie do danych eksperymentalnych było zamodelowanie grafitu z uśrednioną wartością modułu elastyczności otrzymaną z metody E. Średni, maksymalny i minimalny błąd względny w tym przypadku wyniósł odpowiednio 23,3%, 72,1% i 6,23%.

Ważniejsze wnioski z tej pracy można przedstawić następująco:

- Najbardziej dokładnym sposobem zamodelowania sprężystych właściwości grafitu ekspandowanego okazało się użycie hiper-sprężystego modelu materiału Blatz-Ko. Na podstawie obliczeń numerycznych wykazałem, że przyjęcie wartości modułu Kirchhoffa (czyli parametru tego modelu) równego 15 MPa, daje bardzo dokładne odwzorowanie charakterystyki ściskania grafitu ekspandowanego.
- Należy jednak zaznaczyć, że model Blatz-Ko nie uwzględnia zdolności do rozpraszania energii. Dlatego nie można zastosować go w przypadkach, gdy efekt rozpraszania energii odgrywa ważną rolę, szczególnie w symulacjach odkształceń dynamicznych.
- Z pośród pięciu proponowanych metod wyznaczania uśrednionej wartości modułu elastyczności ekspandowanego grafitu, metoda E okazała się najbardziej odpowiednia. Stwierdziłem to na podstawie symulacji odkształcenia uszczelnienia spiralnego, w którym izotropowe właściwości sprężyste taśmy grafitowej zostały odwzorowane uśrednioną wartością uzyskaną na podstawie tej metody. Kryterium oceny danej metody było porównanie uzyskanej w sposób numeryczny charakterystyki ściskania uszczelnienia spiralnego z charakterystyką uzyskaną eksperymentalnie.

Prezentowany model Blatz-Ko wykorzystałem także w pracy A5 „*Adaptation of a highly compressible elastomeric material model to simulate compressed expanded graphite and its application in the optimization of a graphite-metallic structure*", w której przedstawiłem wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych dotyczące optymalizacji konstrukcji uszczelnienia spiralnego z wypełnieniem w postaci grafitu ekspandowanego. Problem optymalizacji tej konstrukcji wynikał głównie z potrzeby uzyskania odpowiedniej sztywności osiowej uszczelnienia, w której nie stosuje się wewnętrznego i zewnętrznego pierścienia dystansowego. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie ASME B16.20-2012 „*Metallic Gaskets for Pipe Flanges Ring-Joint, Spiral-Wound, and Jacketed*", sztywność uszczelnienia spiralnego powinna być tak dobrana aby pod naciskiem stykowym 80 MPa uszczelnienie odkształciło się w zakresie od 15% do 20% w stosunku do początkowej grubości. Efekt założonej sztywności został osiągnięty przez odpowiednie ukształtowanie zwojów spirali. Głównymi parametrami opisującymi geometrię spirali uszczelnienia były promienie odwzorowujące kształt przekroju pojedynczego zwoju metalowej taśmy. Z pośród przyjętego zakresu zmienności tych promieni, zaproponowałem 16 wariantów konstrukcji spirali, które następnie poddałem symulacji ściskania, wykorzystując Metodę Elementów Skończonych. Do odzwierciedlenia sprężystych właściwości taśmy grafitowej, wypełniającej przestrzeń pomiędzy metalowymi zwojami, zastosowałem prezentowany w pracy A4 model Blatz-Ko. Za

Jaszcz

optymalne rozwiązanie przyjąłem takie, w którym przy odkształceniu spirali o 20 %, zredukowane naprężenie w materiale grafitowej taśmy osiągnie minimum (przyjęte minimum funkcji celu). Dodatkowo, aparat optymalizacji narzucał trzy ograniczenia zacieśniające obszar poszukiwanego rozwiązania. Pierwszym ograniczeniem było nieprzekroczenie dopuszczalnego, zredukowanego naprężenia grafitowej taśmy, wynoszące 180 MPa. Drugim z nich było uzyskanie właściwej sztywności (wiążącej nacisk stykowy i odkształcenie). Natomiast trzecie ograniczenie wynikało z zachowania monotoniczności charakterystyki ściskania spirali w pełnym zakresie odkształcenia. Na podstawie zebranych wyników badań numerycznych i ich analizy stwierdziłem, że istnieje tylko jeden wariant konstrukcji spirali, który spełnia założone minimum funkcji celu przy jednoczesnym zachowaniu narzuconych ograniczeń. Optymalne rozwiązanie konstrukcji spirali zostało wykonane i zbadane eksperymentalnie. Uzyskana na podstawie badań charakterystyka ściskania uszczelnienia została porównana z charakterystyką otrzymaną numerycznie. Na tej podstawie stwierdziłem bardzo dobrą zbieżność rozwiązania numerycznego z wynikiem uzyskanym eksperymentalnie. Błąd odchylenia charakterystyki ściskania uszczelnienia wyznaczonej metodą elementów skończonych od charakterystyki wyznaczonej eksperymentalnie był mniejszy niż 10%.

Ważniejsze wnioski z tej pracy:

- Na podstawie przeprowadzonej optymalizacji konstrukcji elementu spiralnego uszczelnienia stwierdzono, że minimalne, zredukowane naprężenie w taśmie grafitowej, oraz wymaganą sztywność spirali można osiągnąć poprzez właściwe ukształtowanie profilu przekroju metalowej taśmy.

Problemy konstrukcyjno-eksploatacyjne uszczelnień stosowanych w połączeniach kołnierzowo-śrubowych

W pracy A6 "Design method of the flange bolted joints in respect to tightness and strength", skupiłem się głównie na problemie projektowania i analizie pracy połączenia kołnierzowo-śrubowego z uszczelnieniem miękko materiałowym i semi-metalowym. W pierwszej części pracy wymieniłem aktualne algorytmy obliczeń dotyczące projektowania tego typu połączeń, opisałem podstawowe właściwości materiałów uszczelniających stanowiące niezbędne dane wyjściowe do zaprojektowania złącza o wymaganej szczelności i wytrzymałości. Z przeprowadzonej analizy literatury oraz norm międzynarodowych wynikało, że najbardziej aktualnym kodem obliczeniowym, który w procesie projektowania umożliwia analizowanie stanu wytężenia poszczególnych elementów złącza, jest ten zawarty w normie PN EN 1591-1 „Kołnierze i ich połączenia - Zasady projektowania połączeń kołnierzowych okrągłych z uszczelką - Część 1: Obliczenia". W drugiej części pracy przeprowadziłem wielowariantowe obliczenia analityczne, wykorzystując wspomniany wyżej kod obliczeniowy. Przyjęty do obliczeń model połączenia kołnierzowo-śrubowego PN63 DN100 rozpatrywałem w dwóch wariantach konstrukcyjnych, różniących się rodzajem zastosowanego uszczelnienia. Każdy z wariantów zakładał dwa projektowane poziomy szczelności, co w rezultacie dawało cztery oddzielne przypadki obliczeń. Pierwszy wariant obliczeniowy zakładał użycie uszczelnienia włóknisto-elastomerowego, zaś drugi wariant użycie uszczelnienia włóknisto-elastomerowego wewnętrznie zbrojonego metalową siatką spiczasto perforowaną. Niezbędnymi danymi do przeprowadzenia obliczeń analitycznych obu

Jasek

wariantów były właściwości materiałowe uszczelnień. Właściwości te wyznaczyłem w sposób eksperymentalny w oparciu o procedurę badawczą zawartą w normie EN PN 13555„Kołnierze i ich połączenia - Parametry uszczelek i procedury badań dotyczące zasad projektowania połączeń kołnierzowych okrągłych z uszczelką". Rezultaty tych badan pozwoliły mi na wyznaczenie charakterystyk mechanicznych oraz charakterystyk szczelności obu uszczelnień. Na podstawie obliczeń analitycznych wyznaczyłem wymaganą do zapewnienia szczelności siłę naciągu śrub i momenty dokręcenia nakrętek, deformacje kołnierzy, współczynniki bezpieczeństwa wszystkich elementów składowych złącza. W trzecim etapie pracy przeprowadziłem obliczenia numeryczne obu wariantów konstrukcji złącza wykorzystując metodę elementów skończonych. Rezultatem przeprowadzonych obliczeń numerycznych było wyznaczenie mapy rozkładu nacisku stykowego uszczelnienia, określenie poziomu jego nierównomierności w kierunku obwodowym i promieniowym, wyznaczenie maksymalnego, zredukowanego naprężenia w elementach złącza i oszacowanie wartości współczynników bezpieczeństwa, które porównałem z danymi uzyskanymi analitycznie. W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych stwierdziłem, że złącze pracujące z uszczelnieniem włóknisto-elastomerowym bez zbrojenia wykazuje mniejszą nierównomierność rozkładu nacisku w kierunku szerokości uszczelnienia. Ponadto do osiągnięcia danej klasy szczelności, złącze z uszczelnieniem bez zbrojenia wymagało mniejszego napięcia montażowego śrub w stosunku do uszczelnienia zbrojonego wewnętrznie siatką metalową. Dodatkowo przeanalizowałem w jakim stopniu w złączu zmienia się stan wytężenia jego elementów przechodząc ze stanu montażowego w stan ciśnieniowej pracy oraz w jakim stopniu zmiana tego stanu wpływa na rozkład nacisku stykowego na powierzchni uszczelniającej. Ostatnim czwartym etapem prac była eksperymentalna weryfikacja obliczeń analitycznych i numerycznych. Badania przeprowadziłem na specjalnym do tego celu stanowisku badawczym w postaci złącza kołnierzowo-śrubowego, konstrukcyjnie odpowiadającego wariantom obliczeniowym. W celu weryfikacji napięcia każdej ze śrub zastosowałem czujniki tensometryczne w układzie pełnego mostka, połączone ze wzmacniaczem tensometrycznym oraz komputerem stanowiącym akwizycje danych. Do pomiaru rzeczywistego rozkładu nacisku stykowego na powierzchni uszczelnienia wykorzystałem film pomiarowy „Fuji". Czynnikiem uszczelnianym był hel co umożliwiło zastosowanie spektrometrycznego detektora do pomiaru wycieku. Danymi wyjściowymi do uzyskania pożądanej szczelności złącza były uprzednio wyznaczone (w sposób analityczny) wartości momentów dokręcenia nakrętek. Śruby napinałem kluczem dynamometrycznym. W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdziłem bardzo dobrą korelacje pomiędzy uzyskanymi z modelu analitycznego siłami napięcia montażowego śrub i siłami zmierzonymi eksperymentalnie. Ponadto, zmierzone poziomy szczelności niewiele odbiegały od klas szczelności, które założyłem na etapie obliczeń analitycznych. Dodatkowo, otrzymany obraz z filmu pomiarowego „Fuji" w sposób zbliżony odpowiadał mapie rozkładu nacisku, którą uzyskałem na podstawie obliczeń numerycznych. Charakter tej pracy należy ocenić bardziej pod kątem usystematyzowania wiedzy dotyczącej sposobu projektowania i analizy pracy połączeń kołnierzowo-śrubowych z uszczelnieniem, sposobu zadawania obciążeń i pozyskiwania niezbędnych danych materiałowych. Charakter naukowy tej pracy można przedstawić w postaci rezultatów stanowiących informacje w jaki sposób sztywność uszczelnienia wpływa na rozkład nacisku stykowego oraz stan wytężenia poszczególnych elementów złącza.

Ważniejsze wnioski z tej pracy można przedstawić w sposób następujący:

Jaszd

- Przy tych samych projektowanych klasach szczelności (L1.0 i L0.1) złącze z uszczelnieniem zbrojonym metalową siatką wywołuje większe zróżnicowanie nacisku stykowego w kierunku promieniowym uszczelnienia, w stosunku do złącza z uszczelnieniem bez zbrojenia.
- Na podstawie obliczeń analitycznych oraz badań eksperymentalnych stwierdziłem, że do uzyskania klasy szczelności w zakresie od L1.0 do L0.1, złącze z uszczelnieniem zbrojonym wymaga wywołania większego montażowego napięcia śrub niż złącze z uszczelnieniem niezbrojonym. Z tego względu stopień wytężenia elementów złącza z uszczelnieniem zbrojonym jest wyższy w porównaniu do złącza z uszczelnieniem niezbrojonym.
- Numeryczny model złącza w powiązaniu z danymi wyznaczonymi w sposób analityczny, bardzo dobrze odwzorowuje rzeczywisty stan obciążenia złącza. Dowodem na to są eksperymentalnie zmierzone i numerycznie wyznaczone wartości naciągu śrub oraz mapy rozkładu nacisku stykowego na powierzchni uszczelnienia.

W pracy A7 "Prediction of the durability of the gasket operating in bolted-flange-joint subjected to cyclic bending" podjąłem temat oceny trwałości zmęczeniowej uszczelnienia włóknisto-elastomerowego, pracującego w złączu kołnierzowo-śrubowym poddanym cyklicznie zmiennemu obciążeniu. Obiektem badań był fragment rurociągu przemysłowego DN100 PN63 składającego się z dwóch zaślepionych odcinków rur połączonych złączem kołnierzowo-śrubowym z uszczelnieniem. Procedura badawcza polegała na wstępnym montażowym zacisku uszczelnienia, a następnie obciążeniu złącza ciśnieniem helu o wartości 20 bar i cyklicznym (odzerowo-tętniącym) zginaniu z amplitudą w zakresie od 0,2 mm do 0,6 mm. Częstotliwość wymuszenia wynosiła 10 Hz, a całkowita liczba cykli zginania złącza była równa 100 tysięcy. W trakcie badań, w sposób ciągły rejestrowałem wartość napięcia śrub (każda z ośmiu śrub posiadała indywidualny układ tensometryczny), poziom wycieku helu oraz wartość siły wymuszającej zginanie złącza, generowanej przez siłownik hydrauliczny. Pomiar siły wymuszającej zginanie złącza pozwolił wyznaczyć ilość pochłanianej i rozpraszanej w uszczelnieniu energii. Wyniki tych badań wykazały, iż wzrost amplitudy zginania rurociągu powoduje szybszy spadek napięcia śrub a także silniejszy wzrost wycieku. Ponadto wzrost amplitudy zginania przyspiesza proces stabilizacji wycieku. Zaobserwowałem, że przy większej amplitudzie odkształcenia przekroczenie klasy szczelności oraz stabilizacja wycieku zachodzi w krótszym czasie niż ma to miejsce przy mniejszych wartościach amplitudy. Na podstawie sporządzonych wykresów zapisu siły wymuszającej zginanie złącza i skojarzonej z nią ugięciem złącza stwierdziłem, iż energia rozproszona w układzie stopniowo maleje wraz ze wzrostem liczby cykli zginania. Skojarzenie zmierzonych wartości energii rozproszonej w złączu z odnotowanym poziomem wycieku pozwoliło ustalić ich ścisły związek, w którym wykazałem że region ustabilizowanie się wycieku przypada w momencie, w którym energia rozproszona w złączu wynosi około 20% energii rozproszonej podczas drugiego cyklu ugięcia złącza. Do matematycznego odzwierciedlenia ilości rozpraszanej w uszczelnieniu energii wykorzystałem analityczny model zaproponowany przez Davidenkov'a. Parametryczny opis tego modelu wymagał określenia charakterystycznych właściwości sprężystych i tłumiących materiału uszczelnienia, do których należały: logarytmiczny dekrement tłumienia drgań, uśredniona wartość lokalnego naprężenia i odkształcenia uszczelnienia w obrębie strefy ściskania. Do wyznaczenia tych właściwości skorzystałem z metody elementów skończonych. Model numeryczny odzwierciedlał badany fragment rurociągu. Na podstawie przyjętych

Jasrd

warunków brzegowych odzwierciedlających statyczny stan obciążenia złącza przy zadanej amplitudzie, wyznaczyłem uśrednioną wartość nacisku oraz odkształcenia uszczelnienia w strefie jego cyklicznego ściskania. W końcowej części pracy, przekształcając model Davidenkov'a oraz wykorzystując powiązanie stabilizacji wycieku z wartością energii rozproszonej w uszczelnieniu, zaproponowałem półempiryczną formułę określającą liczbę cykli odkształceń złącza, przy której dochodzi do stabilizacji wycieku.

Ogólne wnioski z przeprowadzonych badań i analizy można przedstawić w sposób następujący:

- Po 100 tysiącach cykli zginania, wyciek ze złącza wzrasta w stosunku do stanu początkowego.
- Szybkość wycieku wzrasta wraz ze wzrostem amplitudy zginania złącza.
- W zakresie amplitudy od 0,4 do 0,6 mm wyciek ze złącza został przekroczony nawet o rząd wielkości w stosunku do stanu montażowego.
- Spadek naciągu śrub po 100 tysiącach cykli zginania złącza jest niewielki, w skrajnym przypadku wynosi on około 10% wartości naciągu montażowego.
- Wzrost wycieku jest wynikiem uszkodzenia wewnętrznej i zewnętrznej struktury uszczelnienia, spowodowanego cyklicznie zmiennym obciążeniem.
- Wraz ze wzrostem cykli zginania złącza, zdolność do rozpraszania energii w materiale uszczelnienia maleje, o czym świadczy stopniowa redukcja i stabilizacja obszaru pętli histerezy materiału uszczelnienia.
- Liczba cykli zginania złącza, przy której następuje ustabilizowanie się obszaru pętli histerezy materiału uszczelniającego, zbiega się do pewnego stopnia z liczbą cykli, przy której następuje stabilizacja wycieku.
- Stabilizacja wycieku i stabilizacja obszaru pętli histerezy pojawiają się mniej więcej w chwili, w której energia rozpraszana w materiale uszczelnienia wynosi około 20 procent energii rozproszonej podczas drugiego cyklu ugięcia złącza.

Podsumowanie

Główne osiągnięcie naukowe przedstawionego zbioru prac to:

- Opracowanie sposobu wyrównywania rozkładu nacisku stykowego na powierzchni uszczelnień semi-metalowych.

- Wyjaśnienie wpływu położenia efektywnej szerokości uszczelnienia na poziom szczelności połączenia kołnierzowo-śrubowego z uszczelnieniem semi-metalowym pokrytym nakładkami wykonanymi z grafitu ekspandowanego.

- Matematyczne odwzorowanie poziomu wycieku z miękko materiałowej grafitowej warstwy uszczelnienia wielokrawędziowego w oparciu o model przecieku struktury porowatej w postaci pierścienia.

- Opracowanie autorskich metod wyznaczania średniej wartości modułu elastyczności grafitu ekspandowanego, bazujących na eksperymentalnie wyznaczonej charakterystyce ściskania tego materiału.

Jasnde

- Wyjaśnienie wpływu amplitudy i liczby cykli zginania rurociągu na poziom szczelności połączenia kołnierzowo-śrubowego z uszczelnieniem miękko materiałowym.

- Opracowanie matematycznego modelu przedstawiającego zależność pomiędzy liczbą cykli i amplitudą zginania rurociągu a stabilizacją poziomu szczelności połączenia kołnierzowo-śrubowego z uszczelnieniem miękko materiałowym.

5. **Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

W roku 2012 odbyłem dwumiesięczny staż naukowy w zagranicznym ośrodku badawczym Center of Sealing Technologies, działającym przy Wydziale Fizyki Stosowanej na Uniwersytecie FH Münster, Niemcy. W trakcie tego stażu prowadziłem badania eksperymentalne materiałów uszczelniających stosowanych w połączeniach kołnierzowo-śrubowych pracujących warunkach temperatury pokojowej jak i podwyższonej. Głównym celem tych badań było wyznaczenie właściwości sprężysto-plastycznych, reologicznych (określenie stopnia relaksacji i pełzania materiału uszczelniającego) oraz poziomu szczelności w funkcji stosowanego nacisku stykowego. Wyniki tych prac przedstawiłem na dwóch zagranicznych referatach konferencyjnych:

- Gawliński M., **Jaszak P.**, Leakage from the bolted flanges subjected to vibrations. Sealing systems: challenges for the future : 17th ISC International Sealing Conference, Stuttgart, Germany, September 13-14, 2012. Frankfurt am Main : Fachverband Fliudtechnik im VDMA, cop. 2012. s. 254-268.

- **Jaszak P.**, Gawliński M., Modellierung der Arbeit von statischen Dichtungen für Flanschverbindungen. W: Sichere und zuverlässige Dichtverbindungen : XVIII. Dichtungskolloquium in Rhein am 25./26. September 2013 / Alexander Riedl (Hrsg.). Essen : Vulkan Verlag, cop. 2013. s. 35-50.

W roku 2021 podjąłem współpracę z Katedrą Mechaniki Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie oraz z Katedrą Budowy i Eksploatacji Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej. Tematyka wspólnie prowadzonych prac dotyczyła modelowania wpływu ugięcia rurociągu przemysłowego na szczelność i rozkład nacisku stykowego (na powierzchni uszczelnienia) oraz na stopień obciążenia śrub złącza kołnierzowo śrubowego. Wyniki tej pracy przedstawiono w publikacji:

- **Jaszak P.**, Skrzypacz J., Borawski A., Grzejda R., Methodology of leakage prediction in gasketed flange joints at pipeline deformations. Materials. 2022, vol. 15, nr 12, art.

Jaszak

4354, pp. 1-17, DOI: 10.3390/ma15124354, (LF, IF= 3.748, punktacja MNiSW (2019-2021): 140.

Mój wkład w przygotowanie tej pracy polegał na opracowaniu modelu numerycznego i wykonaniu obliczeń oraz interpretacji uzyskanych wyników. Ponadto zaproponowałem sposób szacowania wycieku w warunkach nierównomiernego rozkładu nacisku stykowego (na powierzchni uszczelnienia), który intensyfikował się podczas wzrostu ugięcia rurociągu. Zaproponowany model numeryczny oraz sposób szacowania wycieku zostały zweryfikowane eksperymentalnie, na zaprojektowanym przeze mnie stanowisku badawczym.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Moja działalność dydaktyczna skupia się wokół prowadzenia wykładów oraz ćwiczeń projektowych takich przedmiotów jak: podstawy konstrukcji maszyn, podstawy konstrukcji maszyn i urządzeń energetycznych, rysunek techniczny maszynowy, grafika inżynierska, modelowanie 3D w systemie CATIA, zintegrowane systemy produkcji, integrated production systems - wykład i laboratoria w języku angielskim. Od 2020 roku realizuje swój autorski wykład teoria systemów i mechanizmów. Jestem promotorem 21 prac dyplomowych w tym 14 magisterskich i 7 inżynierskich. Jedna z tych prac („Research of the gaskets used in flange joint in cryogenic temperatures") uzyskała nagrodę w konkursie prac dyplomowych (im. Prof. Romana Sobolskiego) organizowanym przez Stowarzyszenie Inżynierów i Mechaników Polskich.

Od 2021 roku prowadzę opiekę merytoryczną nad realizacją pracy doktorskiej w charakterze promotora pomocniczego. Temat realizowanej pracy doktorskiej (wdrożeniowej) to „Analiza wpływu kształtu taśmy stalowej i miękko-materiałowej w uszczelnieniu spiralnym na szczelność i wytrzymałość połączenia kołnierzowo-śrubowego w funkcji obciążenia". W głównej mierze praca ta dotyczy optymalizacji konstrukcji (uszczelnienia spiralnego z wypełnieniem PTFE), której zasadniczą funkcją celu jest poprawa równomierności nacisku stykowego w obszarze uszczelnianych powierzchni złącza kołnierzowo-śrubowego. W załączniku nr 4 przedstawiłem oświadczenie Rektora PWr o przyznaniu mi opieki (w charakterze promotora pomocniczego) nad realizacją wyżej wskazanej pracy doktorskiej.

W latach 2020 i 2021 otrzymałem nagrody w ramach programów „Primus" i „Secundus" wprowadzonych na Politechnice Wrocławskiej, których celem było promowanie doskonałości naukowej, skierowane do osób wyróżniających się aktywnością publikacyjną oraz realizujących projekty badawcze w swoich dyscyplinach naukowych.

Jaszak

W latach 2020 oraz 2022 otrzymałem nagrodę Rektora PWr za całokształt działalności.

W roku 2022 odbyłem szkolenie świadomościowe, którego celem było przygotowanie kadry nauczycielskiej Politechniki Wrocławskiej do prowadzenia i organizacji zajęć dydaktycznych dla studentów o różnym stopniu niepełnosprawności.

W roku 2016 odbyłem uczelniany kurs dydaktyka szkoły wyższej, którego celem było wzmocnienie kompetencji nauczycieli akademickich w obszarach: metodyki nauczania przedmiotowego, sztuki autoprezentacji i wystąpień publicznych, psychologii grupy, etyki w nauce i dydaktyce oraz emisji głosu.

Swoją działalność naukowo-techniczną wzbogacam także uczestnictwem w Stowarzyszeniu Inżynierów i Mechaników Polskich (SIMP). W okresie od 2017 do 2022 pełniłem funkcję sekretarza sekcji Uszczelnień i Techniki Uszczelniania, działającej przy SIMP oddziału głównego. Od 2022 roku, decyzją Zarządu Sekcji Uszczelnień i Techniki Uszczelniania, pełnię funkcje prezesa zarządu tej sekcji.

W latach 2016 i 2018 byłem członkiem komitetu organizacyjnego, cyklicznie odbywającej się od 1977 roku Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „SealConf". W ramach tej działalności byłem odpowiedzialny za prowadzenie sesji tematycznie związanej z uszczelnieniami stosowanymi w połączeniach kołnierzowo-śrubowych.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Poza prezentowanym w niniejszym wniosku osiągnięciem naukowym moja działalność naukowo-badawcza skupia się wokół niżej wymienionych obszarów:

a) Badania materiałów stosowanych na uszczelnienia statyczne,
b) Badania, projektowanie oraz optymalizacja konstrukcji elementów armatury przemysłowej,
c) Projektowanie oraz optymalizacja konstrukcji systemów i urządzeń kriogenicznych.

Badania materiałów stosowanych na uszczelnienia statyczne

Od roku 2010 jestem członkiem grupy badawczej Laboratorium Techniki Uszczelniania i Armatury działającej przy Politechnice Wrocławskiej. W ramach działań tego laboratorium aktywnie uczestniczę w wielu zleceniach przemysłowych i projektach badawczych. Do większych zrealizowanych tematów można tu zaliczyć:

- Kierowanie pracami w zespole badawczym przy realizacji projektu B+R dofinansowanego ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Temat projektu „Opracowanie innowacyjnych rozwiązań konstrukcji uszczelnień semimetalowych, o zwiększonych parametrach użytkowo-funkcjonalnych, w oparciu o zintegrowane techniki komputerowego wspomagania

Jarosh

projektowania", którego beneficjentem była firma LeaderTech LTD Sp. z o.o. W ramach tego projektu byłem odpowiedzialny m.in. za wykonywanie obliczeń numerycznych (Metodą Elementów Skończonych) prototypowej konstrukcji uszczelnienia spiralnego z modyfikowaną taśmą stalową, opracowanie planu eksperymentu, wykonanie badań eksperymentalnych optymalnej konstrukcji uszczelnienia, opracowanie współautorskiego programu komputerowego do projektowania oraz analizy pracy połączenia kołnierzowo-śrubowego z uszczelnieniem, opracowanie i edycję raportów cząstkowych z poszczególnych etapów prac badawczych.

- Badania dotyczące wyznaczenia współczynników obliczeniowych uszczelnień spiralnych z wypełnieniem grafitowym. Badanie dotyczyło określenia podstawowych właściwości mechanicznych i uszczelniających, bazując na normie EN-PN 13555 „*Kołnierze i ich połączenia - Parametry uszczelek i procedury badań dotyczące zasad projektowania połączeń kołnierzowych okrągłych z uszczelką*". Otrzymane w wyniku badań współczynniki obliczeniowe stanowią niezbędne dane służące do projektowania połączeń kołnierzowo-śrubowych według kodu obliczeniowego PN-EN 1591-1 (*Kołnierze i ich połączenia - Zasady projektowania połączeń kołnierzowych okrągłych z uszczelką - Część 1: Obliczanie*) oraz kodu obliczeniowego wg amerykańskiego ASME „*Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII, Division 1*". Badania wykonano na zlecenie firmy Grupa Azoty i zrealizowane były we współpracy z laboratorium badań materiałów uszczelniających firmy SPETECH. Mój udział w tym projekcie polegał na opracowaniu, interpretacji i analizie otrzymanych danych oraz przygotowaniu raportu. Wyniki pracy zostały przedstawione w materiale niepublikowanym – poz.68 załącznika nr 1.
- Badania dotyczące określenia odporności chemicznej materiałów stosowanych na uszczelnienia statyczne pracujące w środowisku biopaliw drugiej generacji oraz paliw lotniczych. Badania wykonano na zlecenie firmy GAMBIT Lubawka Sp. z o. o. Przedmiotem badań były dwa rodzaje uszczelnień wykonanych z płyt włóknisto-elastomerowych na bazie kauczuków NBR i HNBR. Badania te prowadzono zgodnie z normą DIN 28090-3:2014-11 „*Static gaskets for flange connections - Gaskets made from sheets - Part 3: Chemical resistance test procedures*". Polegały one na sprawdzeniu odporności chemicznej danego uszczelnienia na działanie biopaliw drugiej generacji oraz wybranych paliw lotniczych.
- Badania uszczelnień statycznych pracujących w temperaturze ciekłego azotu. Początkowo temat tych badań wynikał z zakresu realizacji pracy magisterskiej mojego dyplomanta. W ramach tej pracy zostało zaprojektowane i wykonane oryginalne stanowisko badawcze, umożliwiające spektrometryczny pomiar szczelności złącza kołnierzowo-śrubowego schłodzonego do temperatury ciekłego azotu. W ramach tej pracy przebadano uszczelnienia semi-metalowe (spiralne i wielokrawędziowe) z wypełnieniem grafitowym i PTFE. Opis konstrukcji stanowiska, metody badań oraz analiza i interpretacja otrzymanych wyników zostały przedstawione w pracy opublikowanej – poz. 14 załącznika nr 1. Także na tym stanowisku w oparciu o przyjętą metodę badawczą wykonano badania na zlecenie firmy GAMBIT Lubawka Sp. z o. o.

Jarek

Badanie dotyczyło wyznaczenia odporności na niską temperaturę uszczelnienia włóknisto-elastomerowego, pracującego w warunkach ciekłego azotu.

Badania, projektowanie oraz optymalizacja konstrukcji elementów armatury przemysłowej

W ramach prac związanych z działalnością Laboratorium Techniki Uszczelniania i Armatury zaangażowany byłem także w tematy związane z zagadnieniami dotyczącymi badań, projektowania i optymalizacji konstrukcji armatury przemysłowej. Do ważniejszych działań z tego obszaru można zaliczyć:

- Członkostwo w zespole badawczym realizującym projekt B+R dofinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekt w ścieżce programowej IN-TECH „*Opracowanie przez Konsorcjum ZETKAMA S.A. i Politechniki Wrocławskiej innowacyjnej koncepcji produktowych zaworów balansowych statycznych, armatury staliwnej zaporowej oraz armatury sterowanej*". Mój wkład w ten projekt polegał głównie na optymalizacji konstrukcji gumowych membran zaworów i wykonaniu badań trwałościowych tych zaworów. W pierwszej części badań wykonałem obliczenia numeryczne wielu wariantów konstrukcyjnych membran co pozwoliło wybrać rozwiązanie najbardziej optymalne pod względem wytrzymałości oraz szczelności. W drugiej części byłem zaangażowany w badania eksperymentalne dotyczące wyznaczenia trwałości tych membran. Wyniki tych prac zostały przedstawione w materiale niepublikowanym - poz. 82 załącznika nr 1 oraz w pracy opublikowanej – poz. 13 załącznika nr 1.
- Kierowanie pracami w zespole badawczym przy realizacji projektu B+R dofinansowanego ze środków UE w ramach programu operacyjnego Inteligentny Rozwój, 2014-2020. Temat projektu: „*Opracowanie innowacyjnego kompensatora gumowego w klasie ciśnieniowej 25 bar*", którego beneficjentem była firma Gambit Lubawka Sp. z o. o. W ramach tego projektu wykonywałem prace polegające na: analizie istniejących rozwiązań konstrukcji kompensatorów gumowo-metalowych, określeniu ich parametrów użytkowych, przeglądzie dostępnych na rynku materiałów konstrukcyjnych, wykonaniu obliczeń numerycznych uwzględniających wielowariantową analizę stanu obciążenia kompensatora, wykonaniu dokumentacji technicznej, ustaleniu parametrów procesu technologicznego produkcji kompensatorów, wykonaniu prototypowej partii kompensatorów, badaniu trwałości zmęczeniowej prototypów. Mój największy udział procentowy dotyczący wyżej wymienionych działań (ponad 80 %) dotyczył wykonania obliczeń numerycznych, opracowania dokumentacji technicznej oraz przeprowadzenia badań eksperymentalnych dotyczących trwałości prototypów. Wyniki tych prac zostały przedstawione w nieopublikowanych materiałach poz. od 69 do 73 załącznika nr 1. Ponadto, część prac związana z obliczeniami numerycznymi oraz badaniami trwałościowymi została opublikowana w pozycjach 12, 16, 21, 26 załącznika nr 1 oraz dwukrotnie prezentowana (lata 2016 i 2017) na co rocznie odbywającej się przemysłowej konferencji Kongres Gumy i Kauczuków.

Jurzch

- Członkostwo w zespole badawczym realizującym projekt „*Opracowanie innowacyjnych zaworów bezpieczeństwa o unikalnej charakterystyce pracy do zastosowania w instalacjach przemysłowych*", prowadzonym we współpracy z firmą ZETKAMA R&D w Sosnowcu. W ramach tego projektu opracowałem algorytm obliczeń i napisałem program komputerowy pozwalający dobierać sprężyny śrubowe do zaworów bezpieczeństwa. Naukowym aspektem tej pracy było opracowanie sposobu szacowania wartości współczynników pełnego otwarcia oraz szczelnego zamknięcia zaworów w oparciu o zaproponowaną przeze mnie metodę energetyczną. Obliczone za pomocą programu współczynniki zostały eksperymentalnie zweryfikowane w trakcie pomiarów prowadzonych w laboratorium firmy ZETKAMA R&D w Sosnowcu. Wyniki tej pracy zostały przedstawione w materiałach niepublikowanych poz. od 50 do 53 załącznika nr 1 oraz pracy opublikowanej poz. 5 załącznika nr 1.

Projektowanie oraz optymalizacja konstrukcji systemów i urządzeń kriogenicznych

W latach od 2015 do 2020 (we współpracy z grupą kriogeniczną Politechniki Wrocławskiej) uczestniczyłem w projektach badawczo-rozwojowych związanych z dużymi systemami kriogenicznymi. Do ważniejszych należą:

- Udział w projekcie badawczym (dotyczącym instalacji kriogenicznej) realizowanym we współpracy Politechniki Wrocławskiej z ESS (European Spallation Source – Szwecja) w ramach polskiego wkładu rzeczowego „In-Kind" pod tytułem „*Wniesienia wkładu krajowego na rzecz udziału we wspólnym międzynarodowym programie lub przedsięwzięciu, w tym w zakresie strategicznej infrastruktury badawczej*". Projekt ten dotyczył opracowania konstrukcji linii kriogenicznej dystrybuującej ciekły hel do eliptycznego akceleratora liniowego. W ramach projektu byłem odpowiedzialny za: obliczenia termo-mechaniczne instalacji kriogenicznych rur pomocniczych, optymalizacje systemów podpór wewnętrznych i zewnętrznych głównej linii kriogenicznej oraz linii pomocniczej, obliczenia numeryczne dotyczące optymalnego rozmieszczenia mostków odpowiedzialnych za chłodzenie ekranów radiacyjnych poszczególnych modułów systemu kriogenicznego, przygotowanie dokumentacji wykonawczej i technologicznej a także zaprojektowanie systemów transportowych do poszczególnych modułów linii kriogenicznej. Wyniki tych prac można znaleźć w materiałach niepublikowanych poz. 59 i 60 załącznika nr 1.
- Członkostwo w zespole badawczym grupy kriogenicznej Politechniki Wrocławskiej przy realizacji projektu B+R współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020. Temat projektu: „*Optymalizacja systemów zasilających napędy pracujące w transporcie morskim, drogowym albo kolejowym, które wykorzystują gaz naturalny w postaci skroplonej*". Beneficjentem projektu była firma Remontowa LNG Systems. Moje zadanie w tym projekcie polegało na: analizie aktualnych rozwiązań systemów paliwowych wykorzystujących LNG do napędów morskich jednostek pływających,

Jurek

przeglądzie możliwości i sposobów bunkrowania LNG oraz wymagań normatywnych z tym związanych, obliczeniach konstrukcyjnych oraz numerycznych dwupłaszczowego zbiornika izolowanego próżniowo o pojemności 100 m^3, magazynującego LNG. Wyniki prac związanych z tym projektem można znaleźć w materiałach niepublikowanych poz. od 55 do 57 załącznika nr 1. oraz w materiale opublikowanym poz. 11 załącznika nr 1.

- projekt stacjonarnych, dwupłaszczowych zbiorników izolowanych próżniowo w układzie pionowym do magazynowania LNG. Projekt realizowano przez Politechnikę Wrocławską na zlecenie PGNiG Gazoprojekt S.A z siedzibą we Wrocławiu. Moim zadaniem w tym projekcie było: zaprojektowanie czterech zbiorników w układzie pionowym do magazynowania LNG o pojemności 37, 60, 80 i 127 m^3. W ramach tej pracy wykonałem: niezbędne obliczenia analityczne i numeryczne (symulujące pracę zbiornika w różnych przypadkach obciążeń), zoptymalizowałem konstrukcję podpór wewnętrznych pod względem minimalizacji dopływu ciepła do zbiornika wewnętrznego, nadzorowanie prac nad przygotowaniem dokumentacji rysunkowej konstrukcji zbiornika o pojemności 127 m^3 a także nadzorowałem prace nad certyfikacją tej dokumentacji przeprowadzoną przez Urząd Dozoru Technicznego w Łodzi. Wyniki prac związanych z tym projektem można znaleźć w pracach niepublikowanych poz. od 61 do 66 załącznika nr 1.

Jestem autorem lub współautorem sześciu patentów dotyczących rozwiązań konstrukcyjnych uszczelnień semi-metalowych:

L.p.	Tytuł	Numer prawa wyłącznego	Twórcy	Procentowy udział wkładu własnego
P1.	„Rdzeń uszczelnienia wielokrawędziowego"	PL 226067 B1	Przemysław Jaszak	100%
P2.	„Uszczelnienie metaloplastyczne połączeń kołnierzowo-śrubowych"	PL 231058 B1	Przemysław Jaszak	100%
P3.	„Uszczelnienie spiralne"	PL 233738 B1	Przemysław Jaszak Konrad Adamek	50%
P4.	„Pierścień centrujący, pływający uszczelnień wielokrawędziowych"	PL 227088 B1	Przemysław Jaszak	100%
P5.	„Uszczelka spiralna, zwłaszcza pierścieniowa"	PL 227872 B1	Łukasz Samek, Mieczysław Cieślak, Przemysław Jaszak, Paweł Schulz	25%
P6.	„Pierścień centrujący pływający uszczelnień wielokrawędziowych"	PL 227180 B1	Przemysław Jaszak	100%

Przemysław Jaszak
.....
(podpis wnioskodawcy