

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Numeryczne i eksperymentalne badania podpory rurociągu kriogenicznego

Artur Iluk¹, Piotr Grzegory², Bartosz Łoziński², Maciej Chorowski³

¹Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

²KrioSystem sp. z o.o.

³Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska

email: artur.iluk@pwr.edu.pl, piotr.grzegory@kriosystem.com.pl, bartosz.lozinski@kriosystem.com.pl, maciej.chorowski@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE: Nadprzewodnikowe akceleratory badawcze wykorzystywane w fizyce wysokich energii wymagają przesyłu ciekłego i nadkrytycznego helu, wykorzystywanego do kriostatowania nadprzewodzących magnesów i wnęk przyspieszających, na odległości rzędu kilometrów. Hel, w różnych postaciach termodynamicznych, przesyłany jest w wielokanałowych liniach transferowych, które stanowią bardzo odpowiedzialną i wymagającą wysokiej niezawodności część systemu kriogenicznego akceleratora. W artykule opisano badania jednego z elementów takiej linii, wewnętrznej podpory linii zasilającej w hel nowoprojektowany fragment Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC) pracującego w ośrodku CERN w Genewie. Linia zawiera pięć rur procesowych pracujących w temperaturze 4-80K. Innowacyjna konstrukcja podpory zawierająca elementy z laminatu szklanego powinna zapewniać pracę przez kilkadziesiąt lat bez możliwości dostępu i naprawy. Przedstawiono wykonane w procesie projektowania badania numeryczne podpory w zakresie nieliniowym oraz weryfikujące je badania doświadczalne symulujące obciążenia eksploatacyjne i transportowe, łącznie ze zniszczeniem dwóch prototypów. Linia jest zostanie wyprodukowana w Polsce, we wrocławskiej firmie KrioSystem.

SŁOWA KLUCZOWE: linie kriogeniczne, symulacje numeryczne, badania doświadczalne

1. Wstęp

Kriogeniczne systemu dystrybucji helu są jednymi z kluczowych elementów współczesnych akceleratorów badawczych [1]. Ciekły i gazowy hel transportowany zazwyczaj wieloprzewodowych liniach służy do chłodzenia wnęk rezonansowych przyspieszających wiązki jonów oraz nadprzewodzących magnesów zmieniających kierunek i kształt wiązki.

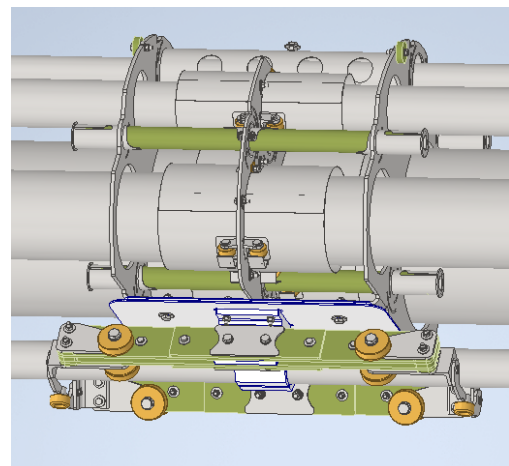
W ich konstrukcji występują specyficzne wymagania dotyczące głównie szczelności (konstrukcje rur w pełni spawane), ograniczonych dopływów ciepła, zdolności do niezależnej kompensacji termicznej skurczu każdego z przewodów oraz odpowiedniej wytrzymałości. W szczególności wymagania dotyczące ograniczenia dopływu ciepła są w bezpośredniej sprzeczności z wymogiem wytrzymałości mechanicznej, ponieważ im bardziej wytrzymała podpora rur procesowych, tym więcej ciepła dopływa do ciekłego helu transportowanego tą rurą.

W artykule przedstawiono symulacje i badania doświadczalne nowego typu przesuwnej podpory wewnętrznej, która zostanie zastosowana w aktualnie prowadzonej rozbudowie Wielkiego Zderzacza Hadronów – projekt *High Luminosity LHC (HL-LHC)* [2,3], który ma znacząco zwiększyć tzw. światłość zderzających się wiązek.

2. Konstrukcja podpory

Konstrukcję podpory przedstawiono na rysunku 1. W płaszczu próżniowym o średnicy 600 mm znajduje się ekran termalny aktywnie chłodzony do temperatury 80K.

Wewnątrz płaszczu prowadzone jest 5 rur procesowych z gazowym i ciekłym helu, które wsparte są na przesuwnej podporze. Konstrukcja podpory składa się z wózka wykonanego głównie z laminatu szklanego G10 wspierającego aluminiową podstawę połączoną z ekranem termalnym o temperaturze 80K. Do podstawy zamocowane są dwie pionowe stalowe płyty, na których za pomocą trzech rur kompozytowych zawieszona jest trzecia, stanowiąca bezpośrednio podporę rur z ciekłym helu o temperaturze około 4K. Elementy kompozytowe stanowią główną izolację cieplną pomiędzy trzema poziomami temperatur: 293K-80K-4K.

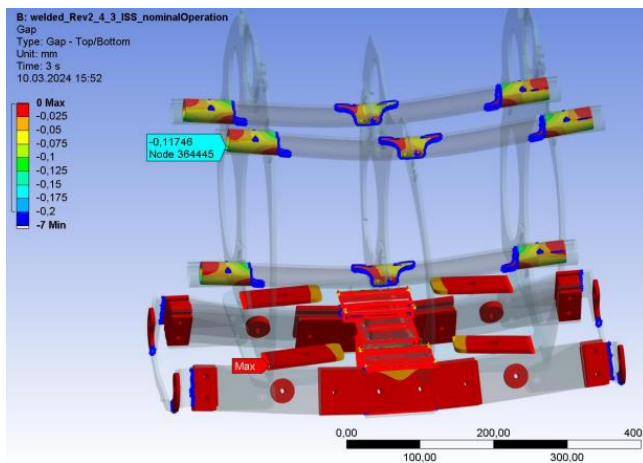


Rys. 1. Konstrukcja wewnętrznej podpory przesuwnej rurociągu kriogenicznego.

Obciążenia podpory stanowi głównie ciężar rur oraz skurcz termiczny przy pracy po schłodzeniu do temperatur roboczych. Krytycznym przypadkiem jest transport drogowy, w którym założono przeciążenia pionowe 2g oraz przeciążenia boczne (jazda w zakręcie) o wartości 0,6g. Dodatkowo dla elementów kompozytowych, ze względu na mniejszą powtarzalność produkcji w stosunku do elementów metalowych, przyjęto współczynnik bezpieczeństwa równy 4.

3. Model numeryczny

Wykonano nieliniowy model numeryczny podpory z uwzględnieniem zmiennych z temperaturą właściwości materiałowych, anizotropii kompozytów oraz kontaktu pomiędzy elementami podpory. Do oceny wytrzymałości kompozytu wybrano kryterium Tsai-Wu [4]. Istotnym elementem oceny było m.in. sprawdzenie wpływu skurczu termicznego na luzy w połączeniach kontaktowych materiałów o różnej rozszerzalności cieplnej. Przykładowe wyniki obliczeń termomechanicznych przedstawiono na rysunku 2.

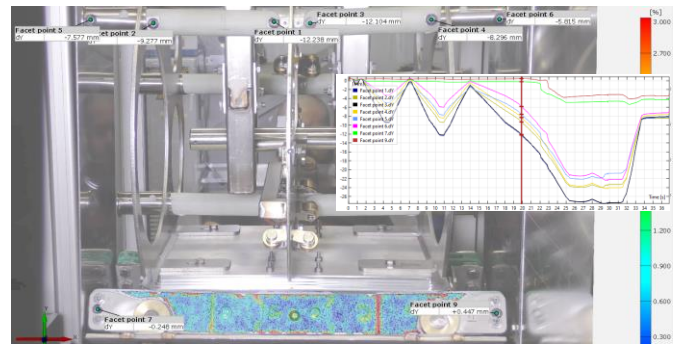


Rys. 3. Luzy w kontaktach kompozyt/metal po schłodzeniu do temperatury roboczej

4. Pomiary

W celu weryfikacji wyników symulacji wykonano 3 prototypy podpory, które poddano testom na maszynie wytrzymałościowej. Ze względu na krytyczne przypadki transportowe, testy wykonano w temperaturze pokojowej.

Wykonano testy obciążenia cyklicznego, testy odporności na wyobczenie, test wytrzymałości granicznej (przeciążenie x4) oraz test niszczący. Podczas testów wykonano pomiary optyczne przemieszczeń wybranych punktów podpory oraz analizę odkształceń kompozytowych listew wózka podpory z użyciem techniki *Digital Image Correlation (DIC)* [5, 6]. Wybrane wyniki testów pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Przemieszczenia pionowe, czterokrotne przeciążenie i test niszczący

5. Wnioski

Największą niepewność związana była z elementami kompozytowymi. Ich przekrój był zminimalizowany w celu zmniejszenia dopływów ciepła.

Wyniki pierwszych pomiarów pozwoliły na identyfikację tych fragmentów podpory, które ze względu na proces produkcji powodowały ugięcia większe od otrzymanych z symulacji. Główny problem stanowiły nadmierne luzy oraz niewystarczająca wytrzymałość połączeń klejonych. Analiza pola odkształceń podczas obciążania obejmująca widoczne miejsca klejenia dwóch elementów kompozytowych pozwoliła nie tylko określenie odkształceń w zginanym kompozycie, ale również na precyzyjne wyznaczenie chwili uszkodzenia połączenia klejonego – nagle duże odkształcenie na linii styku elementów – oraz wyznaczenie chwili zerwania tarcia na połączeniach śrubowych.

Po poprawieniu technologii klejenia i zastosowaniu pasowanych śrub łączących elementy kompozytowe ze stalowymi badania kolejnych prototypów wykazały dobrą zgodność z wynikami symulacji numerycznych. Test niszczący wykazał, że nie ma możliwości uszkodzenia elementów kompozytowych przed zniszczeniem elementów stalowych podpory.

Literatura

- [1] Iluk, A., et al. "Design of the Cryogenic Bypass Line for the SIS100 Synchrotron." *Applied Sciences* 10.22 (2020): 8311.
- [2] Claudet, S., et al. "Cryogenics for the HL-LHC." *The High Luminosity Large Hadron Collider: New Machine for Illuminating the Mysteries of the Universe*. 2024. 341-354..
- [3] D. W. Cheng et al., "The Challenges and Solutions of Meeting the Assembly Specifications for the 4.5 m Long MQXFA Magnets for the Hi-Luminosity LHC," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2023
- [4] Narsai, M., et al. "Composite tube testing and failure theory computational comparison." *R&D Journal* 34 (2018): 37-43.
- [5] Xin, Ruihai, Vinh Tung Le, and Nam Seo Goo. "Buckling identification in composite cylindrical shells with measured imperfections using a Multi-DIC method and finite element analysis." *Thin-Walled Structures* 177 (2022): 109436.
- [6] Kim, JiHyun, et al. "An experimental study on the mechanical behaviour of bonded and hybrid bonded-bolted composite joints using digital image correlation (DIC) technique." *Composite Structures* 276 (2021): 114544.