

WYBRANE ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA LINII KRIOGENICZNEJ XATL1

SELECTED ASPECTS OF THE XATL1 CRYOGENIC LINE DESIGN

Eugeniusz Rusiński, Artur Iluk, Kazimierz Malcher – Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Politechnika Wrocławska

Maciej Chorowski, Jarosław Fydrych – Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska

Przedstawiono wybrane problemy projektowania kriogenicznej linii helowej XATL1. Omówiono założenia do budowy modelu geometrycznego 3D instalacji kriogenicznej, przedstawiono przykładowe rozwiązania modelowe 3D i obiekty rzeczywiste. Przedstawiono również przykładowe wyniki obliczeń wytrzymałościowych. Analizę wytrzymałości rurociągu pracującego w ultra niskich temperaturach i współpracujących z nim urządzeń, przeprowadzono z wykorzystaniem MES oraz opracowanych modeli geometrycznych 3D projektowanych obiektów. Przy ustalaniu warunków brzegowych uwzględniono przypadki odpowiadające normalnej pracy projektowanej instalacji jak również przypadki odpowiadające stanom wyjątkowym jak próby ciśnieniowe lub awaria systemu. Na podstawie wyników obliczeń numerycznych dokonano weryfikacji założeń i opracowanych modeli geometrycznych 3D, które po wprowadzeniu niezbędnych poprawek, wykorzystano do sporządzenia kompletnej dokumentacji technicznej kriogenicznej linii XATL1.

The paper presents selected aspects of designing cryogenic helium lines XATL1. In the paper the design of a 3D geometric model of the cryogenic installation, the examples of the design solutions and real objects were presented. It also presents examples of the results of the strength calculations. The strength analysis of the transfer line was carried out using Finite Element Method. The analyzed load cases take into account the boundary conditions corresponding to the normal operation of the proposed installation as well as special cases of the pressure tests and system failure. Based on the results of numerical calculations, design assumption were verified and geometric models were modified to fulfil requirements of the AD 2000-Merkblatt code.

Wprowadzenie

Powstający w narodowym laboratorium DESY w Hamburgu laser na swobodnych elektronach X-FEL (X-rays Free Electron Laser), przeznaczony do badań materiałowych i biologii molekularnej, należy do największych i najbardziej nowatorskich urządzeń badawczych tego typu na świecie. Trwające od 2007 r. prace związane z budową tak dużego urządzenia badawczego, między innymi ze względu na koszty, realizowane są w ramach międzynarodowego projektu X-FEL, którego budżet stanowią wkłady rzeczowe i finansowe wielu krajów, w tym Polski – pełnoprawnego udziałowca międzynarodowej spółki i współwłaściciela powstającej infrastruktury badawczej.

W budowanym laserze na swobodnych elektronach, podobnie jak w akceleratorach o dużych energiach, powstających od lat 90-tych XX wieku, pozwalających na dokonywanie nowych odkryć fizycznych, zastosowano kriogeenikę helową, która umożliwia utrzymywanie nadprzewodników w odpowiednio niskiej temperaturze. Systemy przesyłania i dystrybucji helu w dużych instalacjach kriostatowania nadprzewodników, stanowią do dziś duże wyzwanie dla projektantów wykorzystujących najbardziej zaawansowane technologie mechaniczne, elektryczne, elektroniczne, materiałowe, informatyczne.

Aktualnie brak jest pełnej wiedzy pozwalającej na optymalizację projektowanych dużych linii kriogeniki helowej pod kątem uzyskania najwyższej ich niezawodności, a realizacji takich projektów mogą podjąć się nieliczne ośrodki naukowe w świecie.

W ramach udziału Polski w międzynarodowym projekcie X-FEL, jako wkład rzeczowy, została zaprojektowana, wykonana i wdrożona do eksploatacji, po raz pierwszy przez stronę

polską, unikalna linia kriogeniczna XATL1, wraz z kriostatami helowymi i dodatkowymi liniami przesyłowymi. Urządzenia te wykorzystywane są do kriostatowania testowanych wnek rezonansowych nad ciekłym helem dwufazowym, transportowanym z hali AMTF oddalonej około 160 m od bloku HERA West (rys. 1) [3] w ośrodku DESY w Hamburgu.

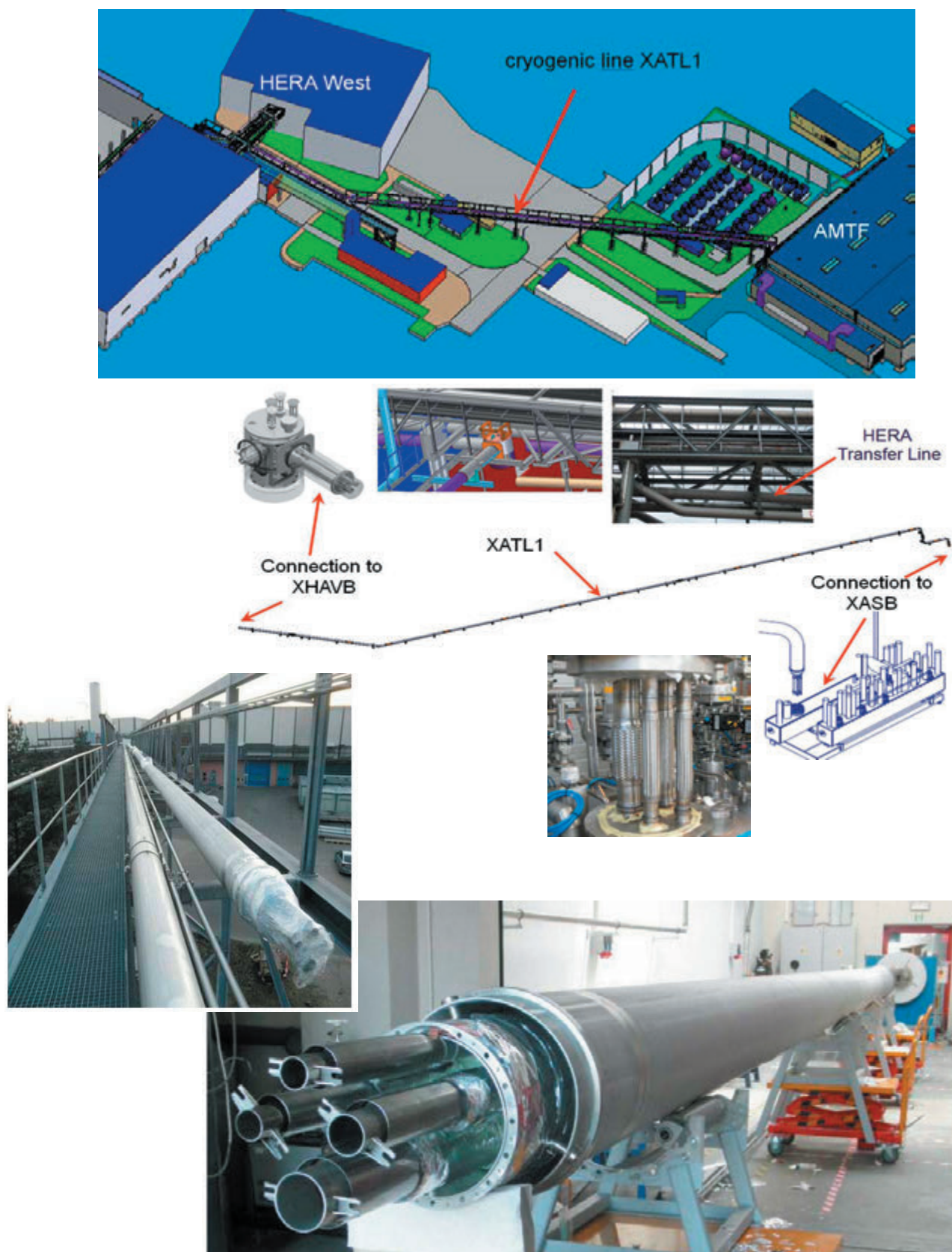
Projekt instalacji, badania modelowe oraz techniczną dokumentację wykonawczą, zatwierdzoną przez TÜV NORD, wykonano w Politechnice Wrocławskiej. Opracowany projekt kriogenicznej linii helowej posiada wiele rozwiązań innowacyjnych.

Produkcji kompletnej instalacji kriogenicznej oraz jej montażu w Hamburgu, zakończonego pełnym sukcesem (rys. 2), tj. uruchomieniem i bezawaryjną do dziś pracą, podjęła się wrocławska firma Kriosystem Sp. z o.o. Najwyższą jakość wytwarzanych elementów i podzespołów, weryfikowano zarówno w procesie ich produkcji jak i na montażu, za pomocą wielu prób i testów jak np.: szczelność helowa rur procesowych i ich połączeń, jakość i wytrzymałość elementów oraz połączeń poddanych przeciążeniom wynikającym z obciążeń próbných, „szokowanie” elementów instalacji, możliwość kompensacji odkształceń termicznych, możliwość uzyskania założonego stopnia próżni, szczelność cieplna, itp.

W procesie projektowania innowacyjnej kriogenicznej linii XATL1, wykorzystano najnowsze techniki CAD/CAE.

Budowa modelu geometrycznego 3D linii kriogenicznej

Jednym z podstawowych ograniczeń, które należało uwzględnić przy ustalaniu założeń i warunków brzegowych do projektu kriogenicznej linii XATL1, była istniejąca już stalowa



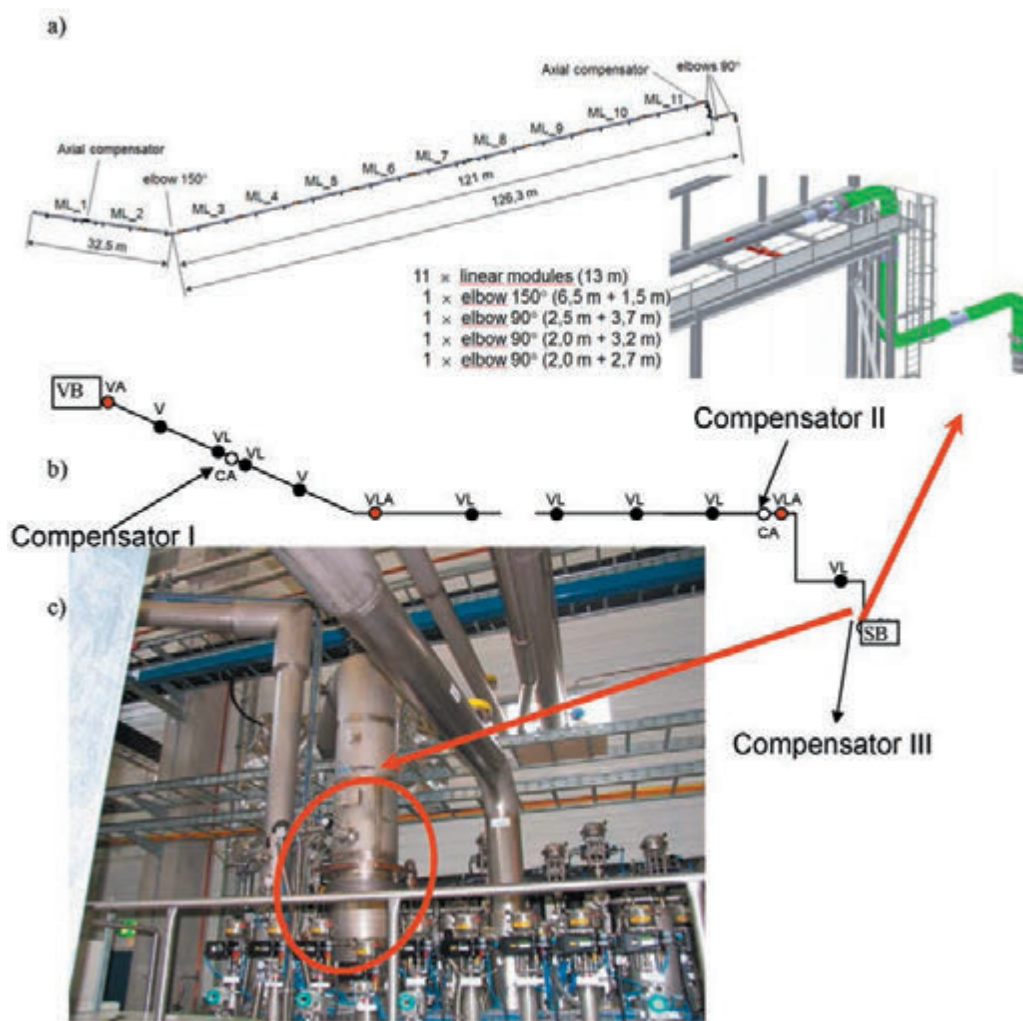
Rys. 1. Kriogeniczna linia helowa XATL1: widok ogólny oraz fragmenty instalacji ułożonej na estakadzie łączącej oddalone obiekty – modele 3D i obiekty rzeczywiste

konstrukcja estakady (rys. 1 i 3), na której należało ułożyć rurociąg. W wyniku przeprowadzonych analiz oraz założeń dotyczących funkcjonowania projektowanego obiektu [1-4], przyjęto oryginalny sposób podarcia rurociągu na estakadzie za pomocą 2 podpór stałych VLA oraz 28 podpór przesuwanych VL

(rys. 3 i 4). Przyjęto sposób kompensacji odkształceń rurociągu na estakadzie oraz sposób przyłączenia go do innych obiektów (VB i SB rys. 3). Po uwzględnieniu możliwości wykonawczych oraz ograniczeń wynikających z transportu i montażu projektowanych urządzeń (rys. 5) jak również dążenia do minimalizacji



Rys. 2. Uroczyste przecięcie wstęgi i przekazanie polskiego wkładu - linii kriogenicznej oraz kriostatów do X-FEL'a - Hamburg 10 lutego 2013 r.



Rys. 3. Widok linii XATL1: a) podział na segmenty, b) schemat podparcia na moście, c) moduł końcowy rurociągu (model i obiekt rzeczywisty); rodzaje podpór i kompensatorów: V – vertical, L – Lateral, A – axial, CA – axial compensator, CL – lateral compensator



Rys. 4. Podpory rurociągu na moście – model 3D i obiekty rzeczywiste na montażu



Rys. 5. Transport i montaż segmentów rurociągu

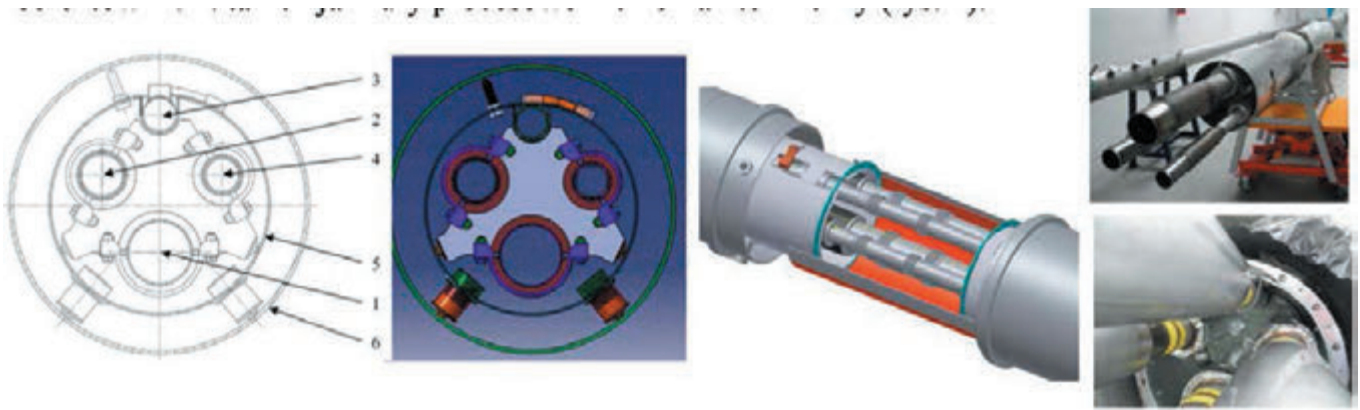
kosztów realizacji projektu, dokonano podziału całego rurociągu na 11 segmentów liniowych oraz 4 segmenty z łukami – „kolana” (rys. 3). Na podstawie przyjętych założeń, opracowano modele geometryczne 3D poszczególnych elementów i podzespołów instalacji kriogenicznej i poddano szczegółowym analizom numerycznym MES. Wirtualny montaż oraz symulacje wzajemnych przemieszczeń współpracujących elementów, umożliwiły wyeliminowanie wielu nieprzewidzianych kolizji, charakteryzujących rozwiązania prototypowe. Zweryfikowane obliczeniowo i poprawione modele geometryczne 3D projektowanych urządzeń, wykorzystano do opracowania ich kompletnej dokumentacji technicznej, którą zatwierdziła i dopuściła do produkcji, niezależna, certyfikowana jednostka TÜV NORD.

Zewnętrzna rura linii kriogenicznej XATL1, spełniająca rolę ustroju nośnego rurociągu, stanowi jednocześnie kon-

strukcję wsporczą i osłonę próżniową dla znajdujących się w niej obiektów m.in. takich jak rury procesowe i ich ekran termiczny (rys. 6).

Obciążenia termiczne, szczelność cieplna i różne ciśnienia, to podstawowe parametry decydujące o bardzo złożonej strukturze projektowanej linii (rys. 6, 7). Skrajnie niskie oraz różne temperatury rur procesowych (tab. 1), ekranu termicznego (40 - 80 K) i rury próżniowej (ok. 313 K), to przyczyna występowania znacznych odkształceń termicznych.

Ciągłą kompensację odkształceń oraz zachowanie stałych odległości promieniowych pomiędzy rurami, uzyskano dzięki zastosowaniu specjalnego systemu stałych i przesuwanych podpór rur procesowych i ekranu termicznego (rys. 7, 8) współpracujących z kompensatorami i elastycznymi węzłami montowanymi na składaniu segmentów rurociągu (rys. 9).



Rys. 6. Przekrój poprzeczny i widok rurociągu: rury procesowe z kompensatorami – modele 3D i obiekty rzeczywiste, 1 – GHe powrót, 2 – SHe zasilanie, 3 – ekran termiczny powrót, 4 – ekran termiczny zasilanie, 5 – ekran termiczny, 6 – ekran próżniowy



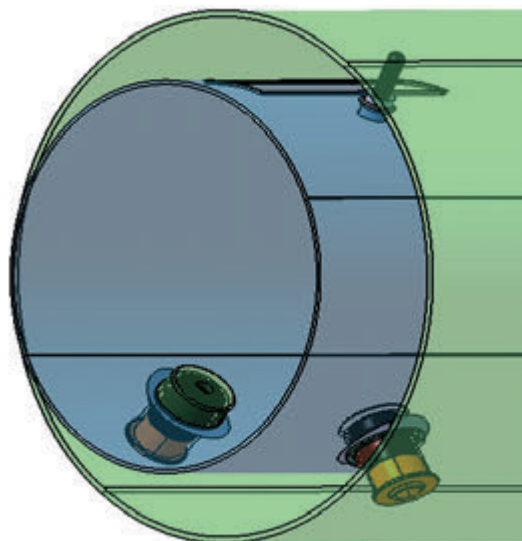
Rys. 7. Podpory rur procesowych – modele i obiekty rzeczywiste: a) pojedyncza i podwójna podpora przesuwna, b i c) podpory stałe

Skuteczną, ciepłą izolację rur procesowych od rury próżniowej uzyskano dzięki zastosowaniu umieszczonego w próżni ekranu termicznego (rys. 10) oraz specjalnych izolacji nawijanych na rury (rys. 11). Do chłodzenia ekranu wykonanego ze

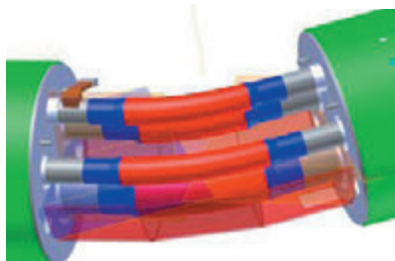
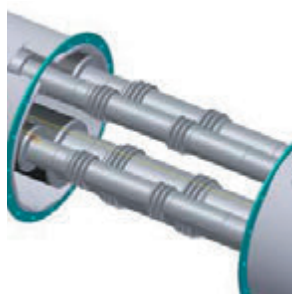
stopy aluminium wykorzystano stalową rurę procesową (80 K – rys. 10), połączoną termicznie z ekranem za pomocą zestawu miedzianych mostków. Dobór liczby mostków oraz sposobu ich mocowania, poprzedziły liczne badania modelowe i eks-

Tab. 1. Zestawienie wymaganych parametrów pracy linii kriogenicznej XATL1 oraz widok tabliczki znamionowej rurociągu

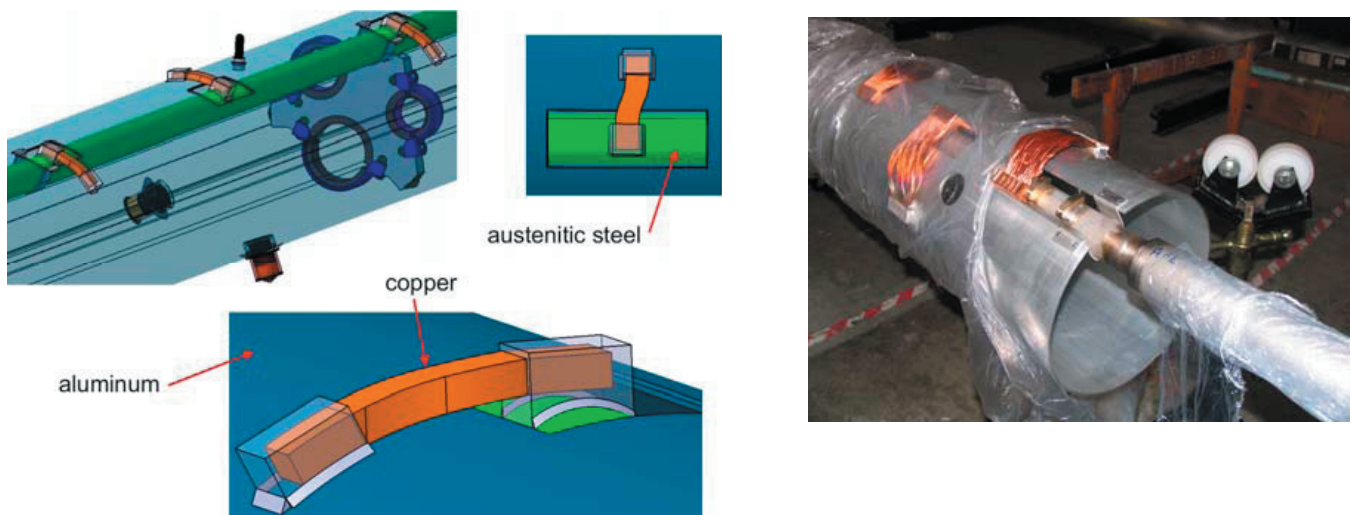
process tube	diameter	design pressure	operating pressure	test pressure	operating temperature
4,5 K supply	DN 50	20 [bar]	3,5 [bar]	28 [bar]	4,5 [K] - 6 [K]
4,5 K return	DN 80	20 [bar]	1,2 [bar]	28 [bar]	4,5 [K]
40 K supply	DN 40	20 [bar]	17 [bar]	28 [bar]	40 [K]
80 K return	DN 40	20 [bar]	16.7 [bar]	28 [bar]	80 [K]



Rys. 8. Podpory ekranu termicznego – modele i obiekty rzeczywiste na montażu



Rys. 9. Kompensatory i elastyczne węże – modele 3D i obiekty rzeczywiste



Rys. 10. Termalizacja ekranu ze stopu aluminium: miedziane mostki łączące ekran ze stalową rurą procesową (80 K) – model 3D i obiekty rzeczywiste na montażu



Rys. 11. Izolacje termiczne rur procesowych i ekranu

perymentalne. Zastosowana konfiguracja materiałów wynikała z konieczności zapewnienia dobrej przewodności cieplnej oraz uniknięcia wystąpienia ogniwa galwanicznego w temperaturach kriogenicznych.

Obliczenia wytrzymałościowe linii kriogenicznej

Celem analiz wytrzymałościowych prowadzonych z wykorzystaniem MES [5, 6, 7] było określenie rzeczywistych odkształceń i stanu wyężenia linii kriogenicznej (rys. 12 - 15), odpowiadających obciążeniom termicznym i zmianom ciśnienia w stanach pracy ustalonej oraz podczas rozruchów linii. Badano również skutki przeciążeń towarzyszących obciążeniom wyjątkowym pojawiającym się podczas prób ciśnieniowych czy też w przypadku możliwych awarii systemu chłodzenia (rozszerzenia rury procesowej i przedostania się helu do rury próżniowej lub rozszerzenia osłony próżniowej). Na podstawie uzyskanych wyników ustalono parametry systemu zewnętrznego podparcia rurociągu na estakadzie (rys. 3) i wewnętrznego podparcia rur procesowych oraz ekranu termicznego (rys. 6, 7). Wyznaczenie ekstremalnych odkształceń elementów i całego rurociągu, umożliwiło dobór rodzajów, ilości i zakresów pracy zewnętrznych oraz wewnętrznych kompensatorów jak również elastycznych węży (rys. 9). Na podstawie wyznaczonych odkształceń ustalono również wymagane wielkości napięcia wstępnego zastosowanych kompensatorów osiowych.

Podstawowym kryterium doboru materiałów, z których wykonano rurociąg jest temperatura przesyłanego czynnika. Zgodnie z normą AD 2000-Merkblatt W10 (tab. 2), na elementy modułów linii kriogenicznej zastosowano materiały, które w temperaturach kriogenicznych, spełniają warunki wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej ustalone dla danego przypadku obciążenia.

Przyjęte do obliczeń parametry pracy poszczególnych rur procesowych linii kriogenicznej zestawiono w tabeli 3.

Wybrane cechy materiałów użytych do produkcji elementów linii kriogenicznej:

- rury procesowe – stal austenityczna DIN 1.4306: $R_{0,2} = 210 \text{ MPa}$, $R_m = 564 \text{ MPa}$,
- ekran termiczny – stop aluminium 6060: $R_{0,2} = 60 \text{ MPa}$, $R_m = 120 \text{ MPa}$,
- ekran próżniowy – stal austenityczna DIN 1.4301: $R_{0,2} = 215 \text{ MPa}$, $R_m = 505 \text{ MPa}$,
- podpory przesuwne rur procesowych – G10: $R_m = 280 \text{ MPa}$

Wymagany, zgodnie z AD2000-Merkblatt W10, współczynnik bezpieczeństwa – 1,5.

W obliczeniach wytrzymałościowych MES uwzględniono trzy podstawowe przypadki obciążenia linii kriogenicznej:

1. Obciążenia próbne:

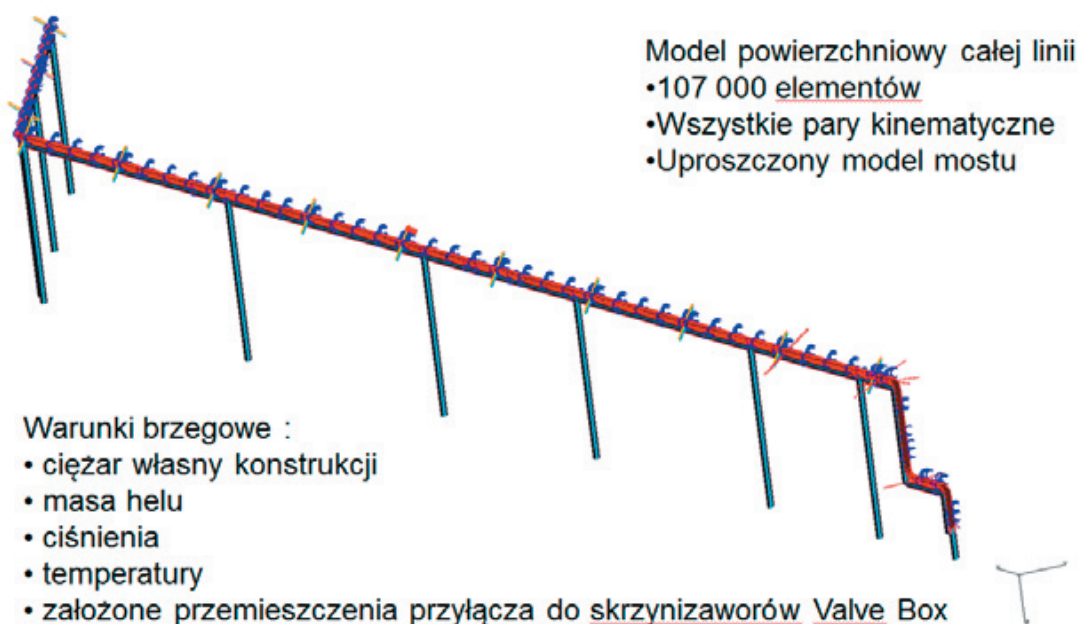
- temperatura elementów 285 °K (260 - 310 °K dla Hamburga)

Tab. 2. AD 2000-Merkblatt W10 – tabela 1; materiały rur procesowych rurociągu XATL1

No	Type of steel	Grade of steel, grade of cast steel	Lowest possible operating temperature °C for stress case			Maximum permissible thickness, wall thick- ness for tubes	Maximum permissible diameter
			I	II	III		
	2	3	4	5	6	mm 7 ¹³⁾	
1							
3	Welded tubes made from stainless austenitic and austenitic-ferritic steels as specified in DIN EN 10216-5	X5CrNi18-10	1.4301	- 200	- 255	- 273	50
		X6CrNiNb18-10	1.4550				
		X5CrNiMo17-12-2	1.4401				
		X2CrNiMo17-12-2	1.4404				
		X2CrNiMo18-14-3 ³⁾	1.4435				
		X2CrNiMoN17-13-5 ⁷⁾	1.4439				
	Seamless tubes made from stainless austenitic and austenitic-ferritic steels as specified in DIN EN 10217-7	X6CrNiMoNb17-12-2 ⁴⁾	1.4580	- 273 ²⁾	- 273	- 273	
		X2CrNi19-11	1.4306				
		X6CrNiTi18-10	1.4541				
		X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571				
		X2CrNi18-10	1.4311				
		X2CrNiMoN17-13-3	1.4429				
		X2CrNiMoN22-5-3 ⁷⁾	1.4462				

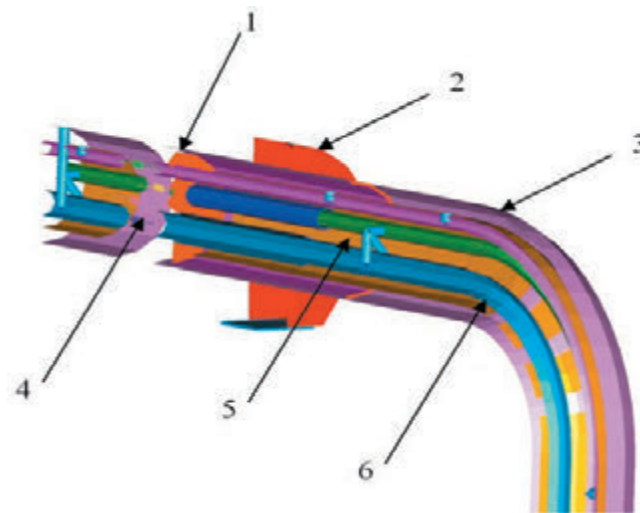
Tab. 3. Wartości ciśnienia i temperatur do obliczeń numerycznych linii kriogenicznej

Line	Nominal condition		Pressure test condition	
	Pressure	Temperature	Pressure	Temperature
Thermal shield return DN 40	2,0 MPa	80 K	2,86 MPa	20°C (313 K)
Thermal shield supply DN 40	2,0 MPa	40 K	2,86 MPa	20°C (313 K)
SHe supply DN 50	2,0 MPa	4,5 K	2,86 MPa	20°C (313 K)
GHe return DN 80	2,0 MPa	4,5 K	2,86 MPa	20°C (313 K)

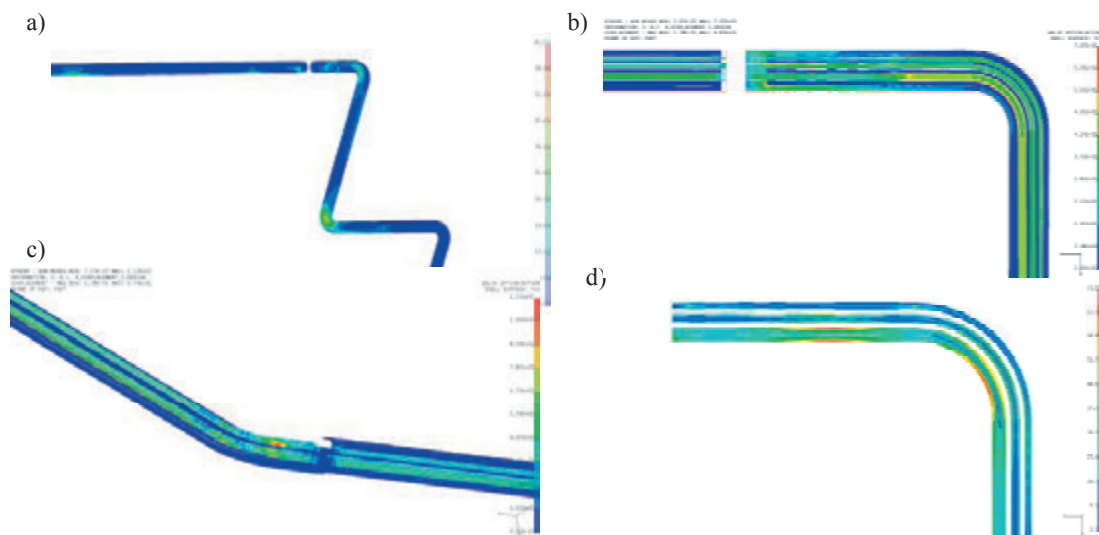


Rys. 12. Model dyskretny linii kriogenicznej z podziałem na elementy skończone

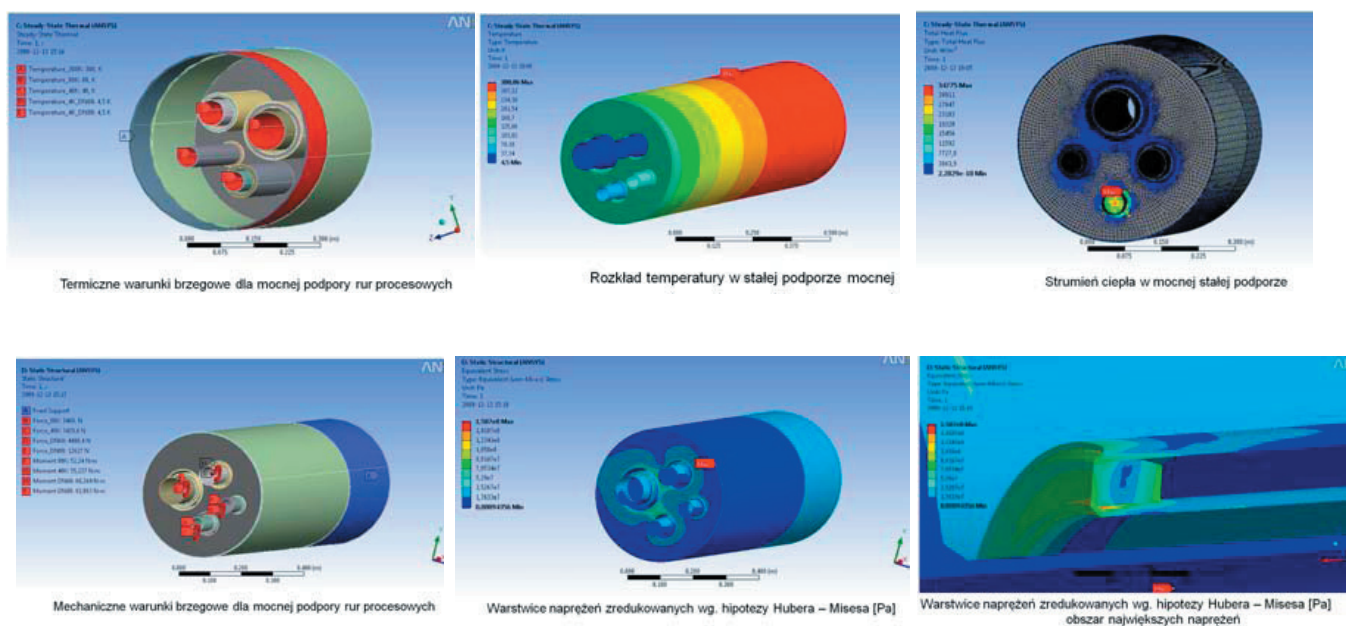
- próżnia w rurze próżniowej
 - ciśnienie w rurach procesowych 2,8 MPa
2. Praca nominalna:
- temperatury rur procesowych i ekranu termicznego zgodne z warunkami pracy
 - temperatura rury próżniowej 260 °K (minimalna temperaturze otoczenia)
 - próżnia w rurze próżniowej
- ciśnienie w rurach procesowych 2 MPa
 - poziome przemieszczenia przyłącza Valve Box (VB rys. 3) – 20 mm
3. Wyciek helu:
- warunki brzegowe jak dla pracy nominalnej
 - dwa sąsiednie segmenty rurociągu ulegają ochłodzeniu o 100 °K wskutek wycieku helu
- Przykładowe modele dyskretne oraz wyniki obliczeń linii kriogenicznej, przedstawiono na rysunkach 12–15.



Rys. 13. Model dyskretny kolana: 1 – mocna podpora stała rur procesowych, 2 – podpora stała rury próżniowej, 3 – rura próżniowa, 4 – kompensatory osiowe, 5 – ekran termiczny, 6 – rury procesowe



Rys. 14. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera – Misesa: a) rura próżniowa; praca nominalna – 65 [MPa] okolice 2-go kolana, b) kolano 90; obciążenia próbne – [71] MPa rura procesowa 4,5 K powrót, c) kolano 150; obciążenia próbne – 112 [MPa] rura procesowa 4,5 K powrót, d) – kolano 90; wyciek helu – 73 [MPa] rura procesowej 4,5 K powrót



Rys. 15. Wybrane wyniki obliczeń MES mocnej podpory stałej rur procesowych dla przypadku obciążenia odpowiadającego pracy nominalnej linii kriogenicznej

Podsumowanie

Zaprezentowano wybrane zagadnienia projektowania i obliczeń wytrzymałościowych linii kriogenicznej przeznaczonej do pracy w ultra niskich temperaturach. W procesie projektowania wykorzystano zaawansowane metody CAD/CAE. Opracowano model geometryczny 3D linii kriogenicznej i przeprowadzono obliczenia numeryczne MES dla przypadków obciążeń odpowiadających rozruchowi i pracy linii w warunkach nominalnych jak również podczas prób oraz możliwych awarii systemu chłodzenia. Uzyskane wyniki wykorzystano do weryfikacji

poprawności przyjętych założeń jak również do ustalenia wartości parametrów złożonego systemu podparcia i kompensacji odkształceń linii kriogenicznej. Projekt linii kriogenicznej posiada wiele rozwiązań innowacyjnych. Opracowano pełną dokumentację konstrukcyjną, która została zatwierdzona przez certyfikowaną jednostkę TÜV NORD w zakresie technicznym i wykonawczym i stanowiła podstawę wykonania, montażu i próbnych badań linii kriogenicznej. Zaprojektowana i wykonana linia XATL1, służy aktualnie do testowania wnęk rezonansowych do lasera na swobodnych elektronach (XFEL) w ośrodku naukowo badawczym DESY w Hamburgu.

Literatura

- [1] Fydrych J., Chorowski M., Polinski J., Skrzypacz J., Design Methodology of Long Complex Helium Cryogenic Transfer Lines. Transactions of the Cryogenic Engineering Conference-CEC: Advances in Cryogenic Engineering. AIP Conference Proceedings, Volume 1218, pp. 1103-1110 (2010)
- [2] Fydrych J., Skrzypacz J., Chorowski M., Thermo-mechanical static analysis of the process lines and external vacuum envelope of the XFEL/AMTF cryogenic transfer line XATL1, Raporty Inst. Inż. Lot. Proces. Masz. Energ. PWroc. 2009, Ser. SPR nr 14 (2009)
- [3] Skrzypacz J., Fydrych J., Chorowski M., Conceptual design of cryogenic transfer line XATL1 for XFEL/AMTF (in Polish), Raporty Inst. Inż. Lot. Proces. Masz. Energ. PWroc., Ser. SPR nr 25 (2009)
- [4] Iluk A., Rusiński E., Strength analysis of the kinematic pairs of a mobile collapsible bridge, Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011, vol. 11, nr 4, s. 875-884
- [5] Rusiński E., Finite Element Method – System COSMOS/M, WKŁ, Warsaw 1994
- [6] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., Advanced Finite Element Method for Load-carrying Structures of Machines (in Polish), Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2000
- [7] Rusiński E., Design Principles for Supporting Structures of Self-Propelled Vehicles (in Polish), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002

