

FORMULARZ OPIS PRZEDMIOTU ZAMÓWIENIA

Tytuł zamówienia: *Usługa polegająca na wykonaniu obliczeń matematycznych z zakresu termodynamiki i obliczeń wytrzymałościowych – powtórka 2.*

Załącznik nr 1 do Zaproszenia 37/2020/ZO/OPNT/SH

I. Przedmiot zamówienia:

Część I: „Obliczenia wytrzymałościowe wielkiego zbiornika na wodór w kształcie cylindra oraz beczki” oraz 2. „Obliczenia termodynamiczne wielkiego zbiornika wodoru na potrzeby zasilania lokomotywy kolejowej”.

II. Szczegółowy opis przedmiotu zamówienia:

Dokument nr 1 pn. „Opracowanie modelu matematycznego i analiza metodą elementów skończonych zachowania oplotu z włókna węglowego opiętego wokół wzorca w kształcie bryły obrotowej rozciąganej na obu końcach za pomocą dwustronnej prasy.”

Założenia dotyczące oplotu wypukłych obiektów obrotowych.

Przyjeliśmy, że powierzchnia obiektów cylindrycznych zachowałaby się podobnie do płaskiej powierzchni, gdyby włókna jednokierunkowe leżały równoległe do wzdłużnej osi cylindra na stałej powierzchni obrotu na liniach prostych w tej samej odległości od środkowej osi cylindra. Wtedy powierzchnia 3D przypomina lokalnie płaską powierzchnię, a wszystkie poprzednie prace dotyczące zachowania się prostej wiązki włókien węglowych pozostają w mocy i nie są przedmiotem tej analizy.

Istnieją jednak jeszcze trzy inne możliwości oplotu włókna na obiekcie 3D, uwzględniające fizyczne zachowanie takiego włókna:

1. włókna leżą na liniach spiralnych na wypukłej powierzchni cylindra w tej samej odległości od centralnej osi cylindra, tworząc helisę, o kącie oznaczanym, np. 30^0 w stosunku do osi centralnej
2. linie włókien są nadal geodezyjne (najkrótsze na powierzchni wypukłej, co wynika z analizy matematycznej), ale są „podwójnie” wypukłe ze względu na fakt, że skorupa bryły powstała w czasie obrotu nie odcinka linii prostej, jak w cylindrze, ale odcinka dowolnej krzywej: elipsy, hiperboli, paraboli, krzywej łańcuchowej itp. Pod uwagę należy wziąć wybrane tak

nietrywialne wypukłe powłoki brył obrotowych (beczki), o różnych krzywiznach wypukłości (głębszych i płytszych),

- linie włókien nie są geodezyjne (wynikające z analizy matematycznej najkrótsze na danej powierzchni wypukłej), ale izotensoidalne, tzn. pochodzące z fizycznego stałego naprężenia włókna, np. nawijanego przez trzpień obrotowy bryły na danej ścieżce różnej od linii geodezyjnej, w granicach braku poślizgu włókna z pozycji geodezyjnej na pozycję lekko odchyloną o pewien niewielki kąt, wynikający z tarcia. W ten sposób tarcie włókien pozwala uzyskać bardziej złożony przebieg ścieżki włókien na powierzchni bryły obrotowej, niż po prostu geodezyjny.

Powyższe trzy przypadki mogą obejmować zarówno pojedyncze włókno albo taśmę z włókien o zadanej szerokości, jak również parę takich włókien lub taśm w postaci osiowo-symetrycznej helisy o przeciwnych kątach do centralnej osi bryły obrotowej. Powoduje to wzajemne lokalne przecinanie się dwóch włókien różnych helis jednocześnie, nawet połączonych w bardziej złożony wzór tkaniny. Taka osiowo-symetryczna tkanina nazywana jest dalej plecionym bezszwowym rękawem lub po prostu rękawem, jako najbardziej obiecującym wzorze tkaniny węglowej do naprężania na bryle obrotowej. Kąt pomiędzy włóknami dwóch helis wyznaczany jest w zapisie wobec osi centralnej bryły obrotowej i przybiera postać opisu, np. $-30^{\circ} / +30^{\circ}$. (rys.3)

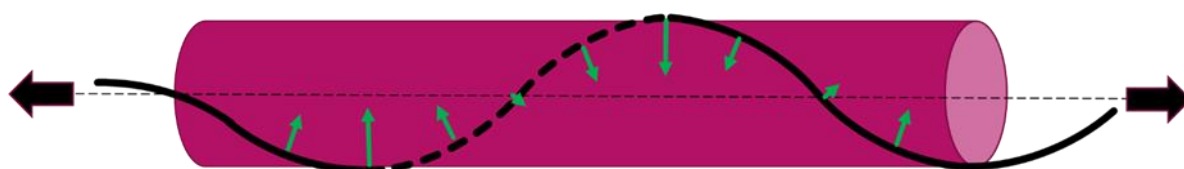
W sytuacji wystąpienia przebiegu włókien różnym od prostej równoległej do osi centralnej bryły obrotowej, (czyli kącie 0° , co możliwe jest jedynie na powierzchni cylindra równoległe do jego osi), włókna przybierają kształt krzywych, począwszy od zwykłej helisy na cylindrze, do bardziej skomplikowanych kształtów izotensoidy wymuszanych przez stałe napięcie włókna oplatanego na powierzchni bryły. Jeśli oplót dotyczy większej ilości helis, powstaje osiowo-symetryczny rękaw o lokalnym kącie zależnym od wypukłości bryły obrotowej (beczki).

Powyższy zestaw obejmuje wszystkie reguły nakładania włókien na powierzchnię bryły obrotowej, z tym jednak, że właśnie budowa rękawa jest pożądana, a jego analiza niezbędna jest do oceny zachowania się na powierzchni bryły. Zakłada się, że rękaw pokrywa 100% oplataną powierzchnię. Analiza dopuszcza jednak sytuację, że w wyniku oplotu na beczce pojawią się w pewnych miejscach punkty nie pokryte włóknami w pojedynczej warstwie (puste okienka, oczka, sito), jednak zakłada się, że warstw oplotu będzie więcej niż jedna i każda kolejna będzie miała takie miejsca nieco inaczej położone w obrębie geometrii powierzchni bryły, powodując możliwość uśrednienia grubości włókien w każdym miejscu powierzchni bryły obrotowej. Celem analizy jest również obliczenie takiej uśrednionej grubości w stosunku do ilości warstw i grubości pojedynczej warstwy.

Zadanie analizy matematycznej wskazanego modelu oplotu rękawa na bryle obrotowej w warunkach wstępnego obustronnego, jednoczesnego naciągania

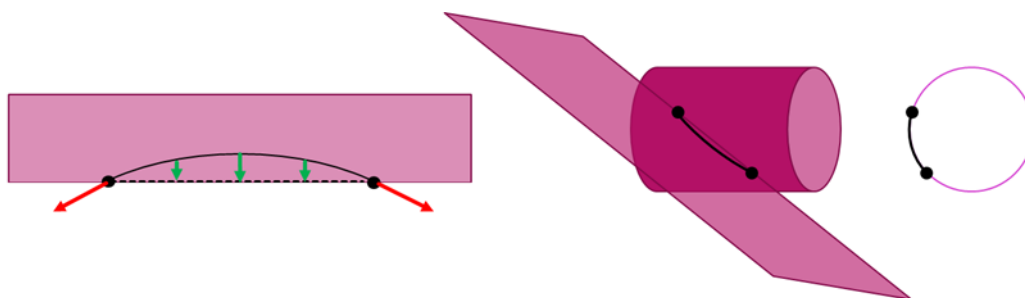
Zakłada się, że zdefiniowany wyżej oplót rękawa z tkaniny węglowej podlega naciąganiu symetrycznymi siłami z obu stron, o znacznej wartości (do 30-50% wytrzymałości włókien na

rozerwanie). Zgodnie z prawem Hook'a włókna ulegają odkształceniu o daną wartość, wynikającą z modułu Young'a. Jednak ich kształt w znakomitej większości przypadków (poza jednym na cylindrze) nie jest prosty, zatem powoduje powstanie dodatkowej siły prostopadłej do powierzchni bryły, a pochodzącej z faktu, że włókna pod wpływem siły rozciągającej mają tendencję do prostowania się i natrafiają na przeszkodę w postaci litego trzpienia bryły obrotowej (beczki) i w konsekwencji zaciskają się na jej powierzchni. Aby opisać to zachowanie, należy zdefiniować pojedyncze włókno uzwojone na powierzchni cylindra w postaci helisy, a następnie zwiększać ogólność takiego opisu na bardziej rozbudowane kształty włókna na beczce. Istotą jednak nie jest analityczny opis krzywych powstających w takiej siatce, a wyliczenie (a nawet uśrednienie dla wielu warstw) sił ściskających w każdym punkcie powierzchni, a raczej wskazanie tej siły ściskającej w funkcji siły naprężającej rękaw, co może wymagać zastosowania modelowania metodą elementów skończonych rombów dążących do zamknięcia, spłaszczenia (sugestia modelowania).



Ryc.1. Siły skierowane do środka cylindra w wyniku napinania włókien oplotu

Siłę reakcji na naprężanie można obliczyć lokalnie jako płaskie napięcie idealnego łuku będącego przybliżeniem lokalnego odcinka helisy zgodnie z rys. 2. Przy aproksymacji krzywej łuku brana byłaby pod uwagę krzywa łańcuchowa, ponieważ wszystkie siły są prostopadłe względem podstawy, czyli powierzchni bryły (sugestia modelowania).



Ryc. 2. Krzywa łańcuchowa, jako łuk helisy: $y = a * \cosh(x / a)$

W poszukiwaniu docelowej ogólności powyższego badania, jeżeli włókna są ułożone w dwuosioowych plecionych rękawach (ryc. 3), powyższa siła jest podwójna w punktach przecięcia osnowy i wątku. Gdy rękaw jest wystarczająco gęsty i zaprojektowany tak, aby pokryć powierzchnię w 100%, można założyć, że taka podwójna siła ściskająca wpływa na cylindryczną

powłokę z równomiernym ciśnieniem skierowanym prostopadle do powierzchni, dokładnie przeciwnie do wewnętrznego ciśnienia w beczce. Jest to siła ściskająca występująca tylko na powierzchniach wypukłych. W przypadku jakichkolwiek powierzchni płaskich lub wklęsłości włókna leżą płasko lub budują most, a taka pożądana siła ściskająca jest wówczas równa zero. Dlatego, zgodnie z założeniami tego zadania, niniejsze obliczenia dotyczą tylko obiektów wypukłych, a wybór specjalnej ścieżki włókna na cylindrze (tj. helisa) również powoduje ten efekt lokalnej wypukłości włókna na quasi płaskiej powierzchni. Należy założyć, że rękaw naciągany jest równomiernie na obwodzie dna beczki wzdłuż osi podłużnej bryły obrotowej.

Cel obliczeń

Analiza matematyczna i modelowanie cyfrowe ma za zadanie wskazanie zależności powstającej siły ściskającej powierzchnię bryły obrotowej od siły naciągania rękawa oraz kształtu bryły. Rękaw pod wpływem takiej siły przybiera formę izotensoidy, choć lokalnie należy brać od uwagę tarcie włókien, zatem efekt ściskający może okazać się malejący wraz z odległością od krawędzi bryły (beczki), powodując minimum we środku jej długości. Aby zapobiec tej tendencji należy zoptymalizować kształt krawędzi obrotowej beczki tak, aby jej środek podlegał odpowiednio większej sile ściskającej wynikającej z naprężania rękawa, co można osiągnąć zwiększając jej wybrzuszenie. Zatem kształt krzywej tworzącej beczkę należy optymalizować ze względu na minimalną powierzchnię, minimalną siłę naprężającą rękaw powodującą założony poziom siły ściskającej, pożądaną kąt włókien rękawa oraz minimalizację użytego włókna węglowego (optymalizacja warstw). Pobocznym celem analizy jest również policzenie dwóch przypadków szczególnych, kiedy tworząca jest linią prostą (cylinder) oraz półkolem (kula).



Rys.3. Rękaw z włókna węglowego (dwa kolory mają lepiej pokazać strukturę zwielokrotnionej podwójnej helisy rękawa bezszwowego)

Część II: „Obliczenia termodynamiczne wielkiego zbiornika wodoru na potrzeby zasilania lokomotywy kolejowej”

Przeprowadzenie modelowania termodynamicznego układu w celu określenia (1) pojemności zbiornika i autonomii jazdy składu lokomotywy, (2) wydajność i grubość izolacji zbiornika oraz (3) straty wentylacyjne. Obliczenia będą rozważać różne scenariusze wykorzystania i tankowania lokomotywy opisane w zadaniu: (a) codziennie lub cotygodniowe cykle robocze, (b) tankowane za pomocą pompy LH2 lub gazowego H2 chłodzonego ciekłym azotem.

Produkt badania: Raport opisujący wydajność systemu zbiornika ciśnieniowego dla wskazanych zastosowań i scenariuszy tankowania lokomotywy kolejowej.

Opis szczegółowy:

Granice dla przyszłych obliczeń projektu. Dla uproszczenia założymy, że mówimy o uniwersalnym rozwiązaniu do napędzanego wodorem silnika cieplnego i zasobnika płynu sprężonego kriogenicznie. Może to być stosowane w duo modalnej elektrycznej lokomotywie szynowej, napędzanej pomocniczą turbiną gazową z generatorem elektrycznym. To prawdziwe założenie, ponieważ podobne generatory diesla w lokomotywach elektrycznych są już w użyciu. Ten sam zespół napędowy jest używany w wielkich koparkach, wywrotkach o dużej ładowności itp. Idea własnego lokalnego generatora jest właściwym rozwiązaniem dla ciężkiego sprzętu, w którym agregat turbiny gazowej pozwala zrezygnować z nadmiaru akumulatorów Li-Po, ciężkiego i o ograniczonej żywotności cykli.

Na potrzeby powyższego wybrano, turbiny gazowe o mocy 5 MWe. Turbina jest wyposażona w komorę spalania zdolną do użycia mieszanki lub 100% wodoru, w celu wykorzystania czystego H2 pochodzącego w postaci LH2 / CH2 z łańcucha dystrybucji lub elektrolizy stacji lokalnej / portu. Tak więc pierwsze założenie brzmi: zastosujemy obrotowy silnik spalinowy napędzany H2 w formie gazowej, z agregatem o sprawności około 30% (5,6 MWe). Taka turbina zużywa około 600 kg / h czystego wodoru przy pełnej mocy. Przy czym gęstość energii H2 120 MJ / kg daje $600 \text{ kg / h} * 120 \text{ MJ / kg} = 72000 \text{ MJ / h} = 72000 \text{ MW} / 3600 \text{ s} = 20 \text{ MW}$, $20 \text{ MW} * 30\% \sim 6 \text{ MW}$.

Kolejny problem dotyczy przechowywania H2. Zaproponowano tender lokomotywy kolejowej, tj. cysterna ciągnięta w połączeniu z lokomotywą lub nawet zintegrowana z nią (tak samo jak lokomotywy parowe z wagonem węglowym i wodnym). Pozwala to na dwa scenariusze: tender typu wagon-cysterna jest wymienny i umożliwia szybkie dostawy torami kolejowymi (usługa załadunku off-line na stacji napełniania) lub po prostu ładowany jest pompą ciśnieniową na dowolnej stacji paliw według dostępnej tam stawki. Założone są oba sposoby zasilania magazynowaniem wodoru, przez skroplony LH2 i kompresowany CH2. Drugi sposób napełniania zbiornika ma być tańszy, ponieważ kompresja, a następnie chłodzenie, powoduje mniejsze zużycie energii.

Zakłada się, że będą dostępne zbiorniki ciśnieniowe w kształcie 7-8 kul o średnicy 3 m lub cylindryczne zbiorniki ciśnieniowe o łącznej wielkości 60-100 cbm. Zakłada się, że ciśnienie robocze 35 MPa jest odpowiednie do takiego celu w zbiorniku sprężonym kriogenicznie. Jeśli

naturalna wymiana ciepła nie wystarcza do zastosowania w turbinie, mogę zaproponować 7 zbiorników kulowych pracujących z całkowicie izolowanym CcH_2 , a 8-ty zbiornik jako wymiennik ciepła z własnym ogrzewaniem, zasilany płynem nadkrytycznym za pomocą pompy kriogenicznej i odparowywany do stan gazowy przy 35 MPa przy ciągłym użytkowaniu, podlegający dalszemu spadkowi ciśnienia do 0,5 MPa, jak wymaga turbina. W ten sposób magazyn 100 cbm obejmie 8 godzin pracy turbiny przy pełnej mocy.



Fundusze Europejskie
Polska Wschodnia



**Rzeczpospolita
Polska**

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego

