

Werner Hufenbach¹, Lothar Kroll², Maik Gude³, Robert Böhm⁴, Andrzej Czulak⁴

Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, 01062 Dresden, e-mail: acz@ilk.mw.tu-dresden.de

ANALIZA WYŁĘŻENIA KOMPOZYTOWYCH ELEMENTÓW RUROCIĄGÓW

Kompozyty wzmocnione zarówno włóknem szklanym, jak i węglowym charakteryzują się lepszymi parametrami użytkowymi w stosunku do klasycznych materiałów w konstrukcjach lekkich, a w szczególności w przemyśle lotniczym, samochodowym i chemicznym. W tym ostatnim, dzięki doskonałym własnościom wytrzymałościowym i odpowiedniej odporności na działanie związków chemicznych, obok elementów rur stalowych często wykorzystuje się elementy warstwowo wzmocnionych rur hybrydowych. Ich struktura nośna składa się ze zbrojonych włóknami szklanymi tworzyw termo- i chemoutwardzalnych. Tego rodzaju instalacje z tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem szklanym służą przede wszystkim do transportu związków chemicznych, odprowadzania ścieków przemysłowych, doprowadzania wody przemysłowej, ale także wykorzystuje się je jako rury kanalizacyjne oraz elementy odciągów powietrza lub gazów technicznych. Dodatkowo, do specjalnych zastosowań można użyć jako osnowy różnorodnych reaktywnych, termo- i chemoutwardzalnych żywic, takich jak nienasyconej żywicy poliestrowej lub winylowej posiadającej dobrą trwałość chemiczną. W pracy przedstawiono analizę wyłężeniową rur kompozytowych, jak również zoptymalizowano ułożenie włókien przy użyciu metody elementów skończonych w zaawansowanych programach graficznych.

Słowa kluczowe: technologia, metoda nawijania, badania kompozytów, złożony stan naprężenia, MES

STRENGTH ANALYSIS OF COMPOSITE TUBES

Fiber reinforced composites offer a - not yet utilized - lightweight potential for innovative lightweight applications in aircraft, automotive and chemical industry. Especially in the latter case, fibre reinforced polymers (FRP) are predestined for the application in hybrid tubes of piping systems, due to the splendid strength properties of FRP and their adequate resistance against chemical compounds. The tube's carrying structure generally consists of glass fiber reinforced heat-hardening or chemical hardening matrices, whereas a polymer liner often protects the carrying structures against extremely aggressive fluids and gases. In special applications, additionally various reactive, thermo hardening and chemical hardening resins, such as non-saturated polyester or vinyl resins, can be used as a matrix which show a good chemical durability. Such piping systems made of fiber reinforced composites are used to transport chemical compounds, drain the liquid industrial wastes and convey industrial water. Moreover, the FRP-pipings are used as sewage pipes, elements of air draft and technical gases. This paper focuses the structural design of FRP-tubes regarding the optimum composite lay-up including a strength analysis of composite tubes with use of finite element methods using the program systems I-DEAS and ANSYS.

Keywords: braiding, filament winding material characterization, multiaxial state of stress, FEM

WSTĘP

Szybkie tempo rozwoju nowoczesnych metod wytwarzania w różnych gałęziach przemysłu wymaga przyspieszenia metod wytwórczych, a co za tym idzie procesu projektowania i przygotowania produkcji. W przypadku wykonywania elementów szczególnie narażonych na działanie złożonych obciążeń, jak również dodatkowych wysokich temperatur oraz agresywnych mediów niezbędne jest przeprowadzenie dodatkowych badań i symulacji komputerowych pozwalających uniknąć późniejszych awarii. Przykładem tego rodzaju elementów są rury oraz kształtki wzmocnione wyplotem z włókna szklanego, przeznaczone do zastosowań w przemyśle chemicznym. Montaż tych rurociągów, jak również przesłane medium determinuje rodzaj obciążeń działających na poszczególne elementy. Skomplikowana konstrukcja i kompleksowość występujących obciążeń

wymagają niezwykle efektywnych metod obliczeniowych, pozwalających uzyskać zadowalające wyniki w krótkim czasie. Dodatkowo w przypadku wytwarzania elementów przeznaczonych do transportu materiałów niebezpiecznych niezbędne jest prowadzenie równoległych obliczeń symulacyjnych oraz analitycznych, pozwalających na wstępną weryfikację otrzymanych wyników. W przypadku wytwarzania rur i kształtek z tworzyw sztucznych ze wzmocnieniem plecionym niezbędna jest optymalizacja kąta ułożenia włókna szklanego, jak również ilości warstw, pozwalająca na dopasowanie umocnienia do geometrii elementu oraz do rodzaju obciążenia. Proces ten został przeprowadzony przy zastosowaniu metody elementów skończonych w pakietach zaawansowanych programów graficznych I-DEAS oraz ANSYS. Otrzymane wyniki pokazały, że

¹ Prof. Dr. habil.-Ing., ² Dr. habil.-Ing., ³ Dr.-Ing., ⁴ Dipl.-Ing.

elementy dotychczas wykonane nie posiadały maksymalnej wytrzymałości i poprzez dodanie warstwy wzmacniającej w miejscach szczególnie narażonych na uszkodzenia możliwe jest poprawienie ich właściwości.

OBLICZENIA NUMERYCZNE

Bazując na analitycznych obliczeniach, kolejnym krokiem jest symulacja pracy rur i kształtek łączących za pomocą metody elementów skończonych. Główny nacisk został położony obok analizy naprężeń przede wszystkim na realistyczną ocenę wytrzymałości na pękanie pojedynczych elementów oraz znalezienie optymalnego ułożenia włókien w ww. strukturach dla złożonych stanów obciążeń.

Poprzez symulacje różnych elementów, jak kolanka, trójniki, redukcje lub kołnierze, z wykorzystaniem programu ANSYS oraz I-DEAS, rozpoznano miejsca występowania największych naprężeń, spowodowanych zewnętrznymi bądź wewnętrznymi obciążeniami.

Za warunki brzegowe w symulacjach rur i kształtek posłużyły obciążenia przedstawione w tabeli 1. Przy uwzględnieniu współczynnika (wpływu), który zawiera niezbędne konstrukcyjne i materiałowe współczynniki bezpieczeństwa, starano się uniknąć błędów w praktycznych zastosowaniach.

TABELA 1. Obciążenia występujące w konstrukcjach rurociągów oraz zbiorników

TABLE 1. Typical loads of pipelines

Rodzaje obciążeń	
Obciążenia spowodowane warunkami pracy	Obciążenie niezależne od procesu (pracy)
- ciśnienie gazu - ciśnienie cieczy - materiału sypkiego - temperatura procesu	- masa własna - ciśnienie wywierane przez otoczenie - obciążenie dodatkowe - temperatura otoczenia

Bazując na elementach już wykonanych, modele wirtualne składały się z dwóch rodzajów materiału. Wewnątrz każdej rurki i kształtki znajdowały się linery z polichlorku winylu, na które zostały nałożone wzmocnienia z włókien szklanych. Wzmocnienie wykonano z rękawów plecionych, które w programach do analizy MES przedstawione zostało w postaci dwóch warstw o przeciwnej orientacji włókien. Elementy zostały uchwycone na brzegach w sposób podobny do rzeczywistych metod mocowania rur bądź kształtek.

W przypadku obliczeń numerycznych przeprowadzono symulacje dla następujących miarodajnych parametrów:

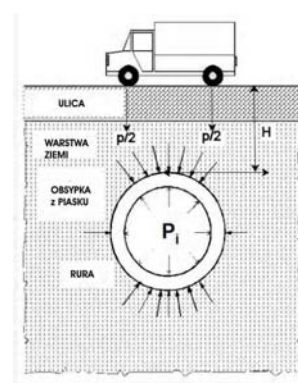
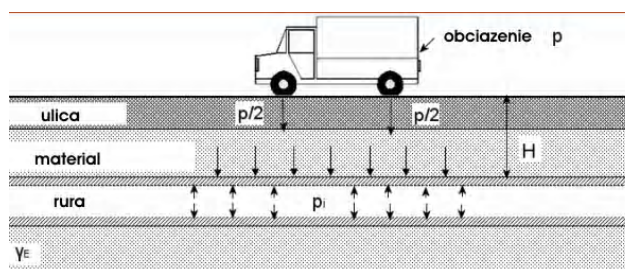
- Ciśnienie w instalacjach przeważnie występuje w postaci ciśnienia wewnętrznego. W tabeli 2 podano ciśnienie nominalne zależne od średnicy rur.

- Obciążenia dodatkowe - rurociągi mogą być instalowane w różnych wariantach i miejscach. Dlatego można rozróżnić co najmniej dwie metody montowania instalacji, tj. w postaci wiszącej bądź też ułożonej pod powierzchnią gruntu, co powoduje różnicę w obciążeniach działających na tę instalację (rys. 1).

TABELA 2. Ciśnienie nominalne zależne od średnicy rury

TABLE 2. Nominal pressures of pipelines

Ciśnienie nominalne					
Ciśnienie nominalne PN dla temperatury od -20 do 50°C bar	Rozmiar rury Typ B mm	Kształtki Typ B mm	Kolnierz	Kolnierz staly Forma V2, V3	Podwyższone ciśnienie pracy dla temperatury od 50 do 80°C, bary
16	25 do 1000	- - -	- - -	- - -	10
10	- -	65 do 150	65 do 150	65 do 150	6
6	- - -	200 do 300	200 do 300	200 do 300	4



Rys. 1. Obciążenia działające na rurociąg podziemny

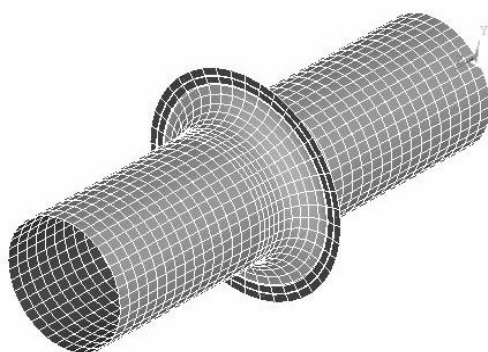
Fig. 1. Loads of pipes under ground

- Obciążenia osiowe przy założeniu złączki - siła powstała poprzez wprowadzenie zaślepki lub ewentualnie złączki oraz działania na nią ciśnienia wewnętrznego.

- Obciążenia występujące w zbiornikach; w tym przypadku został przebadany wpływ zaokrąglonej zaślepki lub zbiornika na końcu instalacji.

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA

W celu umożliwienia analizy wytrzymałościowej struktury elementów rurociągu zostały zamodelowane kompletne rury i kształtki. Numeryczna analiza naprężeń została zaprojektowana i przeprowadzona w pakiecie obliczeniowym ANSYS 7.0 oraz zweryfikowana dodatkowo w programie I-DEAS NX. W programie ANSYS zastosowano czterowierzchołkowe elementy typu shell o numerze 99 (rys. 2).



Rys. 2. Kołnierz - model MES
Fig. 2. Flange - Model

Tabela 3 przedstawia przeanalizowane elementy rurociągów z różną konstrukcją struktury wraz z kombinacją obciążeń.

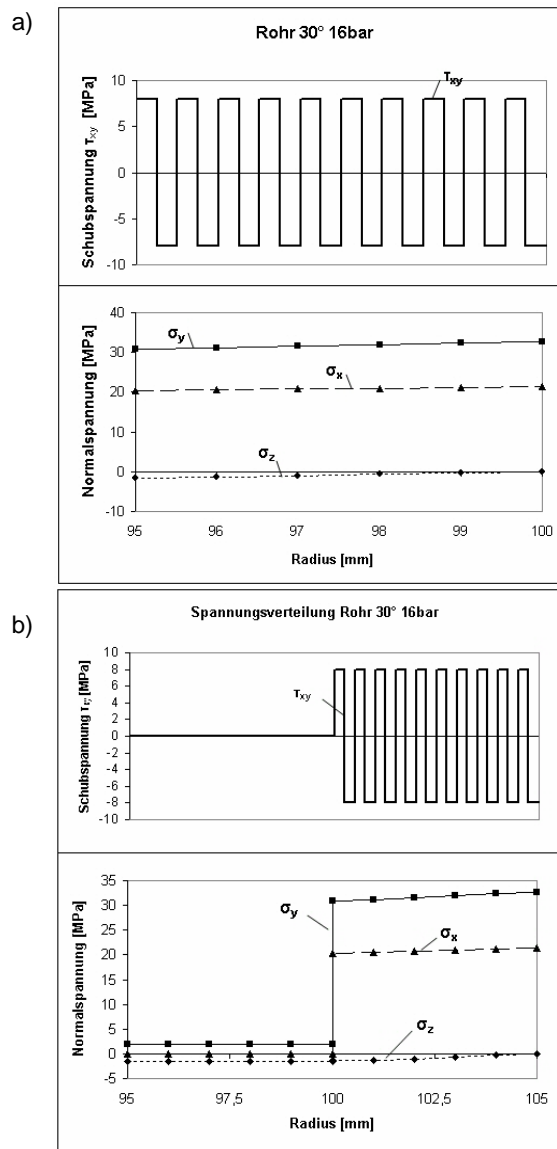
TABELA 3. Zestawienie elementów i obciążeń
TABLE 3. Elements and loads

Obciążenie zadane	Obliczenia				
	PN ₁₆ bar Ciśnienie nominalne	6*PN Ciśnienie krótkotrwałe	PN ₁₆ bar Zginanie F_x	PN ₁₆ bar Obciążanie wzdłużne F_z	PN-B Zbiorniki
Warianty					
Rura 30°	X	X	X	X	X
Rura 45°	X	X	X	X	X
Rura 60°	X	X	X	X	X
Kołanko 30°	X	X		X	
Kołanko 45°	X	X		X	
Kołanko 60°	X	X		X	
Redukcja 30°			X		
Redukcja 45°			X		
Redukcja 60°			X		
Trójnik 30°	X	X			
Trójnik 45°	X	X			
Trójnik 60°	X	X			
Kołnierz 30°	X	X			
opty. rura		X			

opty. kolanko		X			
opty. redukcja		X			
opty. kołnierz		X			
opty. trójnik		X			

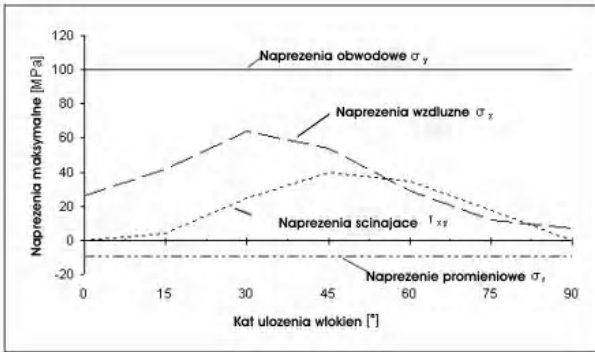
Dla każdej wybranej rury i kształtki na rysunkach 3-13 przedstawiono przebiegi naprężeń.

- rura



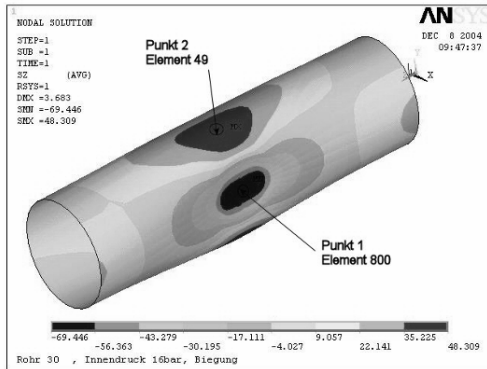
Rys. 3. Przebiegi naprężeń dla rury (±30° DN 100) przy ciśnieniu wewnętrznym 16 barów: a) bez linerem, b) z linerem

Fig. 3. Strengths of pipe (±30° DN 100) with internal pressure 16 bar



Rys. 4. Zależność naprężeń maksymalnych od ułożenia włókien w rurze o średnicy $DN = 200$ z ciśnieniem wewnętrznym 96 barów

Fig. 4. Fibre orientation and strength of pipe $DN = 200$ with internal pressure 96 bar

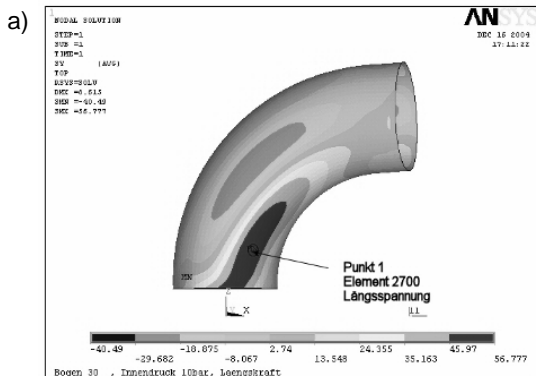


Rys. 5. Naprężenia wzdłużne w rurze ($\pm 30^\circ$) obciążonej ciśnieniem wewnętrznym i zginaniem

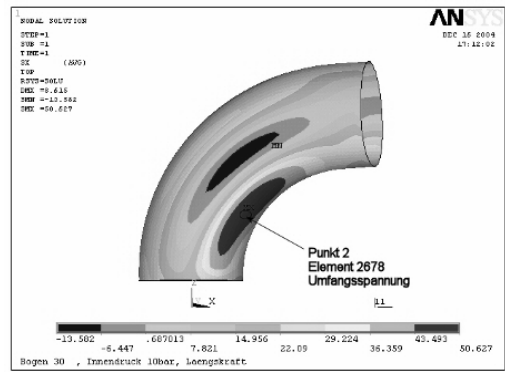
Fig. 5. Longitudinal strength of pipe ($\pm 30^\circ$) with internal pressure and bending

W przypadku symulacji odcinka rury otrzymano optymalne ułożenie włókien zapewniających największą wytrzymałość na działanie ciśnienia wewnętrznego. Dla rur o średnicy wewnętrznej 100 mm jest to $54,5^\circ$. Użytko także potwierdzenie, że zginanie, któremu najczęściej poddane są odcinki proste rurociągów, ma znaczący wpływ na ich wytrzymałość oraz trwałość. Przekonano się również, że istotną sprawą w badaniach wytrzymałościowych odcinków rur prostych jest zginanie i niezbędne jest przygotowanie stanowiska eksperymentalnego w ten sposób, by pozwoliło zweryfikować praktycznie wyniki symulacji.

- kolanko

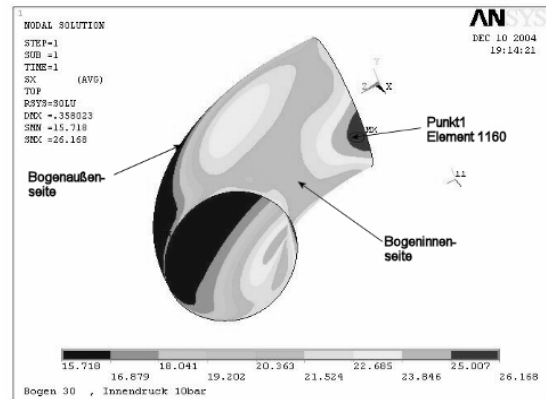


a)



Rys. 6. Naprężenia wzdłużne (a) i obwodowe (b) kolanka ($\pm 30^\circ$) w czasie obciążania ciśnieniem wewnętrznym (10 bar) oraz siłą wzdłużną

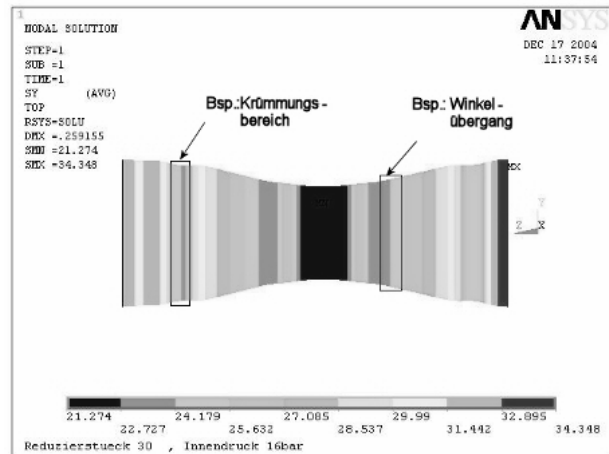
Fig. 6. Longitudinal strengths (a) and circumferential strengths (b) of bend ($\pm 30^\circ$) with internal pressure (10 bar) and thrust load



Rys. 7. Naprężenia obwodowe kolanka ($\pm 30^\circ$) z ciśnieniem wewnętrznym (10 barów)

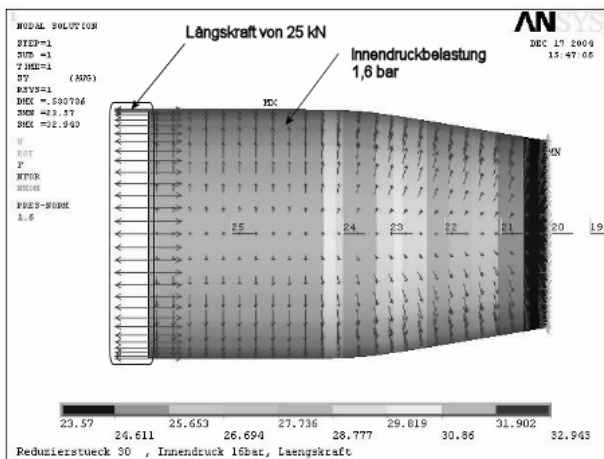
Fig. 7. Circumferential strengths of bend ($\pm 30^\circ$) with internal pressure (10 bar)

- redukcja



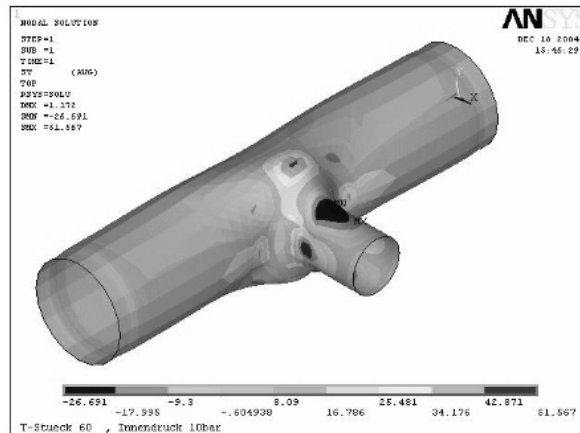
Rys. 8. Naprężenia obwodowe redukcji ($\pm 30^\circ$) przy ciśnieniu 10 bar

Fig. 8. Circumferential strengths of diminishing pipe ($\pm 30^\circ$) with internal pressure (10 bar)



Rys. 9. Napężenia wzdłużne elementu redukcji ($\pm 30^\circ$) przy ciśnieniu wewnętrznym (1,6 bara) i działaniu siły wzdłużnej (25 kN)

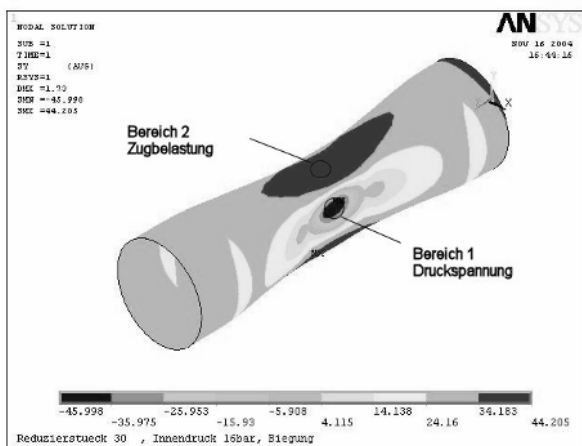
Fig. 9. Longitudinal strengths of diminishing pipe ($\pm 30^\circ$) with internal pressure (1.6 bar) and thrust load (25 kN)



Rys. 11. Napężenia wzdłużne w trójniku ($\pm 60^\circ$) przy dokładnym zamodelowaniu kąta ułożenia włókien w odgałęzieniu (a) oraz przy aproksymowanym przybliżonym ułożeniu (b)

Fig. 11. Longitudinal strengths of T-piece ($\pm 60^\circ$) with fibre optimization

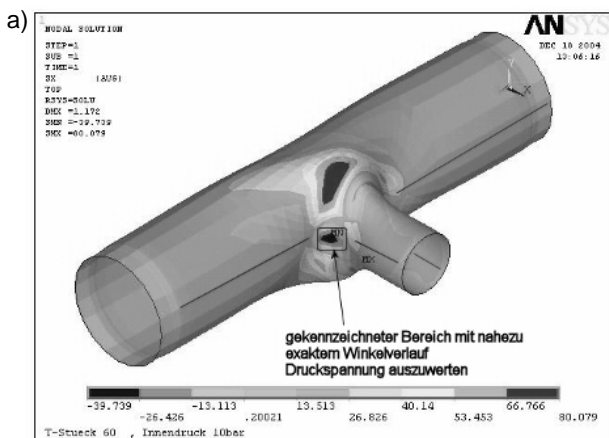
Symulacja pracy trójnika pokazała miejsca wrażliwe konstrukcji, co pozwoliło na dodatkowe wzmocnienie elementu podczas wytwarzania. Osiągnięto to poprzez zagęszczenie wypłotu w punktach krytycznych.



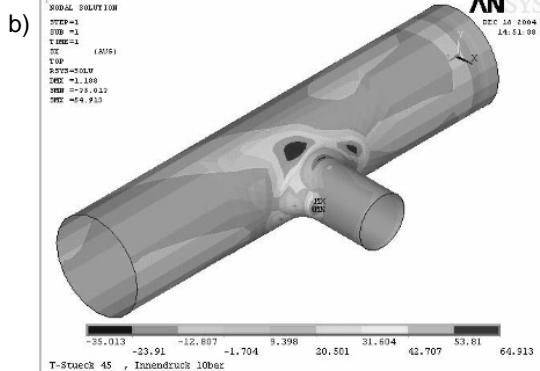
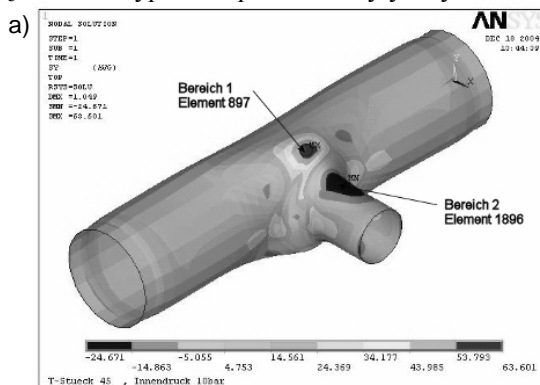
Rys. 10. Napężenia obwodowe redukcji ($\pm 30^\circ$) przy ciśnieniu wewnętrznym (10 bar) i zginaniu

Fig. 10. Circumferential strengths of diminishing pipe ($\pm 30^\circ$) with internal pressure (10 bar) and bending

• Trójnik



b)

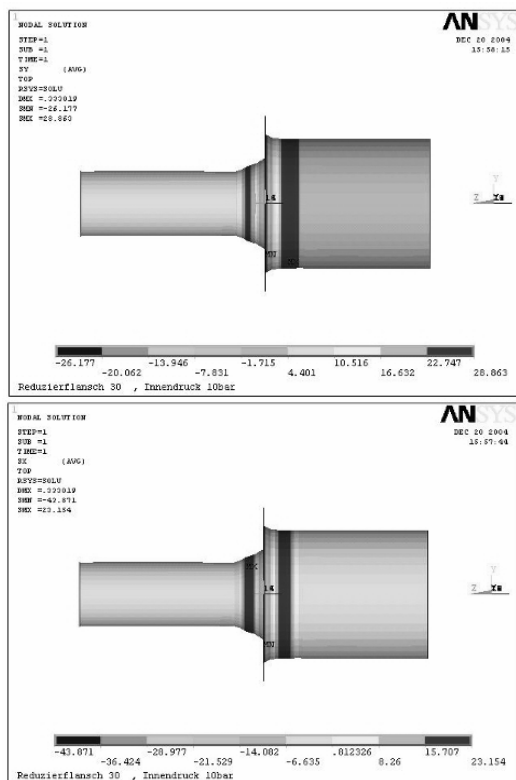


Rys. 12. Napężenia obwodowe trójnika ($\pm 45^\circ$) przy ciśnieniu wewnętrznym (10 bar) (a) oraz przy ciśnieniu wewnętrznym (10 bar) i sile wzdłużnej (b)

Fig. 12. Circumferential strengths of T-piece ($\pm 45^\circ$) with internal pressure (10 bar) (a) and thrust load (b)

• kołnierz

a)



Rys. 13. Naprężenia obwodowe (a) i naprężenia wzdłużne (b) kołnierza ($\pm 30^\circ$) przy ciśnieniu wewnętrznym 10 bar

Fig. 13. Circumferential strengths (a) and longitudinal strengths (b) of flange ($\pm 30^\circ$) with internal pressure (10 bar)

W przypadku symulacji elementów kołnierza otrzymano również miejsca o największej koncentracji naprężeń wzdłużnych oraz obwodowych, pozwalających w procesie wytwórczym wzmocnić dodatkowo obszary krytyczne. Porównanie kształtek wykonanych z zastosowaniem wyników symulacji z kształtkami z partii pilotażowej przyniosło pozytywne efekty w zakresie poprawy wytrzymałości w złożonych stanach obciążeń.

WNIOSKI

Przeprowadzone symulacje pokazują geometryczne nieregularności w stosunku do oczekiwanych wyników stref naprężeń maksymalnych. Analiza metodą elementów skończonych wskazała jednak miejsca największych naprężeń w badanych elementach i pozwoliła na znalezienie optymalnego ułożenia włókien oraz odpowiedniej kombinacji warstw w obszarach niebezpiecznych, a co za tym idzie miejsca, w których w elementach gotowych może nastąpić uszkodzenie. Korzystając z tych wyników w przypadku trójników, możliwe było wzmocnienie miejsc krytycznych poprzez zagęszczenie wylotu.

Zastosowanie dwóch programów do przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej za pomocą MES dało potwierdzenie poprawności wyników, ale dokładne ich porównanie możliwe będzie dopiero po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych.

Kolejnym krokiem będzie wykonanie rur o optymalnej konstrukcji, o odpowiednim ułożeniu włókien, przystosowanie urządzenia do badania rur o średnicach wewnętrznych 100 i 200 mm oraz wykonanie eksperymentów na elementach w złożonych stanach obciążeń.

Autorzy dziękują AIF za finansową pomoc w przeprowadzeniu badań.

LITERATURA

- [1] Hufenbach W., Kroll L., Böhm R., Langkamp A., Czulak A., Piping elements from textile reinforced composite materials for chemical apparatus construction, 12th International Scientific Conference Achievements in Mechanical & Materials Engineering, Zakopane, 7-10 12.2003, 391-398.
- [2] Zajac P., Blazejewski W., Czulak A., Böhm R., Badania kompozytowych próbek rurowych do oceny własności materiału kompozytowego, Materiały Polimerowe Pomierania-Plast 2004, Międzyzdroje 2.6.-4.6.2004.
- [3] Hufenbach W., Kroll L., Böhm R., Langkamp A., Rohrleitungselemente aus textilverstärkten Verbundwerkstoffen für den chemischen Apparatebau, Chemie Ingenieur Technik 2004, 76(7), 898-902.
- [4] Blazejewski W., Hufenbach W., Czulak A., Böhm R., Manufacture and test of composite tube specimens with braided glass fibre reinforcement, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 4, 67-71.
- [5] Hufenbach W., Blazejewski W., Kroll L., Böhm R., Gude M., Czulak A., Manufacture and multi-axial test of composite tube specimens with braided glass fibre reinforcement, Journal of Materials Processing Technology 2005, 162-163, 162-165.
- [6] Hufenbach W., Blazejewski W., Kroll L., Böhm R., Gude M., Czulak A., Manufacture and multi-axial test of composite tube specimen with braided glass-fibre reinforcement, Advances in Materials and Processing Technologies AMPT in COMMENT 2005, Wisła, 16.5-19.5.2005.
- [7] Hufenbach W., Böhm R., Kroll L., Czulak A., Braided composite pipe elements for applications in chemical apparatus engineering, 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), Durban, 27.6.-1.7.2005, auf CD-ROM.
- [8] Hufenbach W., Böhm R., Blazejewski W., Kroll L., Czulak A., Manufacture, design and testing of piping elements from braided composites, Chemical Engineering and Technology 2005, 28(7), 808-813.
- [9] Zichner M., Adam F., Böhm R., Hufenbach W., Production technologies for high-tech applications made of continuous fiber-reinforced polymers. Kolloquium der Shanghai Automotive Association, Shanghai, 19.10. 2005.
- [10] Langkamp A., Bruchmodebezogene Versagensmodelle für faser- und textilverstärkte Basisverbunde mit polymeren, keramischen sowie metallischen Matrices, Dissertation, TU, Dresden 2004.

Recenzent
Józef Śleżiona