

Przemysław Jaszak<sup>1\*</sup>, Janusz Skrzypacz<sup>1</sup>, Konrad Adamek<sup>2</sup>, Paweł Myjak<sup>2</sup>

## Analiza sztywności kompensatora gumowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz badań doświadczalnych

W pracy przedstawiono właściwości mechaniczne gumy EPDM i NBR o twardości 65 °ShA. Rezultaty w postaci jednoosiowego i dwuosiowego rozciągania stanowią niezbędne dane do przeprowadzenia analizy numerycznej odkształcenia elementów wykonanych z gumy. Do zaprojektowania kompensatora o zwiększonej wytrzymałości wykorzystano analizę numeryczną, bazującą na metodzie elementów skończonych. Numeryczny model kompensatora poddano złożonemu obciążeniu, wyznaczając sztywność w danym kierunku osi oraz dopuszczalne naprężenia gwarantujące bezawaryjną eksploatację kompensatora.

**Słowa kluczowe:** guma, kompensator, projektowanie.

## Rubber compensator stiffness analysis using finite element method and experimental tests

The paper presents the mechanical properties of the NBR and EPDM 65 Shore A hardness rubber. The results in the form of uniaxial and biaxial tension are necessary data to perform numerical analysis of the elements made of rubber. To design of the rubber expansion joint with increased strength the numerical analysis based on finite elements method was used. The numerical model of the rubber bellow subjected to complex load as results determined stiffness in different axial direction as well as permissible stress guarantying its failure-free exploitation.

**Keywords:** rubber, compensator, design.

<sup>1</sup>Politechnika Wroclawska,  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
<sup>2</sup>GAMBIT LUBAWKA Spółka z o.o.  
\*e-mail: przemyslaw.jaszak@pwr.edu.pl

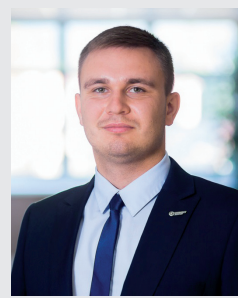
**Dr inż. Przemysław Jaszak** – adiunkt w zakładzie Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wroclawskiej. Zainteresowania zawodowe: projektowanie maszyn, metoda elementów skończonych, technika uszczelniania maszyn i urządzeń.



**Dr hab. inż. Janusz Skrzypacz** – adiunkt w zakładzie Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wroclawskiej. Zainteresowania naukowe: projektowanie konstrukcji mechanicznych, metoda elementów skończonych, obliczenia CFD, pompy i układy pompowe.



**Mgr inż. Konrad Adamek** – absolwent Politechniki Wrocławskiej Wydziału Mechaniczno-Energetycznego. W firmie Gambit – Lubawka Sp. z o.o. konstruktor-technolog zajmujący się opracowywaniem oraz wdrożeniem nowych typów uszczelnień.



**Mgr Paweł Myjak** – absolwent Wydziału Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego. Technolog w Gambit – Lubawka Sp. z o.o. Główne zadania to tworzenie, rozwój oraz wdrażanie technologii w zakresie kompozytów elastomerowych.

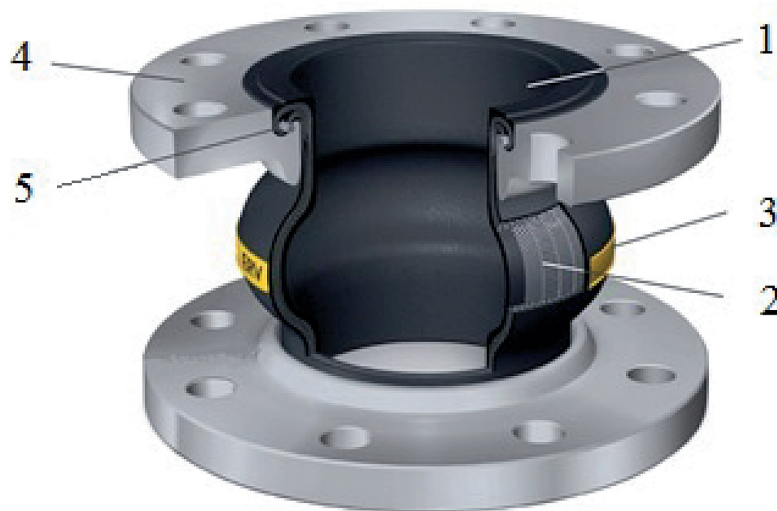


## 1. Wstęp

Według definicji [1], kompensator gumowy to elastyczne połączenie, wytworzone z kompozycji syntetycznego lub naturalnego kauczuku, tkaniny i, jeżeli to konieczne, metalowego wzmocnienia, spojone w procesie wulkanizacji w jednolitą powłokę pyło- i gazoszczelną. Głównym zadaniem kompensatora jest zmniejszenie wpływu odkształceń mechanicznych i termicznych na elementy instalacji rurociąkowej. Przykładową konstrukcję kompensatora gumowego z metalowymi kołnierzami przedstawiono na Rys. 1.

## 1. Introduction

According to the definition [1], the rubber compensator is a flexible connection, made from a synthetic or natural rubber composition, fabric and, if necessary, metal reinforcement, bonded in a vulcanization process into a uniform coating, dust- and gas-tight. The main task of the compensator is to reduce the influence of mechanical and thermal strain on the elements of the pipeline. An exemplary design of a rubber expansion joint with metal flanges is shown in Fig. 1.



**Rys. 1.** Przykładowa konstrukcja kompensatora gumowo-metalowego [2]; 1 – warstwa wewnętrzna, 2 – warstwa wzmacniająca, 3 – warstwa zewnętrzna, 4 – kołnierz metalowy, 5 – pierścień wzmacniający  
**Fig. 1.** Exemplary design of the rubber-metallic bellows [2]; 1 – liner, 2 – reinforcement, 3 – cover, 4 – metal flange, 5 – strengthening ring

Cechy konstrukcyjne kompensatora gumowego to przede wszystkim odpowiednia elastyczność oraz zdolność kompensacji przemieszczeń w jednym lub wielu kierunkach jednocześnie. Schemat przemieszczeń, jakim poddany jest kompensator, przedstawiono na Rys. 2. Do głównych parametrów projektowych należą:

- zdolność do kompensacji przemieszczeń osiowych – ściskających lub rozciągających, powodujących zmianę wymiarów nominalnych kompensatora w kierunku osiowym i obwodowym;
- zdolność do kompensacji przemieszczeń bocznych – w kierunku prostopadłym do osi kompensatora przy jednoczesnym zachowaniu równoległości kołnierzy;
- zdolność do kompensacji przemieszczeń kątowych – wywołujące utratę prostopadłości jednego z kołnierzy względem osi kompensatora.

Podczas pracy kompensatora wszystkie wyżej wymienione przemieszczenia działają jednocześnie. Takie przemieszczenie nazywa się granicznym przemieszczeniem całkowitym, powinno ono podczas normalnej pracy kompensatora spełniać poniższą zależność:

$$1 \geq \frac{\Delta c}{c_{\text{lim}}} + \frac{\Delta a}{a_{\text{lim}}} + \frac{\Delta r}{r_{\text{lim}}} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{\text{lim}}} \quad (1)$$

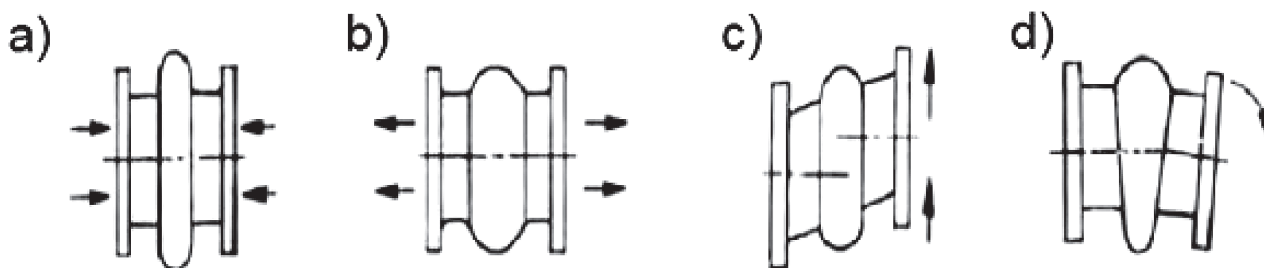
gdzie:

$\Delta c$ ,  $c_{\text{lim}}$  – odpowiednio: aktualne i graniczne przemieszczenie ściskające,

$\Delta a$ ,  $a_{\text{lim}}$  – odpowiednio: aktualne i graniczne przemieszczenie rozciągające,

$\Delta r$ ,  $r_{\text{lim}}$  – odpowiednio: aktualne i graniczne przemieszczenie boczne,

$\Delta \alpha$ ,  $\alpha_{\text{lim}}$  – odpowiednio: aktualne i graniczne przemieszczenie kątowe.



**Rys. 2.** Schemat przemieszczeń kompensatora gumowego; a) osiowe – ściskające, b) osiowe – rozciągające, c) boczne, d) kątowe [1]

**Fig. 2.** The scheme of bellows deflection a) axial – compression, b) axial – elongation, c) lateral, d) angular [1]

Graniczne przemieszczenia są wyznaczane na podstawie testów laboratoryjnych według odpowiednich standardów (np. [3]). W przypadku opracowania prototypowych konstrukcji, liczbę wykonywanych testów można ograniczyć do minimum dzięki zastosowaniu symulacji komputerowych. Jedną z nich jest metoda elementów skoń-

The structural features of a rubber expansion joint are, above all, adequate flexibility and the ability to compensate for displacements in one or more directions at the same time. The scheme of displacements which the compensator is subjected to is shown in Fig. 2. The main design parameters are:

- ability to compensate axial displacements – compression or tensile loads, causing changes in nominal dimensions of the compensator in the axial and peripheral direction,
- ability to compensate lateral displacements – in the direction perpendicular to the axis of the compensator while maintaining the parallelism of the flanges,
- ability to compensate angular displacements – causing loss of perpendicularity of one of the flanges with respect to the compensator axis.

An indispensable case of compensator operation is the occurrence of the above-mentioned displacements operating simultaneously. Such a displacement is called a limit total displacement. The total limit displacement of the compensator during its normal operation should fulfill the following relationship:

$$1 \geq \frac{\Delta c}{c_{\text{lim}}} + \frac{\Delta a}{a_{\text{lim}}} + \frac{\Delta r}{r_{\text{lim}}} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{\text{lim}}} \quad (1)$$

Where

$\Delta c$ ,  $c_{\text{lim}}$  – current and limit compressive displacement, respectively;

$\Delta a$ ,  $a_{\text{lim}}$  – current and limit tensile displacement, respectively;

$\Delta r$ ,  $r_{\text{lim}}$  – current and limit lateral displacement, respectively;

$\Delta \alpha$ ,  $\alpha_{\text{lim}}$  – current and limit angular displacement, respectively.

Limit displacements are determined based on laboratory tests according to standards, e.g. [3]. In the case of developing prototype structures, the number of tests performed can be reduced to a minimum thanks to computer simulation. One of simulation methods is the finite element method. The process

czonych. Proces modelowania elementów gumowych tą metodą szerzej opisano m.in. w pracach [4, 5]. Procedura sprowadza się do właściwego odwzorowania charakterystyki materiałowej gumy. Dane z badań doświadczalnych, takich jak jednoosiowe rozciąganie, dwuosiowe rozciąganie czy ścinanie, przybliża się odpowiednim modelem materiału oraz właściwym ustawieniem warunków brzegowych, symulując przypadki obciążenia, jakim jest poddawany element w czasie eksploatacji.

## 2. Badanie doświadczalne

Na Rysunku 3 zaprezentowano stanowisko badawcze do wyznaczania właściwości mechanicznych gumy w próbie jednoosiowego rozciągania. Do badań przyjęto próbki wiósełkowe typu S1 wg [6], wykonane z gum NBR i EPDM o twardości 65 °ShA. Eksperyment przeprowadzono zgodnie z normą [7]. Prędkość rozciągania wynosiła 500 mm/min. Rejestrację siły w funkcji wydłużenia próbki prowadzono do momentu jej zerwania.

Na Rysunkach 4 i 5 zestawiono wyniki badań w postaci krzywych rozciągania, opisujących zależność pomiędzy naprężeniem ( $\sigma$ ) i odkształceniem względnym ( $\epsilon$ ). Próbie rozciągania poddano po trzy próbki wykonane z każdego badanego gatunku gumy.

Uzupełnieniem danych niezbędnych do numerycznego odwzorowania materiału są testy polegające na dwuosiowym rozciąganiu. Procedurę oraz sposób przeprowadzenia takiego eksperymentu dokładnie omówiono w pracach [4, 8]. Polega ona na nadmuchiwanii gumo-

of modeling rubber elements using this method is described in more detail in the works [4, 5]. In general, the whole procedure boils down to the proper mapping of the rubber material characteristics. Data from experimental tests such as uniaxial stretching, biaxial stretching or shearing, is approximated by a suitable material model and proper setting of boundary conditions, simulating the cases of the load the element undergoes during operation.

## 2. Experimental study

Figure 3 presents a test stand for determining the mechanical properties of rubber in the uniaxial stretching test. S1 barbell samples according to [6], made of NBR and EPDM rubber with a hardness of 65 degrees Shore (A), were used for the tests. The experiment was carried out in accordance with the standard [7]. The stretching speed was 500 mm/min. The registration of force as a function of sample elongation was carried out until it was broken.

Figures 4 and 5 present the results of tests in the form of stretching curves describing the relationship between stress ( $\sigma$ ) and relative strain ( $\epsilon$ ). Three specimens made of each tested rubber grade were subjected to a tensile test.

The data required for numerical reproduction of the material are supplemented by tests based on biaxial stretching. The procedure and the manner of conducting such an experiment are discussed in detail in [4, 8]. The

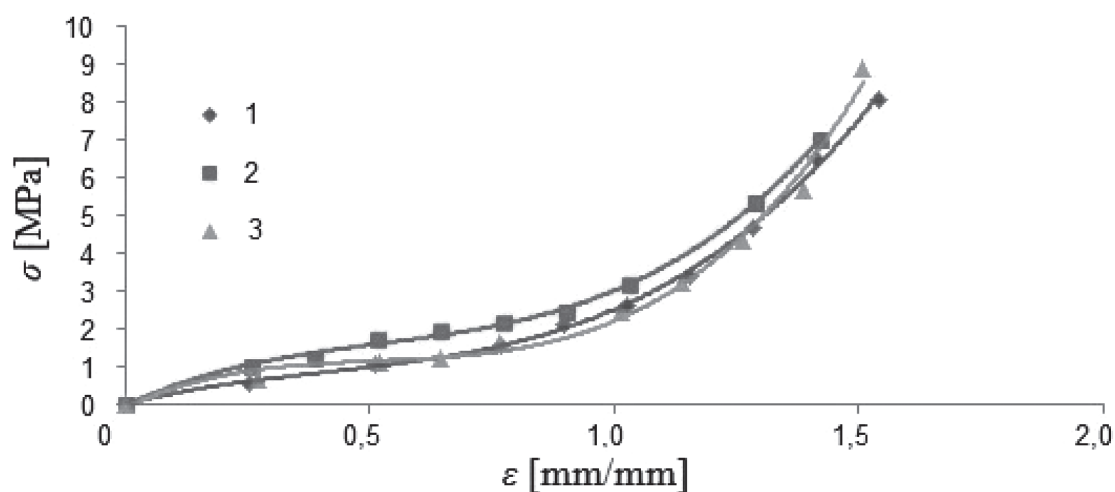


Rys. 3. Maszyna wytrzymałościowa Instron model 5944  
Fig. 3. Instron 5944 test rig

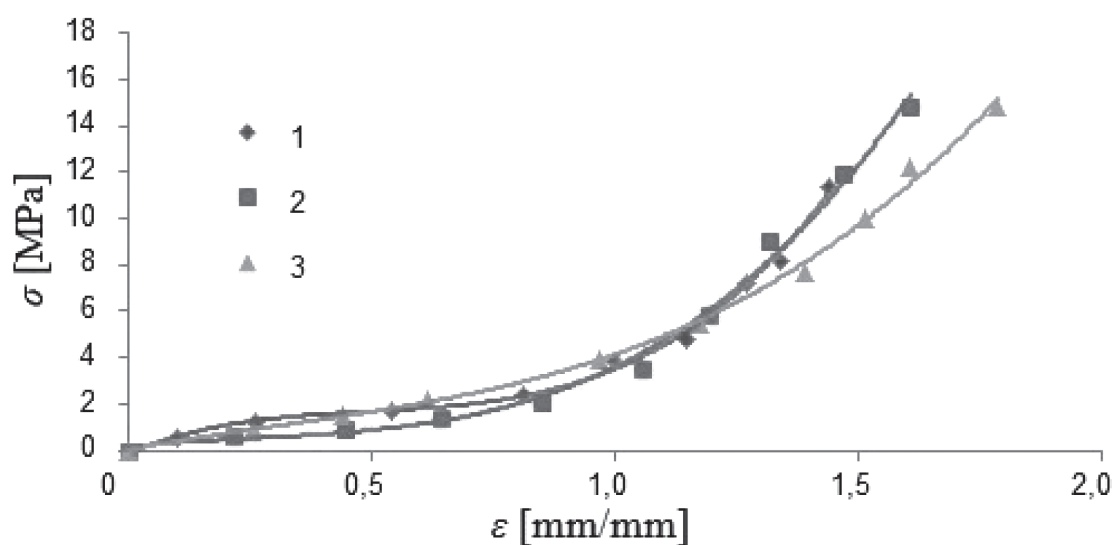


wego krążka do postaci bańki, z jednoczesnym pomiarem ciśnienia oraz odkształcenia próbki. Na Rysunkach 6 i 7 przedstawiono charakterystyki gumy uzyskane w teście dwuosiowego rozciągania. Widać, że zerwanie próbek nastąpiło przy mniejszym odkształceniu niż w przypadku próbek wiosełkowych. Zestaw uzyskanych w ten sposób danych eksperymentalnych przybliża się właściwym modelem materiału. W przypadku obydwu gatunków analizowanych gum, najlepszym dopasowaniem danych eksperymentalnych okazał się trójparametryczny model materiału gumy wg Mooneya-Rivlina. Na Rysunku 8 przedstawiono przykład dopasowania tego modelu dla zestawu danych eksperymentalnych gumy EPDM.

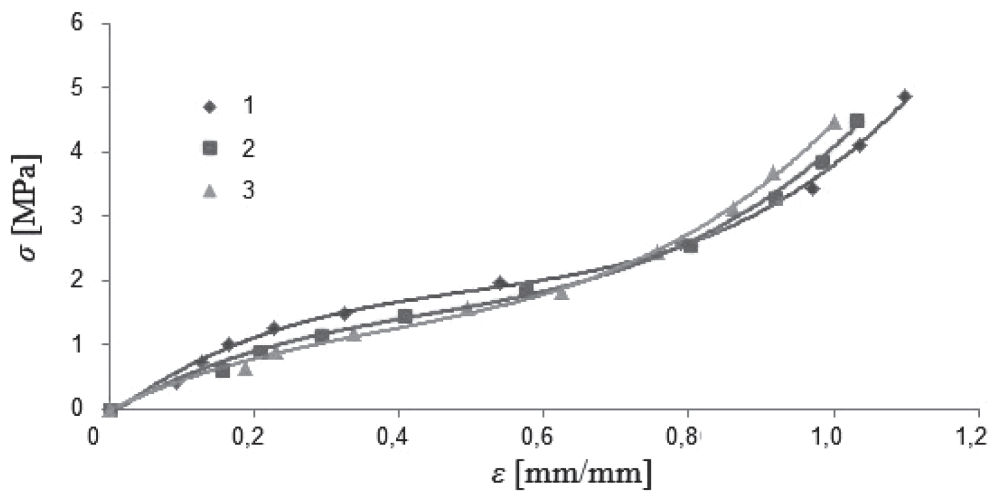
test procedure consisted in blowing a rubber disk into a bubble, simultaneously measuring the pressure and deformation of the sample. Figures 6 and 7 present the characteristics of the rubber obtained in the two-axial stretching test. It can be seen that the breaking of the samples took place with less deformation, compared to the barbell samples. The set of experimental data obtained in this way is approximated by the proper material model. In the case of both species of analyzed rubbers, the best fit of experimental data was the three-parameter model of the rubber material according to Mooney-Rivlin. Figure 8 shows an example of the fit of this model for the EPDM rubber experimental data set.



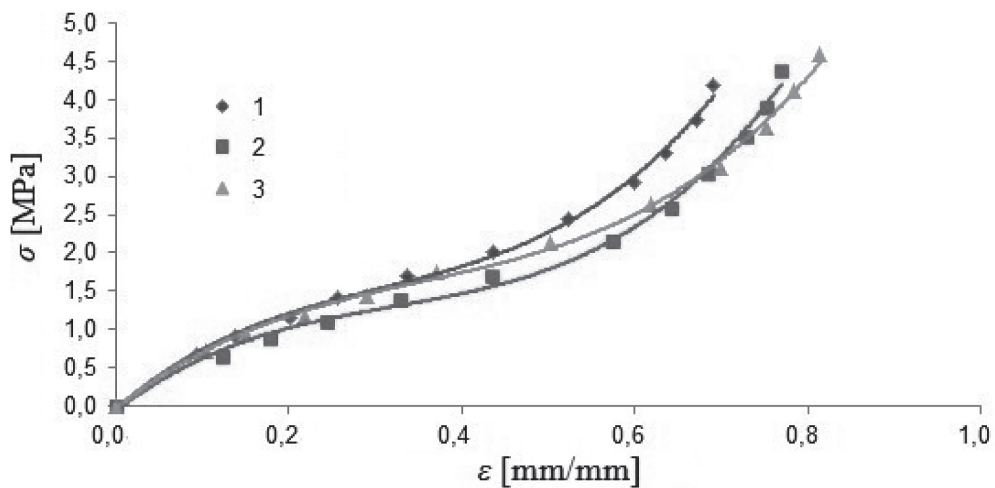
**Rys. 4.** Charakterystyka jednoosiowego rozciągania gumy EPDM o twardości 65 °ShA  
**Fig. 4.** Characteristic of uniaxial stretch of the EPDM rubber at 65 Shore A hardness



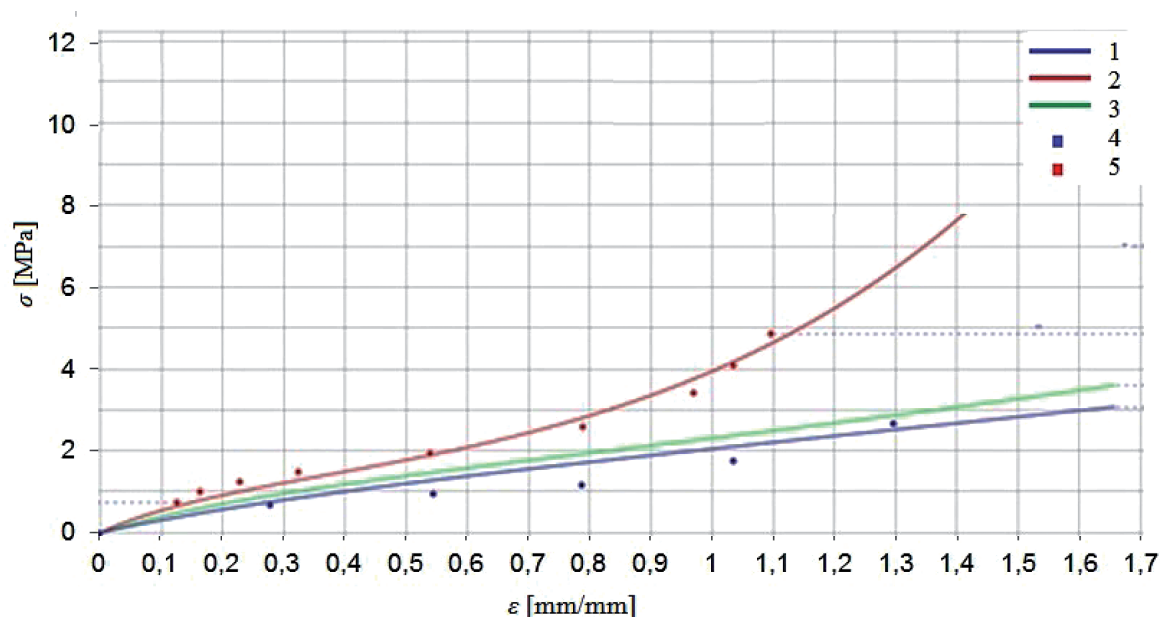
**Rys. 5.** Charakterystyka jednoosiowego rozciągania gumy NBR o twardości 65 °ShA  
**Fig. 5.** Characteristic of uniaxial stretch of the NBR rubber at 65 Shore A hardness



**Rys. 6.** Charakterystyka dwuosowego rozciągania gumy EPDM o twardości 65 °ShA  
**Fig. 6.** Characteristic of biaxial stretch of the EPDM rubber at 65 Shore A hardness



**Rys. 7.** Charakterystyka dwuosowego rozciągania gumy NBR o twardości 65 °ShA  
**Fig. 7.** Characteristic of biaxial stretch of the NBR rubber at 65 Shore A hardness



**Rys. 8.** Dopasowanie krzywych jedno- i dwuosiowego rozciągania gumy EPDM z modelem materiału Mooneya–Rivlina; 1 – jednoosiowe rozciąganie (model M–R), 2 – dwuosiowe rozciąganie (model M–R), 3 – ścinanie (model M–R), 4 – jednoosiowe rozciąganie (dane), 5 – dwuosiowe rozciąganie (dane)

**Fig. 8.** Curve fitting of the uniaxial and biaxial stretch of EPDM rubber to Mooney-Rivlin model: 1 – uniaxial stretch (M-R model), 2 – biaxial stretch (M-R model), 3 – shear (M-R model), 4 – uniaxial stretch (data), 5 – biaxial stretch (data)

### 3. Modelowanie numeryczne odkształceń kompensatora

Model numeryczny kompensatora odwzorowano zgodnie ze wstępną koncepcją konstrukcji przedstawioną na Rysunku 9a. W modelu wyróżniono następujące grupy elementów: guma zewnętrzna, guma wewnętrzna, tkanina wzmacniająca, drut wzmacniający. Zastosowano sześciennie elementy skończone z funkcją kształtu wyższego rzędu (Rysunek 9b).

Poszczególnym grupom elementów przypisano następujące rodzaje materiału:

- guma zewnętrzna – EPDM/NBR;
- guma wewnętrzna – EPDM/NBR;
- tkanina wzmacniająca – poliamid;
- drut – stal.

Do modelowania właściwości materiału gumy wykorzystano hipersprężysty, trójparametryczny model Mooneya–Rivlina. Poliamidowe wzmocnienie modelowano jako ortotropowy model materiału, którego parametry mechaniczne przedstawiono w Tabeli 1. Obliczenia wykonano z aktywną funkcją nieliniowości materiałów.

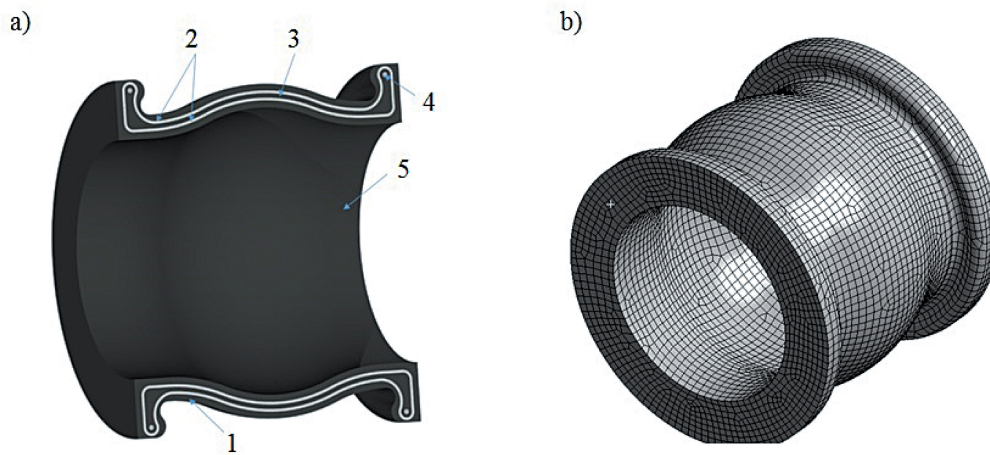
### 3. Numerical modeling of compensator deformation

The numerical model of the compensator was mapped according to the initial concept of the structure shown in Figure 9a. The following elements groups have been distinguished in the model: outer rubber, inner rubber, reinforcing fabric, reinforcing wire. Cubic finite elements with a higher-order shape function were used (Figure 9b).

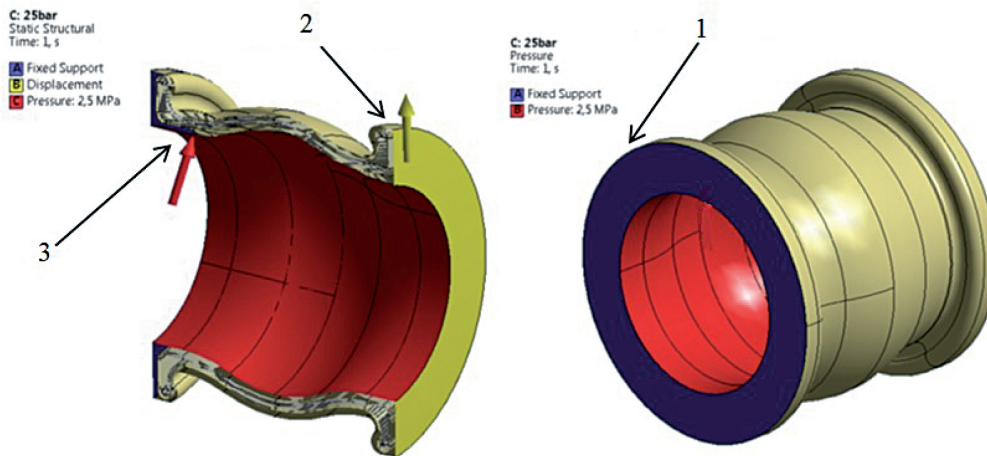
The following types of material have been assigned to individual groups of elements:

- external rubber – EPDM / NBR;
- internal rubber – EPDM / NBR;
- reinforcing fabric – polyamide;
- wire – steel.

To model the properties of the rubber material, a hyper resilient, three-parametric Mooney-Rivlin model was used. The polyamide reinforcement was modeled as an orthotropic material model whose mechanical parameters are shown in Table 1. The calculations were performed with the active non-linearity function of the materials.



**Rys. 9.** a) Model geometryczny; 1 – warstwa zewnętrzna, 2 – wzmocnienie, 3 – warstwa pośrednia, 4 – linka stalowa, 5 – warstwa wewnętrzna; b) siatka elementów skończonych  
**Fig. 9.** a) Geometric model; 1 – cover, 2 – reinforcement, 3 – intermediate layer, 4 – steel wire, 5 – liner; b) finite element mesh



**Rys. 10.** Warunki brzegowe i warianty obciążenia modelu:  
 1 – utwierdzenie, 2 – przemieszczenie, 3 – ciśnienie wewnętrzne  
**Fig. 10.** Boundary conditions and types of model loads:  
 1 – fixing, 2 – displacement, 3 – internal pressure

**Tabela 1.** Dane wytrzymałościowe poliamidowej tkaniny o grubości 1 mm [9]  
**Table 1.** Strength data of a 1 mm thick polyamide fabric [9]

Moduł odkształcenia wzdłużnego Longitudinal deformation module		Moduł odkształcenia postaciowego Form deformation module		Liczba Poissona Poisson number	
Kierunek osi Axis direction	Wartość Value [MPa]	Płaszczyzna Plane	Wartość Value [MPa]	Płaszczyzna Plane	Wartość Value [-]
x	1 200	xy	400	xy	0,43
y	1 200	yz	400	yz	0,43
z	500	xz	200	xz	0,35



Na Rysunku 10 przedstawiono przyjęte warunki brzegowe oraz rozpatrywane warianty obciążenia modelu:

- utwierdzono węzły na płaszczyźnie czołowej kompensatora;
- wymuszono przemieszczenie wzdłużne/przemieszczenie boczne/obrót, przeciwległej powierzchni czołowej kompensatora;
- wewnętrzną powierzchnię kompensatora obciążono ciśnieniem.

## 4. Wyniki obliczeń numerycznych

Na Rysunku 11 przedstawiono mapy rozkładu naprężenia zredukowanego w materiale elastycznej powłoki kompensatora wykonanej z gumy NBR (Rys. 11b, 11d, 11f, 11h) oraz EPDM (Rys. 11a, 11c, 11e, 11g), w zależności od rozpatrywanych wariantów obciążenia modelu. Wszystkie mapy rozkładu naprężenia zredukowanego uzyskano, obciążając model ciśnieniem o maksymalnej wartości, wynoszącej 2,5 MPa. Na Rysunkach 12–17 zaprezentowano charakterystyki sztywności kompensatora przy czterech wartościach ciśnień wewnętrznych. Charakterystyka sztywności przedstawia wykres uogólnionego obciążenia (siły  $F$  lub momentu  $M$ ), wywołującego określone uogólnione przemieszczenie składowe płaszczyzny czołowej kompensatora (składową przemieszczenia względem danej osi  $a$  lub  $r$ , bądź kąt obrotu  $\alpha$ ). Na Rysunku 12 przedstawiono wykres sztywności przy ściskaniu kompensatora wykonanego z gumy EPDM. Przebieg charakterystyki jest degresywny, tzn. podczas wzrostu przemieszczenia przyrost siły stopniowo maleje. Ponadto wraz ze wzrostem ciśnienia wewnętrznego następuje wzrost sztywności powłoki. Odmiennie zachowuje się konstrukcja powłoki w przypadku osiowego rozciągania kompensatora (Rys. 13). Uzyskanie kolejnych przyrostów przemieszczenia wymaga przyrostu siły o coraz większej wartości, co oznacza, że przebieg charakterystyki jest progresywny. Ponadto zwiększenie ciśnienia wewnętrznego powoduje zmniejszenie sztywności powłoki. Kolejne rysunki prezentują rodzinę charakterystyk sztywności przy poprzecznym przemieszczeniu płaszczyzny czołowej kompensatora. Na Rysunku 14 zaprezentowano charakterystyki kompensatora wykonanego z gumy EPDM, a na Rysunku 15 – wykonanego z NBR. Charakterystyki sztywności obu rodzajów gumy wykazują liniową zależność siły od przemieszczenia. Wywołanie tego samego przemieszczenia kompensatora wykonanego z gumy EPDM wymaga przyłożenia mniejszej siły niż w przypadku kompensatora wykonanego z gumy NBR, która z reguły jest bardziej sztywna. W obydwu przypadkach wzrost ciśnienia wewnętrznego powoduje spadek sztywności powłoki – nachylenie charakterystyk jest mniejsze. Ostatnim zestawem krzywych są charakterystyki sztywności uzyskane w próbie odkształceń kątowych. Na Rysunku 16 zaprezentowano krzywe sztywności powłoki wykonanej z gumy EPDM, natomiast na Rysunku 17 – wykonanej z NBR. Charakterystyka sztywności kątowej

Figure 10 presents the adopted boundary conditions and considered variants of the model load:

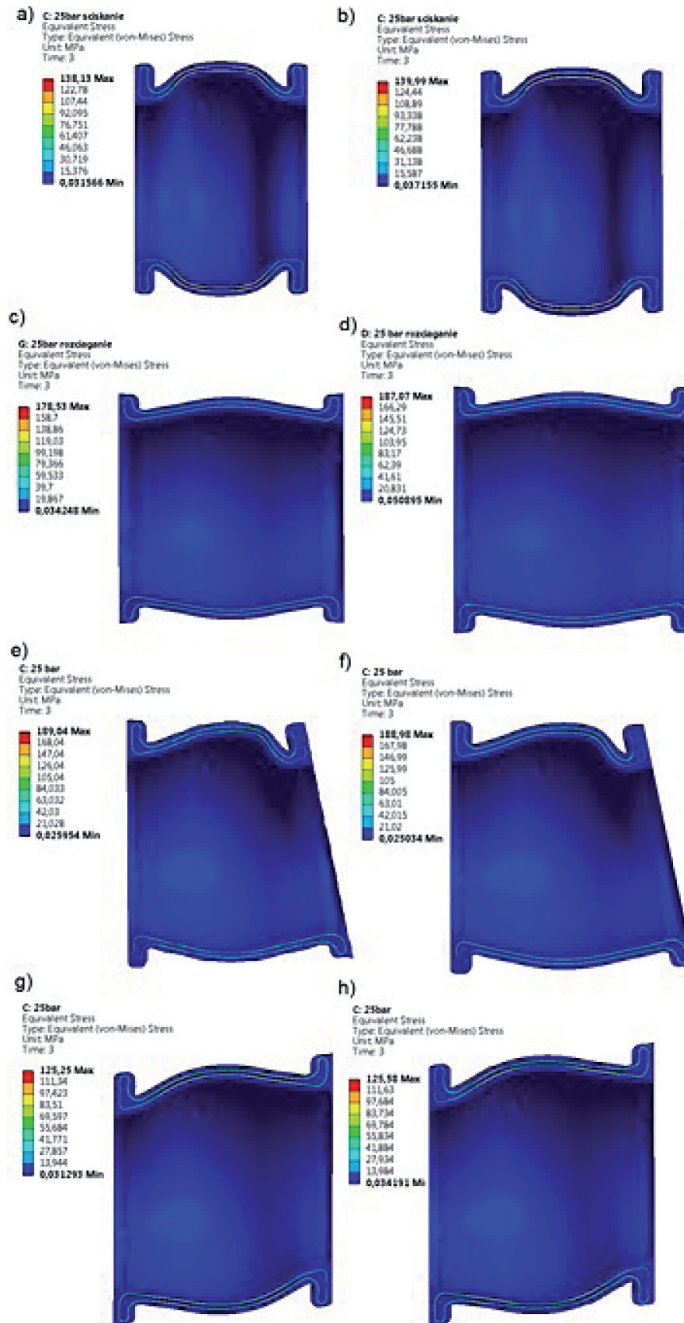
- nodes were fixed at the face of the compensator,
- longitudinal displacement / lateral displacement / rotation of the opposite face of the compensator was forced,
- the internal surface of the compensator was loaded with pressure.

## 4. The results of numerical calculations

Figure 11 presents maps of the distribution of the reduced stress in the elastic material of the compensator shell made of NBR rubber (Figures 11b, 11d, 11f, 11h) and EPDM rubber (Figures 11a, 11c, 11e, 11g), depending on the variants of the model load considered. All maps of the reduced stress distribution were obtained by applying pressure to the model with a maximum value of 2.5 MPa. Figures from 12 to 17 show the compensator stiffness characteristics at four internal pressure values. The stiffness characteristic is a graph of a generalized load (force or moment) that causes a specific generalized displacement of the front face of the compensator (displacement component relative to a given axis, or rotation angle). Figure 12 shows a graph of compression stiffness made of EPDM rubber. The course of the characteristic curve is degressive, i.e. during the increase of the displacement, the increase in force gradually decreases. In addition, as the internal pressure increases, the stiffness of the coating increases. The shell construction behaves differently in the case of axial expansion of the compensator (Fig. 13). Obtaining subsequent displacement increments requires increasing the force with an increasing value, which means that the course of the characteristic is progressive. In addition, increasing the internal pressure reduces the stiffness of the coating. The following drawings present a family of stiffness characteristics with a lateral displacement of the compensator face. Figure 14 presents the characteristics of a rubber expansion joint made of EPDM rubber and Fig. 15 – joint made of NBR. The stiffness characteristics of both types of rubber show a linear dependence of force on displacement. It is not surprising that the same displacement of a compensator made of EPDM rubber requires application of less force than in the case of a compensator made of NBR rubber, which is usually more rigid. In both cases, an increase in internal pressure results in a lower slope of the curves. In other words, the increase in pressure affects the stiffness of the coating. The last sets of curves are the stiffness characteristics obtained in the angle deformation test. Figure 16 shows the stiffness curves for coating made of EPDM rubber, while Fig. 17 – for coating made of NBR. The characteristics of angular stiffness of EPDM rubber coating is degressive,

powłoki wykonanej z gumy EPDM jest degeneracyjna, o małej wrażliwości na wpływ ciśnienia wewnętrznego, o czym świadczy niewielkie zróżnicowanie krzywych. Natomiast charakterystyka kątowej sztywności powłoki wykonanej z gumy NBR, przy zakresie ciśnienia 10–15 bar, wykazuje charakter liniowej zależności momentu od kąta obrotu.

with low sensitivity to the influence of internal pressure as evidenced by the slight variation of the curves. In contrast, the characteristics of the angular stiffness of the coating made of NBR rubber, with a pressure range from 10 to 15 bar, shows the character of linear torque dependence on the angle of rotation.



**Rys. 11.** Mapa rozkładu naprężenia zredukowanego w elastycznej powłoce kompensatora przy różnych postaciach odkształceń i ciśnieniu 25 bar; a) ściskanie EPDM, b) ściskanie NBR, c) rozciąganie EPDM, d) rozciąganie NBR, e) kątove EPDM, f) kątove NBR, g) boczne EPDM, h) boczne NBR

**Fig. 11.** Stress distribution in elastic diaphragm at different deflection mode and internal pressure 25 bar, a) compression EPDM, b) compression NBR, c) elongation EPDM, d) elongation NBR, e) angular EPDM, f) angular NBR, g) lateral EPDM, h) lateral NBR

Pod wpływem większego ciśnienia wewnętrznego charakterystyka sztywności przybiera postać linii łamanej. Przy kącie obrotu powyżej 5 stopni następuje nieznaczny spadek sztywności. Ponadto powłoka wykonana z gumy NBR jest prawie dwukrotnie bardziej sztywna w porównaniu do powłoki wykonanej z gumy EPDM.

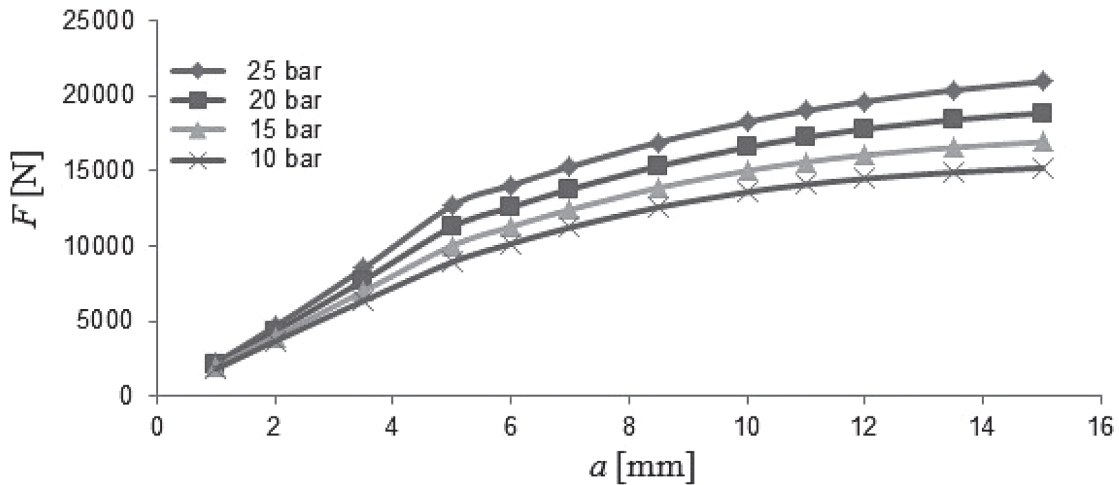
Bardziej istotną informacją niż sztywność kompensatora w danym kierunku osi jest jego doraźna wytrzymałość mechaniczna na zerwanie. Dlatego też wyznaczenie granicznych przemieszczeń w danym kierunku osi kompensatora bazuje na ocenie naprężenia wewnątrz kompozytowej powłoki. Na podstawie Rys. 11 stwierdzono, że we wszystkich przypadkach deformacji powłoki, największe zredukowane naprężenie występuje w jej wzmocnieniu, wykonanym z poliamidowej tkaniny. Przyjęto, że dopuszczalne naprężenie zredukowane tego materiału wynosi 110 MPa. Graficzny sposób wyznaczenia dopuszczalnych przemieszczeń kompensatora zaprezentowano na Rysunkach 18 oraz 19, na których przedstawiono zmianę wartości naprężenia w materiale wzmocnienia w funkcji przemieszczenia kompensatora. W przypadku próby rozciągania powłoki wykonanej z gumy EPDM poddanej ciśnieniu 25 bar, przekroczenie naprężenia dopuszczalnego występuje przy przemieszczeniu 6 mm. Wartość ta została uznana za graniczną. Wraz ze zmniejszaniem ciśnienia wewnętrznego, stopniowo zwiększa się wartość przemieszczenia granicznego powłoki. W przypadku odkształceń kątowych, przy ciśnieniu wewnętrznym 25 bar, wartość dopuszczalna przemieszczenia wynosi 5 stopni. W Tabeli 2 zestawiono graniczne wartości przemieszczeń powłoki kompensatora w danym kierunku osi, w zależności od ciśnienia wewnętrznego oraz rodzaju gumy.

Under a greater internal pressure, the characteristic takes the form of a broken line. At the angle of rotation above 5 degrees, there is a slight decrease in stiffness. In addition, the coating made of NBR rubber is almost twice as stiff as compared to a coating made of EPDM rubber.

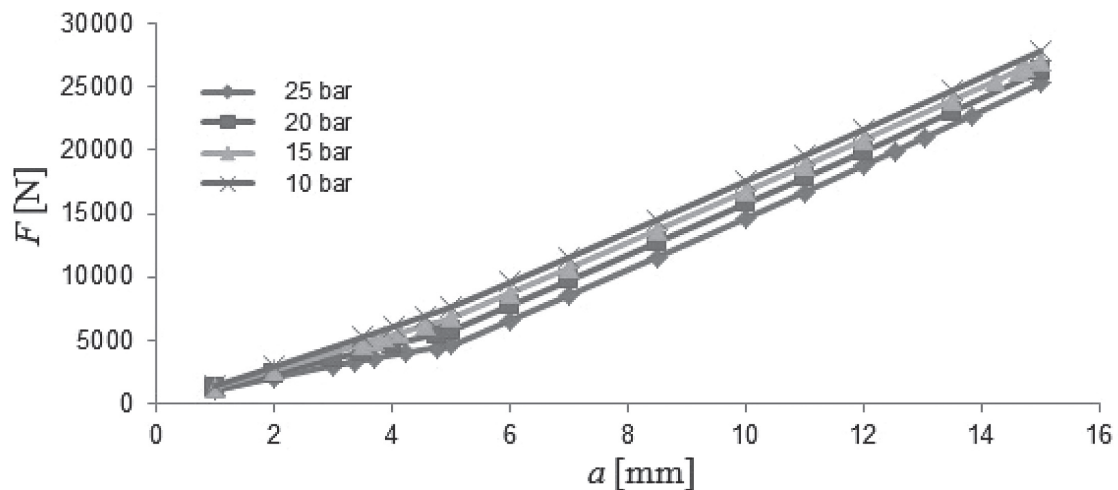
In addition to the information on the stiffness of the compensator in a given direction of the axis, its immediate mechanical strength at break is more important. Therefore, the determination of the limit displacements in a given direction of the compensator axis is based on the assessment of the stress inside the composite coating. On the basis of Fig. 11 it was found that in all cases of deformation of the coating, the greatest reduced stress occurs in its reinforcement made of polyamide fabric. It has been assumed that the allowable reduced stress of this material is 110 MPa. A graphical way to determine permissible offsets of the compensator is presented in Figs. 18 and 19. The figures show the change in the value of stress in the reinforcement material as a function of the compensator movement. In the case of a tensile test of a coating made of EPDM rubber subjected to a pressure of 25 bar, exceeding the allowable stress occurs at a displacement of 6 mm. This value has been recognized as borderline. As the internal pressure decreases, the value of the boundary coating displacement gradually increases. In the case of angular deformations, at an internal pressure of 25 bar, the permissible displacement value is 5 degrees. Table 2 presents the limit values of the compensator shell displacements in a given axis direction, depending on the internal pressure and the type of rubber.

**Tabela 2.** Zestawienie granicznych przemieszczeń kompensatora przy różnych ciśnieniach wewnętrznych i postaciach deformacji  
**Table 2.** Data compilation of permissible deflection mode of the rubber diaphragm at different internal pressure and deformation mode

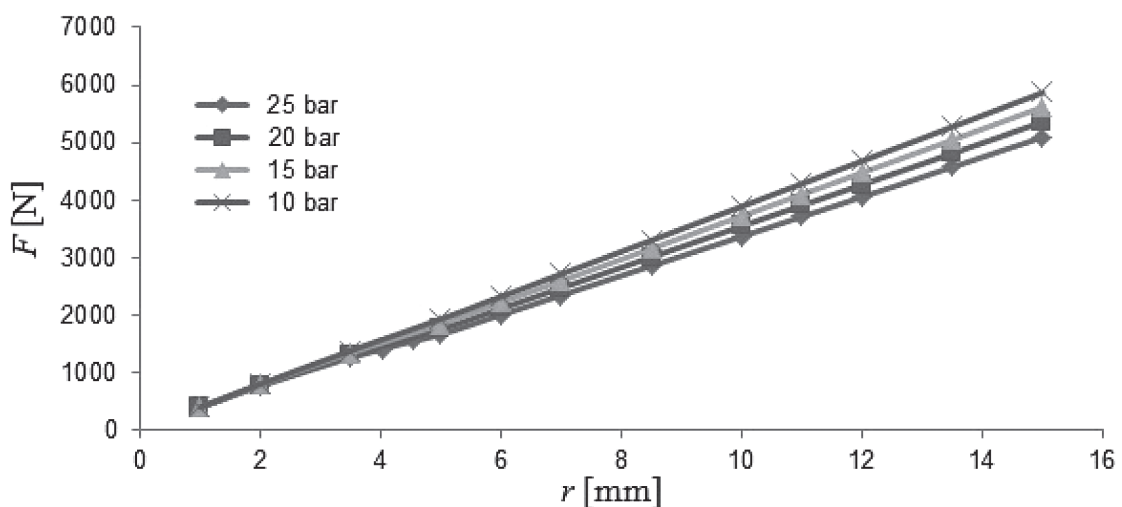
Guma Rubber	Ciśnienie Pressure [bar]	Przemieszczenie Displacement type			
		Ściskające Compressive $c_{lim}$ [mm]	Rozciągające Tensile $a_{lim}$ [mm]	Boczne Lateral $r_{lim}$ [mm]	Kątowe Angular $\alpha_{lim}$ [°]
EPDM	10	13	10	15	8
	15	13	8	15	7
	20	12	7	15	7
	25	10	6	12	5
NBR	10	13	8	15	8
	15	12	6	15	8
	20	12	6	15	8
	25	10	5	12	5



**Rys. 12.** Charakterystyka sztywności osiowej przy ściskaniu kompensatora wykonanego z gumy EPDM  
**Fig. 12.** Stiffness characteristic at axial compression of the diaphragm made of EPDM rubber

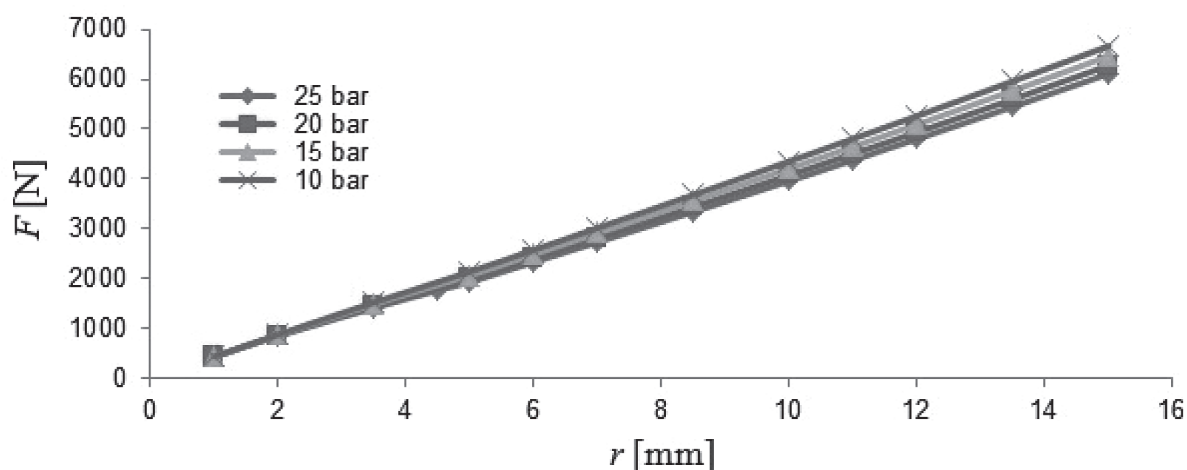


**Rys. 13.** Charakterystyka sztywności osiowej przy rozciąganiu kompensatora wykonanego z gumy EPDM  
**Fig. 13.** Stiffness characteristic at axial elongation of the diaphragm made of EPDM rubber

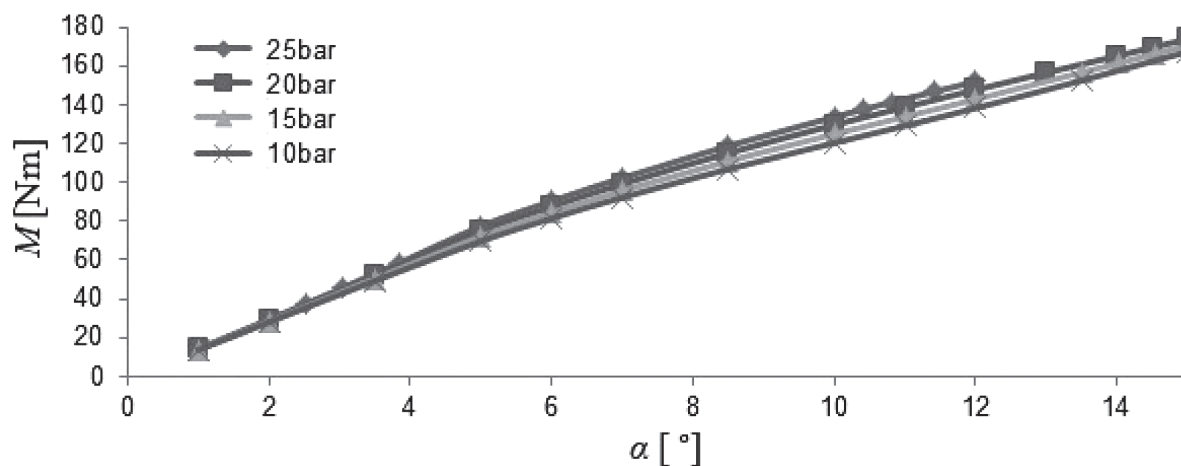


**Rys. 14.** Charakterystyka sztywności przy bocznym odkształceniu kompensatora wykonanego z gumy EPDM  
**Fig. 14.** Stiffness characteristic at lateral deflection of the diaphragm made of EPDM rubber

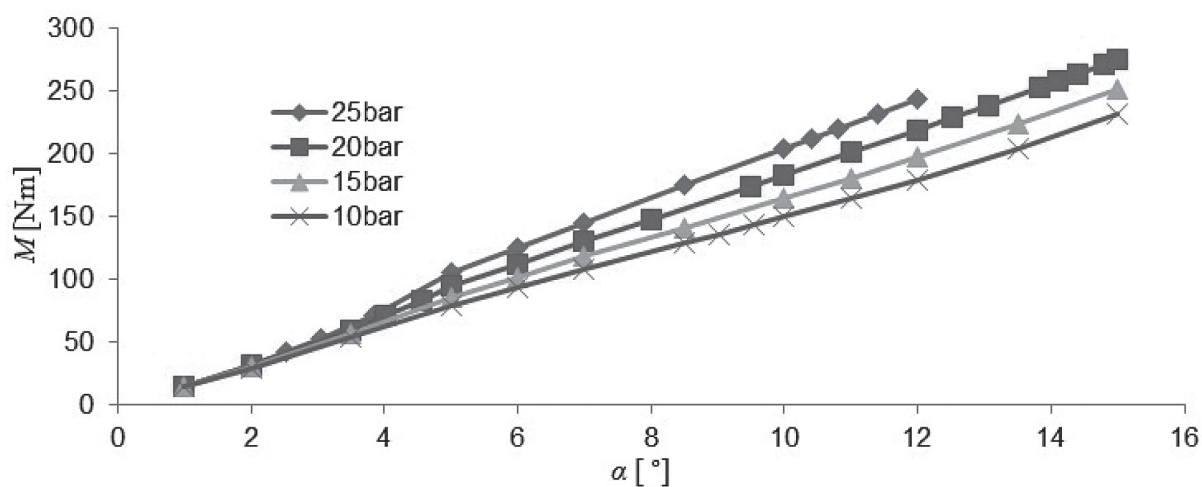




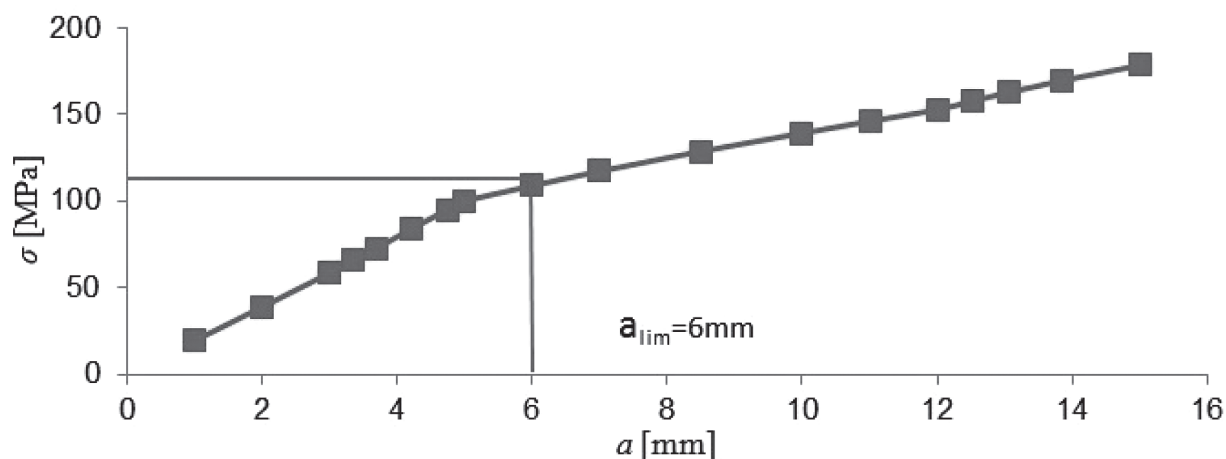
**Rys. 15.** Charakterystyka sztywności przy bocznym odkształceniu kompensatora wykonanego z gumy NBR  
**Fig. 15.** Stiffness characteristic at lateral deflection of the diaphragm made of NBR rubber



**Rys. 16.** Charakterystyka sztywności przy kątowym odkształceniu kompensatora wykonanego z gumy EPDM  
**Fig. 16.** Stiffness characteristic at angular deflection of the diaphragm made of EPDM rubber

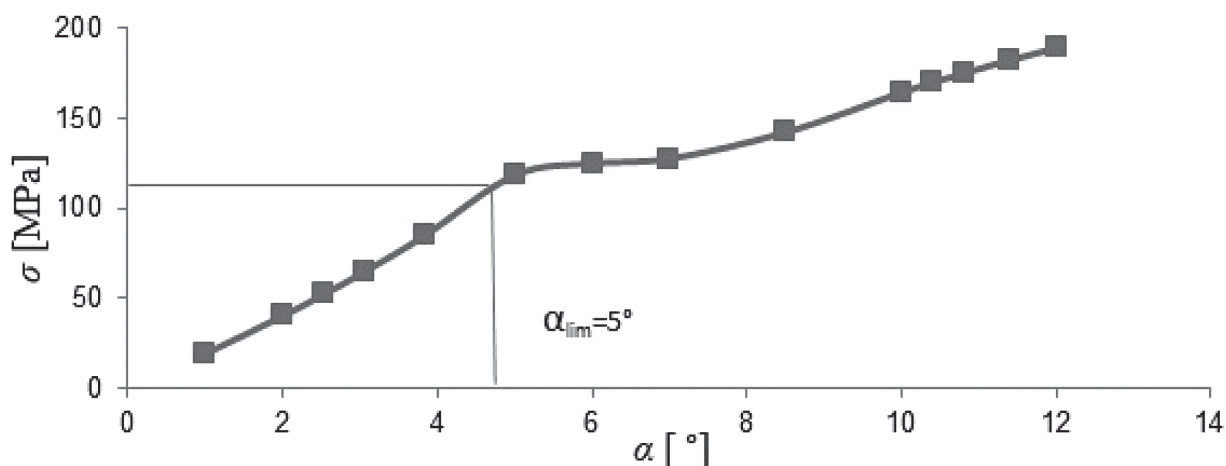


**Rys. 17.** Charakterystyka sztywności przy kątowym odkształceniu kompensatora wykonanego z gumy NBR  
**Fig. 17.** Stiffness characteristic at angular deflection of the diaphragm made of NBR rubber



**Rys. 18.** Przebieg naprężenia w materiale poliamidowego wzmocnienia powłoki kompensatora w funkcji przemieszczenia rozciągającego

**Fig. 18.** Course of material stress in polyamide reinforcement of the diaphragm at elongation mode



**Rys. 19.** Przebieg naprężenia w materiale poliamidowego wzmocnienia powłoki kompensatora w funkcji przemieszczenia kąтового

**Fig. 19.** Course of material stress in polyamide reinforcement of the diaphragm at angular mode

## 5. Podsumowanie

Jak wspomniano we wstępie, głównym zadaniem kompensatora jest zniwelowanie wpływu odkształceń mechanicznych i termicznych rurociągu, które powodują obciążenia podpór oraz innych elementów pomocniczych instalacji. Wielu producentów kompensatorów podaje wartości granicznych przemieszczeń, bez względu na wartość ciśnienia wewnętrznego, jakiemu poddana jest kompozytowa powłoka. Okazuje się, że ciśnienie wewnętrzne znacząco wpływa na

## 5. Summary

As mentioned in the introduction, the main task of the compensator is to compensate the impact of mechanical and thermal deformations of the pipeline, which cause loads on the supports and other auxiliary elements of the installation. Many manufacturers of compensators give limit values of displacements irrespective of the value of the internal pressure to which the composite coating is subjected. It turns out that the internal pressure significantly affects the

sztywność powłoki, co bezpośrednio przekłada się na jej zdolność kompensacji. Głównym celem obliczeń numerycznych było wyznaczenie sztywności powłoki w danym kierunku osi, przy różnej wartości ciśnienia wewnętrznego. Ponadto, na podstawie oceny naprężenia w materiale powłoki, wyznaczono graniczne przemieszczenia w danym kierunku osi kompensatora. Za podstawę do wyznaczenia tych przemieszczeń przyjęto punkt, w którym przekroczono dopuszczalne naprężenie w materiale wzmocnienia powłoki, wykonanej z tkaniny poliamidowej. Za dopuszczalne naprężenie w materiale tkaniny przyjęto wartość 110 MPa. Dalejszy etap prac zakłada walidację obliczeń numerycznych poprzez wykonanie badań eksperymentalnych. W ramach projektu badawczego jest realizowane stanowisko badawcze, umożliwiające m.in. pomiar charakterystyk sztywności konstrukcji kompensatora.

*Projekt zrealizowano przy dofinansowaniu ze środków UE w ramach programu operacyjnego Inteligentny Rozwój, 2014–2020. Temat projektu „Opracowanie innowacyjnego kompensatora gumowego w klasie ciśnieniowej 25 bar. Beneficjent: firma Gambit Lubawka sp. z o.o.*

stiffness of the coating, which directly translates into its ability to compensate. The main purpose of numerical calculations was to determine the stiffness of the coating in a given direction of the axis at a different value of the internal pressure. In addition, based on the stress assessment in the coating material, the limit displacements in a given direction of the compensator axis were determined. The basis for determining these displacements was the point at which the permissible stress in the reinforcement material made of polyamide tannin was exceeded. The admissible stress in the fabric material was 110 MPa. The next stage of work assumes the validation of numerical calculations by performing experimental studies. As part of the research project, a research stand is being carried out, enabling, among others, measurement of the stiffness characteristics of the compensator's construction.

*The project was implemented with co-financing from EU funds under the Intelligent Development Operational Program, 2014–2020. Project theme: “Development of an innovative rubber compensator in a pressure class of 25 bar”. Beneficiary: the company Gambit Lubawka sp. z o.o.*

## Bibliografia/Literature

1. FSA-PSJ-703-11, *Guidelines for elastomers used in piping systems non-metallic expansion joints*, 2011.
2. ELAFLEX – *Rubber expansion joints*.
3. DIN 4809 *Expansion joint made of elastomer compound materials (rubber expansion joint) for water heating plants*, November 1986.
4. Jaszak P., *Elastomery* 2016, **20** (3), 31–39.
5. Santos D., Batalha G.F., *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2010, **38** (1), 33–40.
6. DIN 53504 *Testing of rubber-Determination of tensile strength at brake, tensile stress at yield, elongation and stress values in a tensile test*, 2017.
7. PN-ISO 37:2007 *Guma i kauczuk termoplastyczny – Oznaczanie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu*.
8. Murphy J.S., Hanley N., “The Significance of Equi-biaxial Bubble Inflation in Determining Elastomeric Fatigue Properties”, w: *Advanced Elastomers – Technology, Properties and Applications*, (red. Anna Boczkowska), ISBN 978-953-51-0739-2, s. 363–400, InTech, 2012.
9. Engineering data sources – Ansys Workbench 15.0.