

## ODKSZTAŁCALNOŚĆ PRZEWODÓW ELASTYCZNYCH OBCIĄŻONYCH CIŚNIENIEM WEWNĘTRZNYM

### Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań promieniowej odkształcalności cylindrycznych przewodów elastycznych obciążonych ciśnieniem wewnętrznym. Badanymi materiałami były przewody silikonowe, lateksowe i gumowe, o średnicy wewnętrznej 4-6 mm i grubości ścianki 1 mm. Z powodu specyficznego poziomu odkształceń badanych przewodów do pomiaru stanu odkształcenia przekroju przewodu wykorzystano cyfrową analizę obrazów mikroskopowych. Analiza wyników pomiarów pozwoliła wykazać, że w rozpatrywanym zakresie ciśnienia wewnętrznego część badanych przewodów wykazywała właściwości typowe dla materiałów sprężystych, a część dla lepkosprężystych.

### WSTĘP

Perspektywy wykorzystania tworzyw sztucznych, ze względu na ich olbrzymią różnorodność oraz możliwość modyfikacji właściwości, są praktycznie nieograniczone. Są to materiały pozwalające na tworzenie rozlicznych rozwiązań dostosowanych do najróżniejszych wymagań użytkowych, stanowiąc zarazem praktycznie nieograniczone źródło innowacji w różnych sektorach przemysłu i wielu dziedzinach codziennego życia.

Tworzywa sztuczne, ze względu na ich właściwości elastyczne, można podzielić na dwie podstawowe grupy: elastomery i plastomery. Plastomery cechuje zdolność sprężystego odkształcenia się jedynie w zakresie niewielkich jego wartości, natomiast elastomery zachowują tę cechę w szerokim zakresie odkształceń. Do elastomerów można zaliczyć gumy, kauczuki silikonowe oraz tworzywa lateksowe. Należy jednak podkreślić, że właściwości tworzyw sztucznych zależą nie tylko od składnika głównego, czyli rodzaju polimeru, lecz również od sposobu prowadzenia polimeryzacji, warunków procesu oraz od typu dodatków, czyli np. wypełniaczy, pigmentów, a także użytych kompatybilizatorów [1,2]. Z tego powodu podawane w literaturze właściwości wytrzymałościowe tworzyw sztucznych mają najczęściej orientacyjny charakter, w odróżnieniu od materiałów metalowych, których cechy są na ogół ściśle określone dla ich danego gatunku. Skutkiem tego, wyznaczenie charakterystyk materiałowych tworzyw sztucznych wymaga każdorazowo prowadzenia indywidualnych badań eksperymentalnych.

Ze względu na stosunkowo niewielką gęstość, odporność na działanie alkaliów, kwasów i soli, tworzywa sztuczne na bazie elastomerów są coraz częściej stosowane jako materiał do produkcji przewodów transportujących płyny. Elastyczność takich tworzyw pozwala na dość dowolne formowanie poszczególnych elementów, co zmniejsza rozmiary całej instalacji przepływowej. W przypadku zastosowań medycznych daje to również możliwość poprawy komfortu pacjenta, np. poprzez zminimalizowanie gabarytów w przypadku osobistych pomp insulinowych [3].

Jednakże elastyczność tworzyw sztucznych w przypadku przewodów transportujących płyny ma też inne konsekwencje, a mianowicie może utrudniać oszacowanie zapotrzebowania na energię do wywołania w nich przepływu substancji o wymaganym strumieniu. Jest to spowodowane tym, że wywołana oporami przepływu zmiana ciśnienia płynu sprawia, że na długości elastycznego przewodu zmienia się jego średnica wewnętrzna, a tym samym prędkość przepływu płynu. Tymczasem wartość tej prędkości w dużej

mierze rzutuje na opory przepływu substancji, a w przypadku płynów nienewtonowskich również na ich lepkość.

Kompilacja nienewtonowskich zachowań wielu cieczy rzeczywistych z elastycznością ścian przewodów utrudnia znacznie opis teoretyczny zjawiska przepływu, gdyż staje się on w tej sytuacji bardzo skomplikowany. Opis ten wymaga bowiem znajomości nie tylko właściwości fizycznych transportowanej substancji, ale również szczegółowej charakterystyki odkształceniowej przewodu transportującego. Można ją uzyskać tylko na drodze odpowiedniego eksperymentu. Wyniki badań w tym zakresie zawiera niniejsza praca.

### 1. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Materiałem badanym były dostępne na rynku przewody silikonowe, lateksowe i gumowe, wykorzystywane jako węże laboratoryjne lub elementy aparatury medycznej. W tabeli 1 zestawiono wymiary tych przewodów w stanie nieobciążonym, przypisując im jednocześnie symbole wykorzystane w dalszej części pracy.

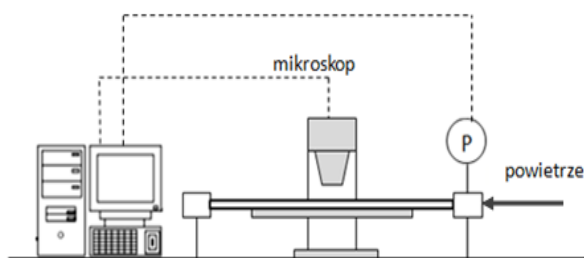
Tab.1. Charakterystyka przewodów badanych

Oznaczenie przewodu	Materiał	Zewnętrzna średnica przewodu, mm	Grubość ścianki, mm
P1	silikon techniczny	6	1
P2	lateks	6	1,5
P3	guma	7	1,5
P4	silikon medyczny	5	1
P5	silikon medyczny	5	0,8

Z danych literaturowych [5-8] wynika, że moduł Younga dla przewodów silikonowych powinien zawierać się w granicach  $(0,1\div 5)$  GN/m<sup>2</sup>, dla przewodów lateksowych  $(0,16\div 1,5)$  MN/m<sup>2</sup>, a dla przewodów gumowych  $(2\div 6)$  MN/m<sup>2</sup>. Gęstość silikonu w zależności od przeznaczenia oraz struktury wynosi  $(200\div 1200)$  kg/m<sup>3</sup>, lateksu  $(60\div 950)$ , natomiast gumy  $(1100\div 2000)$  kg/m<sup>3</sup>.

Z powodu stosunkowo małych ciśnień, a tym samym niewielkiego poziomu promieniowych odkształceń badanych przewodów, do pomiaru zmian ich średnicy wykorzystano analizę rejestrowanych kamerą cyfrową obrazów mikroskopowych. W tym celu wykorzystano stanowisko pomiarowe składające się z mikroskopu optycznego o powiększeniu 10-krotnym, na którego stoliku umieszczano badany przewód elastyczny. Jeden jego koniec był zaślepiony, a drugi podłączony do głowicy wyposażonej w manometr. Przez głowicę dostarczano do wnętrza przewodu powietrze mierząc jed-

nocześnie jego nadciśnienie. Powietrze pobierano ze zbiornika wyposażonego w regulator ciśnienia. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1.** Schemat stanowiska do badania odkształcalności przewodów elastycznych.

Wykorzystanie analizy obrazów do oceny zmian średnicy badanych przewodów wymagało uprzedniego wywzorcowania układu pomiarowego. W tym celu sfotografowano wzorcowe szkiełko pomiarowe o jednostkowej podziałce 10 μm, a następnie ustalono liczbę pikseli odpowiadających odległości 1 mm. Pomiar średnicy przewodów odbywał się w sposób pośredni, poprzez ocenę odpowiadającej tej średnicy liczby pikseli na zarejestrowanych obrazach mikroskopowych. Analogicznie prowadzono wstępną ocenę grubości ścianki przewodu nieobciążonego, analizując przekrój poprzeczny jego wycinka.

Zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem tworzywa konstrukcyjnego w zakresie sprężystym opisuje równanie:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (1)$$

w którym  $\sigma$  to naprężenie, [N/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  to odkształcenie, a  $E$  jest modułem sprężystości tworzywa (moduł Younga), [N/m<sup>2</sup>].

W analizie wyników badań własnych założono, że element przewodu o długości  $x$  i grubości ścianki  $s$  poddawany jest działaniu lokalnego nadciśnienia wewnętrznego  $p$ . Wywołuje ono w tworzywie konstrukcyjnym ścianki naprężenie  $\sigma=f(x)$ . Naprężenie to można określić wychodząc z warunku równowagi układu sił dla tego elementu [9] i zapisać w postaci równania:

$$p \cdot (D \cdot \Delta x) - 2\sigma(s \cdot \Delta x) = 0, \quad (2)$$

gdzie:  $D$  - średnica przewodu odkształconego pod wpływem ciśnienia, [m],  $\Delta x$  - przyrost długości, [m]

Przekształcenie równania (2) pozwala otrzymać zależność pozwalającą określić wartość naprężenia:

$$\sigma = \frac{D}{2s} \cdot (p). \quad (3)$$

Odształcenie obwodowe przewodu obliczono z zależności:

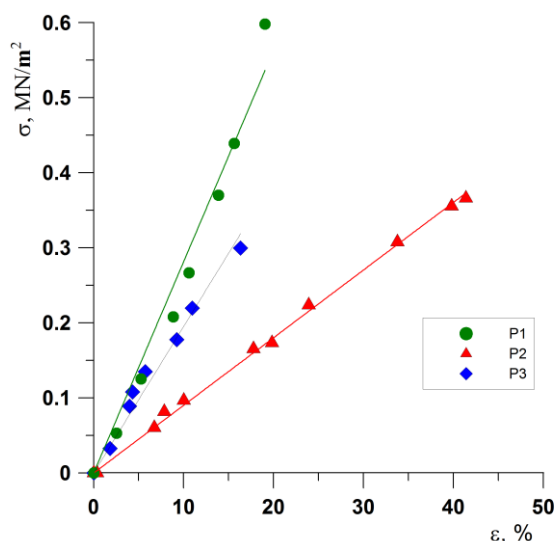
$$\varepsilon = \frac{D}{d} - 1. \quad (4)$$

gdzie:  $d$  - średnica przewodu nieodkształconego, [m].

## 2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wartość naprężeń odpowiadających kolejnym obciążeniom ciśnieniem wewnętrznym ustalono na podstawie równania (3). Analiza zdjęć mikroskopowych pozwoliła również ustalić odkształcenia dla wszystkich badanych przewodów obciążonych różnym ciśnieniem wewnętrznym. Grubość ścianki przewodu ( $s$ ) ustalono korzystając z założenia, że wartość pola przekroju powierzchni ścianki przewodu jest stała, bez względu na jej obciążenie, a zmianie ulegają tylko zewnętrzna i wewnętrzna średnica pierścienia stanowiącego ten przekrój.

Uzyskane dane naniesiono na wykresy zależności naprężenia w funkcji odkształcenia, co przedstawiono na rys. 2 i rys. 3.

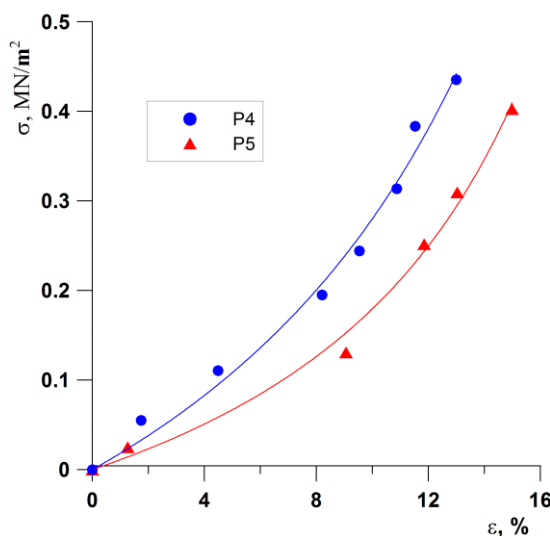


**Rys. 2.** Zależność naprężenia od odkształcenia dla przewodów z materiału sprężystego

Jak wynika z rozkładu punktów doświadczalnych na rys. 2. przewody P1, P2, P3 charakteryzują się proporcjonalną zależnością naprężenia od odkształcenia, typową dla materiałów sprężystych. W przypadku tym moduł Younga jest wielkością stałą, co upraszcza algorytm obliczeń oporów przepływu substancji w przewodzie wykonanym z takich materiałów. Tytułem uzupełnienia w tabeli 2 zestawiono wyliczone na podstawie wykonanych eksperymentów wartości modułu Younga dla badanych przewodów o właściwościach sprężystych.

**Tab.2.** Wartości modułu Younga uzyskane dla przewodów sprężystych

Oznaczenie przewodu	Moduł Younga, MN/m <sup>2</sup>
P1	2,35
P2	0,92
P3	2,94



**Rys. 3.** Zależność naprężenia od odkształcenia dla przewodów z materiału lepkosprężystego

Z kolei, dane doświadczalne przedstawione na rys. 3, otrzymane dla przewodów P4 i P5 wykazują wyraźną krzywiznę, co świad-

czy o występowaniu zachowań lepkosprężystych materiału. Oznacza to, że pod wpływem działania sił zewnętrznych materiał taki odkształca się sprężysto, a dodatkowo zachodzą w nim zjawiska reologiczne, takie jak pełzanie i relaksacja naprężeń. W temperaturze pokojowej dla większości metali i stopów pełzanie to jest pomijalnie małe – obserwuje się je dopiero w wysokiej temperaturze i przy relatywnie dużych naprężeniach. Natomiast w przypadku tworzyw sztucznych zjawisko to może pojawić się znacznie wcześniej, nawet w warunkach, temperatury otoczenia, co ma ogromny wpływ na cechy eksploatacyjne tych typu materiałów.

Istotnym jest, że dla materiałów lepkosprężystych moduł Younga staje się parametrem zmiennym, a istota tej zależności stanowi podstawowy przedmiot fenomenologicznych badań lepkosprężystości. Ważnym parametrem jest także temperatura, ponieważ dla polimerów wartość modułu Younga zmienia się znacząco po przekroczeniu charakterystycznych wartości temperatury mięknięcia i płynięcia [10]. Niekiedy dla prostych rozwiązań inżynierskich możliwe są uproszczenia w analizie wyników badań, polegające na aproksymacji krzywej doświadczalnej za pomocą funkcji liniowej. Należy się jednak liczyć z tym, że dane takie będą obarczone błędem aproksymacji [11].

Warto zwrócić uwagę, że zachowań lepkosprężystych nie wykazano dla przewodu P1, który podobnie jak P4 i P5 jest przewodem silikonowym. Potwierdza to tezę, że na właściwości tworzyw sztucznych ma wpływ nie tylko główny składnik czyli polimer, ale także dodatki wypełniające, kompatybilizatory oraz pigmenty, a każdy przewód wymaga wyznaczenia indywidualnych charakterystyk dotyczących sprężystości [1,2].

## PODSUMOWANIE

Ustalenie właściwości wytrzymałościowych materiałów elastycznych stanowi niezwykle ważny obszar badań poznawczych. Prowadzone są one głównie w celu wyznaczenia maksymalnych obciążeń, pozwalających na poprawne zaprojektowanie wykonanych z nich elementów maszyn i konstrukcji, tak aby ich użytkowanie nie stanowiło zagrożenia dla otoczenia. Zagadnienie to dotyczy również ustalania wymaganej grubości ścian aparatów ciśnieniowych i rurociągów wykonanych z tych materiałów.

Znajomość właściwości sprężystych materiałów jest również istotna przy szacowaniu oporów przepływu podczas transportu płynów w przewodach elastycznych. W układach pompowych nieodpowiednie oszacowanie oporów przepływu może prowadzić do awarii lub nieuzasadnionego zwiększenia energochłonności procesu transportu. Określenie charakterystyk materiałowych konkretnych przewodów elastycznych wymaga indywidualnych badań, gdyż brak jest w tym zakresie ogólnie uznanych danych ilościowych.

Wyniki badań własnych wykazały, że do pełnego opisu warunków przepływu substancji w przewodzie elastycznym wymagana jest znajomość modułu Younga materiału, z którego przewód jest wykonany. Wyniki te wskazują jednocześnie, że w zależności od rodzaju tworzywa sztucznego moduł sprężystości może być stały lub zmieniać swą wartość w zależności od odkształcenia.

## BIBLIOGRAFIA

- Gautriaud, E., Stafford K, Adamchuk J., Simon M., OU D., 2010, *Effect of Sterilization on the Mechanical Properties of Silicone Rubbers*. BioProcess Int. 8, s. 42-49
- Formela K., Cysewska M., 2014, *Charakterystyka sieciowania, statyczne i dynamiczne właściwości mechaniczne mieszanin kauczuk butadieno-styrenowy/regenerat gumowy*, Elastomery, t.18, nr 1, s. 9-15
- Winn A., 1996, *Factors in Selecting Medical Silicones*, Medical Plastics and Biomaterials 3, nr 2, s. 16-19
- Sharp W., Falor W., *Rubber latex tubing as a vascular prosthesis*, American Journal of Surgery, 1963, 105, s. 802-811
- Oliver W., Pharr G., *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation Advances in understanding and refinements to methodology*, Journal of Materials Research, 2004, t. 19, nr 1, s. 3-20
- Bhushan B., LI X., *Micromechanical and tribological characterization of doped single-crystal silicon and polysilicon films for microelectromechanical systems devices*, J. Mater. Res, 1997, t. 12, nr 1, s. 54-63,
- Koblar D., Skofic J., Boltezar M., *Evaluation of the Young's Modulus of Rubber-Like Materials Bonded to Rigid Surfaces with Respect to Poisson's Ratio*, Journal of Mechanical Engineering, 2014, 60, nr 7-8, s. 506-511.
- Mahapram S., Poompradub S., *Preparation of natural rubber (NR) latex/low density polyethylene (LDPE) blown film and its properties*, Polymer Testing, 2011, 30, 7, s. 716-725
- Wolków J., Salamon Sz., 2008, *Badania zmienności parametrów geometrycznych przewodów*, Archiwum Motoryzacji 3-4, s. 163-174,
- Vincent J., *Structural Biomaterials*, Princeton University Press, Princeton 2012
- Wilczyński A., *Stosowalność liniowego przybliżenia zależności naprężenie – odkształcenie w tworzywach o budowie łańcuchowej cząstek w prostym przypadku rozciągania*, Przegląd Mechaniczny, 1963, nr 4, s. 115-116

## DEFORMABILITY OF FLEXIBLE PIPES LOADED BY INTERNAL PRESSURE

### Abstract

*The investigation results and their analysis of radial deformability elastic pipes loaded on internal pressure is presented. The latex, silicone and rubber pipes with inner diameter 4-6 mm are considered. The elastic and viscoelastic properties of commercially available plastic pipes are described and discussed.*

Autorzy:

dr hab. inż. **Jerzy Hapanowicz**, prof. PO - Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Procesowej  
mgr inż. **Izabela Wardach** – Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Procesowej



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego

Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego II