

ZMIANA SZTYWNOŚCI OBWODOWEJ RUR W CZASIE

1. WPROWADZENIE

W branży związanej z sieciami wodociągowymi i kanalizacyjnymi rozpowszechniło się błędne przekonanie, że rury z tworzyw termoplastycznych (PVC-U, PP, PE) wraz z upływem czasu tracą swą wytrzymałość na obciążenia od ciężaru gruntu i pojazdów. Wynika to jakoby z ich malejącej w czasie sztywności obwodowej. Uważa się również, że stosowane w obliczeniach 50 letnie parametry projektowe, oznaczają 50 letnią trwałość użytkową rur. Celem niniejszego opracowania jest wykazanie, że rury z tworzyw termoplastycznych zachowują początkową sztywność obwodową i pomimo upływu czasu, zawsze w ten sam sposób reagują na występujące obciążenia zewnętrzne. Ponadto lepkosprężyste właściwości materiałów termoplastycznych nie ograniczają trwałości użytkowej tych rur wyłącznie do okresu 50 lat.

2. POJĘCIA ZWIĄZANE ZE SZTYWNOŚCIĄ OBWODOWĄ RUR Z MATERIAŁU LEPKOSPŘŻYSTEGO

2.1. Moduł sprężystości, pełzania i relaksacji

O zdolności rury do opierania się siłom zewnętrznym mówi nam jej sztywność obwodowa. Z kolei, jak pokazano w równaniu (1), sztywność obwodowa jest liniową funkcją modułu E. Oznacza to, że zmiana modułu E rury powoduje proporcjonalną zmianę jej sztywności obwodowej.

$$S_R = \frac{E \cdot I}{D^3} \quad (1)$$

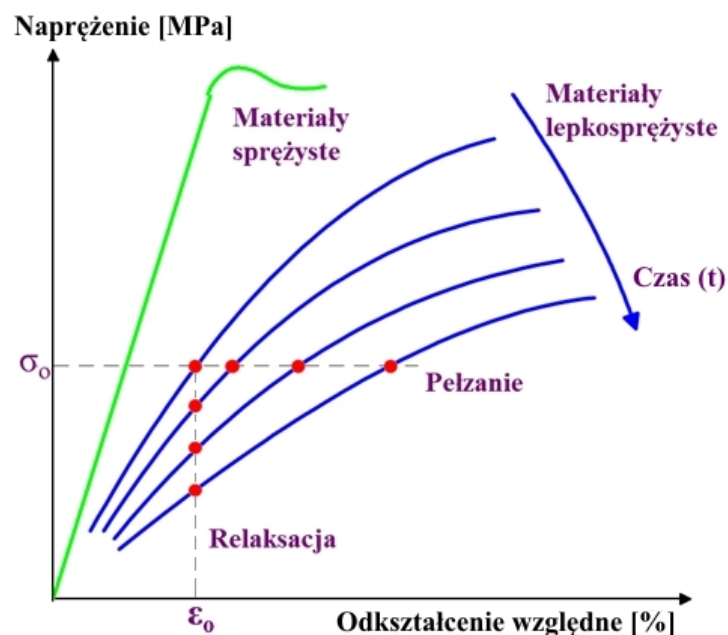
gdzie:

S_R	-	sztywność obwodowa rury [kN/m ²]
E	-	moduł Younga materiału rury [kN/m ²]
I	-	moment bezwładności przekroju poprzecznego rury [m ³]
D	-	średnia średnica rury [m]

W prawie Hooke'a moduł E [MPa] jest nazywany modułem sprężystości i oznacza zależność pomiędzy naprężeniem σ [MPa] i odkształceniem ε [m/m].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Dla materiałów sprężystych zależność ta jest stała aż do punktu płynięcia – rysunek 1. Dla materiałów lepkosprężystych (PVC-U, PP, PE) moduł E nie jest stały lecz zmienia się w zależności od czasu obciążania t oraz poziomu naprężenia σ .



Rysunek 1. Wykres naprężenie / odkształcenie dla materiału sprężystego i lepkosprężystego

Dla opisu zjawisk charakterystycznych dla materiałów lepkosprężystych, powstało pojęcie modułu pełzania oraz modułu relaksacji. Moduł pełzania opisuje stale naprężony materiał, podlegający swobodnemu pełzaniu, natomiast moduł relaksacji opisuje relaksację naprężeń w materiale o stałym, wymuszonym odkształceniu. Biorąc pod uwagę rysunek 1 oraz równanie (2), wartość zarówno modułu pełzania jak również modułu relaksacji, będzie malała wraz z upływem czasu. Zależność ta może prowadzić do błędnego wniosku, że wraz z modułem E maleje również sztywność obwodowa rury. Co prawda istnieje pojęcie długoterminowej sztywności obwodowej (po upływie 50 lat), znacznie mniejszej niż sztywność początkowa (krótkotrwała), lecz powstało ono i jest wykorzystywane wyłącznie w celu opisu zachowania się rury bez wsparcia gruntu (pełzanie materiału).

2.2. Sztywność obwodowa krótkotrwała i długotrwała

Do celów obliczeniowych, za krótkotrwałą sztywność obwodową rury można przyjąć klasę sztywności (SN) deklarowaną przez producenta. Wartość długotrwałej sztywności obwodowej odpowiada zazwyczaj wartości krótkotrwałej pomnożonej przez współczynnik 0,25 dla rur z polietylenu (PE) lub przez współczynnik 0,4 dla rur z polichlorku winylu (PVC-U). W obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych dla określenia ugięcia rury i ryzyka wystąpienia wyboczenia (utruty stateczności) należy stosować w większości przypadków krótkotrwałe wartości sztywności obwodowej. Jedynie dla bardzo luźnych gruntów spoistych, które nie mają zdolności do przeciwdziałania ciągłemu wzrostowi ugięcia rury, należy uwzględnić pełzanie materiału rury i stosować długotrwałą wartość sztywności obwodowej. Reasumując, jeżeli rura jest układana zgodnie ze stosownymi normami i wytycznymi producenta, to zjawisko pełzania materiału rury jest zatrzymane przez wsparcie gruntu, i zastosowanie w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych ma jedynie krótkotrwałą sztywność obwodową.

3. ZACHOWANIE RUR UŁOŻONYCH W GRUNCIE

3.1. Ugięcie krótkotrwałe

Po zakończeniu robót ziemnych, rura ugina się pod ciężarem gruntu dogęszczając boczną obsypkę, aż do momentu kiedy obsypka powstrzyma dalsze uginanie się rury i wystąpi stan równowagi pomiędzy rurą a gruntem. W rurze wystąpi ugięcie zależne od obciążenia gruntem,

szytywności obwodowej rury oraz jakości prac montażowych. Ugięcie to zwane jest ugięciem krótkotrwałym. Wielkość ugięcia krótkotrwałego w znacznej mierze zależy od jakości prac związanych z układaniem rur w gruncie.

3.2. Ugięcie długotrwałe

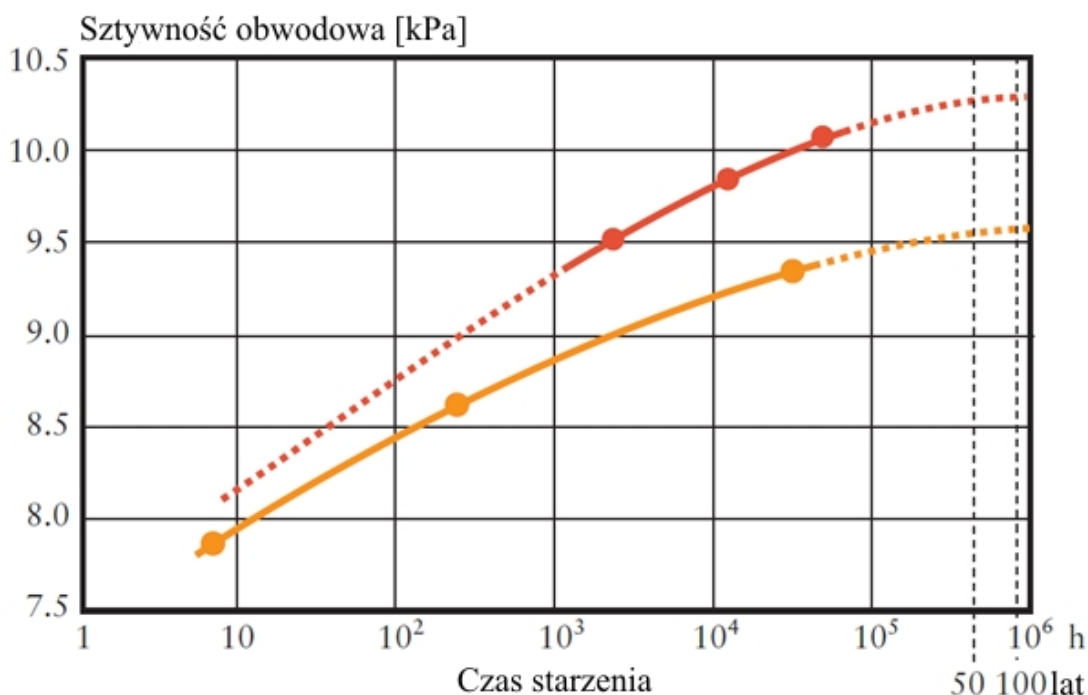
Ugięcie krótkotrwałe wzrasta przez okres 1-3 lat by uzyskać ostateczną wartość zwaną ugięciem długotrwałym. Może to prowadzić do mylnego wniosku, że powodem wzrastającego ugięcia jest malejąca sztywność obwodowa rury, co wynika z malejącego w czasie modułu E. Jednakże przyczyna wzrastającego ugięcia jest zupełnie inna. Na rurę działa wiele krótkotrwałych impulsów obciążających, wynikających z osiadania gruntu lub ruchu pojazdów. Rura przeciwstawia się im swoją krótkotrwałą sztywnością obwodową. Każdy taki impuls powoduje zachwianie równowagi pomiędzy gruntem a ugiętą rurą, a następnie natychmiastowy powrót do stanu równowagi spowodowany przez wzrost ugięcia rury i sztywności gruntu. Proces ten powtarza się aż do momentu wystąpienia ostatecznego stanu równowagi pomiędzy ugiętą rurą a gruntem.

3.3. Stan równowagi rura - grunt

Po osiągnięciu stanu równowagi pomiędzy rurą a gruntem, pojawiające się nowe obciążenia są z reguły przenoszone wyłącznie przez grunt, którego sztywność wielokrotnie przekracza sztywność obwodową rury. Zjawisko pełzania materiału jest zatrzymane przez wsparcie gruntu, który uniemożliwia dalszy wzrost ugięcia rury. Jednocześnie dochodzi do zaniku naprężeń w ściankach rury wskutek zjawiska relaksacji naprężeń. Jak zareaguje rura gdyby w tych warunkach pojawiło się nowe obciążenie? Rura z materiału lepkosprężystego zawsze posiada swoje zapamiętane, krótkoterminowe właściwości wytrzymałościowe i reaguje zgodnie z nimi w przypadku wystąpienia nowego obciążenia. Niezależnie od tego po jakim czasie wystąpi obciążenie, rura stawia mu opór wynikający z jej krótkotrwałej sztywności obwodowej.

3.4. Zmiana krótkotrwałej sztywności obwodowej w czasie

Przeprowadzone badania [6] [7] [8] wykazały, że fizyczne starzenie się tworzyw polimerowych nie powoduje zmniejszania się ich krótkotrwałego modułu E. Próbkę rur PVC-U DN315 SN8 były przechowywane przez kilka lat w klimatyzowanym pomieszczeniu, co pewien czas mierzono ich faktyczną krótkotrwałą sztywność obwodową i porównywano z wartością początkową. Uzyskane wyniki ilustruje rysunek 2 - sztywność obwodowa zwiększyła się średnio z około 8 kPa do około 10 kPa po 50 latach (wartość ekstrapolowana).



Rysunek 2. Wzrost krótkotrwałej sztywności obwodowej rur PVC-U DN315 mm w funkcji czasu, spowodowany fizycznym starzeniem w temperaturze 23°C

Jak się okazuje, krótkotrwały moduł E tworzywa nie tylko nie maleje, lecz rośnie wraz z upływem czasu. Krótkotrwała sztywność obwodowa rury, która jest liniową funkcją modułu E , na przestrzeni 50 lat wzrasta około 20%.

4. TRWAŁOŚĆ UŻYTKOWA

Przyjmowanie w obliczeniach wytrzymałości rur termoplastycznych parametrów 50 letnich, takich jak długoterminowa sztywność obwodowa dla rur grawitacyjnych czy napężenie projektowe dla rur ciśnieniowych, jest błędnie utożsamiane z ich 50 letnią trwałością użytkową. Często można spotkać się z poglądem, że rury termoplastyczne są projektowane na 50 lat i po upływie tego czasu ulegają zniszczeniu. W rzeczywistości trwałość użytkowa rur termoplastycznych jest znacznie dłuższa i na podstawie przeprowadzonych badań [3] [4] [5], jest określana na minimum 100 lat.

4.1. Systemy grawitacyjne

Długoterminowa sztywność obwodowa (sztywność rury po upływie 50 lat) jest brana pod uwagę w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych jedynie w przypadku ułożenia rury w gruntach bardzo luźnych, spoistych, które nie zapewniają rurze wsparcia bocznego. W takim przypadku zachodzi proces swobodnego pełzania materiału opisany przez malejący moduł E . Układanie rur w tego typu gruncie jest niezalecane przez normy oraz producentów zarówno rur termoplastycznych jak również rur sztywnych (beton, kamionka). Prawidłowo ułożona rura termoplastyczna, posiadająca wsparcie gruntu zapobiegające jej dalszemu uginaniu, reaguje zawsze na obciążenia zgodnie ze swą krótkotrwałą sztywnością obwodową. Ponadto fizyczne starzenie materiału rury powoduje wzrost jej sztywności obwodowej – około 20% w ciągu 50 lat. Wynika z tego, że wytrzymałość rury termoplastycznej na obciążenia rośnie z czasem. Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić, że pojęcie długoterminowej sztywności obwodowej nie ma nic wspólnego z prawidłowo ułożoną w gruncie rurą termoplastyczną, i z całą pewnością nie determinuje jej trwałości użytkowej do 50 lat.

4.2. Systemy ciśnieniowe

Rury z tworzyw sztucznych są projektowane na ciśnienie nominalne, które jest wewnętrznym ciśnieniem roboczym jakiemu rurociąg może być poddawany przy pracy ciągłej. Wewnętrzne ciśnienie wywołuje powstanie w ścianie rury obwodowego naprężenia rozciągającego. Naprężenie rozciągające w ścianie rury nie może przekroczyć naprężenia projektowego charakterystycznego dla danego materiału lepkosprężystego.

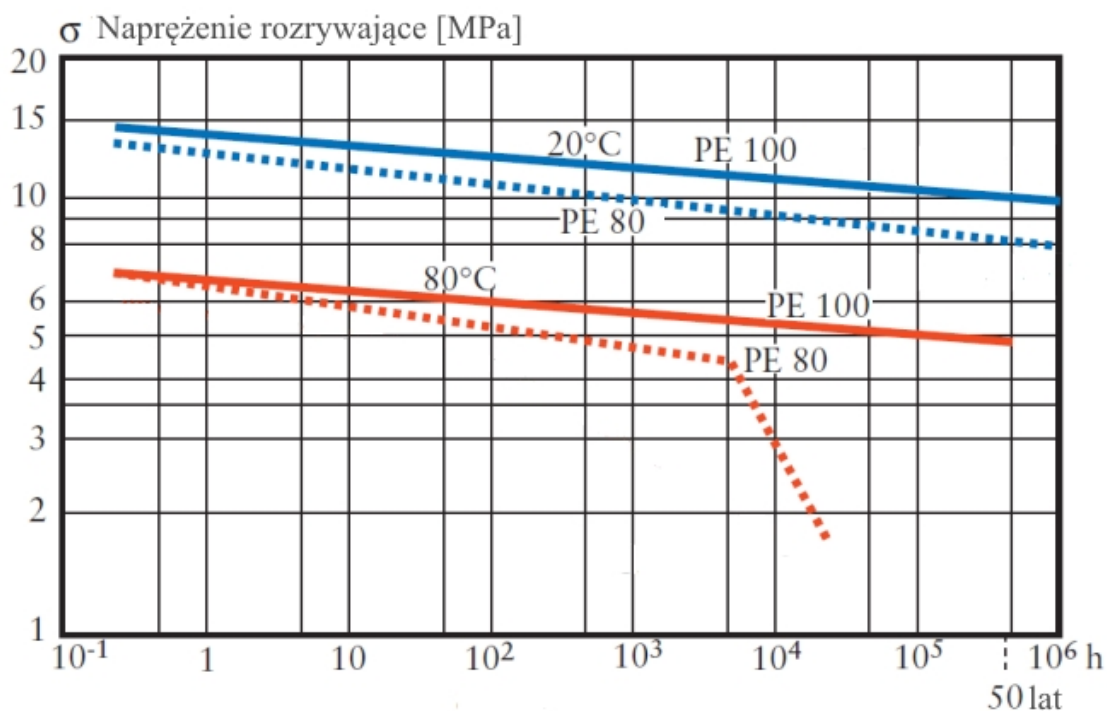
$$\sigma = \frac{MRS}{C} \quad (3)$$

gdzie:

- σ - naprężenie projektowe [MPa]
- MRS - minimalna wymagana wytrzymałość [MPa]
- C - współczynnik bezpieczeństwa [-]

Zgodnie z równaniem (3), naprężenie projektowe to minimalna wymagana wytrzymałość charakterystyczna dla danego materiału lepkosprężystego, podzielona przez współczynnik bezpieczeństwa. Minimalna wymagana wytrzymałość (MRS) to minimalna prognozowana wytrzymałość rury po 50 latach użytkowania w temperaturze 20° C. Czy to oznacza, że po 50 latach rura traci swą zdolność do przenoszenia ciśnienia wewnętrznego i ulega uszkodzeniu?

Ponieważ rury ciśnieniowe z polietylenu (PE) są najczęściej stosowanymi rurami do budowy sieci wodociągowych, rozpatrzmy przykład rury PE100.



Rysunek 3. Krzywe zależności pomiędzy naprężeniem rozrywającym a czasem, dla PE100 i PE80 w temperaturze 20°C i 80°C

Rysunek 3 przedstawia zależność naprężenia rozrywającego od czasu, dla rur PE80 i PE100. Z linii dotyczącej temperatury 20°C możemy odczytać, że naprężenie rozrywające dla PE100 po 50 latach (MRS) wynosi 10 MPa. Biorąc pod uwagę, że 10⁶ h to około 114 lat widzimy, że różnica pomiędzy wartością 50 i 100 letnią naprężenia rozrywającego dla PE100 jest bardzo mała. Znalazło to odzwierciedlenie w określeniu współczynników bezpieczeństwa stosowanych przy obliczaniu

naprężenia projektowego – równanie 3. Zgodnie z [1] współczynnik bezpieczeństwa jaki należy stosować dla naprężeń projektowych 50 letnich wynosi 1,25 a dla naprężeń projektowych 100 letnich 1,23. Jak widać, nie ma prawie żadnej różnicy pomiędzy projektową 50 letnią wytrzymałością rury a jej wytrzymałością 100 letnią.

5. FIZYCZNE STARZENIE MATERIAŁU

Materiały termoplastyczne (PVC-U, PP, PE) są polimerami, czyli związkami zbudowanymi z dużej liczby powtarzających się i połączonych za sobą identycznych elementów podstawowych, zwanych merami lub jednostkami strukturalnymi. W wyniku fizycznego starzenia, w polimerach następuje konsolidacja molekularna struktury materiału. Dla rur wyprodukowanych z materiałów polimerowych ma to pozytywne i negatywne skutki. Pozytywnym skutkiem fizycznego starzenia jest wzrost krótkotrwałej sztywności obwodowej rur – jak podano w punkcie 3.4 około 20% na przestrzeni 50 lat. Negatywnym skutkiem jest malejąca odporność rur na uderzenia (udarność). Rozpatrując udarność rury z materiału termoplastycznego należy wziąć pod uwagę, że rura ta nawet po 100 latach eksploatacji będzie miała większą odporność na uderzenia niż nowa rura z kamionki czy betonu. Dlatego malejąca udarność, wynikająca z fizycznego starzenia materiału, nie jest czynnikiem ograniczającym trwałość użytkową rur termoplastycznych poniżej okresu 100 lat.

6. PODSUMOWANIE

- Mimo upływu czasu rury z tworzyw termoplastycznych zawsze reagują na obciążenia ze swą krótkotrwałą sztywnością obwodową – ich wytrzymałość nie maleje z czasem.
- Krótkotrwała sztywność obwodowa rur z tworzyw termoplastycznych rośnie wskutek fizycznego starzenia materiału.
- W obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych rur posiadających wsparcie gruntu, należy stosować wyłącznie krótkotrwałe wartości sztywności obwodowej.
- Przyjmowanie w obliczeniach rur termoplastycznych 50 letnich parametrów projektowych, nie jest tożsame z ich 50 letnią trwałością użytkową.
- Przeprowadzone badania [3] [4] [5] wykazały, że w przypadku prawidłowo ułożonych i eksploatowanych rur z materiałów termoplastycznych, można zakładać ich 100 letnią trwałość użytkową.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] PKN-CEN/TS 15223:2011 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych – Potwierdzone parametry projektowe podziemnych systemów przewodów rurowych z tworzyw termoplastycznych.
- [2] Lars-Eric Janson. Rury z tworzyw sztucznych do zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków. Wydane przez Polskie Stowarzyszenie Producentów Rur i Kształtek z Tworzyw Sztucznych. Toruń 2010.
- [3] 100 letni okres trwałości użytkowej polipropylenowych i polietylenowych grawitacyjnych rur kanalizacyjnych. Projekt TEPPFA prowadzony we współpracy z Borealis i LyondellBasell Grudzień 2014.
- [4] Przewidywana trwałość istniejących systemów wodociągowych z PCV. Badania przeprowadzone przy współpracy Dyka, Pipelife, Wavin, LVM, Shin-Etsu, Solvin i KIWA. TNO - report nr 007.63549. Maj 2006.

- [5] PVC Pipe Longevity Report: Affordability & the 100+ Year Benchmark Standard. Utah State University, Buried Structures Laboratory, Steven Folkman. Maj 2014.
- [6] Janson, L-E. 1991. Long-term studies of PVC and PE pipes subjected to forced constant deflection. - Report No 3 from the Swedish KP-Council, Stockholm, Dec. 1991.
- [7] Janson, L-E. 1988. Physical ageing of buried PVC sewer pipes as affecting their long-term behaviour. - Proc. PRI 7th Int. Conf. Plastics Pipes. Bath, UK 1988, p. 28/1-28/10.
- [8] Janson, L-E. 1995. Long-term behaviour of buried PVC sewer pipes. - Plastics Pipes IX Conference. The Institute of Materials UK, Edinburgh, UK, 1995. p. 31-39.