

Trwałość instalacji z tworzyw sztucznych

Trwałość systemów rurowych stanowi miarę zachowania funkcjonalności w określonych warunkach środowiskowych eksploatacji.

W analizach dotyczących przewidywanej trwałości rur z tworzyw termoplastycznych, koniecznym jest wzięcie pod uwagę szereg istotnych aspektów, a mianowicie:

- właściwości fizyko-mechaniczne materiału, z którego wykonano rury;
- odporność materiału rur na czynniki środowiskowe – mechaniczne, chemiczne, fizyczne i biologiczne;
- rodzaj i zachowanie się gruntów oraz stabilność właściwości mechanicznych rur;
- utrzymywanie parametrów eksploatacyjnych.

Mówiąc o trwałości rur i wykonanych z nich instalacji i sieci nie sposób pominąć jakości wykonania ich montażu oraz monitorowania sieci w trakcie eksploatacji. Rosnące zużycie rur z tworzyw syntetycznych oraz zastępowanie rur wykonanych ze stali, kamionki i żeliwa w sieciach i instalacjach wynika z ich trwałości, łatwości montażu jak również walorów eksploatacyjnych.

Przewiduje się, że wzrost globalnego zapotrzebowania na rury z tworzyw sztucznych wyniesie 4,6% w skali roku, osiągając wartość 18,1 mln ton w roku 2012 [1].

Tablica 1. Światowe zapotrzebowanie na rury z tworzyw sztucznych (mln. metrów)					
				roczny przyrost, %	
lata	2002	2007	2012	2002-2007	2007-2012
Ameryka Północna	1852	2162	2440	3,1	2,4
Europa Zachodnia	1041	1152	1285	2,0	2,2
kraje Azji i Pacyfiku	1286	1852	2645	7,6	7,4
Pozostałe regiony	966	1359	1790	7,1	5,7
Zapotrzebowanie	5145	6525	8160	4,9	4,6

Wpływ materiału na jakość i trwałość rur.

Podatność do przetwórstwa oraz właściwości fizyko-mechaniczne materiałów polimerowych pozostają w ścisłym związku z ich ciężarem cząsteczkowym oraz budową chemiczną makrocząsteczki. W produkcji rur wytwarzanych z materiałów syntetycznych główną rolę odgrywają wielkotonażowe polimery termoplastyczne, głównie polietylen (PE), polipropylen (PP) oraz poli(chlorek winylu) (PVC).

Polietylen (PE)

Polimery etylenu często klasyfikowane są pod względem ich gęstości [2]:

- polietylen o bardzo małej gęstości (VLDPE), gęstość $< 910 \text{ kg/m}^3$;
- polietylen małej gęstości (LDPE), $910 \text{ kg/m}^3 < \text{gęstość} < 930 \text{ kg/m}^3$;
- polietylen średniej gęstości (MDPE), $930 \text{ kg/m}^3 < \text{gęstość} < 945 \text{ kg/m}^3$;

- polietylen dużej gęstości (HDPE), $945 \text{ kg/m}^3 < \text{gęstość} < 965 \text{ kg/m}^3$;
- polietylen ultra dużej gęstości (UHMWPE), gęstość $> 965 \text{ kg/m}^3$.

Obecnie stosowane w produkcji polimery etylenu są klasyfikowane w oparciu o wytrzymałość rur poddanych wewnętrznemu ciśnieniu hydrostatycznemu w temperaturze 20°C , dla okresu użytkowania co najmniej 50 lat. Minimalną wymaganą wytrzymałością (MRS) wyrażoną w barach oznacza się poszczególne typy PE, np. PE80 (MRS=8,0MPa), PE100 (MRS=10,0MPa).

Generalnie otrzymanie wyrobu o wysokiej wytrzymałości wymaga zastosowania polimeru o większej gęstości i krystaliczności, wykazującego gorszą podatność do przetwórstwa. Jednak ulepszone metody polimeryzacji pozwoliły na otrzymanie MDPE o nieznacznie zwiększonym ciężarze cząsteczkowym, mniejszej lepkości w stanie stopu, wykazujących zwiększoną długotrwałą wytrzymałość. Przykładem polimerów o dużym ciężarze cząsteczkowym oraz małych wartościach MFR są bimodalne polietyleny typu PE100.

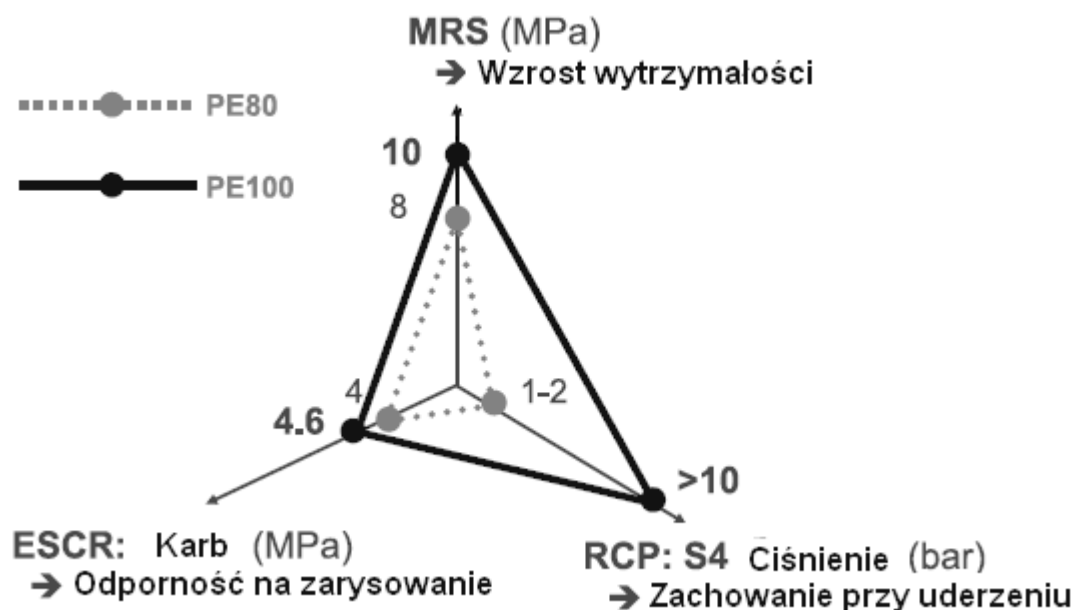
Gęstość (powiązana z krystalicznością), wskaźnik szybkości płynięcia (zależny od ciężaru cząsteczkowego polimeru) oraz rozkład ciężarów cząsteczkowych to parametry decydujące o właściwościach wytrzymałościowych polietylenu oraz polipropylenu, a zatem także o trwałości rur wykonanych z tych materiałów.

Dobierając określony typ PE do produkcji rur wskazanym jest wzięcie pod uwagę wpływu parametrów jakościowych polimeru na właściwości fizyko-mechaniczne wyrobu.

Tablica 2. Wpływ zmian gęstości, wskaźnika szybkości płynięcia (MFR) oraz Rozkładu Ciężarów Cząsteczkowych (RCC) na wybrane właściwości PE [3]			
Właściwość	Przy wzroście gęstości	Przy wzroście MFI	Wraz z poszerzeniem RCC
Wytrzymałość przy rozciąganiu	wzrasta	spada	
Sztywność	wzrasta	nieznacznie spada	nieznacznie spada
Udarność	spada	spada	spada
Kruchość w niskich temperaturach	wzrasta	wzrasta	spada
Odporność na ścieranie	wzrasta	spada	
Twardość	wzrasta	nieznacznie spada	
Punkt mięknięcia	wzrasta		wzrasta
Odporność na korozję naprężeniową	spada	spada	wzrasta
Przepuszczalność gazów	spada	nieznacznie wzrasta	
Odporność chemiczna	wzrasta	spada	
Wytrzymałość stopu		spada	wzrasta
Połysk	wzrasta	wzrasta	spada
Zmętnienie	spada	spada	
Skurcz	spada	spada	wzrasta

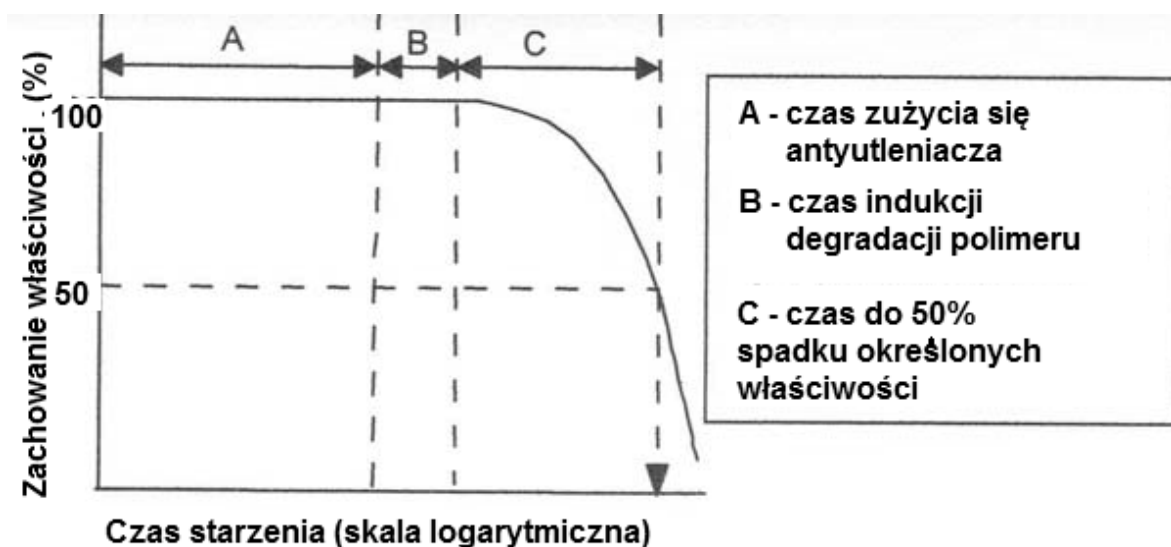
Obecnie powszechnie stosowane w produkcji rur do ciśnieniowego transportu wody i gazu polietyleny PE80 oraz PE100 charakteryzują się dobrym zrównoważeniem trzech podstawowych właściwości, a mianowicie:

- odpornością na pełzanie i długotrwałą wytrzymałością;
 - odpornością na korozję naprężeniową, krytyczną właściwością odnoszącą się do uniknięcia inicjacji i propagacji pęknięć wywołanych zarysowaniami lub punktowymi obciążeniami;
- Ponadto PE 100 charakteryzuje się dużą odpornością na szybką propagację pęknięć.



Rys.1 Porównanie wybranych właściwości PE 80 oraz PE100

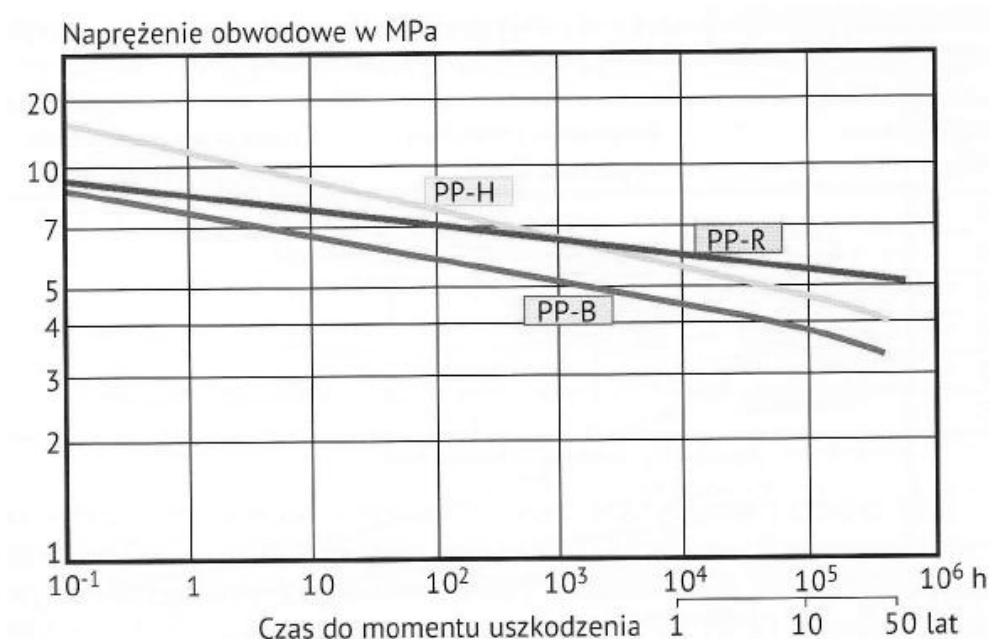
W przypadku polietylenu istotnym parametrem oprócz wymienionych powyżej, jest jego stabilność wyrażana czasem indukcji utlenienia (OIT). Zależy ona od rodzaju i ilości antyutleniaczy dodanych do polimeru, a „zużywanych” w trakcie obciążeń cieplnych w trakcie produkcji rur jak również wykonywania połączeń zgrzewanych. Po wyczerpaniu się substancji zabezpieczających polimer, następuje jego degradacja, a w konsekwencji spadek właściwości wytrzymałościowych, drastycznie wpływając na trwałość rur. Dlatego też, stopy polimerowe poliolefin (PE oraz PP) w trakcie przetwórstwa nie powinny być przegrzewane (np. w trakcie kilkunastominutowych przerw w produkcji), a ilość stosowanego przetworzonego wcześniej polimeru jako dodatku do polimeru bazowego powinna być ograniczana. W pływ czasu starzenia termicznego PE na poziom zachowania właściwości wytrzymałościowych polimeru przedstawiono poniżej.



Rys. 2 Trzy stadia utleniania PE HD [4,5].

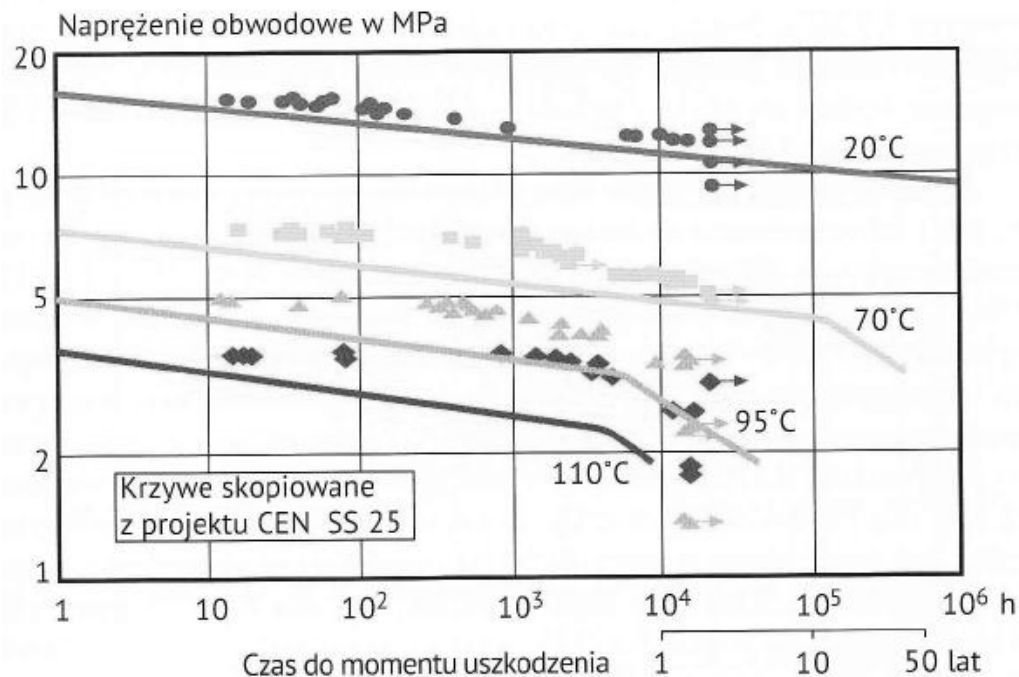
Polipropylen

W produkcji rur stosowane są trzy zasadnicze odmiany polipropylenu, różniące się budową makrocząsteczek: homopolimer – PP-H; polimer blokowy- PP-B oraz polimer statystyczny – PP-R. Różnice wytrzymałości rur wykonanych z tych polimerów przedstawiono poniżej.



Rys. 3 Wytrzymałość hydrostatyczna rur z różnych typów PP w temperaturze 60°C[6].

Polipropylen blokowy PP-B stosowany jest w produkcji rur ciśnieniowych do produkcji rur zimnej wody oraz rur kanalizacyjnych, PP-R do transportu wody ciepłej o temperaturze 60°C.



Rys.4 Krzywe pełzania do rozerwania rur z PP-R [6].

Na podstawie zależności przedstawionej na rysunku 4 można stwierdzić, że rury z PP-R w temperaturze 20°C mogą być stosowane zamiennie z rurami PE80 [6].

Projektowe trwałości PP-R odniesione do temperatury eksploatacji oraz naprężeń projektowych przedstawiono w tabelicy 3.

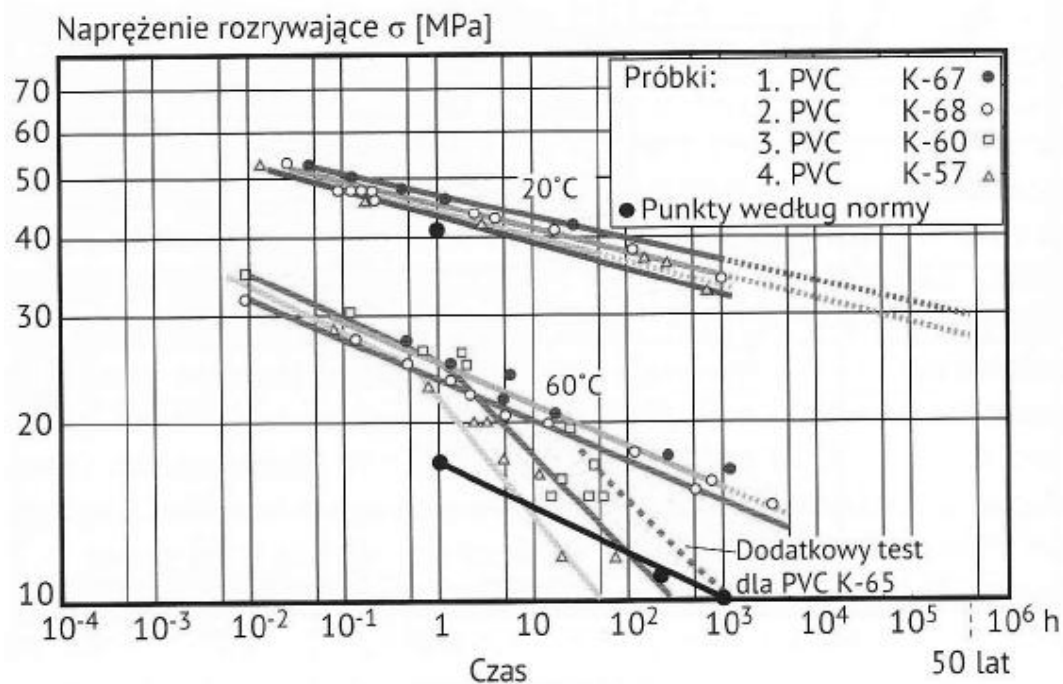
Tabela 3. Kryteria projektowe dla rur ciśnieniowych z PP-R		
Temperatura , °C	Projektowa trwałość użytkowa, lata	Naprężenie projektowe przy współczynniku bezpieczeństwa C=1,25, MPa
20	50	6,3
40	50	4,6
60	50	2,7
70	30	2,2
80	15	1,8
95	5	1,5

Poli(chlorek winylu) (PVC)

W przypadku poli(chlorku winylu) materiał do wytwarzania rur stanowi kompozycja polimeru suspensyjnego z niezbędnymi środkami pomocniczymi (stabilizatory termiczne, środki poślizgowe o działaniu wewnętrznym i zewnętrznym, napelniacze).

O właściwościach mechanicznych rur wykonanych z tych kompozycji decyduje ciężar cząsteczkowy PVC oraz ilość oraz rodzaj zastosowanych dodatków.

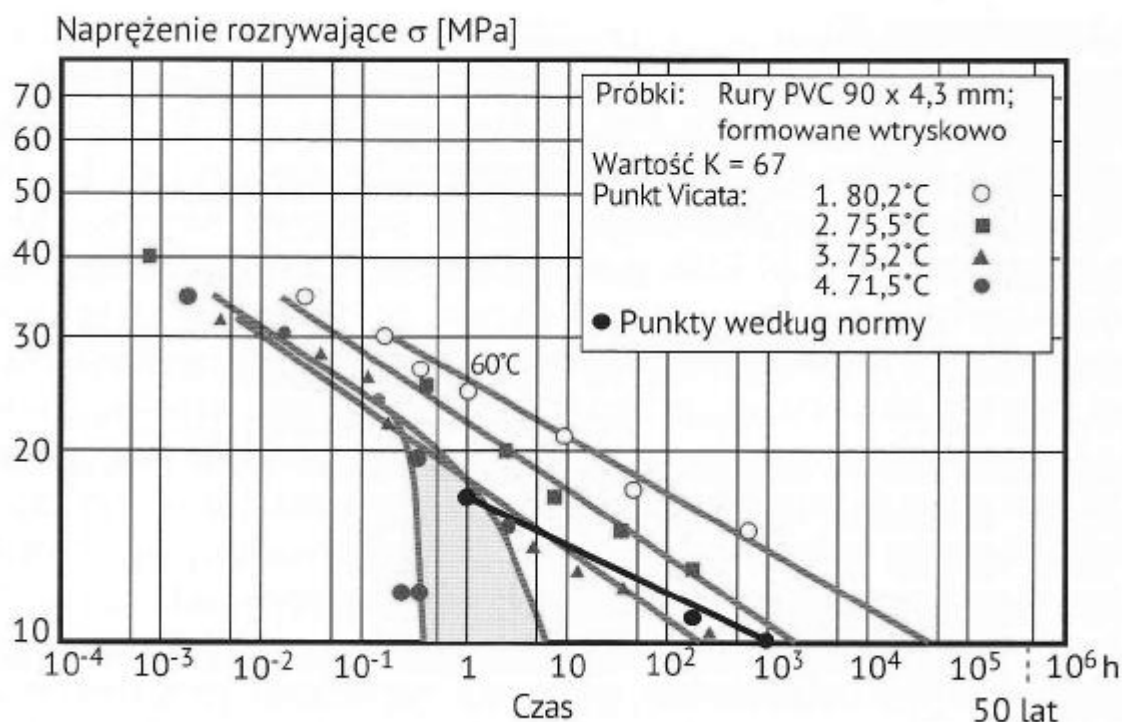
Wpływ ciężaru cząsteczkowego PVC-S na czas do zniszczenia rury zilustrowano na poniższym rysunku.



Rys. 5 Zależność naprężenie - czas do uszkodzenia rur z PVC wykonanych z kompozycji zawierających polimery o różnych stałych K, wyznaczona w temperaturze 60°C [6].

Jak widać wpływ ciężaru cząsteczkowego PVC na wartość naprężenia rozrywającego rur w temperaturze 20°C jest niewielki. Jednak istotne różnice w trwałości rur stwierdzono w podwyższonych temperaturach (patrz rys. powyżej). Dlatego też w produkcji rur powinny być stosowane polimery suspensyjne o stałych $K > 65$.

Skład recepturowy kompozycji PVC powinien być również tak dobrany aby materiał rury charakteryzował się odpowiednią temperaturą mięknięcia wg. Vicata, wyższą niż 79°C, jako, że materiały miękające w niższych temperaturach wykazują wyraźnie gorszą odporność na rozerwanie w próbie ciśnieniowej.



Rys. 6 Zależność naprężenie rozrywające/czas dla wtryskiwanych próbek rur PVC o różnych temperaturach mięknięcia, wyznaczona w temperaturze 60°C [6].

Podstawowym parametrem trwałości rur z tworzyw termoplastycznych stosowanych w określonych warunkach eksploatacyjnych, wyznaczanym dla wszystkich materiałów, jest ich długotrwała wytrzymałość hydrostatyczna wyznaczana przez ekstrapolację [7].

Przydatność tworzywa sztucznego w aplikacjach ciśnieniowych określona jest, zachowaniem się materiału konstrukcyjnego pod obciążeniem, z uwzględnieniem określonych warunków roboczych (np. temperatury). Powszechnie wyraża ją naprężenie obwodowe wywołane ciśnieniem hydrostatycznym, które przewiduje że, rura z badanego materiału wytrzyma warunki robocze przez 50 lat w temperaturze otoczenia 20 °C, z użyciem wody jako wewnętrznego medium badawczego.

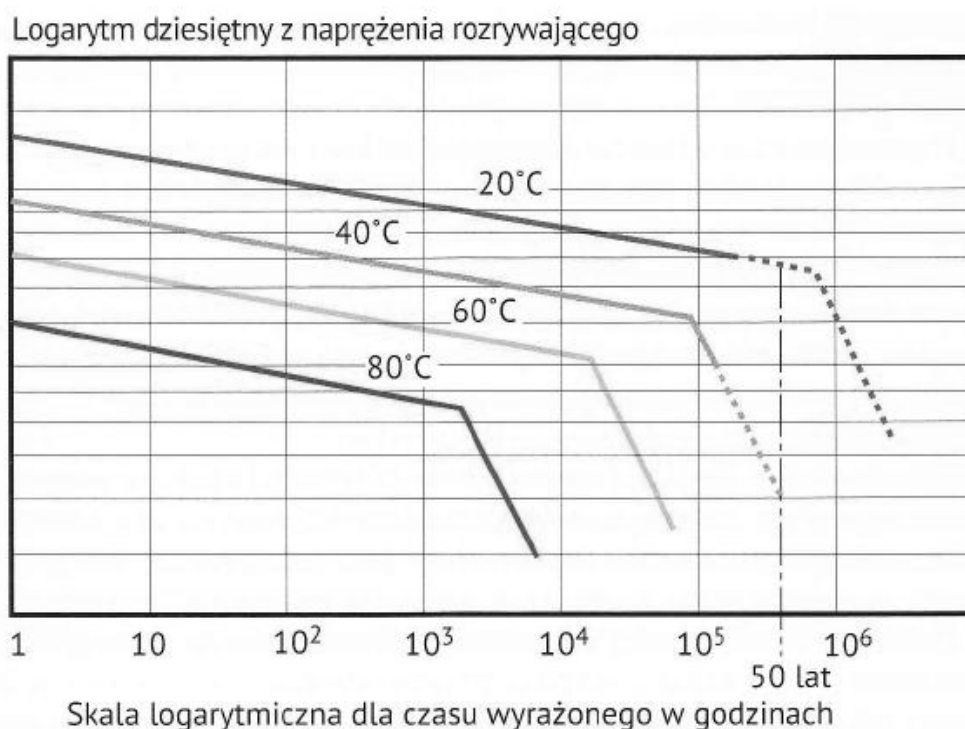
Niniejsza metoda może stanowić systematyczną podstawę do interpolacji i ekstrapolacji charakterystyk opisujących naprężenia niszczące dla warunków roboczych innych niż konwencjonalne 50 lat i temperatura 20 °C. Biorąc pod uwagę współczynniki ekstrapolacyjne, graniczny czas ekstrapolacji może sięgać 100 lat. Dotychczasowe badania rurociągów ciśnieniowych wskazują, że przy zachowaniu określonych warunków, ich trwałość eksploatacyjna będzie dłuższa aniżeli 100 lat. Metoda ta pozwala ponadto na ustalenie:

- a) maksymalnego naprężenia (lub ciśnienia), które może wytrzymać dany system rurowy w określonej temperaturze i czasie;
- b) czasu pracy rurociągu, obciążonego określonym naprężeniem (lub ciśnieniem) w danej temperaturze.

Metoda aproksymacyjna została skonstruowana tak, by spełnić dwa następujące wymagania:

- a) Oszacować dolną granicę przewidywanej wartości naprężeń (przy 97,5-procentowym poziomie prawdopodobieństwa), które rura z badanego materiału może wytrzymać przez 50 lat w temperaturze otoczenia równej 20 °C, używając wody lub powietrza jako medium badawczego.
- b) Oszacować dolną granicę przewidywanej wartości naprężeń (przy 97,5-procentowym poziomie prawdopodobieństwa) albo dla różnych okresów trwałości, albo w różnych temperaturach, albo jednego i drugiego.

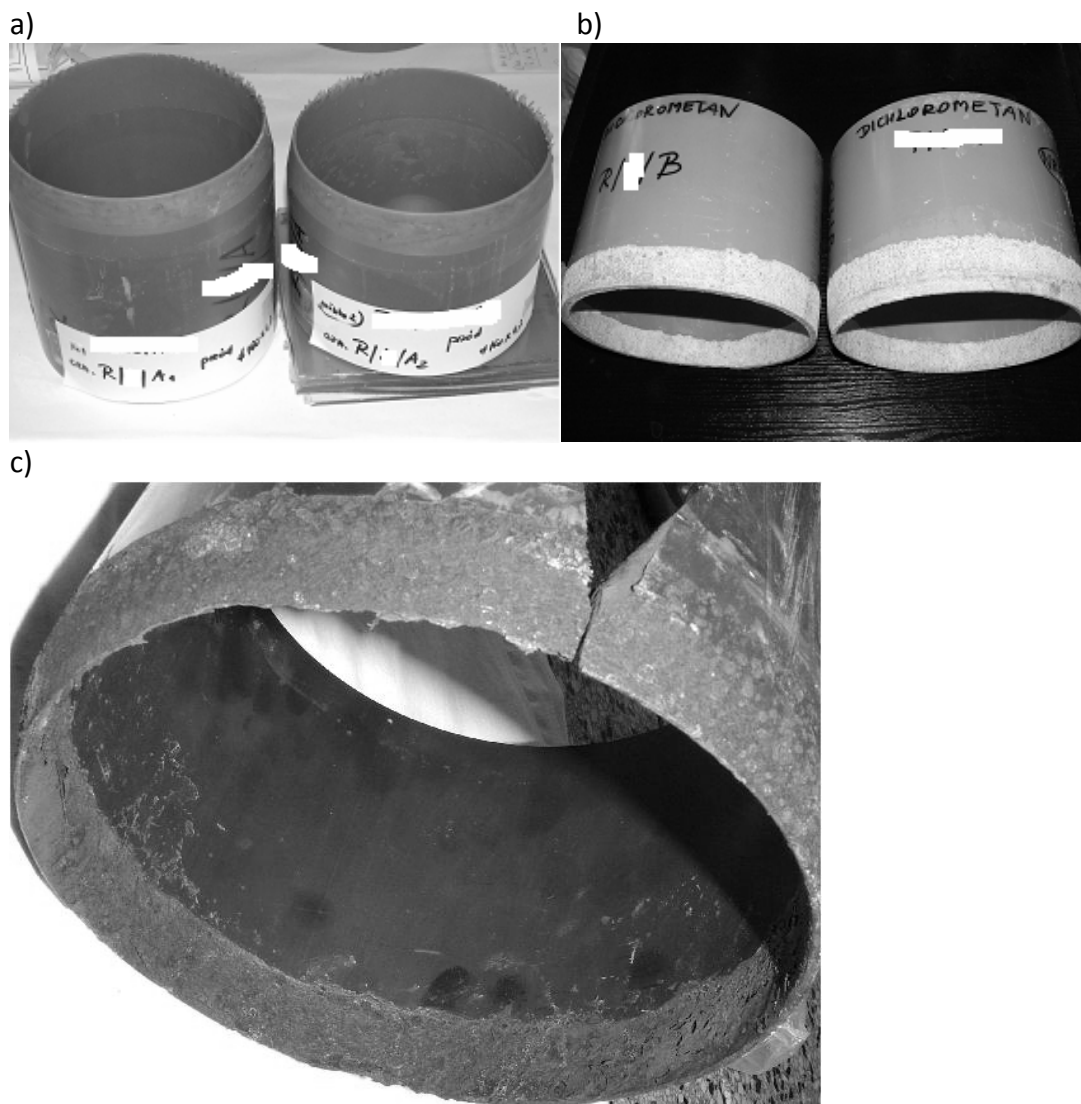
Dla każdego materiału polimerowego należy wyznaczyć długotrwałą wytrzymałość hydrostatyczną aby móc przewidzieć jego trwałość w warunkach eksploatacji, przykład podano poniżej



Rys. 7 Zależność czasu do uszkodzenia rur PE od naprężenia dla różnych temperatur badania (linie ciągłe – na podstawie rezultatów testu, linie przerywane stanowią ekstrapolację) [6].

Wpływ przetwórstwa na jakość i trwałość rur.

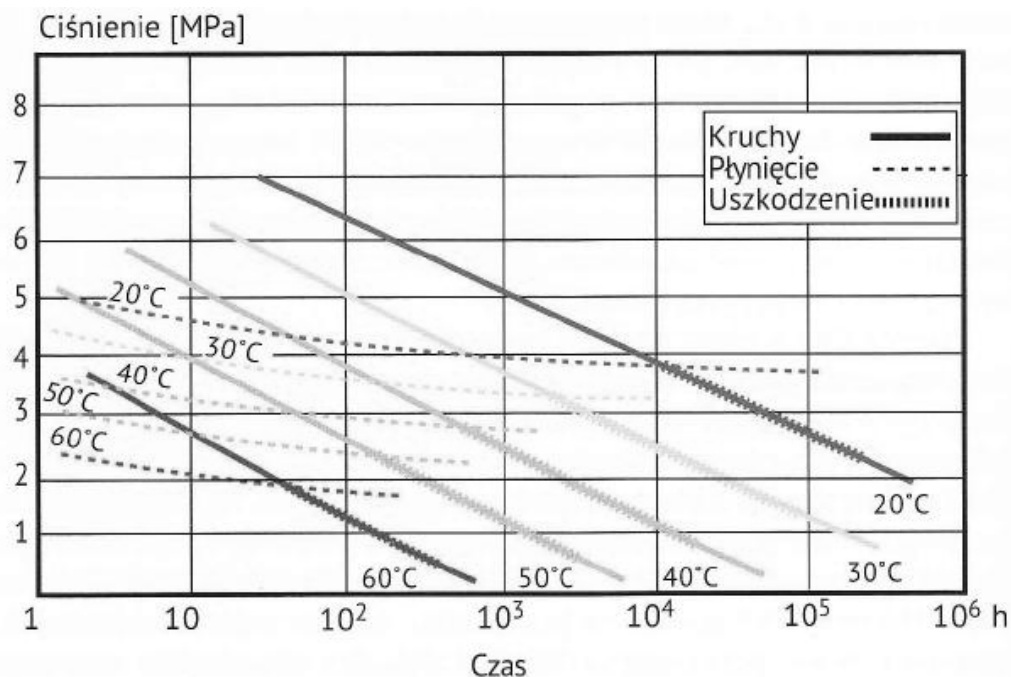
Niewłaściwie prowadzony proces przetwórstwa, także w istotny sposób rzutuje na trwałość rur z tworzyw termoplastycznych.



Rys.8 Próbki rur PVC po badaniu odporności na dichlorometan, rura kanalizacyjna ϕ 160 mm ,
a) – dobrze żelowany materiał;
b) – niedostateczne żelowanie materiału w całym przekroju rury;
c- próbka rury ciśnieniowej do transportu wody ϕ 225 mm - niedostateczne żelowanie materiału w całym przekroju rury.

W przypadku rur z PVC, kiedy stopień żelowania materiału jest za niski, jak również kiedy jest zbyt wysoki, wytrzymałość materiału jest także mała. Optymalne właściwości rur z PVC uzyskiwane są w przypadkach gdy stopień żelowania jest zawarty w zakresie od 60 do 85% [8].

Niewłaściwe żelowanie materiału rur z PVC negatywnie odbija się na ich odporności na uderzenie jak również na przewidywanej długoczasowej trwałości w warunkach eksploatacji. Nieodpowiednie parametry prowadzenia procesu przetwórstwa kompozycji PVC negatywnie wpływają również na wytrzymałość hydrostatyczną rur, wyraźnie zmniejszając ich trwałość, co zobrazowano poniżej na rysunku.



Rys. 9 Czas do uszkodzenia w funkcji ciśnienia hydrostatycznego w określonych temperaturach dla rury z PVC wytłoczonej w niewłaściwych warunkach przetwórstwa [6].

Obce wtrącenia, niejednorodności materiału oraz aglomeraty napelnaczy lub środków barwiących w ściankach rur, stanowią miejsca inicjujące pęknięcia rur, istotnie wpływając na trwałość rur.

W systemach rurowych z PE stosowanych do ciśnieniowego przesyłania mediów do bardzo ważnych parametrów decydujących o ich trwałości zaliczyć należy podatność rur do kruchego pęknięcia.

W związku z możliwością wystąpienia zniszczeń rurociągów wywołanych np. uszkodzeniami mechanicznymi powierzchni rur lub nagłymi skokami ciśnienia, w celu określenia ich odporności na te czynniki, a zarazem trwałości przeprowadzane są specyficzne znormalizowane testy:

Oznaczanie odporności na propagację pęknięć. Metoda badania powolnego wzrostu pęknięć na rurach z karbem [9].

Badanie wykonuje się na próbce rury o długości przekraczającej $3d_n$, dla średnic rur ≤ 315 mm, dla rur o większych średnicach długość ta powinna być > 1000 mm. Na próbce nacina się 4 karby wzdłużne równomiernie rozmieszczone na obwodzie. Grubość ścianki pod karbem powinna wynosić od 0,78 do 0,82 minimalnej grubości ścianki. W badaniu tym w temperaturze 80°C próbkę poddaje się działaniu ciśnienia hydrostatycznego. Ciśnienie w próbce utrzymuje się do chwili wystąpienia uszkodzenia próbki lub wyznaczonego czasu prowadzenia testu.

**Oznaczanie odporności na szybką propagację pęknięć (RCP – Rapid Crack Propagation).
Metoda badania w pełnej skali (FST – Full-Scale Test) [10].**

Badanie polega na utrzymywaniu w określonej temperaturze rury z tworzywa termoplastycznego o długości 14 m, zawierającej płyn pod określonym ciśnieniem. Badana rura połączona jest ze zbiornikiem z rury stalowej o długości co najmniej 28 m. Badaną rurę poddaje się uderzeniu, w miejscu wzdłużnego karbu, co najmniej 2 m od końca rury, w której inicjuje się pęknięcie. Miejsce inicjowania pęknięcia jest schładzane przez 1 h do temperatury -60°C (etanol/stały CO_2). Szybka propagacja pęknięcia ma miejsce wówczas, gdy najdłuższe pęknięcie jest dłuższe niż 90% długości badanej rury. W badaniu zamiast gazu ziemnego jako płynu sprężonego można zastosować azot albo powietrze. W systemach rurowych do przesyłania wody, które zawierają tylko wodę, jest mało prawdopodobne wystąpienie zjawiska propagacji pęknięcia, jednak jest to możliwe, jeżeli woda zawiera rozproszone pęcherzyki lub korki powietrza. Zazwyczaj aby oznaczyć odporność na propagację pęknięcia, badanie wykonuje się z zastosowaniem wody zawierającej od 5 do 10% objętościowych powietrza.

Wymagania, dotyczące odporności rur polietylenowych na szybką propagację pęknięć, są określone w dokumencie normalizacyjnym PN-EN 12007-2. Według tej normy, stosunek krytycznego ciśnienia p_c (oznaczanego podczas testu w pełnej skali) do maksymalnego ciśnienia roboczego (MOP) musi być większy lub równy 1,5. Ciśnienie to powinno być oznaczane zgodnie z PN-EN 1555-2 dla temperatury odniesienia 0°C .

Test S4 – test na małą skalę w stanie stacjonarnym (Small Scale Steady State Test) - wg. ISO 13477 [11].

Badanie polega na wyznaczeniu minimalnego ciśnienia wewnętrznego powietrza, potrzebnego do podtrzymania szybkiej propagacji pęknięcia postępującego od naciętego karbu. Test prowadzony jest w temperaturze 0°C , stosując azot lub powietrze do wywarcia ciśnienia w próbce rury, zamkniętej z obu stron odpowiednimi uchwytami. W teście tym, ciężarek z zamocowanym ostrzem, spada na z określonej wysokości na koniec badanej rury, we wnętrzu której wytworzono określone ciśnienie. Na podstawie serii prób wykonanych przy różnych ciśnieniach określa się ciśnienie krytyczne, przy którym następuje wyraźne przejście od zatrzymania początkowego pęknięcia do stałej propagacji pęknięcia. O propagacji pęknięcia mówimy wówczas gdy długość pęknięcia jest większa lub równa $4,7 d_n$. Ciśnienie krytyczne p_c (S4) jest najwyższym ciśnieniem przy którym następuje zatrzymanie zainicjowanego pęknięcia.

Współczynnik korelacji między testem w pełnej skali i testem S4 jest zdefiniowany jako stosunek bezwzględnego ciśnienia krytycznego testu w pełnej skali do podobnego ciśnienia testu S4:

$$(p_c, \text{ test w pełnej skali} + 1) = 3,6 (p_c, \text{ S4} + 1), \text{ czyli } = 3,6 p_c, \text{ S4} + 2,6$$

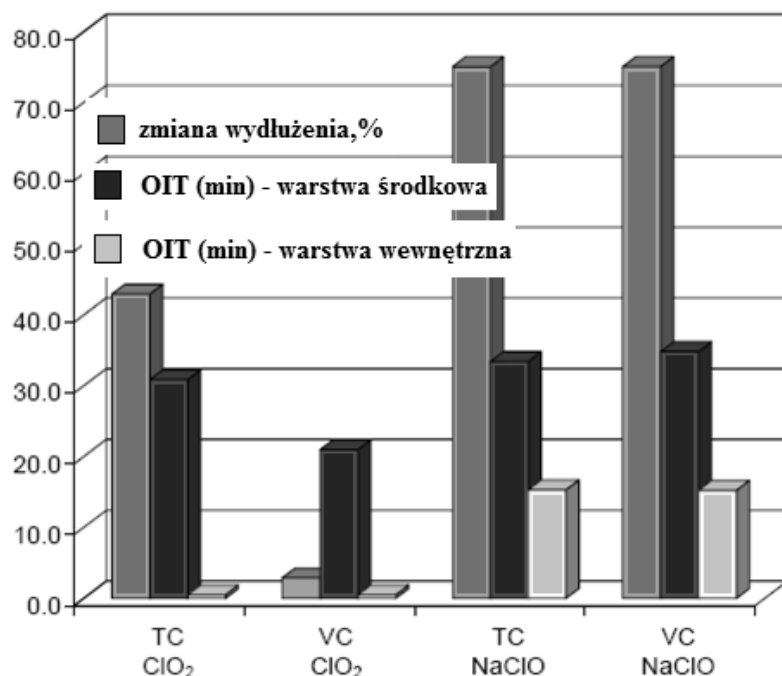
Ważnymi parametrami charakteryzującymi materiał rur jest odporność chemiczna oraz odporność na zużycie abrazyjne.

Odporność chemiczna

Generalnie materiały polimerowe stosowane w produkcji rur są odporne na większość zwykłych środowisk korozyjnych. Pomijając media wykazujące oddziaływanie spęczniające lub rozpuszczające materiał polimerowy, w pozostałych przypadkach określając odporność chemiczną tworzyw syntetycznych, koniecznym jest wzięcie pod uwagę wpływu środowiska na procesy degradacji polimeru. Degradację polimerów wywołują głównie substancje wykazujące działanie utleniające, promieniowanie UV, obciążenia termiczne i cykliczne obciążenia mechaniczne. W celu zwiększenia odporności polimerów na czynniki degradujące są one stabilizowane poprzez dodatek antyutleniaczy, sadzy oraz stabilizatorów termicznych.

W ISO/TR 10358 „Plastics pipes and fittings -- Combined chemical-resistance classification table „ w formie tabelarycznej przedstawiono klasyfikację odporności chemicznej różnych materiałów polimerowych na 427 substancji chemicznych w różnych temperaturach oraz przy różnych stężeniach. Projektując system przewodowy koniecznym jest uwzględnienie odporności chemicznej materiału rur i armatury na media, które mają nim transportowane, aby zachować jego funkcjonalność i trwałość w długim czasie.

Pospolitym wykorzystaniem rur z PE jest transport wody pitnej, dlatego interesującym jest zwrócenie uwagi na rodzaj stosowanego środka dezynfekcyjnego na trwałość rur, badania takie przeprowadzono we Włoszech [12]. Na przykładzie badań rur wykonanych z PE 100, ϕ 32mm stwierdzono większy wpływ ditlenku chloru aniżeli podchlorynu sodu (NaClO) na właściwości rur.



Rys.10 Zmiany wydłużenia oraz wartości OIT dla próbek rur mających kontakt z wodą zawierającą ditlenek chloru oraz podchloryn sodu, po 360 godz. oddziaływania (TC – próbka pobrana z rury przez którą przepływała woda ze środkiem dezynfekującym, VC – próbka rury zanurzona w wodzie zawierającej środek dezynfekujący)

Zarówno dla próbek mających kontakt z ditlenkiem chloru jak i podchlorynem sodu stwierdzono spadek wydłużenia przy zerwaniu jak również czasu indukcji utlenienia (OIT), jednak w przypadku (ClO₂) spadek tych właściwości był szybszy i zdecydowanie większy.

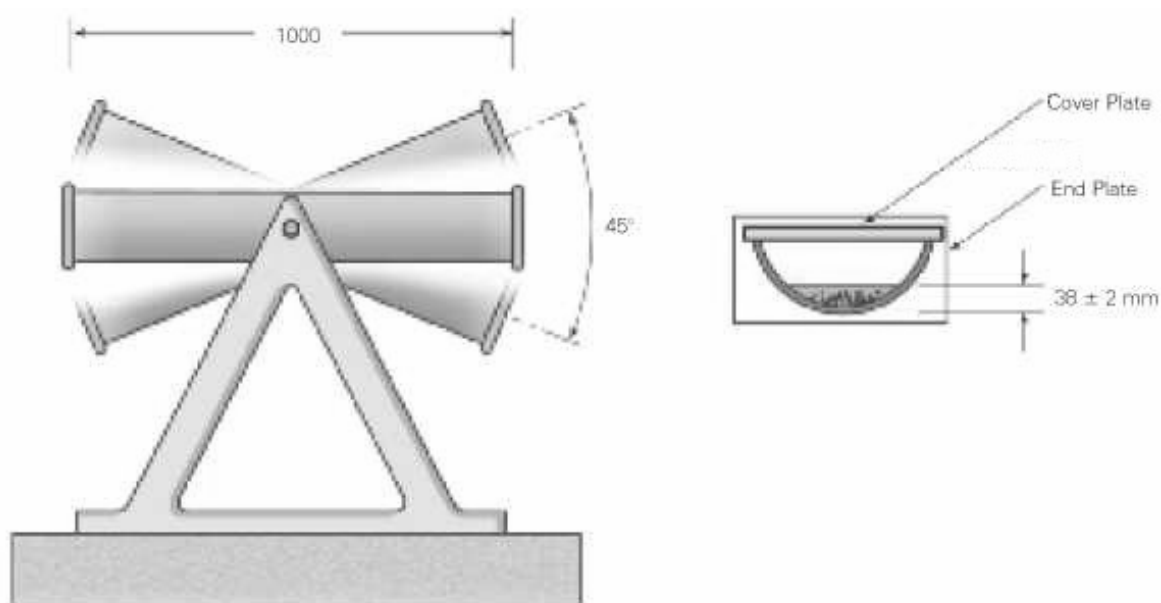
Znaczny spadek OIT dla próbki ekspozowanej przez kilka tygodni w wodzie z dodatkiem (ClO₂) świadczy o wyraźnej dezaktywacji antyutleniaczy zawartych w polimerze szczególnie w warstwach powierzchniowych mających bezpośredni kontakt z wodą zawierającą ditlenek chloru. Nie stwierdzono jednak istotnego wpływu omawianych środków dezynfekujących na wytrzymałość przy rozciąganiu oraz wytrzymałość hydrostatyczną badanych rur.

Ścieralność

Zużycie abrazyjne ścianek przewodów kanalizacyjnych zależy między innymi od:

- rodzaju materiału, z jakiego wykonana jest rura,
- obecności i ilości cząstek mineralnych w ściekach (np. piasku, żwirku),
- prędkości przepływu ścieków,
- wypełnienia kanału,
- miejsca w sieci kanalizacyjnej.

W Europie opracowano kilka metod badań rur na ścieranie, np.: metoda opracowana na uniwersytecie w Darmstadt (symulacja ruchu prostoliniowego, postępowo-zwrotnego), metoda Wuppertal (symulacja ruchu obrotowego) oraz rozwiązanie z zastosowaniem instalacji ciśnieniowej. Najpopularniejszą obecnie jest metoda Darmstadt opisana w DIN V 19534 teil 2[13,14].



Rys. 11 Stanowisko do oznaczania ścieralności rur metodą Darmstadt

Przytoczone powyżej normy nie precyzują jednak dopuszczalnej ścieralności po określonej ilości cykli(np. .po 100 000). Na podstawie badań eksploatacyjnych przeprowadzonych w Szwecji określono ilość piasku, która może dostawać się do systemu

kanalizacyjnego przez jedną studzienkę rewizyjną (ok. 200 kg/rok) [15]. Obliczenia wykonane dla rurociągu z 10-12 studzienkami wskazują na transport ok. 2000 kg piasku rocznie w rurach o małych średnicach, co odpowiada wytarciu ścianki rury po ok. 100 000 cykli [13]. Stosownie do przyjętych założeń rezultat badań po 100.000 cykli w metodzie Darmstadt odpowiada okresowi 102 lat eksploatacji sieci.

Badania ścieralności przeprowadzone przez firmę OMNIPLAST [16]. potwierdziły dobrą odporność rur PVC na zużycie abrazyjne w stosunku do rur wykonanych z innych materiałów. Uzyskane rezultaty przedstawiały się następująco: dla PVC-u - 0,754 μm ; dla stali - 1,72 μm ; dla żeliwa sferoidalnego - 2,09 μm ; dla kamionki - 4,31 μm ; dla betonu - 15,9 μm oraz dla azbesto-cementu - 17,28 μm .

Wyniki szeregu badań laboratoryjnych oraz eksploatacyjnych wskazują, że szacowane zużycie abrazyjne ścianek rur rurociągów z PVC oraz PE w ciągu 100 lat będzie mniejsze niż 0,5 mm, dlatego też, ten poziom wytarcia ścianek rur nie powinien obniżyć ich trwałości.

Uderzenie hydrauliczne

W ciśnieniowych systemach przewodowych mogą wystąpić krótkotrwałe wzrosty ciśnienia wewnętrznego przekraczające nominalne ciśnienie robocze, wywołane tzw. uderzeniem hydraulicznym. Sytuacje takie występują w sieciach wodociągowych w przypadkach uruchamiania i zatrzymywania pracy pomp, nagłych otwarć i zamknięć armatury, pęknięć rur itp., wówczas ciągłość przepływu jest zaburzona nagłymi zmianami warunków przepływu.

Prędkość fali ciśnieniowej dla rur stalowych i betonowych jest około trzy razy większa aniżeli w przypadku rur HDPE, osiągając wartości od 1000 do 200 m/s.

Tablica 4 Zmiany ciśnienia spowodowane uderzeniem hydraulicznym w rurach klasy PN 10		
Materiał rury	Prędkość fali ciśnieniowej, m/s	Zmiana ciśnienia, bar
HDPE, MRS 63-100	285	$\pm 2,9$
MDPE, MRS 80	253	$\pm 2,6$
LDPE, MRS 40	190	$\pm 1,9$
PVC, MRS 250	443	$\pm 4,5$

W przypadku krótkotrwałych obciążeń jakimi są fale ciśnieniowe, naprężenie jakie powinna wytrzymać projektowana rura przez 50 lat może być znacznie przekroczone, pod warunkiem, że fale ciśnieniowe utrzymywane są w rozsądnych granicach. Ilość zmian obciążenia podczas spodziewanej 50-letniej trwałości użytkowej może być oszacowana na podstawie włączenia i wyłączenia pomp co 10 minut. Daje to ok. 106 gwałtownych zmian w przepływie, uwzględniając odbicia fal otrzymujemy 107 zmian obciążenia. Wytrzymanie 107 zmian obciążenia jest zazwyczaj określane jako wytrzymałość zmęczeniowa [6].

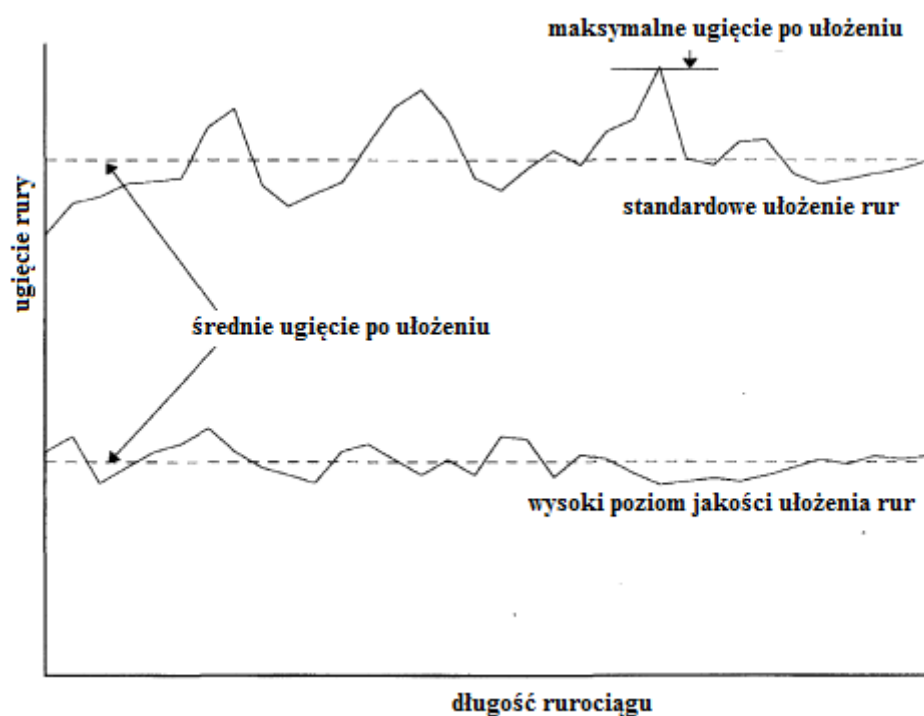
Prowadzone w Narodowym Szwedzkim Instytucie Testów i Badań w Goeteborgu badania uderzeń hydraulicznych dla rur wykonanych z PE 100 rur PN 10 o średnicy 110 mm wykazały, że rury wytrzymały 106 zmian pulsacji ciśnienia bez oznak uszkodzeń (temp. 230C,

odchyłki ciśnienia $\pm 50\%$ ciśnienia nominalnego 10 bar, częstotliwość zmian – 5 impulsów/10 sek.).

Rezultatem wielu prac dotyczących wpływu uderzeń hydraulicznych na trwałość rur, było stwierdzenie, że głębokość karbu na powierzchni rury do 5% grubości ścianki rury nie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową rur.

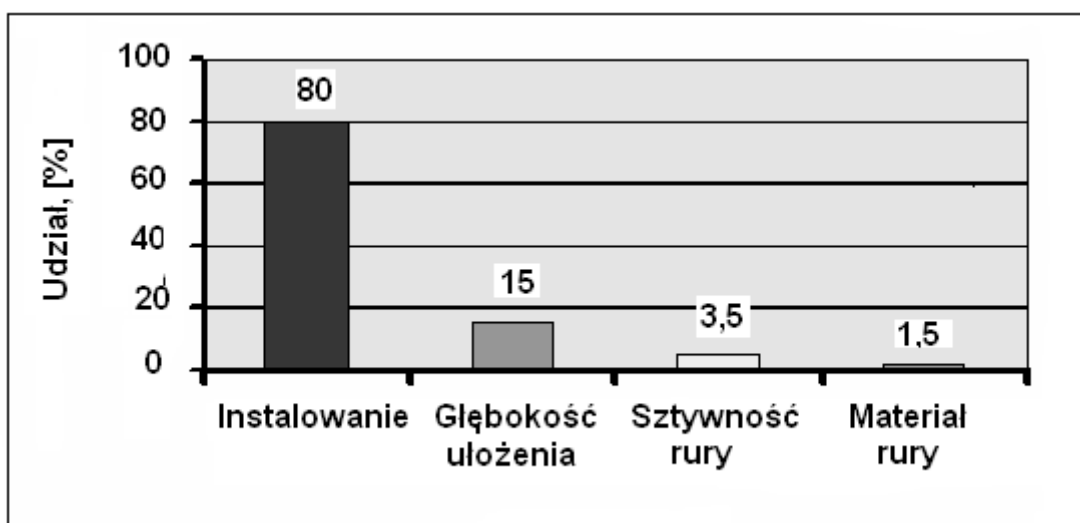
Ułożenie rur w gruncie

Rura ułożona w gruncie podlega obciążeniom gruntu i obciążeniom wywołanym ruchem kołowym. W przypadku rur elastycznych ułożonych w gruncie zdolność przenoszenia obciążeń przez rurociąg zależy zarówno od sztywności obwodowej rury, jak i sztywności otaczającego ją gruntu. Nawet jeżeli rurociąg wykonano według najwyższych standardów, praktyka wskazuje, że, odkształcenie będzie się zmieniało wzdłuż rurociągu. Zmiany ugięcia odzwierciedlają zróżnicowane podparcie oraz zróżnicowane oddziaływanie obciążeń zewnętrznych na rurę. Ugięcie wywołane obciążeniami zewnętrznymi działającymi w gruncie na ułożony elastyczny rurociąg przedstawiono poniżej



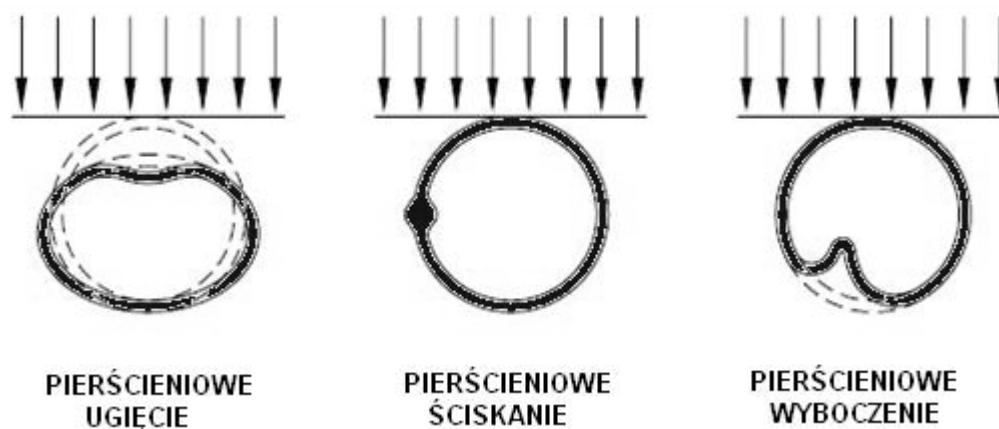
Rysunek 12 Typowe zmiany ugięcia wzdłuż rurociągu dla dwóch poziomów jakości ułożenia

Rury z tworzyw termoplastycznych, jako rury elastyczne, przenoszą wraz z otaczającym je gruntem wszystkie obciążenia zewnętrzne. Nieodłączną cechą rur elastycznych jest to, że pod wpływem działania obciążeń zewnętrznych uginają się. Wielkość tego ugięcia uzależniona jest głównie od stopnia, w jakim obciążenia przenoszone są przez grunt otaczający rurę. Wyniki przeprowadzonych badań wykazują, że wielkość ugięcia rury w ok. 80% zależy od jakości prac montażowych, ok. 15% od głębokości ułożenia rurociągu, ok. 3,5% od sztywności obwodowej zastosowanej rury i ok. 1,5% od użytego materiału [17]. Jak widać, to nie parametry techniczne stosowanych rur lecz jakość prac montażowych jest kluczowym elementem decydującym o stopniu ugięcia rurociągu.



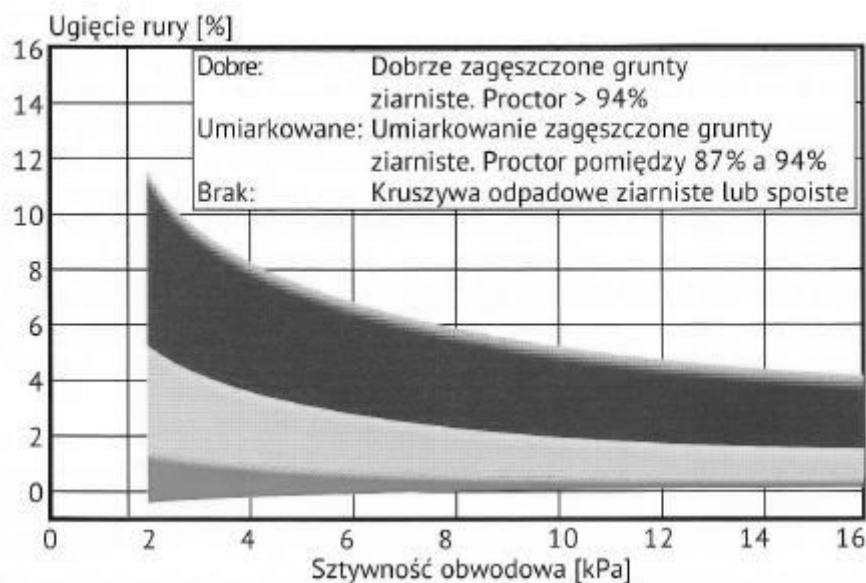
Rys. 13 Udział czynników mających wpływ na wielkość ugięcia rur.

Przekroczenie granicznych obciążeń rur ułożonych w gruncie może wywołać nadmierne ugięcie pierścieniowe rury, pierścieniowe wyboczenie, pierścieniowe ściskanie lub zniszczenie mechaniczne konstrukcji ścianki. Przypadki takie przedstawiono poniżej.



Rys.14 Rezultaty przekroczenia obciążeń granicznych rur z PE instalowanych w gruncie [3].

Wpływ poprawności posadowienia rur w gruncie na wielkość ich odkształcenia przedstawiono poniżej.



Rys. 15 Zależność pomiędzy ugięciem pierścieniowym rury i sztywnością obwodową dla określonego stopnia zagęszczenia gruntu wokół rury [6].

PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu zasygnalizowano jedynie niektóre aspekty mające wpływ na długotrwałą eksploatację rurociągów. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń oraz badań próbek rur z PVC pobranych z funkcjonujących sieci wodociągowych przewiduje się, że zachowają one swoją funkcjonalność przynajmniej przez 100 lat, pod warunkiem, że wewnętrzne i zewnętrzne obciążenia nie spowodują naprężeń obwodowych większych aniżeli 12,5 MPa, przy założeniu, że ścianki rur są pozbawione mikropęknięć, mechanicznych uszkodzeń, eksploatacja sieci będzie prowadzona przy niskich ciśnieniach wody, niewielkich fluktuacjach ciśnienia oraz nie wykonywaniu nowych przyłączy. W niektórych przypadkach rury z PVC z lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych pobrane z funkcjonujących sieci wodociągowych wykazywały „gorszą” jakość.

Dalszy okres trwałości eksploatacyjnej istniejących systemów rur wodociągowych z PVC, szczególnie w przypadkach rur „gorszej” jakości może być skrócony obecnością dodatkowych obciążeń, mikropęknięć oraz osiadaniem gleby.

Obecne obserwacje dotyczące próbek rur kanalizacyjnych z PVC pobranych z funkcjonujących sieci wskazują na powierzchniowe odbarwienie występujące w ograniczonej ilości przypadków badanych rur i zazwyczaj tylko miejscowo oraz umiarkowane zużycie powierzchniowe (erozja).

W wielu przypadkach miarą trwałości rurociągów wykonanych z różnych materiałów jest ich awaryjność. Poniżej przytoczono przykłady informacji dotyczących eksploatacji rurociągów wykonanych z różnych materiałów. Brytyjska baza danych awarii wodociągów UKWIR, tworzona przy współpracy wszystkich spółek wodociągowych w Zjednoczonym

Królestwie, zawiera prawie 500.000 zapisów awarii i obejmuje 350.000 km magistrali wodociągowych.

Z analizy danych rejestrowanych od 1995 roku, wynika, że PE jest najmniej zawodnym ze wszystkich materiałów używanych do produkcji rur. W przypadku rurociągów z PE, większość awarii stwierdzono dla rur z materiałów pierwszej generacji [18].

Wodociągi z Århus (Dania) posiadające duże doświadczenie w eksploatacji rurociągów z tworzyw sztucznych (50% sieci z PVC i 23% z PE), przez wiele lat rejestrowały awarie występujące na ich sieci. Dane za rok 2003 przedstawiono w poniżej tabeli. Z zestawionych danych wynika, że najmniejszą awaryjnością charakteryzują się instalacje wykonane z PE.

Tabela 5. Dane nt. awaryjności sieci wodociągowej Århus Water Company (2003) [19].

Materiał rury	Udział w sieci, [%]	Długość rurociągu, (km)	Średnia liczba wycieków rocznie	Wskaźnik awaryjności, [l/km/rok]
Żeliwo	16	216	86	0,40
Azbestocement	10	135	11	0,08
PVC	50	675	48	0,07
PE	23	310,5	7	0,02
Stal Galwanizowana	1	135	16	0,30
Suma	100	1350	168	0,11

Przeprowadzone w USA badania sfinansowane przez American Water Works Assn. Research Foundation i CSIRO wykazały, że rurociągi z PVC w sieciach wodociągowych z powodzeniem mogą być eksploatowane przez okres 100 lat. Sieci te wykazywały mniejszą awaryjność w porównaniu do sieci wykonanych z materiałów tradycyjnych. Za główne przyczyny awarii uznano błędy w projektowaniu oraz niezachowanie dobrej praktyki montażu [20].

Rury PE są zazwyczaj zgrzewane, a dobrze wykonana zgrzeina jest często mocniejsza niż sama rura. Oznacza to, że rurociąg może przenosić obciążenia osiowe bez groźby jego uszkodzenia i potrzeby stosowania bloków oporowych. Trwałość eksploatacyjna rurociągów do transportu gazu i wody od czasu do czasu weryfikowana jest podczas klęsk żywiołowych, np. trzęsień ziemi.

Odporność rurociągów PE na obciążenia i ruchy gruntu została wykazana w 1995 roku podczas dramatycznego trzęsienia ziemi w Kobe w Japonii. Kiedy po trzęsieniu ziemi, w którym zginęło 6 tys. osób, a 440 tys. domów zostało zniszczonych, firma Osaka Gas zbadała stan sieci gazowej, to stwierdzono wysoki poziom uszkodzeń na rurociągach żeliwnych i stalowych, i żadnych awarii w części sieci wykonanej z PE. Po tej analizie rury PE stały się niezwykle popularne w Japonii i innych obszarach, na których występują trzęsienia ziemi [21].

W styczniu 2008 roku w 6 południowych prowincjach Chin, wystąpiły niespotykane wcześniej w tych rejonach duże opady mroźnego deszczu oraz śniegu, zaś w maju trzęsienie ziemi o sile 8 stopni w skali Richtera (800 tys. osób straciło życie). Analiza zniszczeń sieci wodociągowej oraz gazowej wykazała, że uszkodzenia sieci dystrybuującej wodę i gaz wykonane z PE oraz żeliwa sferoidalnego były o wiele rzadsze, aniżeli w przypadku sieci wykonanych z betonu oraz żeliwa szarego. Głównym powodem zniszczeń oprócz sił natury w

tym przypadku wymieniono także – wykorzystanie niewłaściwych materiałów do budowy sieci, niską jakość rur oraz niewłaściwe wykonanie instalacji [22].

Pozytywną cechą rur z tworzyw sztucznych, w wielu przypadkach decydujących o ich trwałości jest ich podatność do przenoszenia obciążeń współpracując z otaczającym gruntem. Na przykładzie systemów kanalizacyjnych w Niemczech, Holandii oraz Szwecji wykazano, że wskaźnik awaryjności sieci wykonanych z rur sztywnych (kamionka, beton) jest wyższy w porównaniu do sieci wykonanych z rur elastycznych. (PVC, PE, PP). Na podstawie inspekcji telewizyjnych sieci stwierdzono, że ilość uszkodzeń na kilometr w przypadku rur sztywnych wynosił 50, zaś dla rur elastycznych tylko 8. W oparciu o wykonane prace ustalono, że poziom ryzyka wystąpienia uszkodzenia rur sztywnych jest ok. 2 większy w porównaniu do rur z tworzyw sztucznych [23].

Przeprowadzone dotychczas badania podstawowych materiałów polimerowych (PE, PVC oraz PP), stosowanych w produkcji rur wykorzystywanych w instalacjach ciśnieniowych i bezciśnieniowych, jak również długoletnie doświadczenia z eksploatacji sieci wykonanych z tych materiałów, wskazują na co najmniej 100 letnią ich niezawodność. Jednak warunkiem trwałości i funkcjonalności jest ich właściwe zastosowanie, prawidłowe wykonanie instalacji jak również monitorowanie systemu w trakcie eksploatacji.

Literatura

1. Freedonia Report, November 2008
2. ASTM D 3350 Standard Specification for Polyethylene Plastics Pipe and Fittings Materials
3. Second Edition Handbook of PE Pipe, Chapter 3, Plastics Pipe Institute, Washington
4. M. Pluimer, Establishing 100-Year Service Life for Corrugated HDPE Drainage Pipe, Plastics Pipe Institute, Washington, 2009
5. Y.G. Hsuan, R.M. Koerner, "Antioxidant Depletion Lifetime in High Density Polyethylene Geomembranes," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 6, pp 532 – 541, 1999
6. Lars-Eric Janson, Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal, Stockholm, str. 195, 2003, Tłumaczenie: Polskie Stowarzyszenie Producentów Rur i Kształtek z Tworzyw Sztucznych, Toruń, 2010
7. PN-EN ISO 9080 Systemy przewodów rurowych i rur osłonowych z tworzyw sztucznych – Oznaczanie przez ekstrapolację długotrwałej wytrzymałości hydrostatycznej materiałów termoplastycznych w postaci rur
8. J. Breen, Expected lifetime of existing PVC water, Plastics Pipes XII, Milano, April 2004
9. PN-EN ISO 13479 Oznaczanie odporności na propagację pęknięć. Metoda badania powolnego wzrostu pęknięć na rurach z karbem
10. PN-EN ISO 13478 Oznaczanie odporności na szybką propagację pęknięć (RCP – Rapid Crack Propagation). Metoda badania w pełnej skali (FST – Full-Scale Test)
11. ISO 13477 Test S4 – test na małą skalę w stanie stacjonarnym (Small Scale Steady State Test)
12. D. Castagnetti, E. Dragoni, G. Scirè Mammano, N. Fontani, I. Nuccini, V. Sartori, Effect of sodium hypochlorite on the structural integrity of polyethylene pipes for potable water conveyance, Proceedings of "Plastic Pipes XIV", September 22-24, 2008, Budapest, HU.
13. DIN V 19534 TEIL 2 „Rohre und Formstücke aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) mit Steckmuffe für Abwasserkanäle und leitungen. Technische Lieferbedingungen“
14. EN 295-3 "Vitrified clay pipes and fittings and pipe joints for drains and sewers. Part 3: Test methods."
15. REGELING H.J.: "Abrasion test of PVC sewer pipes" Report no. R 5907 Wavin R&D, 1989

16. NÖTHEN AND METZ: "Abriebversuche an Kanalrohr aus PVC hart. – Berichte aus der Entwicklungsabteilung der Omniplast GmbH & Co.", Ehringshausen Kts. Wetzlar, 1968
17. Frans Alferink, THE DESIGN OF BURIED THERMOPLASTICS PIPES, Wavin M&T, The Netherlands
18. Brytyjska baza danych awarii sieci wodociagowych UKWIR, Konferencja PlasticPipes XIII, Waszyngton, 2006 (Steve MacKellar, BodycotePDL).
19. F. Fontenay, et al „Review of properties of pipe and fitting materials for drinking water”, Force Technology Report, 2005
20. Stewart Burn ; Paul Davis ; Tara Schiller , Long-Term Performance Prediction for PVC Pipes , AwwaRF Report 91092F, 2006
21. H. Nishimura et al, „Earthquake resistance – evaluation of polyethylene pipes”, 3R
22. Zhanjie Wang, Robin Bresser, Cindy Wang, Analysis of the pipe failures in the 2008 frozen-rain & snow, earthquake in China, Plastic Pipes XV Vancouver 2010
23. Flexible and rigid sewer pipes in Europe: Comparing performance and environmental impact, Report on the TEPFPA-PLASTICS EUROPE Sustainable Municipal Pipes Project, October 2005