

Warunki pęknięcia doczołowo zgrzewanych połączeń rur z polietylenu

Włodzimierz Baranowski^{1), *)}, Krzysztof Werner²⁾, Monika Kula¹⁾

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.747](https://doi.org/10.14314/polimery.2014.747)

Streszczenie: Rurociągi wykonane z polietylenu są stosowane do przesyłania zarówno płynów i gazów mających niską temperaturę (zimna woda, paliwa gazowe), jak i różnych płynów agresywnych i wody o podwyższonej temperaturze, używanych w procesach technologicznych. Przedstawiono wyniki obliczeń i analizę krytycznych wymiarów szczelin zewnętrznych i wewnętrznych, doczołowo zgrzewanych złączy rur polietylenowych. W przypadku osiągnięcia przez szczelinę krytycznej wielkości może nastąpić zainicjowanie pęknięcia złącza rurociągu. W analizie uwzględniono zjawisko pełzania tworzywa w temp. 23 °C. Krytyczne wymiary szczelin wyznaczono dla wartości nominalnych ciśnienia roboczego rurociągów. Artykuł stanowi kontynuację pracy poświęconej tej tematyce, zamieszczonej w *Polimerach* w 2013 r. [6].

Słowa kluczowe: polietylen, zgrzewanie doczołowe, pęknięcie połączeń zgrzewanych, właściwości mechaniczne połączeń zgrzewanych polietylenu.

Evaluation of cracking conditions for butt-welded joints of polyethylene pipes

Abstract: Pipelines made of polyethylene are used to transport fluids and gases of low temperature (cold water, gaseous fuels) and various aggressive fluids as well as water of elevated temperature, used in technological processes. The work shows the results of calculations and analysis of critical-size defects in the forms of surface and internal fissures in the butt-welded joints. The initiation of cracking process in a pipeline can occur at the critical size of the fissure. The creep phenomenon of plastic at the temperature of 23 °C was taken into account in the analysis. The critical fissure sizes were determined for nominal working pressure in pipelines. The paper is a continuation of an earlier research work published by the authors in the same journal in 2013 [6].

Keywords: polyethylene, butt welding, cracking, mechanical properties of butt-welded joints of polyethylene.

W doczołowo zgrzewanych złączach rurociągów polietylenowych, stosowanych do przesyłania paliw gazowych, wody oraz innych płynów [1] mogą występować nieciągłości materiału, np. szczeliny wewnętrzne i powierzchniowe (zewnętrzne). Mogą to być szczeliny wzdłużne (powstające wzdłuż osi rury) albo poprzeczne [np. powierzchniowe szczeliny obwodowe na zewnętrznej lub wewnętrznej powierzchni zgrzeiny (por. rys. 1)] [1–3]. Szczeliny wzdłużne na zewnętrznej powierzchni rur (zarysowania) powstają na ogół w wyniku braku ostrożności podczas transportu i składowania rur oraz bu-

dowy rurociągu [3–5]. Natomiast szczeliny w złączach zgrzewanych, np. szczeliny obwodowe występujące w płaszczyźnie rowka zgrzeiny lub szczeliny wzdłużne wewnętrzne, tworzą się najczęściej w następstwie nieprawidłowości przeprowadzonego procesu zgrzewania. Warunkiem uzyskania dobrego połączenia doczołowego są m.in.: zbliżona lub taka sama wartość wskaźnika szybkości płynięcia (*MRF*) zgrzewanych materiałów, właściwe przygotowanie do zgrzewania czołowych powierzchni rur oraz utrzymanie określonych parametrów procesu zgrzewania (temperatury, czasu, siły docisku itd.).

Inspiracją do kontynuowania badań opisanych w [6] było powstanie dużej wewnętrznej szczeliny wzdłużnej w zgrzewanym złączu rur polietylenowych, które na podstawie oględzin zewnętrznych zakwalifikowano jako wykonane właściwie.

Naprężenie na czole szczeliny, spowodowane ciśnieniem przesyłanego medium, ulega znacznemu zwiększeniu, co może prowadzić do inicjacji i rozwoju pęknięcia. Warunkiem zainicjowania pęknięcia jest kry-

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Technologii Mechanicznych, Al. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa.

²⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, Katedra Technologii Procesów Budowlanych i Materiałowych, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa.

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: baranowski@ipp.pcz.pl

tyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia na czole szczeliny charakteryzującej się odpowiednio dużą (krytyczną) wielkością. Proces może przebiegać szybko lub wolno. Szybka propagacja pęknięcia (RCP — *Rapid Crack Propagation*), z prędkością bliską prędkości dźwięku [4, 7] może nastąpić w warunkach, w których tworzywo zachowuje się jak materiał sprężysto-kruchy, tj. w niskiej temperaturze (dla polietylenu PE-HD $T \leq 0$ °C). Na zjawisko RCP są narażone zwłaszcza grubościennne rury oraz ich złącza zgrzewane, pracujące w temperaturze bliskiej 0 °C. Wynika to ze stanu odkształcenia grubej ścianki rury, w przybliżeniu płaskiego, oraz z większej kruchości polietylenu w takiej temperaturze. Natomiast w warunkach nieco wyższej temperatury rurociągu (dla PE-HD od kilku do kilkunastu stopni Celsjusza) zainicjowane na czole szczeliny pęknięcie charakteryzuje stabilny lecz bardzo powolny wzrost spowodowany zmianą szybkości odkształceń związaną ze wzrostem temperatury tworzywa. Jest to zgodne z zasadą równoważności temperaturowo-czasowej odnoszącą się do tworzyw polimerowych i wyjaśniającą udarowy charakter inicjacji pęknięcia RCP. Powolny wzrost pęknięcia kończy się etapem, w którym prędkość pęknięcia bardzo szybko rośnie — w wyniku czego dochodzi do zniszczenia rurociągu (pęknięcia przechodzącego na wskroś).

W wypadku rurociągów przemysłowych, służących do przesyłania różnych płynów technologicznych i wody o podwyższonej temperaturze ($T > 20$ °C), istotne znaczenie dla eksploatacji ma proces pełzania tworzywa oraz jego degradacja w wyniku starzenia. Autorzy pracy przeanalizowali wpływ pełzania na pęknięcie rur z PE-HD. Pełzanie polietylenu powoduje spadek wartości modułu Younga (E), a w następstwie zmniejsza odporność na pęknięcie (K_{Ic}). W temperaturze wyższej niż 20 °C wraz z upływem czasu następuje duże zmniejszenie wartości E polietylenu, co świadczy o pełzaniu tworzywa w tych warunkach [8, 9]. Wydłużenie czasu eksploatacji rurociągów polietylenowych w podwyższonej temperaturze zwiększa ich podatność na pęknięcie, które, jak już wspomniano, może przebiegać szybko (RCP) po obniżeniu temperatury do wartości bliskiej 0 °C, albo powolnie w nieco wyższej temperaturze. Podatność ta jest tym większa, im w wyższej temperaturze były one uprzednio eksploatowane, przy czym oba procesy — starzenia i pełzania — mają istotny wpływ na zwiększenie skłonności do inicjacji pęknięcia i jego rozwoju [7]. Szczelina powstała w złączu rurociągu pracującego w podwyższonej temperaturze zwiększa zatem możliwość zainicjowania i rozwoju pęknięcia.

Prezentowana praca ma charakter analizy teoretycznej zmierzającej do określenia krytycznej — ze względu na inicjację pęknięcia, którego rozwój zagraża zniszczeniem rurociągu — wielkości szczeliny. Przedstawiono też wyniki badań pomocniczych polietylenu dużej gęstości PE-HD (firmy „Borealis”), sto-

sowanego do produkcji rur. Na podstawie uzyskanych danych wyznaczono podstawowe właściwości mechaniczne rury polietylenowej i jej złącza zgrzewanego doczołowo. Przedstawiono również wyniki oceny wytrzymałości rur bez wad na ciśnienie wewnętrzne, traktowanej jako wstępna weryfikacja trwałości rur ze względu na ich pęknięcie.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

W badaniach wykorzystano rury SDR11 i SDR17,6, o średnicy zewnętrznej $d_n = 110$ mm, wykonane z polietylenu dużej gęstości PE-HD. Próbkę w kształcie wiosełek pobrano zgodnie z normą PN-EN ISO 6259-1:2003, wzdłuż osi rury z materiału rodzimego i z miejsca złącza zgrzewanego doczołowo (złącze znajdowało się w środku próbki). Do każdej serii badań wykorzystano po 10 próbek.

Metody badań

— Wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności, moduł Younga i odkształcenie przy zerwaniu materiału rodzimego rury i zgrzeiny wyznaczano za pomocą maszyny wytrzymałościowej firmy Hegewald & Peshke. Próbkę rozciągano z prędkością 50 mm/min aż do chwili zerwania. W celu wyeliminowania poślizgu między szczękami a próbką zastosowano obciążenie wstępne 80 N. Oznaczona wartość modułu Younga PE-HD mieściła się w przedziale wartości podanych przez producenta rur. Odporność na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia określano w próbie zginania zgodnie z ASTM D5045-93 i według [10, 11].

— Wytrzymałość rur na ciśnienie wewnętrzne określano zgodnie z normami PN-EN ISO 1167-1:2006, PN-EN ISO 1167-2:2006 i PN-EN ISO 1167-4:2006. Wyznaczano wytrzymałość na ciśnienie wewnętrzne, obliczano naprężenia niszczące, scharakteryzowano rodzaj pęknięcia badanej próbki. Oczyszczone próbki kondycjonowano w temp. 20 °C, w ciągu 3 h \pm 15 min, zależnie od grubości ścianki rury. Badanie przeprowadzono przy użyciu wanny firmy Cincinnati w stałej temp. 20 \pm 1 °C. Na końcówki rury SDR11 o długości 1000 mm, zawierającej doczołowo zgrzewane złącze, zakładano sztywno przymocowane do rury uchwyty zamykające, które przenosiły na próbkę obciążenie osiowe wywołane ciśnieniem wewnętrznym. Po usunięciu powietrza stopniowo i równomiernie napełniano rurę wodą o coraz większym ciśnieniu hydrostatycznym, podnoszonym do wartości 1 MPa, a następnie utrzymywano je na tym poziomie przez ok. 5 min. Zwiększano ciśnienie wody napełniającej się o kolejny 1 MPa i utrzymywano je przez następne 5 min. Tak postępowano aż do rozerwania rury. Po zakończonym doświadczeniu rury poddano oględzinom w celu określenia rodzaju pęknięcia.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Właściwości mechaniczne polietylenu i jego złącza zgrzewanego doczołowo

Badania próbek zawierających zgrzeinę wykazały, że wytrzymałość na rozciąganie przy zerwaniu była większa o 5,6 %, natomiast wydłużenie było większe aż o 18,6 % w porównaniu z wartościami odpowiadającymi próbkom materiału rodzimego. Zjawisko to może być spowodowane różnicą stopnia krystaliczności tworzywa w strefie złącza doczołowego. Granica plastyczności próbek zawierających zgrzeinę jest o ok. 2,3 MPa większa niż próbek materiału rodzimego (21 MPa). Odporność na pękanie próbki ze zgrzeiną była natomiast mniejsza ($1,92 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) niż próbki materiału rodzimego ($2,39 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Moduł Younga materiału zgrzewanego zmniejszył się o ok. 13 MPa w porównaniu z modułem materiału rodzimego, wynoszącym 615 MPa.

Wytrzymałość rur na ciśnienie wewnętrzne

Badane próbki pod wpływem ciśnienia wewnętrznego pękały plastycznie wzdłuż osi rury, poza miejscem złącza zgrzewanego. Wartość ciśnienia wewnętrznego powodującego pękanie rury wynosiła $p = 4,5\text{--}4,9 \text{ MPa}$, a odpowiadające mu naprężenie obwodowe $\sigma_o = 22,3\text{--}23,6 \text{ MPa}$. Należy sądzić, że przyczyną pękania wzdłużnego badanych rur było naprężenie obwodowe – znacznie większe od naprężeń wzdłużnego i promieniowego, istniejących w grubościenniej ściance rury, oraz od naprężenia zredukowanego obliczonego wg hipotezy Hubera.

Wartości naprężenia obwodowego ρ_o wyznaczono z zależności Kessela [4]:

$$\sigma_o = \frac{p}{2} \left(\frac{d_n}{e} - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie: p – ciśnienie (MPa), d_n – średnica zewnętrzna rury (mm), e – zmierzona minimalna grubość ścianki swobodnego odcinka próbki (mm).

Po podstawieniu za $d_n/e = \text{SDR}$ (*Standard Dimension Ratio*) zależność (1) przyjęła postać:

$$\sigma_o = \frac{p}{2} (\text{SDR} - 1) \quad (2)$$

Obliczeniowe naprężenie projektowe (σ) dla polietylenu określonej klasy jest wyznaczane na podstawie minimalnej żądanej wytrzymałości MRS (*Minimum Required Strength*). Naprężenie to przy określonej wartości MRS i współczynnika bezpieczeństwa C jest wyrażone zależnością:

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

Podstawiając dla PE100 wartości: MRS = 10 i C = 1,25 otrzymamy $\sigma = 8 \text{ MPa}$.

Z wykresu zamieszczonego w [9] można odczytać, że wartość σ w temp. 20 °C, na początkowym etapie badania wytrzymałości długotrwałej, jest równa 12,5 MPa.

Obecnie można jedynie przewidywać długotrwałą wytrzymałość rurociągów z polietylenu, ponieważ są one budowane dopiero od 25 lat i brakuje danych dotyczących ich eksploatacji.

ANALIZA PROCESU PĘKANIA ZGRZEWANYCH ZŁĄCZY RUR

Podstawy teoretyczne analizy pękania złącza rury ze szczeliną

Zainicjowanie w okresie przygotowawczym (inkubacyjnym) pęknięcia w materiałach lepkosprężystych, opisane w pracach [12, 13], wiąże się z odpowiednią szybkością odkształceń na czole szczeliny, wynikającą z zasady równoważności temperaturowo-czasowej. Określa się wielkość rozwarcia szczeliny w funkcji pełzania takiego materiału przy rozciąganiu [7, 13]. Pozwala to na wyznaczenie okresu przygotowawczego do zainicjowania pęknięcia. Po zainicjowaniu pęknięcia następuje jego rozwój prowadzący do zniszczenia rurociągu. Analizę możliwości zainicjowania propagacji pęknięcia, w złączu rury wykonanej z PE-HD, zawierającej szczelinę o wymiarze charakterystycznym a , oparto na europejskiej procedurze obliczeniowej *Fitness for Service Network* (FITNET) i wykresie zniszczenia *Failure Assessment Diagram* (FAD) [14], opisanych w [6]. Na wykresach FAD krzywą graniczną zniszczenia oraz współczynnik intensywności naprężenia na czole szczeliny przedstawiono jako wartości bezwymiarowe, odniesione do odporności materiału na pękanie. Krzywa graniczna $K_r = f(L_r)$ na wykresie FAD, przy naprężeniu referencyjnym σ_{ref} na poziomie obciążenia $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_y$, obowiązująca do $L_r = L_r^{maks.}$, ogranicza bezpieczny obszar punktu (elementu ze szczeliną) o współrzędnych: $K_r = K_a/K_{Ic}$, L_r [14]. Zastosowano zerowy poziom analizy, wymagający znajomości granicy plastyczności σ_y i modułu Younga E dla poziomu obciążenia $L_r \leq 1$ ($L_r^{maks.} = 1$). Na podstawie tych danych określono krzywą graniczną $K_r = f(L_r)$ [14]. Współczynnik intensywności naprężenia K_a , zależny od charakterystycznego wymiaru szczeliny a , określono na podstawie naprężenia σ na czole szczeliny. Wymiar szczeliny osiąga wartość krytyczną $a = a_c$ ze względu na możliwość inicjacji pęknięcia dla danego poziomu obciążenia L_r , gdy jest spełniony warunek:

$$K_a / K_{Ic} = K_r(L_r) \quad (4)$$

Krytyczny wymiar szczeliny a_{c0} obliczano przy założeniu normalnych warunków pracy rurociągu, tj. temperatury znacznie niższej niż 20 °C (temperatura gruntu, od kilku do kilkunastu stopni Celsjusza). Krytyczne wymiary szczeliny $a_{c(t)}$ obliczono także w odniesieniu do rurociągów do przesyłania mediów przemysłowych z uwzględnieniem, występującego w temperaturze eksploatacji rurociągu $T = 23 \text{ °C}$, zjawiska pełzania polietylenu.

W celu zapewnienia lepszej czytelności wyników obliczeń krzywą graniczną $K_r = f(L_r)$ oraz krzywe zniszcze-

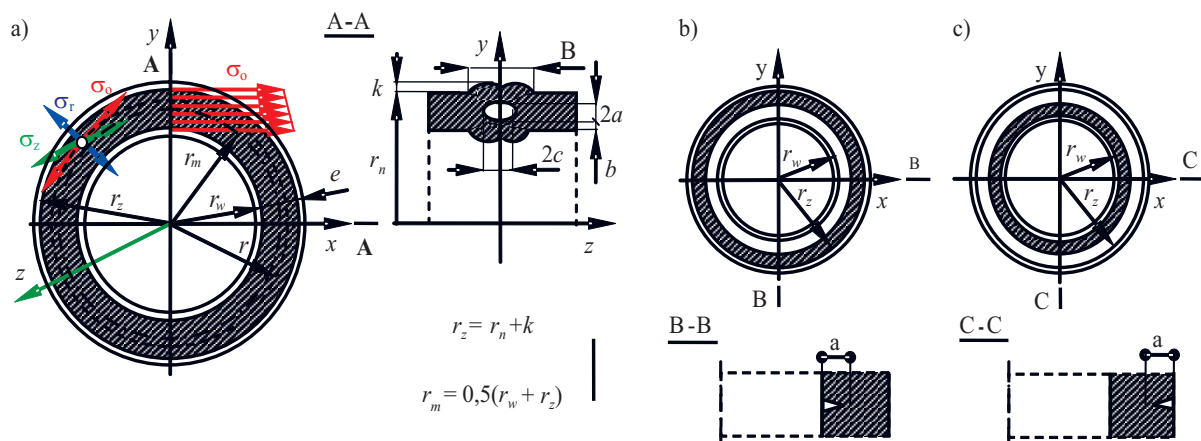
nia $K_r = K_a/K_{Ic}$ przedstawiono na wykresach FAD w funkcji wymiaru szczeliny a , od którego krzywe te, bezpośrednio lub pośrednio, są zależne [np. $K_r = f(L_r)$ jest zależna od a , bo $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_y$ gdzie $\sigma_{ref} = f(a)$]. Na wykresach obszar bezpieczeństwa nie jest ograniczony krzywą graniczną odpowiadającą maksymalnemu poziomowi obciążenia $L_r^{maks.} = 1$, ponieważ dla rozpatrywanych obciążeń i wymiarów szczelin wartości L_r były znacznie mniejsze ($L_r \ll L_r^{maks.}$).

Charakterystyka szczeliny, materiału i warunków pracy złącza rury

Przeanalizowano wpływ wymiaru a powierzchniowej szczeliny obwodowej na zewnętrznej lub wewnętrznej powierzchni zgrzeiny oraz szczeliny wewnętrznej, tj. wzdłużnej szczeliny eliptycznej, w doczołowym złączu zgrzewanym na możliwość zainicjowania w nim procesu pęknięcia (rys. 1). Założono, że powstające szczeliny mają wymiar w zakresie $a = 0 - e/2$.

nej grubości ścianki: $e = 6,25$ mm (SDR17,6) oraz $e = 10$ mm (SDR11).

Nominalne naprężenie obwodowe (styczne) (σ_θ) i naprężenie wzdłużne (σ_z) (rys. 1a) w zgrzeinie obliczono dla nominalnego poziomu ciśnienia paliwa gazowego $p = 0,5$ MPa w rurze o SDR11 a także nominalnego ciśnienia wody $p = 1,0$ MPa w rurze SDR17,6 oraz $p = 1,25$ MPa w rurze SDR11 [3, 4, 15]. Do wyznaczenia naprężeń σ_θ i σ_z przyjęto skrajne wymiary złącza (mieszczące się jednak w warunkach jego odbioru [4]), tj. łączną szerokość wałeczków złącza $B = e$ i odległość dna rowka między wałeczkami od powierzchni rury k ($k > 0$) jako minimum $k = 0,25$ mm. Normy odbioru nie określają wysokości wałeczków złącza, ale zwykle w zgrzeinie rur o średnicy $d_n = 110$ mm wynosi ona ok. 2,5 mm w rurze SDR17,6 i ok. 4 mm w rurze SDR11. Podczas wyznaczania naprężenia obwodowego i wzdłużnego w złączu, uwzględniono zmianę wartości tych naprężeń, wynikającą z większego niż w rurze pola przekroju złącza. Do obliczeń przyjęto pole poprzecznego przekroju złącza w płaszczyźnie row-



Rys. 1. Przekrój złącza rur zgrzewanych doczołowo: a) ze szczeliną wewnętrzną eliptyczną wzdłużną, b) szczeliną poprzeczną obwodową wewnętrzną i c) szczeliną poprzeczną obwodową zewnętrzną

Fig. 1. Cross-section of butt-welded pipe joint: a) with longitudinal elliptical internal fissure and b) with transverse circular fissure on the internal and c) external joint surface

Szczelina poprzeczna (obwodowa) w zgrzeinie na ogół nie stanowi tak dużego zagrożenia (pęknięcia rurociągu), jak szczelina wzdłużna, ponieważ wartość naprężenia wzdłużnego, decydującego o inicjacji i rozwoju pęknięcia poprzecznego ze szczeliny obwodowej, jest o 50 % mniejsza niż wartość naprężenia obwodowego. Jeżeli jednak powstanie tylko szczelina obwodowa (zwłaszcza na wewnętrznej powierzchni złącza rury) i osiągnie głębokość krytyczną to – w warunkach uprzednio przebiegającego pełzania polietylenu w podwyższonej temperaturze – może w takim samym stopniu jak szczelina wzdłużna prowadzić do pęknięcia rurociągu.

W toku analizy pęknięcia złącza rur polietylenowych obliczono krytyczną głębokość a_c szczeliny występującej w złączu doczołowym [6]. Obliczenia wykonano w odniesieniu do złącza rur o średnicy $d_n = 110$ mm i minimal-

ka o średnicy zewnętrznej $d_z = d_n + 2k$. Pominięto niewielkie zakłócenia rozkładu naprężeń w zgrzeinie jako karbie geometrycznym ze względu na niewielką szerokość wałeczków zgrzeiny ($e/2$) [4, 5, 9].

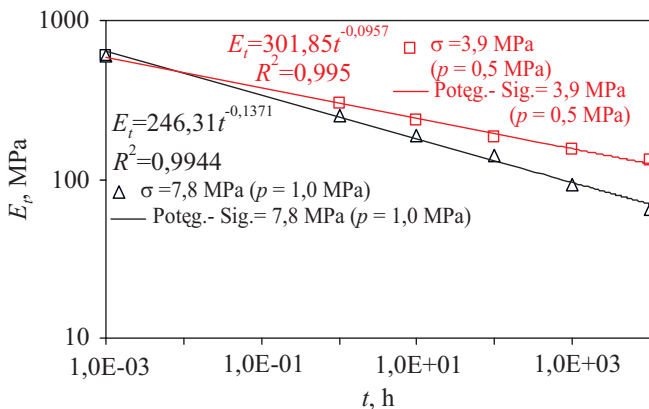
Naprężenie obwodowe σ_θ w przekroju rury, istotne dla pęknięć wzdłużnych, zazwyczaj określa się ze wzoru Kessela (1), natomiast ze względu na konieczność wyznaczenia naprężeń w złączu na czole szczeliny, do obliczeń zastosowano wzór Lamego dla rur grubościennych [16], określający wartość naprężenia σ_θ w funkcji grubości ścianki rury (złącza, por. rys. 1a). Wartość tego naprężenia rośnie (w przybliżeniu liniowo) wraz ze zbliżaniem się do wewnętrznej powierzchni ścianki rury (złącza). Pęknięcie złącza ze szczeliną poprzeczną (rys. 1b i 1c) w istotnym stopniu zależy od naprężenia prostopadłego do jej powierzchni, tj. naprężenia wzdłużnego σ_z (rys. 1a).

Naprężenie wzdłużne ma stałą wartość w przekroju ścianki rury, w odniesieniu do przyjętych wymiarów rury i ciśnienia wewnętrznego.

W podwyższonej temperaturze początkowa wartość odporności na pęknięcie polietylenu (K_{lc}) zmniejsza się pod wpływem działania obciążenia, do wartości K_{ct} po czasie t , na skutek pełzania. Wiąże się to ze spadkiem modułu Younga po czasie t do wartości E_t . Odporność na pęknięcie K_{ct} po czasie t wyznaczono przy założeniu, że w tworzywach polimerowych strefa plastyczna przed czołem szczeliny na etapie jej powolnego wzrostu ma stałą szerokość [7, 17, 18]. Z tego wynika stała wartość rozwarcia czoła szczeliny (pęknięcia) $\delta = \text{const}$. Do obliczeń K_{ct} przyjęto model Dugdale'a strefy plastycznej o kształcie klinowym, powstającej przed czołem szczeliny [7].

$$\delta = \frac{K_{lc}}{E\sigma_y} = \frac{K_{ct}}{E_t\sigma_y} = \text{const} \quad \text{skąd} \quad K_{ct} = K_{lc} \frac{E_t}{E} \quad (5)$$

Wartości modułu E_t w temp. 23 °C określono na podstawie wykresów pełzania $E = f(t, \sigma)$ polietylenu PE-HD, w miejscu czoła szczeliny dla naprężenia nominalnego σ w przekroju złącza rury bez szczeliny [8, 9].



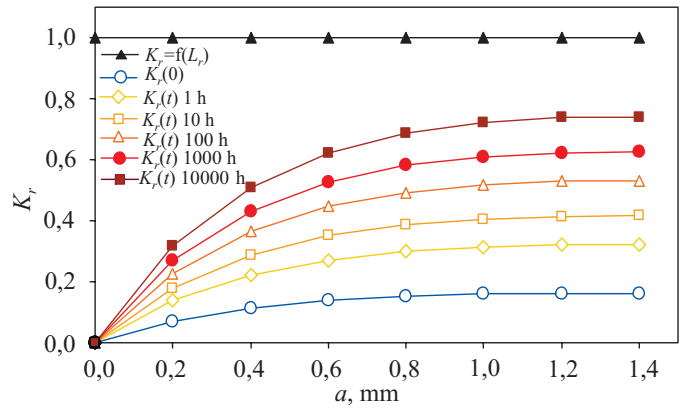
Rys. 2. Zmiana modułu Younga polietylenu podczas pełzania w temp. 23 °C

Fig. 2. Change of Young's modulus of polyethylene due to creep at 23 °C

Zmianę modułu Younga (E_t) polietylenu PE-HD, w temp. 23 °C, na skutek pełzania w warunkach ciśnienia roboczego $p = 1,0$ MPa i $p = 0,5$ MPa przedstawia przykładowy rys. 2.

Analiza wyników pęknięcia złącza rur ze szczeliną

Analiza możliwości pęknięcia złącza ze szczeliną wewnętrzną eliptyczną położoną wzdłuż osi rury wykazała, że taka szczelina nie stanowi zagrożenia zainicjowaniem pęknięcia rury SDR11 w warunkach ciśnienia $p = 0,5$ MPa (rys. 3), zarówno podczas eksploatacji rurociągu w niskiej temperaturze [krzywa $K_{r(0)}$], jak i po uprzednim pełzaniu tworzywa w temp. 23 °C (krzywe $K_{r,t}$). Dotyczy



Rys. 3. Krzywe zniszczenia złącza rury SDR11 ze szczeliną eliptyczną; $p = 0,5$ MPa, $k = 0,25$ mm, $b = 0,1$ mm, $c = 3$ mm

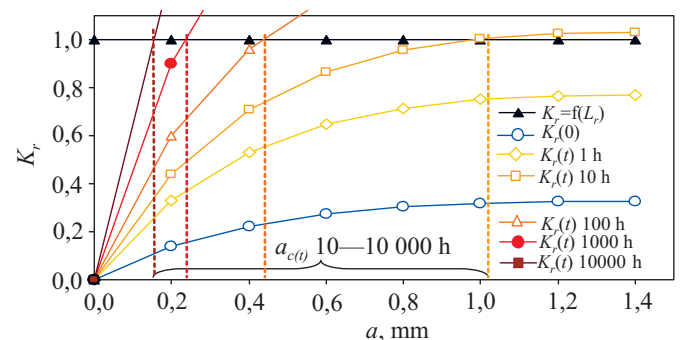
Fig. 3. Failure curves of pipe joint SDR11 with elliptical fissure; $p = 0,5$ MPa, $k = 0,25$ mm, $b = 0,1$ mm, $c = 3$ mm

to nawet dużej szczeliny o długości $2c \approx B$, przy założeniu niekorzystnych wartości pozostałych wymiarów: niewielkiej odległości $b = 0,1$ mm czoła szczeliny od powierzchni wewnętrznej złącza oraz małej — dna rowka od powierzchni rury $k = 0,25$ mm (rys. 3).

Natomiast w warunkach wyższego ciśnienia ($p = 1,0$ MPa) zagrożenie zainicjowaniem propagacji pęknięcia występuje w złączu ze szczeliną eliptyczną, po uprzednim pełzaniu tworzywa w temp. 23 °C, już po czasie $t = 10$ h (rys. 4). Wymiar krytyczny a_c szczeliny wynosi wówczas nieco ponad 1 mm. Po dłuższym okresie pełzania tworzywa wartości krytyczne a_c takiej szczeliny są jeszcze mniejsze: dla $t = 100$ h $a_c = 0,44$ mm, dla $t = 1000$ h $a_c = 0,24$ mm, a dla $t = 10\,000$ h $a_c = 0,16$ mm.

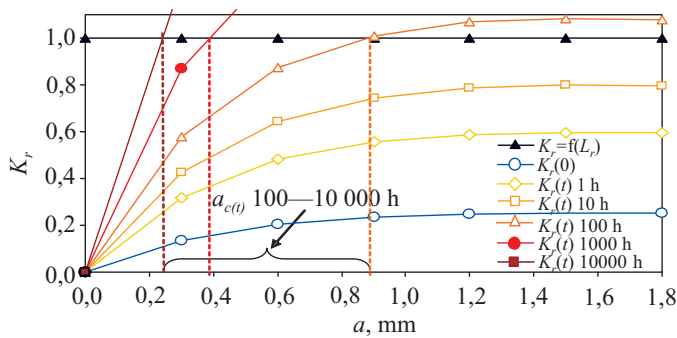
Podobne zagrożenie zainicjowaniem i rozwojem pęknięcia występuje także w przypadku złącza rur SDR11 ze szczeliną eliptyczną w warunkach nominalnego ciśnienia roboczego $p = 1,25$ MPa (rys. 5).

Wartość krytyczna a_c , odpowiadająca zainicjowaniu i rozwojowi pęknięcia, zależy od odległości k złącza i położenia czoła szczeliny względem powierzchni złącza b oraz od długości $2c$ samej szczeliny. Wartości wymiaru



Rys. 4. Krzywe zniszczenia złącza rury SDR17,6 ze szczeliną eliptyczną; $p = 1$ MPa, $k = 0,25$ mm, $b = 0,1$ mm, $c = 3$ mm

Fig. 4. Failure curves of pipe joint SDR17,6 with elliptical fissure; $p = 1$ MPa, $k = 0,25$ mm, $b = 0,1$ mm, $c = 3$ mm



Rys. 5. Krzywe zniszczenia złącza rury SDR11 ze szczeliną eliptyczną; $p = 1,25$ MPa, $k = 0,25$ mm, $b = 0,1$ mm, $c = 3$ mm

Fig. 5. Failure curves of pipe joint SDR11 with elliptical fissure; $p = 1.25$ MPa, $k = 0.25$ mm, $b = 0.1$ mm, $c = 3$ mm

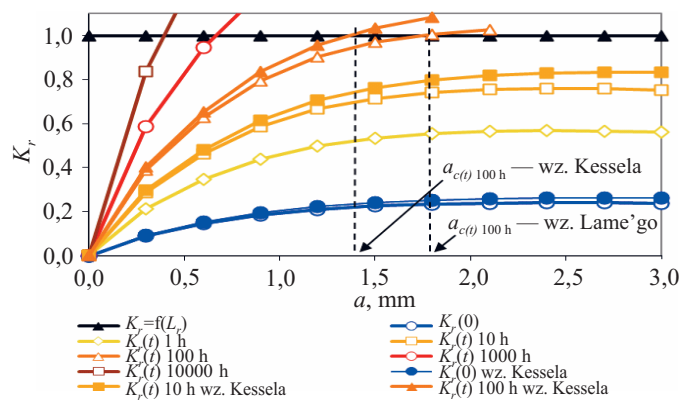
krytycznego a_c w odniesieniu do złącza tej rury z wzdłużną szczeliną eliptyczną przedstawiono w tabeli 1. Na podstawie danych można stwierdzić, że zwiększenie wymiaru c szczeliny powoduje zmniejszenie jej wymiaru krytycznego a_c (np. wzrost wymiaru c z 3,5 do 5,0 mm powoduje zmianę wymiaru a_c o 0,18 mm, tj. o ok. 20 %). Wzrost parametru b z 0,10 do 0,25 mm skutkuje natomiast znacznym zwiększeniem wymiaru krytycznego a_c o ok. 127 %. Podobnie zwiększenie parametru k z 0,25 mm do 2,00 mm wpływa na przyrost wartości a_c o ok. 90 %. Większe wartości parametrów b i k zmniejszają więc zagrożenie inicjacją pęknięcia w złączu, większe wartości natomiast wymiaru c — zwiększają to zagrożenie.

T a b e l a 1. Krytyczny wymiar szczeliny eliptycznej w złączu rury SDR11, $p = 1,25$ MPa

T a b l e 1. The critical size of elliptical fissure in pipe joint SDR11 at $p = 1.25$ MPa

$k = 0,25$ mm; $b = 0,1$ mm; $t = 100$ h				
c , mm	3,50	4,00	4,50	5,00
a_c , mm	0,88	0,80	0,73	0,70
$c = 3,5$ mm; $k = 0,25$ mm; $t = 100$ h				
b , mm	0,10	0,15	0,20	0,25
a_c , mm	0,88	1,15	1,44	2,00
$c = 3,5$ mm; $b = 0,1$ mm; $t = 1000$ h				
k , mm	0,25	0,50	1,00	2,00
a_c , mm	0,38	0,42	0,50	0,72

Zastosowanie wzoru Lamego do wyznaczenia naprężeń obwodowych pozwoliło na dokładniejsze określenie wymiaru krytycznego wzdłużnej szczeliny eliptycznej w złączach rur polietylenowych. Wzór Kessela nie uwzględnia bowiem zmiany naprężenia na grubości ścianki złącza rury. Widać to na rys. 6, na którym w wypadku rur SDR11 ze szczeliną eliptyczną $c = 5$ mm, po pełzaniu w czasie $t = 100$ h, wymiar a_c jest równy ok. 1,35 mm zgodnie ze wzorem Kessela [przecięcie krzywych: $K_{rt} 100$ h wz. Kessela i $K_{r(Lr)}$] natomiast wg wzoru Lamego wymiar $a_c \approx 1,77$ mm [przecięcie krzywych: $K_{rt} 100$ h i $K_{r(Lr)}$].



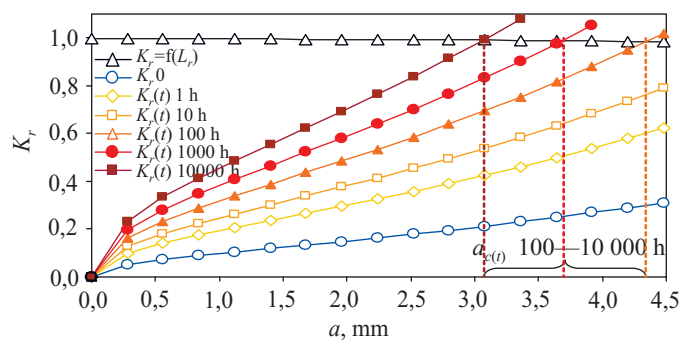
Rys. 6. Krzywe zniszczenia złącza rury SDR11 ze szczeliną eliptyczną (naprężenie obwodowe określone według wzorów Lamego — krzywe nieoznaczone i Kessela); $p = 1,25$ MPa, $k = 1,5$ mm, $b = 0,25$ mm, $c = 5$ mm

Fig. 6. Failure curves of pipe joint SDR11 with elliptical fissure (the circumferential stress determined from Lamé's — unmarked curves and Kessel's equations); $p = 1.25$ MPa, $k = 1.5$ mm, $b = 0.25$ mm, $c = 5$ mm

Analiza pęknięcia szczeliny obwodowej o założonej głębokości $a \leq e/2$ na wewnętrznej powierzchni złącza rur SDR17,6 pod ciśnieniem $p = 1$ MPa wykazała, że w normalnych warunkach eksploatacji szczelina ta nie zagraża zainicjowaniem pęknięcia lub może wystąpić tylko po wcześniejszym pełzaniu tworzywa w czasie ≥ 100 h (rys. 7).

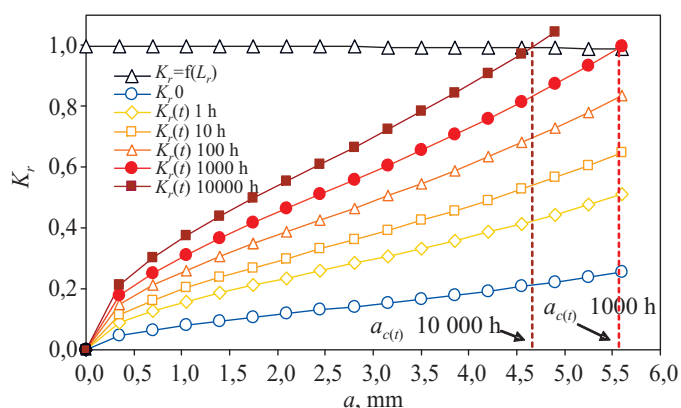
Wraz ze skróceniem czasu pełzania t tworzywa w podwyższonej temperaturze, rośnie wartość krytyczna (głębokość szczeliny) a_c i wynosi ok. 3,1 mm w przypadku szczeliny obwodowej na wewnętrznej powierzchni złącza rur SDR17,6, w warunkach $p = 1$ MPa i $k = 1$ mm, po czasie pełzania $t = 100$ h w temp. 23 °C (rys. 7).

Zagrożenie inicjacją pęknięcia złącza ze szczeliną obwodową na zewnętrznej powierzchni także występuje tylko w przypadku wcześniejszego pełzania tworzywa i jest nieco mniejsze niż zagrożenie inicjacją pęknięcia



Rys. 7. Krzywe zniszczenia złącza rury SDR17,6 ze szczeliną obwodową na wewnętrznej powierzchni złącza; $p = 1$ MPa, $k = 1$ mm

Fig. 7. Failure curves of pipe joint SDR17,6 with circular transverse surface fissure on the internal joint surface; $p = 1$ MPa, $k = 1$ mm



Rys. 8. Krzywe zniszczenia złącza rury SDR11 ze szczeliną obwodową na wewnętrznej powierzchni złącza; $p = 1,25$ MPa, $k = 0,25$ mm

Fig. 8. Failure curves of pipe joint SDR11 with circular transverse surface fissure on the internal joint surface; $p = 1.25$ MPa, $k = 0.25$ mm

złącza ze szczeliną obwodową na powierzchni wewnętrznej. Świadczą o tym nieco większe wartości krytycznej głębokości szczelin obwodowych zewnętrznych.

Zagrożenie pękaniem złącza rur SDR11 ze szczeliną obwodową jest jeszcze mniejsze niż złącza rur SDR17,6 z analogiczną szczeliną. Wymiar krytyczny a_c szczeliny obwodowej na wewnętrznej powierzchni złącza rur SDR11, przy $k = 0,25$ mm osiąga wartość ok. 5,6 mm (rys. 8) dopiero po pełzaniu trwającym 1000 h. W przypadku złącza rur SDR11 ze szczeliną obwodową zewnętrzną zagrożenie pękaniem pojawia się po jeszcze dłuższym czasie pełzania.

PODSUMOWANIE

Próbki rur badane pod względem wytrzymałości na ciśnienie wewnętrzne pękały plastycznie wzdłuż osi rury, a pęknięcie występowało poza miejscem złącza zgrzewanego.

Na podstawie analizy obliczonego krytycznego wymiaru szczeliny stwierdzono, że zagrożenie inicjacją pęknięcia w złączu rur SDR17,6 zgrzewanych doczołowo, ze szczeliną eliptyczną wewnętrzną w warunkach ciśnienia $p = 1$ MPa, występuje po pełzaniu tworzywa w temp. 23 °C w ciągu $t = 10$ h. Wymiar krytyczny a_c szczeliny wynosi wówczas zaledwie ok. 1 mm, a po dłuższym okresie pełzania wartości a_c są jeszcze mniejsze. Równie duże zagrożenie występuje w odniesieniu do złącza rur SDR11 ze szczeliną eliptyczną wewnętrzną, pod nominalnym ciśnieniem wewnętrznym $p = 1,25$ MPa i po pełzaniu w temp. 23 °C przez 100 h. Wymiar krytyczny szczeliny wynosi w tym wypadku tylko 0,9 mm.

Wartość wymiaru a_c eliptycznej szczeliny wewnętrznej, przy której może nastąpić propagacja pęknięcia w złączu rur, zależy także od odległości rowka złącza od powierzchni rury (k) i położenia czoła szczeliny eliptycznej względem powierzchni złącza (b). Wraz ze zwiększaniem

parametrów k i b wartość krytyczna szczeliny eliptycznej a_c rośnie, co oznacza mniejsze zagrożenie zainicjowania pęknięcia złącza. Natomiast wzrost długości $2c$ szczeliny eliptycznej zwiększa to zagrożenie (wartość a_c maleje).

Ze względu na możliwość pęknięcia złącza polietylenowych mających wadę w postaci wewnętrznej eliptycznej szczeliny wzdłużnej, a nawet szczeliny obwodowej (zwłaszcza na wewnętrznej powierzchni złącza), pracujących uprzednio w podwyższonej temperaturze, doczołowo zgrzewane złącza należałoby poddawać kontroli nieniszczącej, np. metodą ultradźwiękową, w celu wykrycia i oceny wielkości szczeliny.

LITERATURA

- [1] Katalog — Systemy ciśnieniowe PE-HD i PVC-U, Kartoszyno 2012, s. 4–11 i 22–32. www.pipelife.pl
- [2] Sikora R.: „Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych”, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- [3] „Instrukcja montażu — układanie rurociągów z polietylenem (PE) w gruncie”, Wyd. Spyra Primo Poland Sp. z o.o., Mikołów 2008.
- [4] Pusz A.: „Gazociągi z tworzyw sztucznych”, Monografie, seria gazownictwo nr 2, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [5] „Specyfikacja techniczna projektowania, budowy i odbioru sieci gazowej wyd. 3.”, DSG — Wrocław, Zakład Gazowniczy, Wałbrzych 2005.
- [6] Baranowski W., Werner K.: *Polimery* 2013, 58, 51. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2013.051>
- [7] Wilczyński A.: „Mechanika polimerów w praktyce konstrukcyjnej”, WNT, Warszawa 1984, s. 245–249.
- [8] Frącz W., Krywul B.: „Projektowanie i wytwarzanie elementów z tworzyw sztucznych”, Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
- [9] Katalog informacyjny SIMONA tech. Info: “Engineering Manual for Piping System”, 2010.
- [10] “Handbook of Polymer Testing. Physical Methods” (red. Brown R.), Marcel Dekker, Inc., New York — Basel 1999.
- [11] “Polymer Testing” (red. Grellmann W., Seidler S.), Publ. Carl Hanser Verlag, München 2007.
- [12] Graham G.A.C.: *Acta. Mech.* 1969, 8 (3/4), 188.
- [13] Kamiński A.A.: “Mechanika rozruśnienia wjasno-uprugich tel. Kiev”, Naukova Dumka, 1980.
- [14] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J.: „Ocena wytrzymałości trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty”, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008, s. 38–94 i 319–357.
- [15] „Sieci gazowe z PE”, Informator techniczny, Wyd. Elplast, Jastrzębie Zdrój 2005.
- [16] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: „Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe”, wyd. 9, WNT, Warszawa 2007, s. 171–172.
- [17] Bessonov M.I., Kuvšinskij E.V.: *Fiz. Tverd. Tel.* 1961, 3 (2), 607.
- [18] Burdekin F.M., Stone D.E.W.: *J. Strain Anal.* 1966, 1 (2), 145.

Otrzymano 13 IX 2013 r.