

WŁODZIMIERZ BARANOWSKI<sup>1),\*</sup>, KRZYSZTOF WERNER<sup>2),\*</sup>

## Analiza rozwoju pęknięć i lokalnego odkształcania rur z polietylenu

**Streszczenie** — Analizowano wpływ powierzchniowych i wewnętrznych wad wzdłużnych (szczelin) w rurach z polietylenu PE-HD, stosowanych do budowy rurociągów, na możliwość szybkiej propagacji pęknięć (*Rapid Crack Propagation* — RCP) oraz na wzrost lokalnego odkształcania na czole szczeliny. Dla założonych wymiarów szczelin obliczono współczynnik intensywności naprężenia, który porównano z jego wartością krytyczną dla materiału rury — zmieniającą się w wyniku pełzania. Na tej podstawie określano krytyczne wymiary szczelin ze względu na pękanie. Wyznaczano też wielkość spiętrzenia naprężenia rozciągającego na czole wady oraz wzrost lokalnego odkształcania jako wyniku pełzania.

**Słowa kluczowe:** polimery, rury, naprężenia, pełzanie, pękanie.

### ANALYSIS OF CRACK PROPAGATION AND LOCAL STRAIN OF POLYETHYLENE PIPES

The influence of surface and inner longitudinal defects (rifts) in the pipes made from polyethylene, used in the construction of gas and water pipelines, on the possibility of rapid crack propagation (RCP) as well as on the increase of local strain at the front of the rift was analyzed. The value of stress intensity factor was calculated for the assumed rift dimensions and compared to its critical value for the material of pipe — changing as a result of the creep. On this basis the critical dimensions of rifts in regard to cracking were determined. Also, the value of tensile stress concentration at the front of the rift was determined as well as the increase in local strain as a result of material creep.

**Keywords:** polymers, pipes, stresses, creep, cracking.

### WPROWADZENIE

Podczas technologicznego procesu wytłaczania rur z polietylenu, w wyrobie mogą powstawać różnego rodzaju wady — nieciągłości materiału, np. szczeliny wzdłużne [1, 2]. Szczeliny w ściance rury mogą być wynikiem, m.in. niewłaściwego doboru parametrów technologicznych, stanu technicznego linii wytłaczarskiej bądź niedostatecznego wyszkolenia obsługi. W procesie wytłaczania rur, pomiar i automatyczna regulacja grubości ścianki rury za pomocą skanera ultradźwiękowego [3] umożliwia wykrycie wady rury, tj. szczeliny wewnętrzne w jej ściance oraz szczeliny powierzchniowe na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni rury. Szczeliny te mogą się charakteryzować bardzo małym, bliskim zeru, promieniem zaokrąglenia czoła (przyjmuje się, że promień ten jest mniejszy od 0,02 mm). Uszkodzenia rur będące skutkiem małej twardości polietylenu mogą

powstawać także podczas ich transportu, składowania i montażu [4]. Są to najczęściej szczeliny powierzchniowe wzdłużne (rysy), których czoło ma z reguły większy promień zaokrąglenia ( $r > 0,02$  mm). Mała twardość polietylenu niekorzystnie wpływa na jego odporność na zarysowania. Wraz ze zmniejszeniem twardości polietylenu obserwuje się wzrost jego plastyczności i podatności na zarysowania. Tworzywo staje się wprawdzie bardziej odporne na pękanie, równoczesne zwiększenie skłonności do zarysowania sprzyja jednak powstawaniu głębokich rys. Głębsze rysy powodują większe spiętrzenie naprężenia na czole szczeliny, co ostatecznie decyduje o spadku odporności materiału na pękanie.

Szczeliny, czyli karby, wpływają na spiętrzenie naprężenia wywołanego ciśnieniem przesyłanego medium. Spiętrzenie to wzrasta wraz ze zmniejszaniem się promienia zaokrąglenia czoła szczeliny. Znaczne spiętrzenie naprężenia jest wynikiem istnienia szczelin o bardzo małym promieniu zaokrąglenia czoła, powstających najczęściej w procesie wytłaczania rur. Taka szczelina może się przyczynić do szybkiej propagacji pęknięcia rury polimerowej (RCP), z prędkością równą prędkości dźwięku [5]. Na takie zjawisko są narażone zwłaszcza rury z polietylenu dużej gęstości (PE-HD) oraz o dużej grubości ścianki, użytkowane w niskiej temperaturze. Szybkie pękanie wystąpi wówczas, gdy współczynnik intensywności naprężenia na czole szczeliny osiągnie wartość kry-

<sup>1)</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Inżynierii Mechanicznych, Zakład Przetwórstwa Polimerów, Armii Krajowej 19c, 42-201 Częstochowa.

<sup>2)</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, Katedra Technologii i Procesów Budowlanych i Materiałów, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa.

<sup>\*</sup> Autorzy do korespondencji; e-mail: baranowski@ipp.pcz.pl, werner@ipp.pcz.pl

tyczną [5], która dla tworzywa lepkosprężystego, poddanego długotrwałemu działaniu obciążenia jest zmienna w czasie. Maleje bowiem wraz z upływem czasu działania obciążenia, w wyniku zmniejszania się wartości modułu sprężystości wzdłużnej tworzywa i, jednocześnie, wzrostu odkształcenia do którego dochodzi w procesie pełzania.

Według normy [6], ocenę odporności rur z PE na szybką propagację pęknięć uzyskuje się na podstawie badania wykonanego w skali rzeczywistej (FST), w temp. 0 °C, rury o długości 18 m z pęknięciem zainicjowanym z nacięcia na jednym końcu. Wadą tego badania jest trudność w realizowaniu oraz wysokie koszty. Częściej stosuje się prostsze badanie, S4, przeprowadzane w małej skali (*Small Scale Steady State*), według normy [7]. Ocena odporności materiału na szybką propagację pęknięć, określona stanem naprężeń w ścianie rury jest wymagana, gdy: maksymalne ciśnienie robocze przesyłanego medium przekracza 0,4 MPa lub, gdy średnica rury przekracza 250 mm lub, gdy temperatura pracy rury wynosi mniej niż 0 °C. Stan naprężeń w ścianie rury jest określony także przez wzajemny stosunek wymiarów rury, np. średnicy rury do grubości jej ścianki (SDR, *Standard Dimension Ratio*) oraz wymiaru szczeliny  $a$  do grubości ścianki rury  $e$  [14].

Spiętrzenie naprężenia na czole szczeliny (rysy) o dużym promieniu zaokrąglenia jest znacznie mniejsze, dzięki temu, na ogół nie następuje szybka propagacja pęknięcia rury. Wartość spiętrzonego naprężenia w okolicy czoła takiej szczeliny może być jednak duża — bliska granicy plastyczności, a nawet może ją przekraczać tworząc lokalną strefę dużego odkształcenia tworzywa w tym miejscu. W warunkach długotrwałego działania obciążenia, będzie wzrastać odkształcenie w tej strefie na skutek pełzania polietylenu. W konsekwencji może to doprowadzić do zainicjowania, a następnie powolnego rozwoju pęknięcia.

W strefie odkształcenia, przed czołem pęknięcia tworzywo ulega osłabieniu na skutek licznych jego uszkodzeń w miejscach mikrowad struktury [5]. Jest to taki etap powstawania pęknięcia, w którym wzrasta tylko rozwarcie szczeliny. Na następnym etapie uszkodzenia mogą się łączyć poprzez pęknięcie więzów w tworzywie polimerowym w obszarze osłabienia, powiększając w ten sposób rozmiar szczeliny. Wzrost szczeliny na tym etapie jest powolny, z prędkością narastającą monotonicznie i może występować w tworzywach polimerowych przy stałym obciążeniu. Zasięg strefy odkształcenia plastycznego przed czołem szczeliny nie ulega jednak zmianie, ponieważ pojawiają się w niej nowe mikrouszkodzenia materiału, powodujące wzrost wymiarów szczeliny. Na końcowym etapie rozwoju szczeliny, gdy jej długość osiąga wartość krytyczną, charakterystyczną dla danego tworzywa i sposobu obciążenia, prędkość pęknięcia bardzo szybko rośnie, osiągając wartość prędkości rozchodzenia się dźwięku.

W niniejszej pracy analizowano wpływ wad wzdłużnych, tj. szczelin powierzchniowych i wewnętrznych na

możliwość szybkiej propagacji pęknięć i stan lokalnego odkształcenia rur wykonanych z polietylenu dużej gęstości PE-HD.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

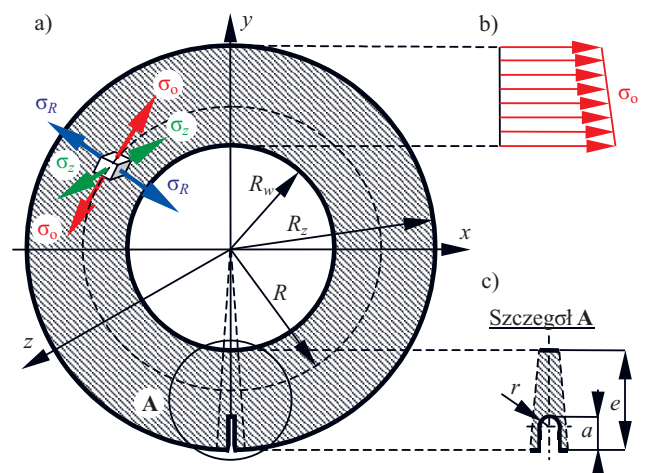
### Materiały

Materiał do badań stanowiły próbki rury z PE-HD (PE-HD 3494, firmy Borealis), stosowanego do budowy gazociągów i wodociągów. Granicę plastyczności tworzywa —  $\sigma_y = 21,0$  MPa — wyznaczono w próbie rozciągania próbek płaskich. Moduł sprężystości wzdłużnej oznaczony w próbie rozciągania próbek pobranych z rury, wynosi  $E = 600$  MPa (według danych producenta). Wartość ta mieści się w przedziale  $E = 550–1100$  MPa, charakterystycznym dla PE-HD.

### Próbki do badań

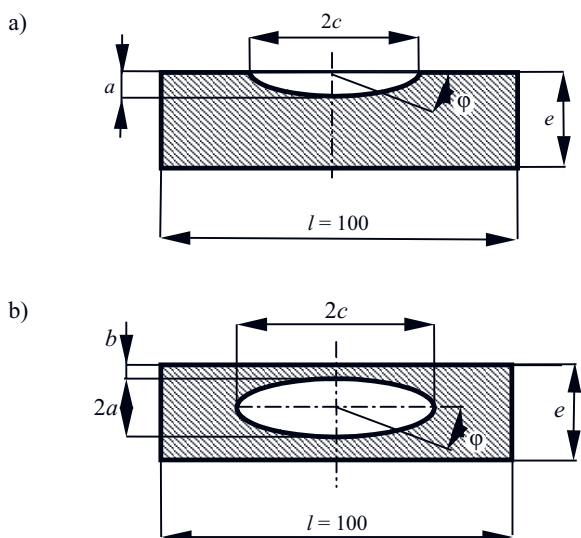
Rozpatrywano rurę o średnicy  $D_z = 2 \cdot R_z = 110$  mm i grubości ścianki  $e = 6,25$  mm, tj. o parametrze  $SDR = 17,6$ . Najmniejszy wykrywalny skanerem ultradźwiękowym wymiar szczeliny  $a$  stanowi 5 % grubości ścianki rury [3] (w przypadku, gdy grubość  $e = 6,25$  mm,  $a_{min} = 0,31$  mm). Schemat przekroju poprzecznego rury z polietylenu z wadą na całej jej długości — szczeliną wzdłużną o głębokości  $a$  na zewnętrznej powierzchni rury przedstawia rys. 1.

Na rysunku 2 przedstawiono modele i wymiary szczelin w ścianie rury — powierzchniowych półeliptycznych oraz wewnętrznych eliptycznych, które można wykryć metodami nieniszczącymi, np. metodą ultradźwiękową (przy pełnym obiegu głowicy pomiarowej na



Rys. 1. Przekrój poprzeczny rury ze szczeliną wzdłużną zewnętrzną: a) wymiary rury i naprężenia, b) rozkład naprężenia obwodowego, c) wymiary szczeliny

Fig. 1. Cross-section of pipe with longitudinal rift: a) dimensions of pipe and stresses, b) distribution of circumferential stress, c) dimensions of rift



Rys. 2. Model szczeliny powierzchniowej półeliptycznej (a) i wewnętrznej eliptycznej (b)

Fig. 2. The model of surfacial semi-elliptical (a) and internal elliptical (b) rift

odcinku  $l = 100$  mm i stosowanych prędkościach odciagu). Długość tych szczelin jest z reguły mniejsza niż długość skanowanego odcinka i wynosi  $2c \leq 0,5 l$ . Trójosiowy stan naprężeń (por. rys. 1a) w ściance rury określają: naprężenie obwodowe  $\sigma_\theta$ , naprężenie promieniowe  $\sigma_R$  i naprężenie wzdłużne  $\sigma_z$ .

Istotne znaczenie w przypadku rury ze szczeliną wzdłużną ma tylko naprężenie obwodowe  $\sigma_\theta$ , które może wywołać zjawisko RCP z istniejącej w rurze szczeliny. Pozostałe naprężenia (promieniowe  $\sigma_R$  i wzdłużne  $\sigma_z$ ) są znacznie mniejsze w porównaniu z naprężeniem obwodowym. Naprężenie obwodowe  $\sigma_\theta$  w ściance rury bez szczeliny obliczono [8] według zależności Lamé'go dla rur grubościennych:

$$\sigma_\theta = \frac{R_w^2 \cdot p_w - R_z^2 \cdot p_z}{R_z^2 - R_w^2} + \frac{(p_w - p_z) \cdot R_w^2 \cdot R_z^2}{R \cdot (R_z^2 - R_w^2)} \quad (1)$$

gdzie:  $R_z$ ,  $R_w$ ,  $R$  – promień rury, odpowiednio, zewnętrzny, wewnętrzny i dowolny wewnątrz jej ścianki,  $p_w$ ,  $p_z$  – ciśnienie, odpowiednio, wewnętrzne i zewnętrzne działające na ściankę rury.

Obliczenia naprężenia  $\sigma_\theta$  wykonano dla założonego nominalnego ciśnienia wewnętrznego  $p_w = 0,5$  MPa dla gazu i  $p_w = 1,0$  MPa dla wody oraz dla jego maksymalnych wartości wyznaczonych w próbie szczelności ( $p_w = 0,75$  MPa dla gazu i  $p_w = 1,6$  MPa dla wody) [4, 9, 10]. Obliczone naprężenie zmienia się liniowo wraz ze zmianą wartości promienia  $R$  (por. rys. 1b) i, np. przy  $p_w = 1,0$  MPa wzrasta od 7,33 MPa dla  $R = R_z$  do 8,33 MPa dla  $R = R_w$ .

### Metodyka badań

W celu określenia krytycznych wymiarów szczelin wzdłużnych o bardzo małym promieniu zaokrąglenia

ich czoła, wyznaczono **odporność polietylenu na pękanie** ( $K_c$ ) dla I modelu obciążenia, tj. przy rozciąganiu próbki obciążenie działa prostopadle do powierzchni szczeliny powodując jej wzrost. Badania wykonano na próbkach trójpunktowo zginanych ze szczeliną po jednej stronie próbki. Próbki pobrane ze ścianki rury nie spełniałyby jednak warunku płaskiego stanu odkształceń i wymaganych proporcji wymiarowych, ze względu na nieodpowiednią grubość i wymiary rury. Dlatego też próbki spełniające warunek płaskiego stanu odkształceń pobrano z innego elementu, wykonanego z takiego samego tworzywa. Wykonanie próbek oraz procedurę badań przeprowadzono zgodnie z normą ASTM D5045-93 [11], dotyczącą badania odporności na pękanie tworzyw polimerowych. Metoda badań (według tej normy), szerzej omówiona w pracach [12, 13], jest oparta na metodyce określonej w normie ASTM E399 dla metali, ale dodatkowo zawiera specyficzne procedury dla tworzyw polimerowych (dotyczące np. szybkości uwalniania energii pękania).

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS-810, w temp.  $23 \pm 1$  °C. Wartość średnia odporności na pękanie  $K_c$ , z pięciu badanych próbek polietylenu PE-HD wynosiła  $K_c = 2,391$  MPa · m<sup>1/2</sup>. Wyznaczona wartość  $K_c$  dla polietylenu dużej gęstości mieści się w zakresie odporności na pękanie, który według autorów publikacji [14, 15] wynosi 2–5 MPa · m<sup>1/2</sup> i jest bliska wartości  $K_c = 2$  MPa · m<sup>1/2</sup>, podanej w pracy [16].

Na podstawie naprężenia obwodowego obliczono wartość naprężenia referencyjnego  $\sigma$  (z uwzględnieniem wady), wg procedury europejskiej FITNET (*Fitness for Service Network*), zgodnie z metodą wykresu zniszczenia FAD (*Failure Assessment Diagram*) [17]. Naprężenie referencyjne posłużyło do wyznaczenia **współczynnika intensywności naprężenia**  $K_a$ . Współczynnik ten na czole szczeliny wzdłużnej o głębokości  $a$  obliczono z zależności:

$$K_a = (\gamma\sigma)\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

gdzie:  $\gamma\sigma$  – iloczyn funkcji kształtu  $\gamma$  danego elementu konstrukcyjnego, zależnej od jego wymiarów i wymiaru charakterystycznego szczeliny oraz naprężenia referencyjnego  $\sigma$ .

Wartość współczynnika intensywności naprężenia  $K_a$  dla szczeliny półeliptycznej i eliptycznej wyznaczono w [18], dla kierunku wzrostu pęknięcia  $\phi = \pi/2$  (rys. 2), w punkcie przecięcia się tego kierunku z czołem szczeliny. Współczynnik  $K_a$ , mający w tym miejscu największą wartość, wyznaczono z następującej zależności:

$$K_a = K_{\phi=\pi/2} = M \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi} \cdot \left( \sin^2 \phi + \frac{a^2}{c^2} \cdot \cos^2 \phi \right)^{0,25} \quad (3)$$

gdzie:  $M$  – współczynnik korekcyjny zależny od wymiarów elementu konstrukcyjnego i wymiaru charakterystycznego szczeliny,  $\Phi$  – całka eliptyczna II rodzaju, zależna od wymiarów elipsy,  $a$  oraz  $c$ ,  $\phi$  – kierunek rozwoju pęknięcia półeliptycznego i eliptycznego w płaszczyźnie szczeliny.



Zjawisko szybkiego pęknięcia rury ze szczeliną wystąpi wówczas, gdy współczynnik  $K_a$  osiągnie wartość krytyczną  $K_{cr}$ , odpowiadającą wymiarowi krytycznemu tej szczeliny ( $a = a_{cr}$ ). Pęknięcie rury ze szczeliną nie wystąpi, gdy zostanie spełniony warunek:

$$K_a < K_{cr} \quad (4)$$

Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia  $K_{cr}$  tworzywa jest określona poprzez odporność na pęknięcie  $K_c$  i współczynnik obciążenia  $L_r$ , który jest stosunkiem naprężenia  $\sigma_{maks.} = \sigma_o$  do granicy plastyczności  $\sigma_y$  ( $L_r = \sigma_{maks.}/\sigma_y$ ) [17]:

$$K_{cr} = K_c \left(1 + 0,5 \cdot L_r^2\right)^{-1/2} \left[0,3 + 0,7 \cdot \exp\left(-0,001 \frac{E}{\sigma_y} \cdot L_r^6\right)\right] \quad (5)$$

Wartość  $K_{cr}$  zależy także od rozmiaru  $a$  danej szczeliny, ponieważ naprężenie  $\sigma_o$  na czole szczeliny zmienia się w przekroju rury wraz z głębokością  $a$  (por. rys. 1b).

Podczas pełzania tworzywa lepkosprężystego moduł sprężystości wzdłużnej ulega zmniejszeniu, od wartości  $E$  w chwili przyłożenia obciążenia do wartości  $E_t$  w określonej chwili czasu  $t$  działania obciążenia. Powoduje to zmianę początkowej wartości krytycznej współczynnika intensywności naprężenia  $K_{cr}$  wraz ze wzrostem czasu  $t$ . Wartość tego współczynnika w określonej chwili działania obciążenia  $K_{cr(t)}$  można wyznaczyć przy założeniu stałej wielkości rozwarcia wierzchołka pęknięcia  $\delta$ , tzn. przemieszczenia się krawędzi szczeliny na jej czole [5], powstałego w wyniku utworzenia się strefy plastycznej przed czołem szczeliny. W tworzywach lepkosprężystych strefa ta ma stałą wielkość [19] do chwili, gdy szczelina uzyska długość krytyczną. Zgodnie z przyjętym modelem Dugdale'a strefy plastycznej  $\delta = K_{cr}/(E\sigma_y)$  krytyczną wartość  $K_{cr(t)}$  można zatem wyznaczyć jako:

$$K_{cr(t)} = K_{cr} \frac{E_t}{E} \quad (6)$$

Wyznaczono też wartość **spiętrzonego naprężenia**  $\sigma_{maks.}$  działającego prostopadle do płaszczyzny szczeliny w odległości  $\rho$  przed jej czołem, w kierunku wzrostu pęknięcia  $\varphi = \pi/2$ . W przypadku szczeliny o bardzo małym promieniu zaokrąglenia jej czoła ( $r < 0,02$  mm) [5] naprężenie  $\sigma_{maks.}$  określono jako:

$$\sigma_{maks.} = \frac{K_a}{\sqrt{2\pi\rho}} \quad (7)$$

W przypadku natomiast szczeliny o dużym promieniu zaokrąglenia ( $r > 0,02$  mm) wyznaczono poziom spiętrzonego naprężenia  $\sigma_{maks.}$  [18] na jej czole z zależności:

$$\sigma_{maks.} = \alpha_k \cdot \sigma_n \quad (8)$$

gdzie:  $\sigma_n$  — naprężenie nominalne dla szczeliny wzdłużnej w rurze ( $\sigma_n = \sigma_o$ ),  $\alpha_k$  — współczynnik spiętrzenia naprężenia przy rozciąganiu.

Wartość współczynnika spiętrzenia naprężenia przy rozciąganiu można określić [18] jako funkcję grubości ścianki rury  $e$  i wymiarów szczeliny  $a$  oraz  $r$  (por. rys. 1c) ze wzoru:

$$\alpha_k = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{0,25}{\frac{a}{r}} + 0,62 \left( \frac{1 + \frac{e-a}{r}}{\frac{e-a}{r} \sqrt{\frac{e-a}{r}}} \right)^2}} \quad (9)$$

Wyznaczono także **lokalny wzrost odkształcenia**  $\varepsilon$  na czole szczeliny, spowodowany zjawiskiem pełzania materiału, pod wpływem spiętrzonego w tym miejscu naprężenia  $\sigma_{maks.}$ . W tym celu wykorzystano dostępne wykresy pełzania  $\sigma - \varepsilon$  polietyleny PE 100 GUR 4120 prod. firmy Ticona, zamieszczone w bazie danych programu Campus [20], wykresy te nie w pełni odpowiadają rozpatrywanemu gatunkowi tworzywa, ale producent PE-HD stosowanego na rury do gazu i wody nie podaje krzywych pełzania dla tego gatunku polietyleny.

## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Obliczone wartości współczynnika intensywności naprężenia  $K_a$  na czole szczeliny o bardzo małym promieniu zaokrąglenia ( $r < 0,02$  mm), występującej na całej długości powierzchni zewnętrznej (rys. 3) lub wewnętrznej rury wskazują, że od chwili rozpoczęcia eksploatacji gazowych lub wodnych rurociągów z PE-HD, współczynnik  $K_a$  rośnie wraz z pogłębianiem się szczeliny  $a$ .

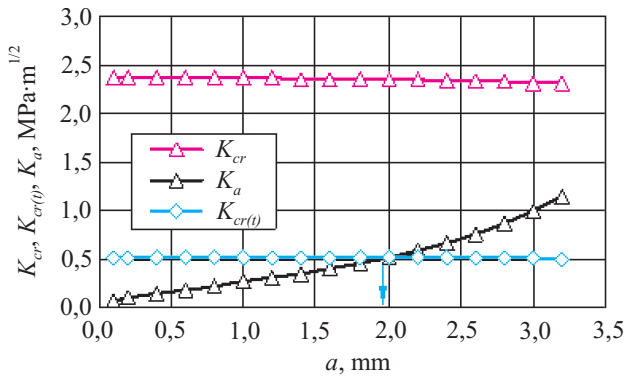
Jego wartość przy ciśnieniu  $p_w = 0,5$  MPa (rys. 3), a nawet przy ciśnieniu  $p_w = 0,75$  MPa, nie osiągała jednak wartości krytycznej  $K_{cr}$  w założonym zakresie głębokości szczeliny  $a = 0 - 3,25$  mm. Stan krytyczny został osiągnięty dopiero przy ciśnieniu  $p_w = 1,0$  MPa (rys. 4) w przypadku szczeliny o głębokości  $a = a_{cr} = 3,07$  mm, na wewnętrznej powierzchni rury.

W warunkach ciśnienia w próbie szczelności,  $p_w = 1,6$  MPa (rys. 5), krytyczna głębokość szczeliny była jeszcze mniejsza i wynosiła  $a_{cr} = 2,26$  mm w przypadku szczeliny na powierzchni zewnętrznej oraz  $a_{cr} = 2,18$  mm — szczeliny na wewnętrznej powierzchni rury.

Spiętrzenie naprężenia na czole szczeliny sprzyja pełzaniu tworzywa, co powoduje zmniejszanie się wartości krytycznej głębokości szczeliny w czasie eksploatacji rurociągów, na skutek spadku krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia.

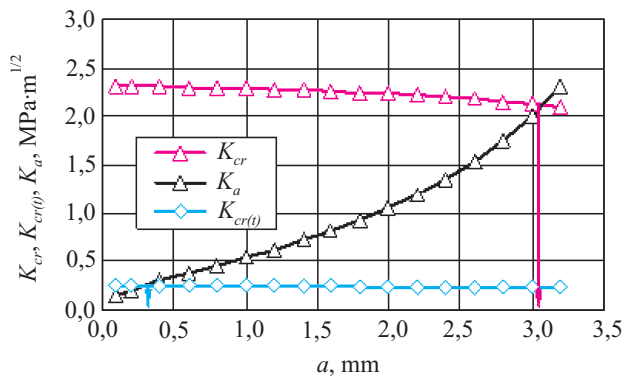
Zależność tę przedstawiono na rys. 3 i 4 w odniesieniu do rury ze szczeliną wzdłużną ciągłą na wewnętrznej powierzchni rury, po czasie eksploatacji  $t = 10\,000$  h, w temp. 23 °C, przy ciśnieniu  $p_w = 0,5$  lub 1,0 MPa. Zmianę krytycznej głębokości  $a_{cr}$  szczeliny wzdłużnej ciągłej na zewnętrznej lub wewnętrznej powierzchni rury, w wyniku pełzania w temp. 23 °C, przy ciśnieniu  $p_w = 1,0$  MPa, w funkcji czasu przedstawiono na rys. 6.

Szczeliny eliptyczne (wewnętrzne) i półeliptyczne powierzchniowe, na zewnętrznej albo wewnętrznej powierzchni ścianki rury o małym promieniu zaokrąglenia czoła ( $r < 0,02$ ) początkowo nie są w tak dużym stopniu zagrożone szybkim rozwojem pęknięcia, jak szczeliny



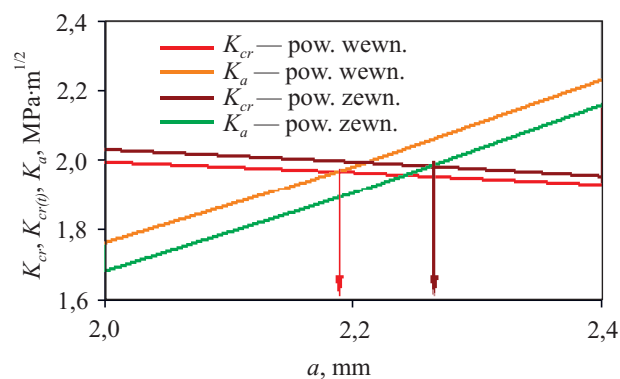
Rys. 3. Współczynnik intensywności naprężenia w funkcji wymiaru szczeliny  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 0,5$  MPa

Fig. 3. Stress intensity factor as a function of rift dimension:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 0.5$  MPa



Rys. 4. Współczynnik intensywności naprężenia w funkcji wymiaru szczeliny na wewnętrznej powierzchni rury:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1,0$  MPa

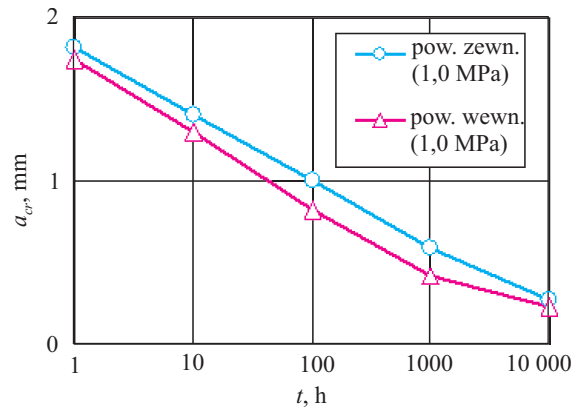
Fig. 4. Stress intensity factor as a function of rift dimension on the inside surface of pipe:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1.0$  MPa



Rys. 5. Współczynnik intensywności naprężenia w funkcji wymiaru szczeliny:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1,6$  MPa

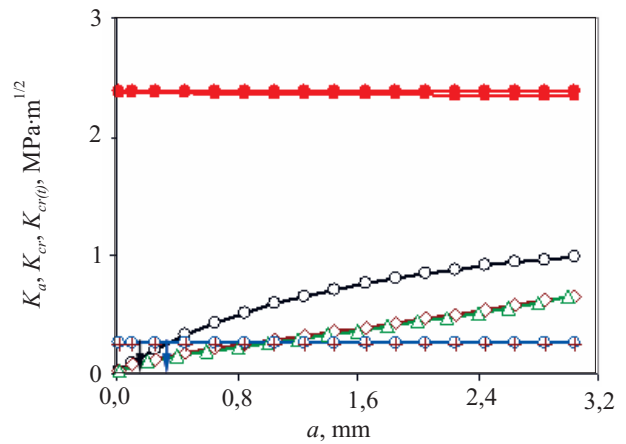
Fig. 5. Stress intensity factor as a function of rift dimension:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1.6$  MPa

powierzchniowe ciągle (na całej długości rury). Takie szczeliny o różnej długości  $2c \leq 0,5 l$ , na odcinku  $l = 100$  mm, nie stanowiły zagrożenia szybkiego pęknięcia rury, w chwili przyłożenia obciążenia w warunkach



Rys. 6. Krytyczna głębokość szczeliny wzdłużnej na: zewnętrznej (a) i wewnętrznej (b) powierzchni rury

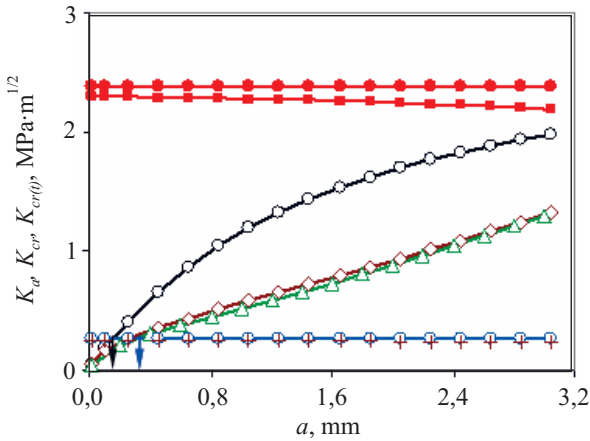
Fig. 6. Critical depth of the longitudinal rift on the outside (a) and inside (b) surface of pipe



Rys. 7. Współczynnik intensywności naprężenia w funkcji wymiaru szczeliny:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 0,5$  MPa,  $b = 0,1$  mm; o — szcz. wewn. elipt., • —  $K_{cr}$  szcz. wewn. elipt.,  $\Delta$  — szcz. półelipt. pow. zewn., + —  $K_{cr(t)}$  szcz. półelipt.,  $\diamond$  — szcz. półelipt. pow. wewn.,  $\blacksquare$  —  $K_{cr}$  szcz. półelipt., o —  $K_{cr(t)}$  szcz. wewn. elipt.

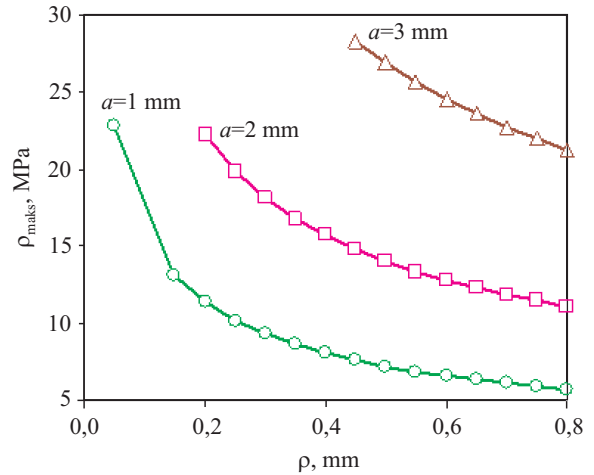
Fig. 7. Stress intensity factor as a function of rift dimension  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 0.5$  MPa,  $b = 0.1$  mm; o — internal elliptical, • —  $K_{cr}$  internal elliptical,  $\Delta$  — semi-elliptical, outside surface, + —  $K_{cr(t)}$  semi-elliptical,  $\diamond$  — semi-elliptical, inside surface,  $\blacksquare$  —  $K_{cr}$  semi-elliptical, o —  $K_{cr(t)}$  internal elliptical

nominalnych ciśnień gazu (rys. 7) lub wody (rys. 8). Możliwość RCP wystąpiła dopiero przy wysokim poziomie ciśnienia  $p_w = 1,6$  MPa (rys. 9). Zagrożenie RCP może jednak pojawiać się wraz z upływem czasu także przy nominalnych poziomach ciśnienia gazu lub wody, na skutek pełzania tworzywa. Należy zauważyć, że w gazociągach niebezpieczeństwo wystąpienia RCP może być znacznie większe, ze względu na dużą akumulację energii wynikającą z dużej ściśliwości gazu. W związku z tym, w przypadku przesyłu gazu, zamiast krytycznej wartości współczynnika  $K_{cr}$  można zastosować inne kryteria pęknięcia, np. kryterium odkształceniowe, określające krytyczną wartość rozwarcia pęknięcia  $\delta_{cr}$  (CTOD, Crack Tip Ope-



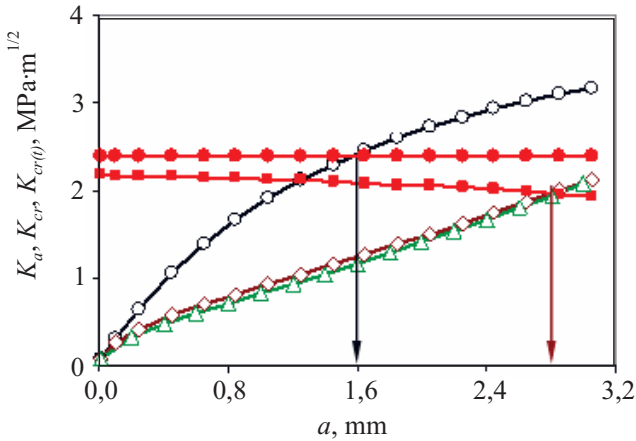
Rys. 8. Współczynnik intensywności naprężenia w funkcji wymiaru szczeliny:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1,0$  MPa,  $b = 0,1$  mm; oznaczenia jak na rys. 7

Fig. 8. Stress intensity factor as a function of rift dimension:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1.0$  MPa,  $b = 0.1$  mm; designations as in Fig. 7



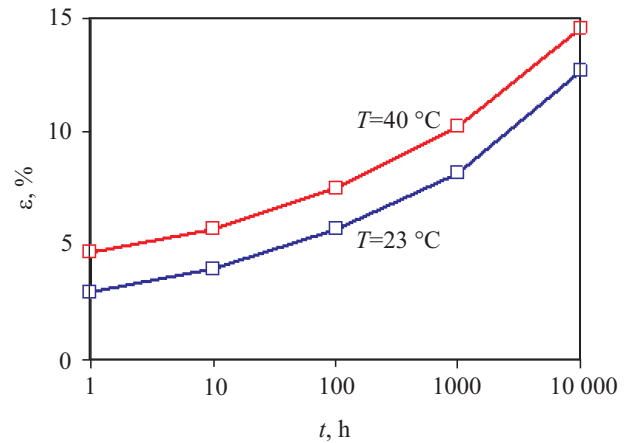
Rys. 11. Naprężenia przed czołem szczeliny  $\sigma_{maks.} = f(\rho)$ ,  $p_w = 0,5$  MPa

Fig. 11. Stresses in the front of the rift  $\sigma_{max} = f(\rho)$ ,  $p_w = 0.5$  MPa



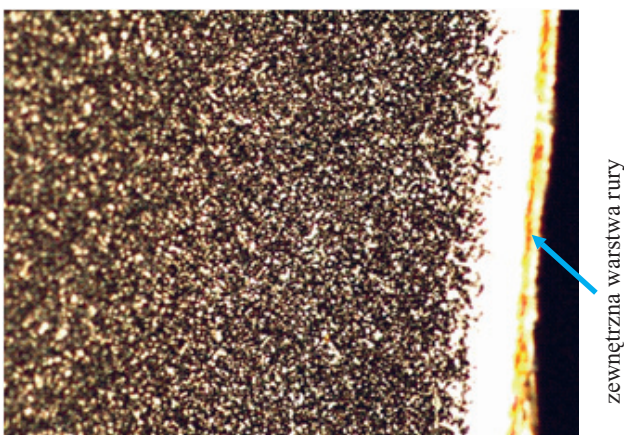
Rys. 9. Współczynnik intensywności naprężenia w funkcji wymiaru szczeliny:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1,6$  MPa,  $b = 0,1$  mm; oznaczenia jak na rys. 7

Fig. 9. Stress intensity factor as a function of rift dimension:  $K_a = f(a)$ ,  $p_w = 1.6$  MPa,  $b = 0.1$  mm; designations as in Fig. 7

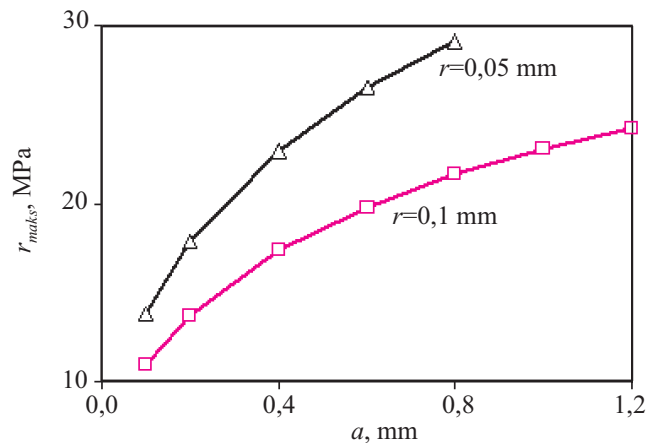


Rys. 12. Odkształcenie przed czołem szczeliny  $\epsilon = f(t)$ ,  $a = 1$  mm,  $\rho = 0,34$  mm,  $p_w = 0,5$  MPa

Fig. 12. Strain in the front of the rift  $\epsilon = f(t)$ ,  $a = 1$  mm,  $\rho = 0.34$  mm,  $p_w = 0.5$  MPa



Rys. 10. Struktura materiału rury (PE-HD)  
Fig. 10. Structure of a pipe material (PE-HD)



Rys. 13. Śpiętrzenie naprężenia na czole szczeliny w funkcji jej wymiarów  $\sigma_{maks.} = f(a, r)$ ,  $p_w = 0,5$  MPa

Fig. 13. Stress concentration at the front of the rift as a function of its dimensions  $\sigma_{max} = f(a, r)$ ,  $p_w = 0.5$  MPa



ning Displacement), lub kryterium energetyczne oparte na krytycznej wartości całki  $J_c$ . Zgodnie z tymi kryteriami RCP wystąpi wówczas, gdy wielkość rozwarcia szczeliny  $\delta$  osiągnie wartość krytyczną ( $\delta = \delta_{cr}$ ) albo całka  $J$  w otoczeniu czoła szczeliny osiągnie wartość krytyczną ( $J = J_c$ ). Zastosowanie tych kryteriów jest wprawdzie trudniejsze niż kryterium naprężeniowego ( $K = K_c$ ) ale pozwala na bardziej precyzyjne przewidywanie wystąpienia pęknięcia rury.

Stan krytyczny w odniesieniu do rury ze szczeliną eliptyczną wyznaczono przy założeniu, że odległość czoła szczeliny od zewnętrznej powierzchni ścianki rury  $b = e - a$  (rys. 2b) wynosiła  $b = 0,1$  mm. Odległość ta ma istotny wpływ na wartość krytyczną  $a_{cr}$  szczeliny eliptycznej. Zwiększenie odległości  $b$  powoduje wyraźny wzrost wartości krytycznej  $a_{cr}$ .

Potwierdzono doświadczalnie wystąpienie RCP w warunkach ciśnienia  $p_w = 1,6$  MPa, na próbkach z rury wykonanych z PE-HD, o średnicy 110 mm i SDR = 17,3 ze szczeliną półeliptyczną na jej zewnętrznej powierzchni, o długości  $2c = 50$  mm i głębokości  $a = 3$  mm.

Pęknięcie rury w warstwie powierzchniowej miało charakter kruchy, co można tłumaczyć amorficzną strukturą tej warstwy (rys. 10). W głębi ścianki rury pęknięcie miało natomiast charakter ciągliwy, co związane jest z istniejącą tam strukturą krystaliczną — bardziej podatną na odkształcenia plastyczne.

Poziom naprężenia w ściance rury przed czołem szczeliny zewnętrznej ciągłej o małym promieniu zaokrąglenia czoła jest dość wysoki — bliski granicy plastyczności. Zmianę wartości tego naprężenia  $\sigma_{maks.} = f(\rho)$ , dla trzech głębokości szczeliny  $a$  i ciśnienia  $p_w = 0,5$  MPa ilustruje rys. 11. Tak wysoki poziom naprężenia przed czołem szczeliny będzie powodował lokalnie znaczny wzrost odkształcenia, w wyniku zjawiska pełzania (rys. 12), a w konsekwencji materiał przed czołem szczeliny może ulegać lokalnemu osłabieniu. Może to ułatwić zainicjowanie pęknięcia na czołe szczeliny.

W przypadku szczeliny zewnętrznej o większym promieniu zaokrąglenia  $r > 0,02$  mm, jest generowane mniejsze spiętrzenie naprężenia na jej czole niż w szczelinie o małym promieniu  $r$ . Spiętrzone naprężenie na czołe szczeliny może jednak chwilowo przekraczać wartość granicy plastyczności, nawet przy niskim ciśnieniu (rys. 13). Wywoła to natychmiast duże odkształcenie trwałe, w wyniku którego materiał ulegnie lokalnemu osłabieniu. Wzrost promienia zaokrąglenia szczeliny prowadzi do znacznego zmniejszenia poziomu spiętrzonego naprężenia na czołe szczeliny. Osiągnięcie granicy plastyczności na czołe szczeliny prowadzi do przyrostu odkształceń bez zwiększania naprężeń.

#### PODSUMOWANIE

Ocenę jakości rur z polietylenu, z wadami w jej ściance można przeprowadzić opierając się na metodzie FAD, opracowanej w ramach Europejskich procedur FITNET.

Przedstawiona analiza stanu naprężeń w rurach z polietylenu dużej gęstości PE 100 pozwoliła określić, w przypadku jakich wymiarów wady o kształcie szczeliny wzdłużnej w ściance rury, wystąpi stan krytyczny wynikający z możliwości szybkiej propagacji pęknięcia przy założonych wartościach ciśnienia przesyłanego medium. Podobną analizę przeprowadzono też w przypadku rury ze szczeliną powierzchniową półeliptyczną na zewnętrznej lub wewnętrznej powierzchni ścianki rury oraz szczeliny wewnętrznej eliptycznej w ściance rury. Na podstawie przeprowadzonej analizy określono ponadto wielkość koncentracji naprężenia na czole szczeliny o dużym promieniu  $r$  zaokrąglenia czoła oraz w najbliższym obszarze przed czołem szczeliny o małym promieniu zaokrąglenia jej czoła a także osiąganą wielkość lokalnego odkształcenia w tym miejscu w efekcie pełzania tworzywa.

#### LITERATURA

1. Praca zbiorowa: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych” (red. Sikora R.), Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
2. Sikora J., Broel-Plater B.: *Polimery* 2004, **49**, 195.
3. Baranowski W., Werner K.: „Przetwórstwo materiałów polimerowych”, Wyd. CWA, Częstochowa 2010, str. 13–30.
4. Pusz A.: „Gazociągi z tworzyw sztucznych”, Monografie, seria gazownictwo nr 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
5. Wilczyński A.: „Mechanika polimerów w praktyce konstrukcyjnej”, WNT, Warszawa 1984.
6. PN-EN ISO 13478:2007 Rury z tworzyw termoplastycznych do przesyłania płynów. Oznaczanie odporności na szybką propagację pęknięć (RCP). Metoda badania w pełnej skali (FST).
7. PN-EN ISO 13477:2008 Rury z tworzyw termoplastycznych do przesyłania płynów. Oznaczanie odporności na szybką propagację pęknięć (RCP). Metoda badania w małej skali w stanie stacjonarnym (S4).
8. Kurowski R., Niezgodziński M. E.: „Wytrzymałość materiałów”, PWN, Warszawa 1959.
9. „Sieci gazowe z PE”, Informator techniczny, Wyd. Elplast, Jastrzębie Zdrój 2005.
10. „Instrukcja montażu — układanie rurociągów z polietylenu (PE) w gruncie”, Wyd. Spyra Primo Poland Sp. z o.o., Mikołów 2008.
11. ASTM D5045-93 Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastics Materials.
12. Praca zbiorowa: „Handbook of Polymer Testing. Physical Methods” (red. Brown R.), Marcel Dekker, Inc., New York — Basel 1999.
13. Praca zbiorowa: „Polymer Testing” (red. Grellmann W., Seidler S.), Publ. Carl Hanser Verlag, München 2007.
14. Blicharski M.: „Odkształcenie i pękanie”, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2002.
15. Bochenek A.: „Elementy mechaniki pękania cz. 1. Podręcznik dla materiałowców”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998.

16. Ashby M. F., Jones D. R. H.: „Materiały inżynierskie t. 1 — właściwości, zastosowania”, WNT, Warszawa 1995.
17. Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J.: „Ocena wytrzymałości trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty”, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008.
18. Kocańda S., Szala J.: „Podstawy obliczeń zmęczeniowych”, PWN, Warszawa 1985.
19. Bessonov M. I., Kuvšinskij E. V.: *Fiz. Tverd. Tel.* 1961, 3, 607.
20. Frącz W., Krywult B.: „Projektowanie i wytwarzanie elementów z tworzyw sztucznych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.

Otrzymano 5 I 2012 r.

## Materiały Polimerowe Pomerania – Plast 2013

Międzyzdroje, 4 – 7 czerwca 2013 r.



**Konferencja** jest kontynuacją konferencji Pomerania–Plast 2001, 2004, 2007 i 2010, a także wcześniejszych cykli konferencyjnych organizowanych przez zespoły polimerowe Politechniki Szczecińskiej (obecnie Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie).

**Organizator:** Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Polimerów

**Przewodniczącą Konferencji:** prof. dr hab. inż. Tadeusz Spychaj

**Tematyka konferencji** będzie obejmować następujące zagadnienia:

- Kompozyty i kompozycje polimerowe (kompozyty i nanokompozyty; nowe materiały termoplastyczne, elastomerowe, chemo- i termoutwardzalne, materiały powłokowe i klejowe, modyfikatory i środki pomocnicze).
- Polimery a środowisko (polimery biodegradowalne, biomateriały polimerowe, polimery i żywice w układach wodnych, recykling materiałów polimerowych).

**Program naukowy konferencji** obejmuje: wykłady na zaproszenie Komitetu Naukowego (30 min), komunikaty sekcyjne (15 min), komunikaty młodych pracowników i doktorantów/studentów (10 min), sesje plakatowe.

**Publikacje i materiały konferencyjne** — Dwustronicowe skróty wystąpień zostaną wydane w formie materiałów konferencyjnych. Prezentowane prace (po recenzji) będą publikowane w czasopismach: *Polimery*, *Polish Journal of Chemical Technology*, *Przemysł Chemiczny*.

**Terminy** — Udział w konferencji należy zgłosić do **15 stycznia 2013 r.**, a skrót wystąpienia nadesłać do **31 stycznia 2013 r.**

### Koszty

Opłata normalna: do 31 marca 2013 r. — 1100 zł, a po tym terminie — 1200 zł.

Opłata ulgowa: doktorant/student — 850 zł, osoba towarzysząca — 700 zł (do 31 marca 2013 r., a po tym terminie odpowiednio 950 zł i 700 zł).

Opłata obejmuje: koszty konferencyjne, wyżywienie (obiady i kolacje) oraz program towarzyszący.

**Wpłaty** na konto: ZUT, Szczecin, Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin, Bank Zachodni WBK III Oddział w Szczecinie, Nr rachunku: 02 1090 1492 0000 0000 4903 0242, z dopiskiem: Pomerania-Plast 2013.

**Biuro konferencji:** dr inż. Katarzyna Wilpiszewska — Sekretarz konferencji

**Adres do korespondencji:** Instytut Polimerów, ul. Pułaskiego 10, 70-322 Szczecin, tel. (91) 449 41 78, tel./fax (91) 449 42 47, e-mail: pomeraniaplast@zut.edu.pl, kwilpi@zut.edu.pl

[www.ip.zut.edu.pl](http://www.ip.zut.edu.pl)