

**L. Śnieżek, Dr inż**

*Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa,  
Polska*

## **TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA ELEMENTÓW RUROCIĄGÓW PRZEMYSŁOWYCH Z PROPAGUJĄCYM PĘKNIĘCIEM PÓLELIPTYCZNYM**

*Przemysłowe rurociągi, przeznaczone dla naziemnego transportowania substancji chemicznych wymagają szczególnej uwagi ze względu ryzyka jaki oni mogą stwarzać jak dla ludności, tak i środowiska. W artykule zaprezentowane otrzymane dane o zmęczeniowym zniszczeniu przemysłowego rurociągu w trakcie eksploatacji. Zniszczenie było badane w określonym miejscu, czyli od punktu inicjacji zmęczeniowego pęknięcia. Były poddane analizie dwa rurociągi o różnych średnicach dla transportowania systemów dwóchwartościowego kwasu. Wytrzymałościowe próby, realizowane na wycinkach rur z rurociągu z pomiarami propagacji zmęczeniowego pęknięcia od punktu inicjacji. Badania doświadczalne realizowane w dwóch seriach: jedna na materiałowi po niektórym okresie eksploatacji, i druga, na próbkach zrobionych z nowego materiału. Inicjatory były wykonane w formie półeliptycznych pęknięć. Długość pęknięć była mierzona przy użyciu elektrycznej metody potencjalnej różnicy (EPD) z wykorzystaniem optycznych czujników fali. Wyniki badań doświadczalnych wykorzystane dla opisu propagacji zmęczeniowego pęknięcia. Na podstawie tych wyników było określone zmęczeniowe naprężenia oraz liczba cykli do zniszczenia.*

**L. Śnieżek, PhD**

*Military University of Technology, Warsaw, Poland*

## **FATIGUE RESISTANCE, ELEMENTS INDUSTRIAL PIPELINE WITH PROPAGATION SEMI-ELLIPTICAL FATIGUE CRACK**

*Industrial pipelines, most of all the ground-based ones intended to deliver chemicals, require more attention for their being potentially hazardous to both the population and the environment. The paper has been intended to present findings on the industrial pipeline's fatigue life. The issue has been approached locally, i.e. from the standpoint of fatigue crack propagation. Two pipelines of different diameters of double-pressure acid systems were subjected to the assessment. Locally approached endurance tests were carried out under fatigue-crack-propagation conditions using specimens taken from a pipeline. Experiments were carried out using two test series: one from the material after some operational-use period, and one made of new material. Cracking initiators were made in the form of half-elliptical cracks. Crack lengths were measured with the electric potential difference (EPD) method and optical wave-guides employed. Results of fatigue tests were then used to describe fatigue-cracking growth. On the grounds of results of fatigue tests, fatigue strength was determined and expressed with a number of cycles to failure.*

**Л. Сьнежек, канд. техн. наук**

*Військово-технічна академія ім. Ярослава Домбровського, Варшава,  
Польща*

## **ВТОМНА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОМИСЛОВИХ ТРУБОПРОВОДІВ З НАПІВЕЛІПТИЧНОЮ ТРІЩИНОЮ**

*Промислові трубопроводи, призначені для наземного транспортування хімічних субстанцій, вимагають особливої уваги з огляду на загрозу, яку вони можуть створювати для населення та середовища. В статті приведені дані відносно втомого руйнування промислового трубопроводу в процесі експлуатації. Руйнування досліджували у визначеному місці, тобто від місця ініціації втомною тріщини. Досліджували два трубопроводи різних діаметрів, для транспортування двохвалентних кислот. Втомні випробування реалізували на вирізаних елементах трубопроводу з вимірюванням поширення втомною тріщини від ініціатора. Експериментальні дослідження реалізовані двома серіями: перша на матеріалі після експлуатації друга - на вихідному матеріалі. Ініціатори тріщин виконані у формі*

напівеліптичної щілини. Довжину тріщини вимірювали з використанням методу різниці потенціалів (МРП) з використанням оптоволоконних датчиків. Результати експериментів використані для опису поширення втомної тріщини, та на їх основі визначено втомне напруження і кількість циклів до руйнування.

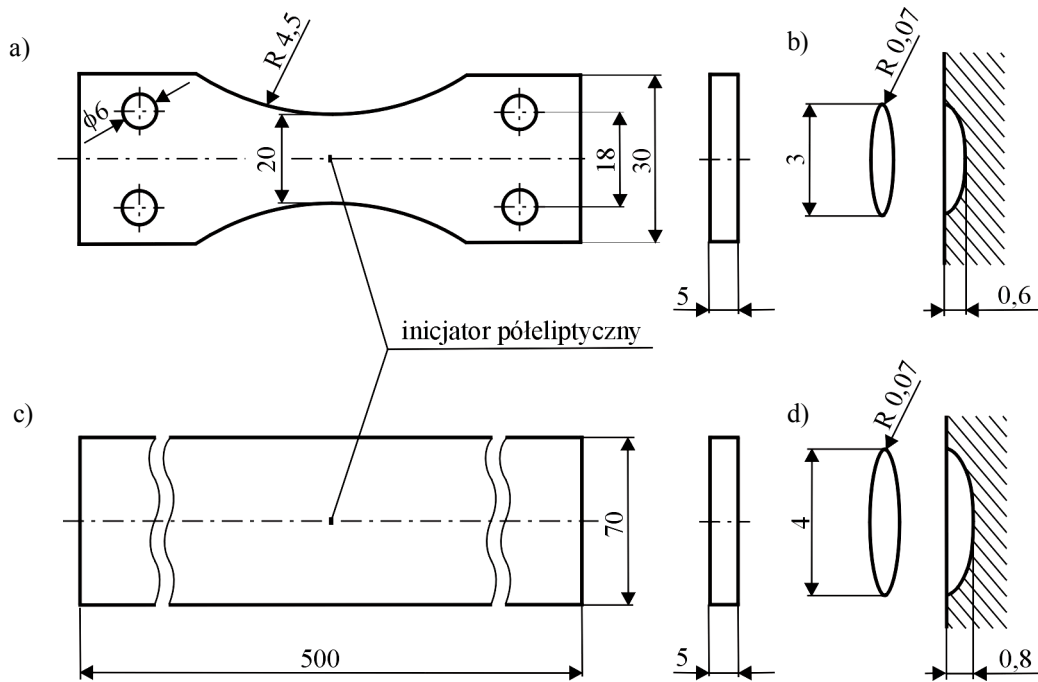
## WSTĘP

Rurociągi przemysłowe, w szczególności rurociągi chemiczne naziemne, zasługują na szczególną uwagę z racji zagrożeń dla ludności i środowiska naturalnego. Zagrożenie to występuje zwłaszcza przy przesyłaniu mediów niebezpiecznych, wymuszając permanentne zajmowanie się problematyką wytrzymałości rurociągów [1-2]. Wytrzymałość ta zależy w głównej mierze od rodzaju obciążeń, materiału oraz oddziaływania otoczenia zewnętrznego i czynników przesyłanych. W ostatnim okresie coraz szerzej stosowane są metody wyznaczania trwałości rurociągu z propagującymi pęknięciami zmęczeniowymi, począwszy od metod typowych uwzględniających rozwój pęknięcia powierzchniowego i wewnętrznego (pęknięcie półeliptyczne czy eliptyczne) [3-6] aż do prezentowanej ostatnio metody obliczeń trwałości z wykorzystaniem tak zwanego parametru wady  $\bar{a}$ . Głównym kierunkiem obliczeń w tych metodach stała się grubość ścianki rurociągu, przy założeniu wielkości krytycznej długości pęknięcia  $a_{kr}$  równej 50% grubości ścianki lub dopuszczalnej długości pęknięcia  $a_{dop}$ . Znając początkową i końcową długość pęknięcia oraz prędkość jego propagacji, można wyznaczyć trwałość rurociągu z równania Parisa z jego modyfikacjami. Dzięki nowym tendencjom w obliczeniach zmęczeniowych w ujęciu globalnym i lokalnym można ocenić trwałość rurociągu również przy uwzględnieniu tzw. pęknięcia przeciekowego. Obliczenie trwałości musi być wtedy oparte o warunek zapewniający rozwój pęknięcia o charakterze plastycznym i uzyskanie z obliczeń wielkości  $a_{kr}$  równej grubości ścianki rurociągu  $g$ . Stosowanie metody parametru wady  $\bar{a}$  stwarza możliwość śledzenia na bieżąco rozwoju wymiaru wady wgłębszej przez odniesienie do nomograficznego ujęcia wielkości dopuszczalnej długości pęknięcia powierzchniowego. Podstawą tych obliczeń są wielkości z mechaniki pęknięcia wykorzystywane w zakresie sprężystym i sprężysto-plastycznym ( $K_{Ic}$ ,  $CTOD - \delta$ ) [7-10]. Ważnym czynnikiem w obliczeniach jest fakt między innymi niezależności współczynnika intensywności naprężeń wyznaczonego na powierzchni od wyznaczonego w głąb ścianki. Punktem wyjściowym dla tych metod musi być jednak dobra znajomość zmian wielkości mechanicznych uzyskanych na drodze badań wytrzymałościowych [11].

## PRZEDMIOT BADAŃ

Badania doświadczalne przeprowadzono na elementach rurociągu przemysłowego napowietrznego o wymiarach  $\phi 600 \times 5$  mm i  $\phi 900 \times 5$  mm (średnica zewnętrzna  $\times$  grubość ścianki), wykonanego ze stali austenitycznej. Dostarczone do badań odcinki rur pochodziły zarówno z rurociągu po wieloletniej eksploatacji, wykonanego ze stali 1H18N9T (wg PN-71/H-86020), oraz z rurociągu nowego, przed włączeniem do procesu eksploatacji, wykonanego ze stali 1.4541 (wg EN 10088-3), odpowiednika zachodnioeuropejskiego stali 1H18N9T.

Obszerne badania zmęczeniowe przeprowadzono dla dwóch różnych warunków obciążenia i kształtów próbek z naciętymi, półeliptycznymi inicjatorami pęknięcia. W pierwszym etapie próbki płaskie o wymiarach przedstawionych na rys. 1a-b poddano płaskiemu zginaniu przy amplitudzie naprężenia nominalnego  $\sigma_{gna} = 170, 180, 200$  i  $250$  MPa dla  $R=0$ . W kolejnym etapie, próbki o wymiarach przedstawionych na rys. 1c-d, badano w warunkach osiowego rozciągania przy amplitudzie naprężenia  $\sigma_a$  opisanej blokowym programem naprężenia. Program naprężeń opracowano na podstawie zbioru przebiegów zmian ciśnienia zarejestrowanych w wybranym, 5,5-letnim przedziale eksploatacji rurociągu.

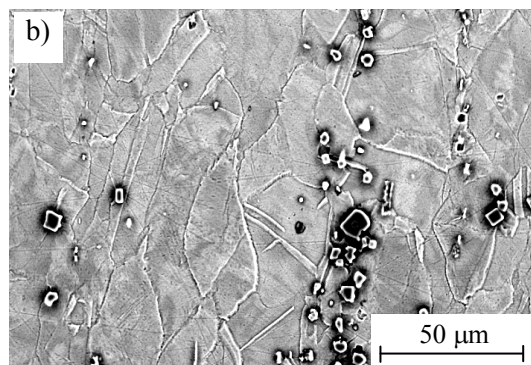
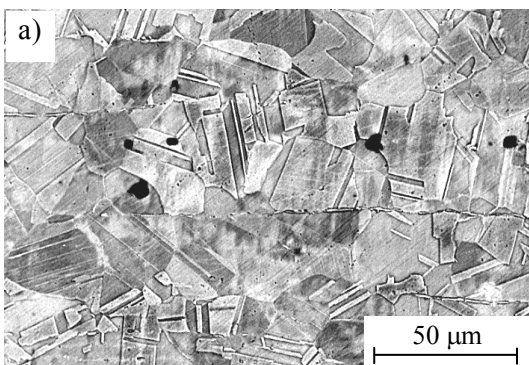


Rys. 1. Próbkki do badań rozwoju pęknięć zmęczeniowych

### BADANIA STRUKTURY

Mikroanaliza rentgenowska EDS składu chemicznego materiału rur w stanie dostawy odpowiada gatunkowi stali 1H18N9T. Struktura badanego stopu (rys. 2a) składa się z ziaren austenitu o średniej wielkości  $20\mu\text{m}$  z licznymi bliźniakami rekrytalizacji powstałymi podczas wytwarzania elementów rurociągu za pomocą obróbki plastycznej na gorąco, realizowanej poprzez walcowanie. Na zglądach widoczne są, pomiędzy ziarnami austenitycznej osnowy, pasmowe wydzielienia, które zidentyfikowano jako ferryt  $\delta$  powstały podczas procesu metalurgicznego.

Analiza struktury i składu chemicznego materiału po trzydziestoletniej eksploatacji rurociągu wykazała zauważalną fluktuację zawartości poszczególnych pierwiastków stopowych. Obserwowane zmiany składu chemicznego świadczą o degradacji struktury stali, za którą odpowiadają procesy wydzieleniowe, przebiegające głównie pod wpływem oddziaływania środowiska przesyłanego medium – 10,5 procentowego tlenu azotu, o temperaturze roboczej  $t_r=436\text{K}$ . Struktura stali składa się z ziaren austenitu z licznymi bliźniakami rekrytalizacji. W granicach między ziarnami obserwuje się pasmowe wydzielienia ferrytu oraz liczne, punktowe wtrącenia azotków tytanu (rys. 2b). Struktura stali 1.4541 składa się z ziaren austenitu z licznymi bliźniakami rekrytalizacji (rys.2c). Na zglądach nie stwierdzono obecności wydzieleń ferrytu  $\delta$ . W strukturze badanego stopu widoczne są natomiast pojedyncze wydzielienia wtrąceń niemetalicznych w postaci azotków tytanu. Zestawienie wyników badań właściwości wytrzymałościowych statycznych i udarowości badanych stali przedstawiono w Tabeli 1.



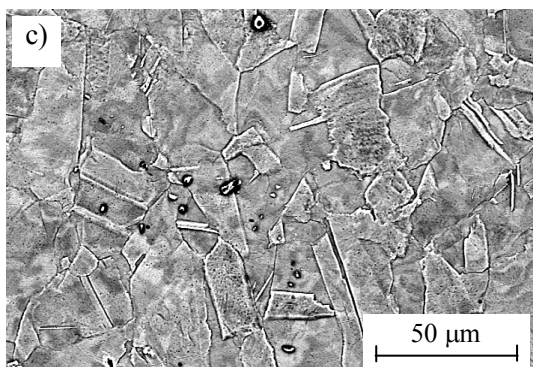


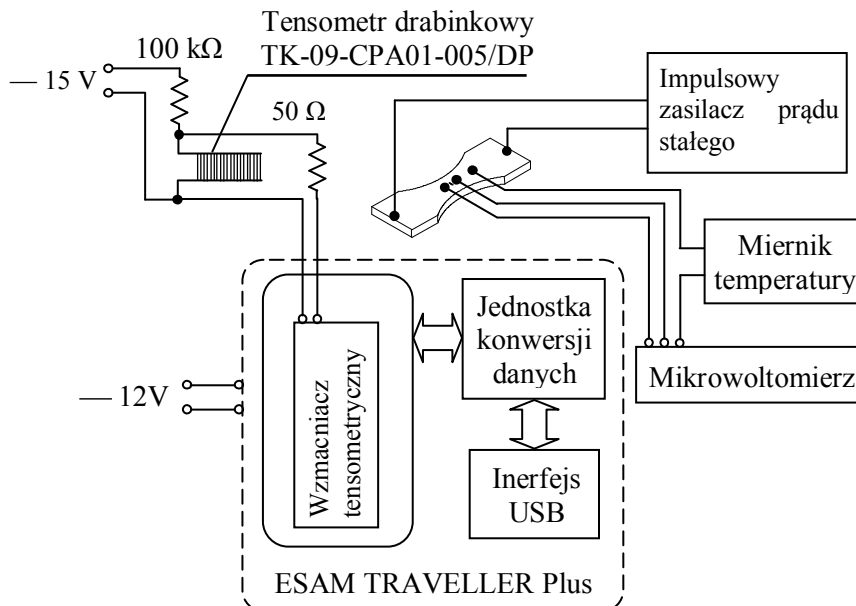
Tabela 1. Właściwości wytrzymałościowe badanych stali

Stal	Stal 1H18N9T	Stal 1H18N9T po eksploatacji	Stal 1.4541
$R_{0,2}$ [MPa]	291	325	284
$R_m$ [MPa]	612	638	600
$E$ [MPa]	192500	178500	193900
$A$ [%]	58,8	51,5	63,6
$Z$ [%]	43,2	40,7	45,3
$U$ [J/cm <sup>2</sup> ]	208	130	226

Rys. 2. Austenityczna struktura stali: 1H18N9T w stanie dostawy (a), 1H18N9T po wieloletniej eksploatacji (b) i 1.4541 (c)

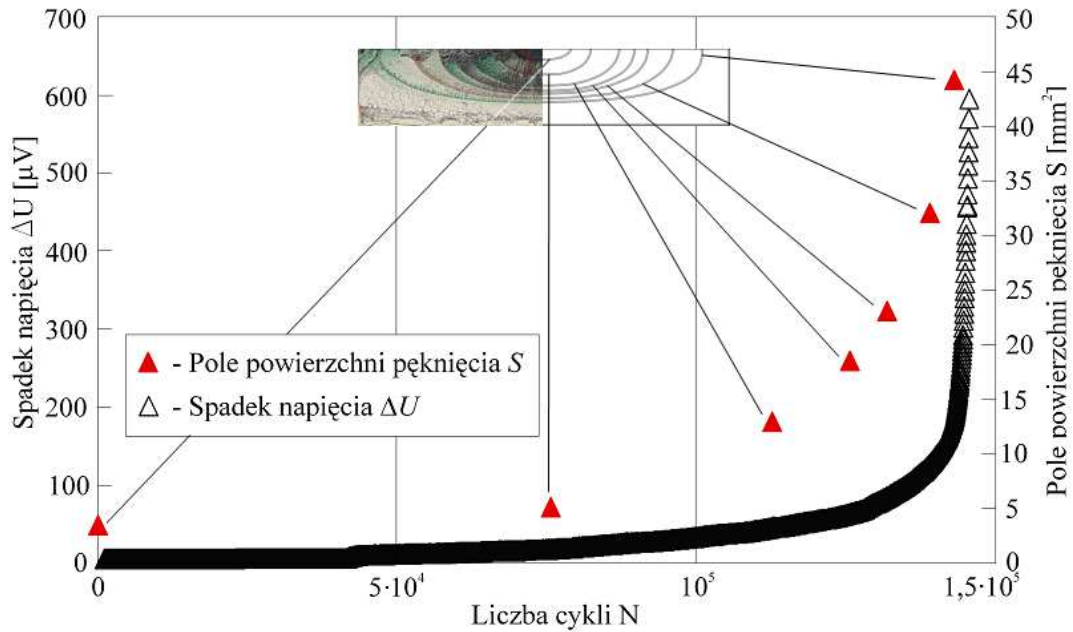
### METODYKA BADAŃ PROPAGACJI PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH

Pomiarów długości pęknięć zmęczeniowych wykonano przy wykorzystaniu metody spadku potencjału prądu stałego. Metoda ma dość szerokie zastosowanie w praktyce pomiarowej i można jej używać do badań propagacji pęknięć w materiałach przewodzących prąd elektryczny. Do weryfikacji uzyskanych tą metodą wyników pomiarów zastosowano dodatkowo tensometry drabinkowe, pozwalające na rejestrację czoła propagującego na powierzchni próbki pęknięcia z krokiem 0,25 mm. Do odtworzenia kształtu czoła pęknięcia półeliptycznego zastosowano ponadto metodę barwienia. Schemat stanowiska do pomiaru pęknięć półeliptycznych metodą spadku potencjału i z użyciem tensometru drabinkowego przedstawiono na rys. 3.



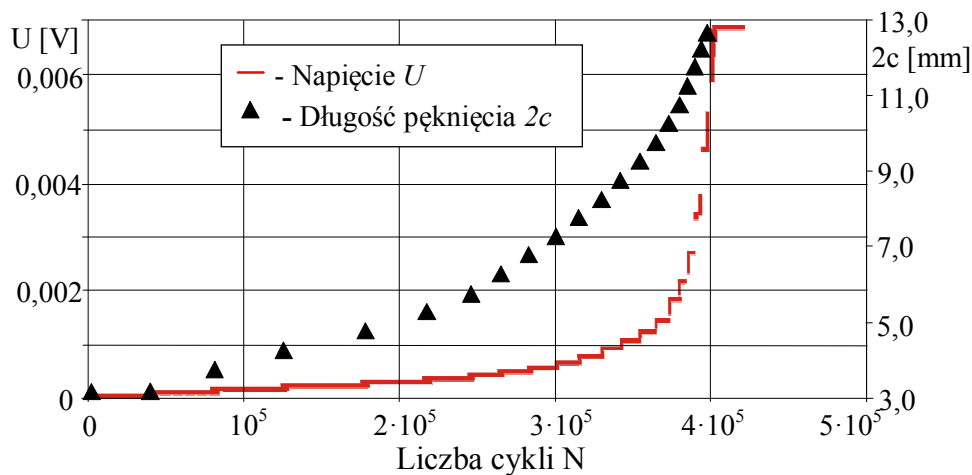
Rys. 3. Schemat stanowiska do pomiaru pęknięć półeliptycznych metodą spadku potencjału i z wykorzystaniem tensometru drabinkowego

Korelacja wyników otrzymanych w pomiarach spadków potencjału oraz pół powierzchni propagującego pęknięcia wyznaczonych na podstawie jego zarysu uzyskanego w metodzie barwienia pozwoliły na sporządzenie przebiegów zmian tych wielkości wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Przykładowy przebieg dla badań przeprowadzonych w warunkach zginania przy  $\sigma_{gna}=250$  MPa przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi zmian pola powierzchni pęknięcia  $S$  i spadku napięcia  $\Delta U$  wyznaczone dla próbki badanej w warunkach zginania przy  $\sigma_{\text{gna}}=250$  MPa

Weryfikacji wyników w zakresie długości pęknięć na powierzchni próbek uzyskanych metodą spadku potencjału dokonano na drodze badań przy użyciu tensometrów drabinkowych. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian napięcia w układach pomiarowych tensometrów drabinkowych oraz wyliczone na tej podstawie długości pęknięć na powierzchni  $2c$  dla wybranych próbek poddanych zginaniu.



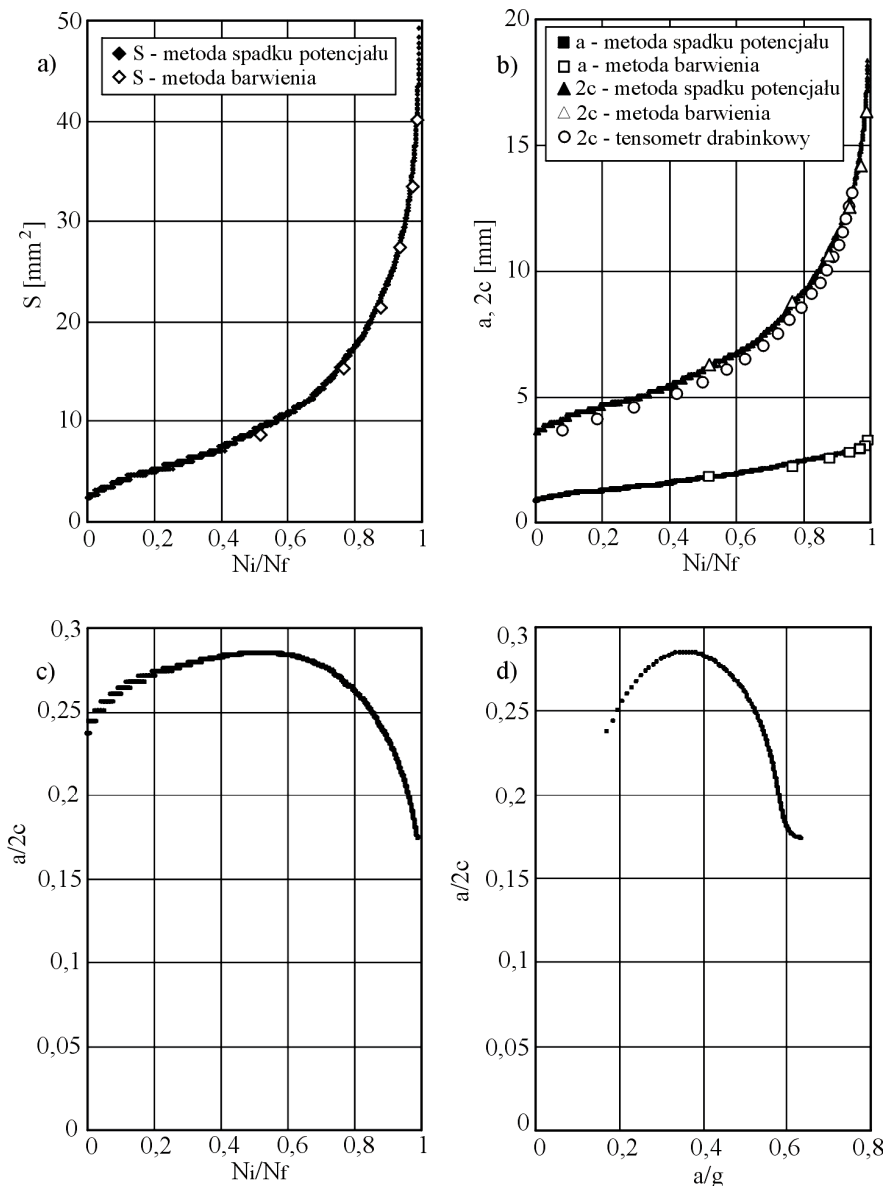
Rys. 5. Wyniki badań długości pęknięcia na powierzchni  $2c$  uzyskane za pomocą tensometru drabinkowego (próbka zginana przy  $\sigma_{\text{gna}}=250$  MPa)

## WYNIKI BADAŃ

Przebiegi zmian pola powierzchni  $S$  oraz wymiarów  $2c$  i  $a$  pęknięcia półeliptycznego, dla ustalonej liczby cykli  $N$ , przedstawiono w postaci przebiegów  $S=f(N_i/N_f)$ ,  $a, 2c=f(N_i/N_f)$ ,  $a/2c=f(N_i/N_f)$ , i  $a/2c=f(a/g)$ , przy czym  $N_i$  stanowi bieżącą liczbę cykli,  $N_f$  – liczbę cykli do zniszczenia oraz  $g$  - grubość badanej próbki. Na wybranych wykresach przedstawiających wyniki badań próbki zginanej przy  $\sigma_{\text{gna}} = 125$  MPa (rys. 6) punktami niezaciemnionymi zaznaczono wyniki pomiarów uzyskane metodą barwienia oraz za pomocą tensometrów drabinkowych. Rejestrowane za pomocą tensometru drabinkowego przyrosty pęknięcia powierzchniowego (rys. 6b) wskazują na jego wolniejszy rozwój w porównaniu z wynikami pomiarów optycznych. Różnice te są większe przy małych wartościach  $N_i/N_f$  i wynoszą

6÷8 % wartości mierzonej w przedziale  $N_i/N_f = 0\div 0,4$  oraz maleją wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. W przedziale  $N_i/N_f = 0,8\div 0,9$  wskazania układu pomiarowego z tensometrem drabinkowym różnią się o 2÷4 % w stosunku do wyników pomiarów optycznych. Wykazane rozbieżności długości pęknięć nie ograniczają możliwości stosowania tensometrów drabinkowych do pomiarów przyrostów długości pęknięć, wskazują jednak na konieczność uwzględnienia wpływu zastosowanej metodyki na wyniki pomiarów.

Analiza otrzymanych wyników wykazała między innymi, że podczas zmiennego zginania próbek badanych przy  $\sigma_{gna}=125$  MPa, parametr wymiaru pęknięcia  $a/2c$  narasta do wartości maksymalnej  $(a/2c)_{max} = 0,28$  wraz ze wzrostem liczby cykli zmian obciążenia pęknięcia w przedziale  $N_i/N_f = 0\div 0,5$  (rys. 6c). Dalszemu wzrostowi liczby cykli zmian obciążenia towarzyszy spadek parametru  $a/2c$ , osiągając w końcowym etapie badania próbki wartość minimalną  $(a/2c)_{min} = 0,175$ . Największa wartość  $a/2c$  odpowiada głębokości pęknięcia  $a/g = 0,35$  (rys. 6d).

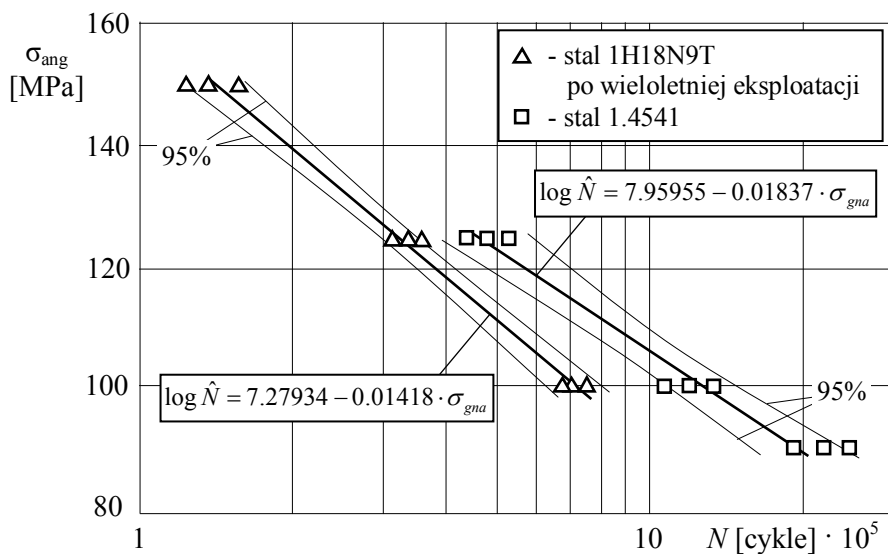


Rys. 6. Przebiegi zmian wymiarów pęknięcia półeliptycznego wyznaczone metodami spadku potencjału, barwienia i za pomocą tensometrów drabinkowych w zginanej próbce badanej przy  $\sigma_{gna} = 125$  MPa; objaśnienie w tekście

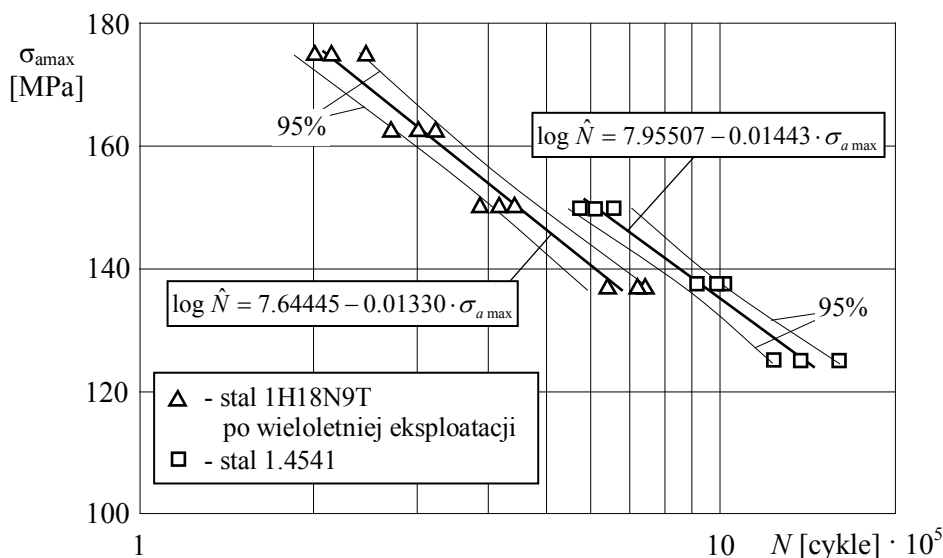
Podczas zmiennoaamplitudowego rozciągania, rejestrowane za pomocą tensometru drabinkowego, przyrosty długości pęknięcia powierzchniowego  $2c$  w przedziale  $N_i/N_f < 0,7$  wskazują, podobnie jak w przypadku zginania, na jego wolniejszy rozwój w porównaniu

z wynikami pomiarów optycznych i spadku potencjału. Różnica ta sięga 5 % wartości mierzonej. W przedziale  $N_i/N_f = 0,7 \div 0,9$  wyniki pomiarów tensometrem drabinkowym wykazują natomiast większą o 2÷8 % długość pęknięć w stosunku do pozostałych metod. Analiza otrzymanych wyników wykazała również, że podczas zmiennego rozciągania parametr wymiaru pęknięcia  $a/2c$  narasta do wartości maksymalnej  $(a/2c)_{max} = 0,4$  wraz ze wzrostem liczby cykli zmian obciążenia. Największa wartość  $a/2c$  odpowiada głębokości pęknięcia równej grubości próbki.

Wyznaczone doświadczalnie trwałości zmęczeniowe przedstawiono na wykresie (rys. 7-8). Jako kryterium trwałości badanych próbek przyjęto, dla próbek zginanych, osiągnięcie przez pęknięcie, mierzone na powierzchni próbki, długości krytycznej  $2c_k$  równej 18 mm. Końcowy etap pęknięcia próbki wiąże się z silnym oddziaływaniem powierzchni bocznych badanych próbek, wywierającym wpływ na wyniki pomiarów. Wyznaczona trwałość próbek ze stali 1.4541 jest wyższa o 40-56% od trwałości próbek ze stali 1H18N9T po wieloletniej eksploatacji w przedziale amplitudy naprężeń  $\sigma_{gna} = 100-125$  MPa (rys. 7).



Rys. 7. Trwałość próbek ze stali 1H18N9T po wieloletniej eksploatacji i 1.4541 poddanych stałoaamplitudowemu zmiennemu zginaniu



Rys.8. Trwałość próbek ze stali 1H18N9T po wieloletniej eksploatacji i 1.4541 poddanych zmiennemu rozciąganiu przy amplitudzie naprężenia  $\sigma_a$  opisanej blokowym programem naprężeń

Trwałość zmęczeniową próbek, poddanych osiowemu rozciąganiu, przedstawiono na wykresie (rys. 9). Jako kryterium trwałości badanych próbek przyjęto osiągnięcie przez pęknięcie głębokości, równej grubości próbki ( $a_k=g$ ). Tak określona trwałość próbek ze stali 1.4541 jest wyższa o 24-32% od trwałości próbek ze stali 1H18N9T po wieloletniej eksploatacji w przedziale amplitudy naprężeń  $\sigma_{\max}=137,5-150$  MPa.

### **PODSUMOWANIE**

Przedstawione w pracy wyniki badań świadczą o możliwości wykorzystania metody spadku potencjału do pomiaru geometrii pęknięć półeliptycznych. Rozwój tych pęknięć w stali austenitycznej, analizowany za pomocą oceny skutków zmian pola elektrycznego w pękającej próbce, wykazuje szereg cech prezentowanych przez autorów prac dotyczących pęknięcia stali z półeliptycznymi inicjatorami pęknięcia. Zastosowana metoda, z uwagi na ograniczone wymagania aparaturowe, może być wykorzystywana w większości laboratoriów badawczych. Pewne trudności mogą wystąpić podczas realizacji badań prowadzonych w warunkach sterowania parametrami kontrolnymi maszyny zmęczeniowej, zależnymi od bieżącej długości pęknięcia, np. w badaniach przy założonej stałej wartości naprężenia rzeczywistego w przekroju poprzecznym próbki.

### **LITERATURA**

1. G. B. DeWolf: Process safety management in the pipeline industry: parallels and differences between the pipeline integrity management (IMP) rule of the Office of Pipeline Safety and the PSM/RMP approach for process facilities. *Journal of Hazardous Materials* 104, 2003.
2. G. A. Papadakis: Major hazard pipelines: a comparative study of onshore transmission accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 12, 91-107, 1999.
3. H. F. Chen, F.W. Shu: Simplified limit analysis of pipelines with multi-defects. *Engineering Structures* 23, 207-213, 2001.
4. L. Śnieżek, Cz. Goss, Mazur A., Experimental and Theoretical Investigations of Fatigue Life of Chemical Pipelines, *Archives of Civil Engineering*, No. 1, 2007.
5. S. H. Ahn, K. Ando, A. Hidaka: Fatigue crack growth and penetration behaviour in a pipe subjected to bending load. *Engineering Against Fatigue*, 73-82, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1999.
6. L. Śnieżek, Cz. Goss, Investigation Into Fatigue Life of Welded Chemical Pipelines, ECF 16 - 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, Greece, July 3-7, 2006 Abstract: pp. 173-174 (CD-6 pages).
7. J. Samuelsson: Design and analysis of welded high strength steel structures. *Nordic Industrial Fund. EMAS. Stockholm, Sweden*, 2002.
8. K. Y. Lam, Q. X. Wang, Z. Zong: A nonlinear fluid-structure interaction analysis of a near-bed submarine pipeline in a current. *Journal of Fluids and Structures* 16(8), 1177-1191, 2002.
9. D. Matko, G. Geiger, W. Gregoritz: Verification of various pipeline models. *Mathematics and Computers in Simulation* 53, 303-308, 2000.
10. M. Bergman: Stress intensity factors for circumferential surface cracks in pipes. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 18, 1155-1172, 1995.
11. M. Łubiński, W. Wojnowski, Cz. Goss: Load capacity of steel structures taking into account low cycle fatigue. *Archiwum Inżynierii Łądowej* 2, 183-204, 2002.

*Pracę wykonano w ramach Projektu Badawczego nr 5 T07B 031 25 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2003-2006 oraz Polsko-Słoweńskiego Projektu Fatigue properties of welded joints in structural steels under exploitation condition realizowanego w latach 2008-2009.*

*Одержано 12.05.2008 р.*