



Analiza propagacji pęknięć półeliptycznych w stali austenitycznej z wykorzystaniem metody spadku potencjału

LUCJAN ŚNIEŻEK, JANUSZ MIERZYŃSKI, JANUSZ TORZEWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Budowy Maszyn, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki praktycznego zastosowania metody spadku potencjału do rejestracji zmian kształtu czoła rozwijającego się pęknięcia półeliptycznego w elementach poddanych rozciąganiu i zginaniu. Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali austenitycznej stosowanej do konstrukcji rurociągów przemysłowych. Warunki badań doświadczalnych ustalono na podstawie pomiarów wartości eksploatacyjnych amplitudy naprężenia w ścianie rurociągu. Skalowanie układu pomiarowego, umożliwiające ciągły pomiar półosi elipsy przeprowadzono, wykorzystując metody: optyczną oraz barwienia. Dodatkowo, w celu weryfikacji długości pęknięć na powierzchni próbek, zastosowano tensometry drabinkowe. Uzyskane wyniki pozwalają na adaptację metody spadku potencjału do pomiaru rozwijających się pęknięć półeliptycznych, co w znacznym stopniu ułatwia analizę ich propagacji.

Słowa kluczowe: propagacja pęknięć zmęczeniowych, metoda spadku potencjału, pęknięcia półeliptyczne

Symbole UKD: 539.431

1. Wprowadzenie

Analiza doświadczalna rozwoju pęknięć zmęczeniowych w różnych materiałach konstrukcyjnych, a w szczególności w stalach, stanowi od wielu lat jeden z chętniej podejmowanych i jednocześnie jeden z ciekawszych kierunków prac badawczych prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie. Najczęściej celem tych badań jest określenie prędkości zmęczeniowego pęknięcia lub charakterystyk wzrostu pęknięcia jako funkcji liczby cykli obciążenia. Są one wykorzystywane do

bardziej obszernych analiz zmierzających między innymi do optymalnego doboru materiału na elementy maszyn pracujące w warunkach obciążeń zmiennych. Do badań eksperymentalnych wzrostu pęknięć zmęczeniowych wykorzystywane są różne metody pomiarowe. Obszerny przegląd tych metod wraz z analizą możliwości ich zastosowania i określeniem dokładności pomiarów zamieszczono między innymi w pracy [1]. Najchętniej stosowana jest metoda optyczna (bezpośrednia lub metoda replik), głównie z uwagi na jej prostotę oraz zadowalającą dokładność pomiarów. Wybór tej metody do weryfikacji wyników uzyskanych z metod pośrednich jest zalecany w większości norm dotyczących pomiarów prędkości zmęczeniowego pęknięcia. Oprócz metody optycznej, normy ASTM E 647-95a [2] i PN-84/H-04333 [3] zalecają stosowanie metod zmian podatności, ultradźwiękowej, emisji akustycznej, oporowej lub spadku potencjału. Metody te znalazły swoje aplikacje przede wszystkim w badaniach próbek zwartych i ze szczeliną centralną przechodzącą na wskroś [4-6]. Do pomiaru rozwoju pęknięć półeliptycznych wykorzystywane są najczęściej metody barwienia i krótkotrwałych obniżzeń lub wzrostów amplitudy naprężenia, pozwalające na odtworzenie kształtu czoła pęknięcia na wybranych etapach jego rozwoju [7]. Spotyka się również prace, w których wykorzystano do tego celu metodę magnetyczną [8]. Jest ona jednak stosowana jedynie do materiałów ferromagnetycznych.

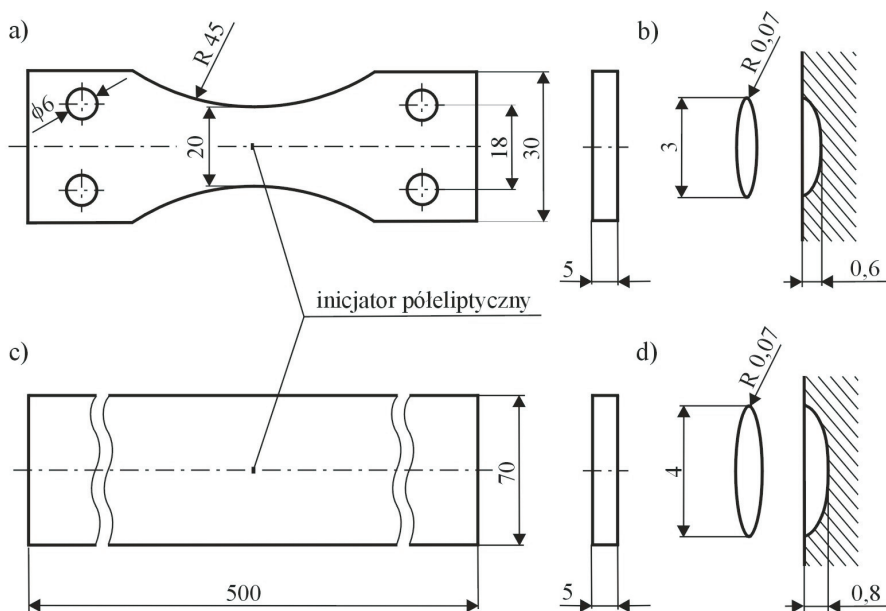
Celem tej pracy jest adaptacja metody spadku potencjału do ciągłego pomiaru podstawowych wymiarów rozwijającego się pęknięcia półeliptycznego w stali austenitycznej.

2. Przedmiot i metodyka badań

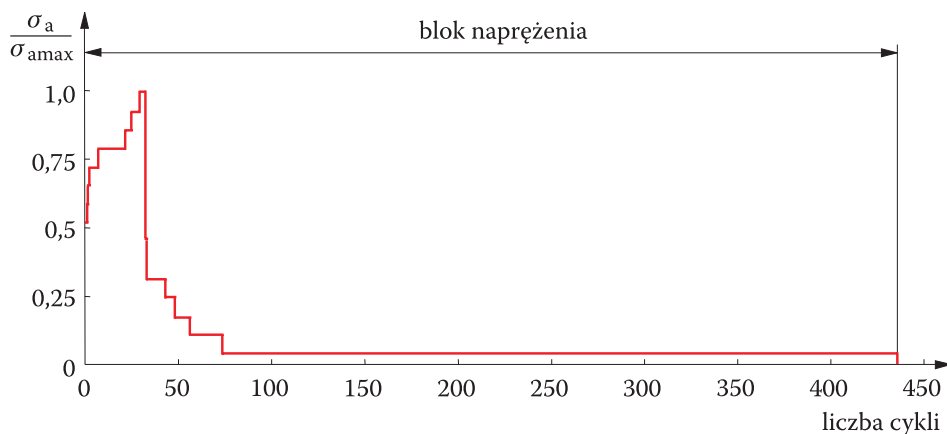
Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach ze stali 1.4541 (wg DIN: C — 0,04%, Si — 0,80%, Mo — 0,40%, Ti — 0,40%, Cr — 17,88%, Mn — 1,80%, Ni — 8,89%) dla której: $R_e = 284$ MPa, $R_m = 600$ MPa, $E = 193900$ MPa, $A = 63,6\%$ i $Z = 45,3\%$. Próbkę wycięto z arkuszy o grubości 5 mm, przeznaczonych do kształtowania i spawania odcinków rurociągów chemicznych o średnicy 600 mm.

Obszerne badania zmęczeniowe przeprowadzono dla dwóch różnych warunków obciążenia i kształtów próbek. W pierwszym etapie próbki płaskie o kształcie przedstawionym na rysunku 1a poddano płaskiemu zginaniu przy naprężeniu maksymalnym $\sigma_{max} = 170, 180, 200$ i 250 MPa dla $R = 0$. W kolejnym etapie badano próbki o kształcie i wymiarach przedstawionych na rysunku 1c w warunkach osiowego rozciągania przy amplitudzie naprężenia σ_a opisanej widmem blokowym (rys. 2). Doboru wartości naprężeń dokonano w oparciu o wyniki badań statycznych właściwości wytrzymałościowych, analizy numerycznej rozkładów naprężeń i odkształceń w obrębie wierzchołka szczeliny początkowej oraz pomiarów wartości eksploatacyjnych amplitud naprężenia w ścianie rurociągu.

W próbkach wykonano póleliptyczny inicjator pęknięcia za pomocą elektrodrążarki typu EDEE 40 firmy ZEGAR. Kształt i wymiary inicjatorów dla przyjętych próbek przedstawiono na rysunkach 1b i d. W celu ograniczenia wpływu ciepła na strukturę stali w obszarze inicjatora, maksymalną amplitudę prądu roboczego w impulsie ograniczono do 3 A, a czas trwania impulsu do 160 μ s z taką samą przerwą pomiędzy impulsami.



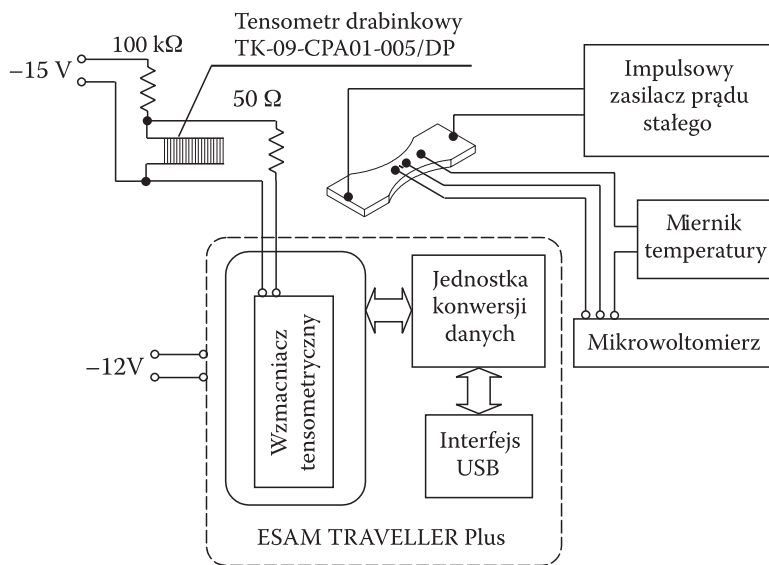
Rys. 1. Próbkę do badań rozwoju pęknięć zmęczeniowych



Rys. 2. Blokowe widmo obciążenia próbek poddanych osiowemu rozciąganiu

Pomiar 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. Wyznaczenie wymiarów pęknięcia opiera się na zasadzie, że pole elektryczne w pękającej próbce, przez którą przepływa prąd, jest funkcją geometrii próbki oraz wielkości pęknięcia. Przy zastosowaniu prądu stałego spadek napięcia mierzony w przekroju poprzecznym próbki z pęknięciem rośnie wraz ze wzrostem wymiarów tego pęknięcia. Efekt ten powstaje na skutek zmiany pola elektrycznego będącej wynikiem zaburzeń linii przepływu prądu. Zastosowanie prądu stałego zapewnia uzyskanie dwuwymiarowego pola elektrycznego, stałego na całej grubości badanej próbki.

Układ pomiarowy w metodzie spadku potencjału składa się z obwodu zasilającego i obwodu pomiarowego. Napięcie wyjściowe obwodu zasilającego wynosi od 0,1 do 50 mV dla najczęściej stosowanych wartości natężenia prądu (5÷50 A), zależnych od wymiarów i materiału badanych próbek. W obwodzie pomiarowym należy stosować przyrządy umożliwiające pomiar zmiany napięcia o wartości od 0,05 do 0,5 μV . W badaniach własnych gęstość prądu przepływającego przez próbki wynosiła 0,1 A/mm². W obwodzie pomiarowym zastosowano mikrowoltomierz cyfrowy o rozdzielczości 0,5 μV z korekcją temperaturową, umożliwiającą automatyczną rejestrację wyników pomiarów. Do weryfikacji uzyskanych tą metodą wyników pomiarów zastosowano dodatkowo tensometry drabinkowe, pozwalające



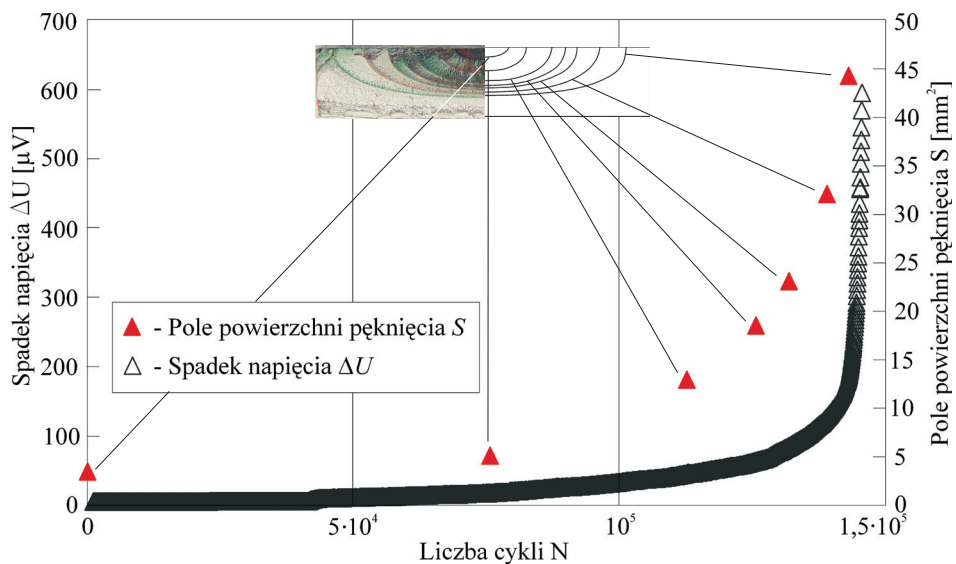
Rys. 3. Schemat stanowiska do pomiaru pęknięć półeliptycznych metodą spadku potencjału i z wykorzystaniem tensometru drabinkowego

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 rysunku 3.

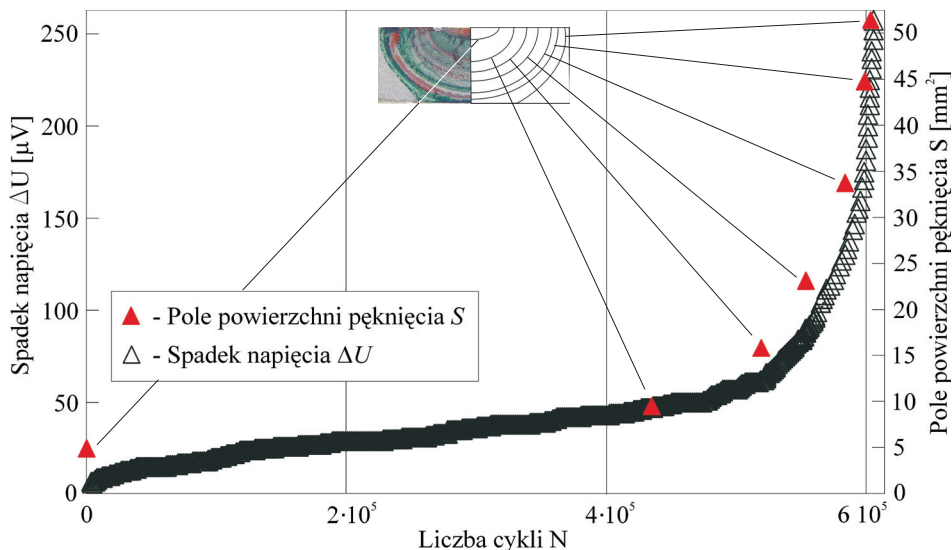
3. Wzorcowanie układu pomiarowego

Korelacja wyników otrzymanych w pomiarach spadków potencjału oraz pól powierzchni propagującego pęknięcia, wyznaczonych metodą barwienia, pozwoliły na sporządzenie przebiegów zmian tych wielkości wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Przykładowe przebiegi dla badań przeprowadzonych w warunkach zginania przy $\sigma_{\max} = 250$ MPa przedstawiono na rysunku 4. Odpowiednio, wyniki uzyskane dla próbki poddanej rozciąganiu przy $\sigma_{\max} = 275$ MPa pokazano na rysunku 5.

Ujęcie zbiorcze wyników pomiarów uzyskanych dla próbek wzorcowych umożliwiło określenie charakterystyk układu pomiarowego. Na ich podstawie opisano zmiany pola powierzchni S , długości pęknięcia półeliptycznego $2c$ na powierzchni próbki i jego głębokości a za pomocą wielomianów stopnia 2÷4. Przykładowe



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

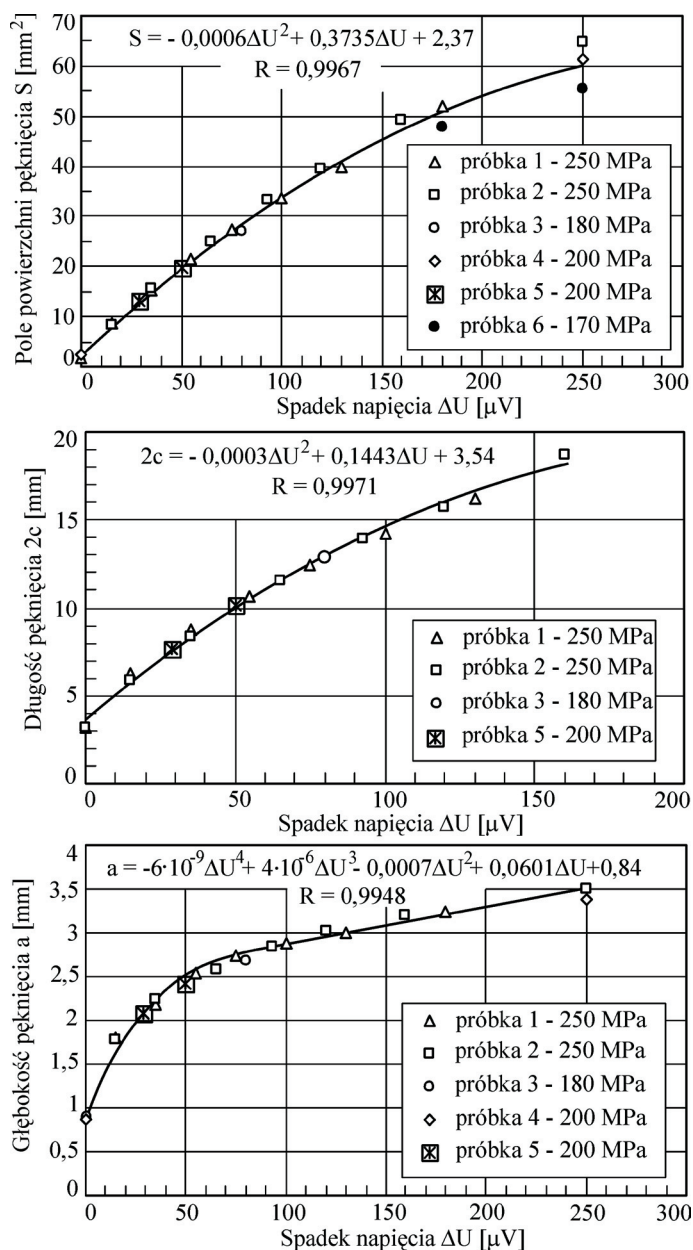


Rys. 5. Przebiegi zmian pola powierzchni pęknięcia S i spadku napięcia ΔU wyznaczone dla próbki rozciąganej przy $\sigma_{\max} = 275$ MPa

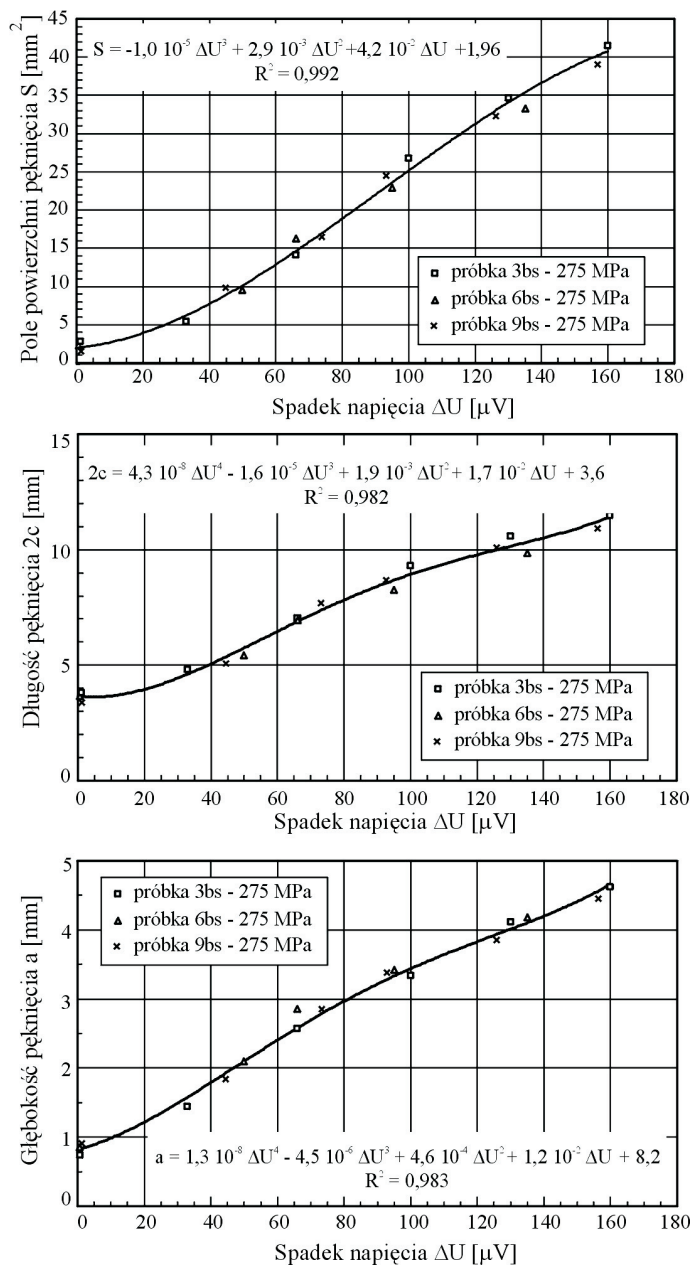
charakterystyki opracowane dla przyjętych warunków badań przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Charakterystyki przedstawione na rysunkach 6 i 7 wykorzystano do przygotowania programu komputerowego pozwalającego na automatyczną analizę cech geometrycznych propagującego pęknięcia. Zmierzone wartości spadków potencjału poddane zostały redukcji danych w celu pozbycia się krótkotrwałych zakłóceń elektrycznych, a wyniki analizy przedstawiano w postaci plików liczbowych lub wykresów.

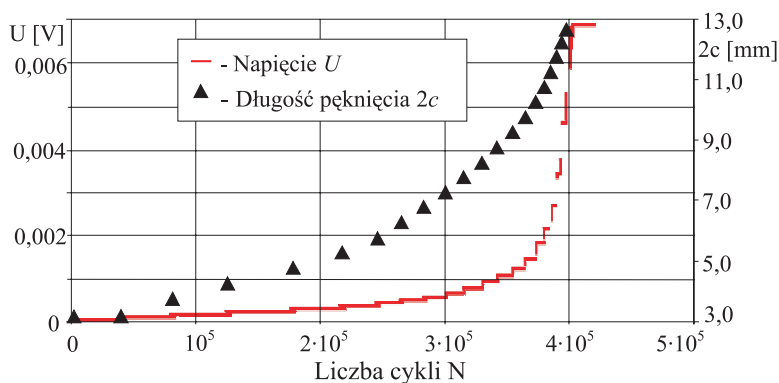
Weryfikacji wyników w zakresie długości pęknięć na powierzchni próbek uzyskanych metodą spadku potencjału dokonano na drodze badań przy użyciu tensometrów drabinkowych. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian napięcia w układach pomiarowych tensometrów drabinkowych oraz wyliczone na tej podstawie długości pęknięć $2c$ dla wybranych próbek poddanych tylko zginaniu lub tylko rozciąganiu.



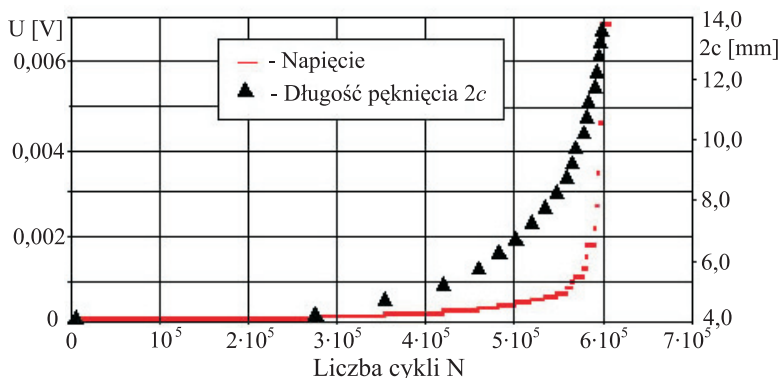
Rys. 6. Charakterystyka wzorcowania układu pomiarowego spadku potencjału w próbkach zginanych z rozwijającym się pęknięciem półeliptycznym



Rys. 7. Charakterystyka wzorcowania układu pomiarowego spadku potencjału w próbkach rozciąganych z rozwijającym się pęknięciem półeliptycznym badanych przy $\sigma_{\max} = 275$ MPa



Rys. 8. Wyniki badań długości pęknięcia na powierzchni $2c$ uzyskane za pomocą tensometru drabinkowego (próbka zginana przy $\sigma_{\max} = 250$ MPa)



Rys. 9. Wyniki badań długości pęknięcia na powierzchni $2c$ uzyskane za pomocą tensometru drabinkowego (próbka rozciągana przy $\sigma_{\max} = 275$ MPa)

4. Wyniki badań doświadczalnych

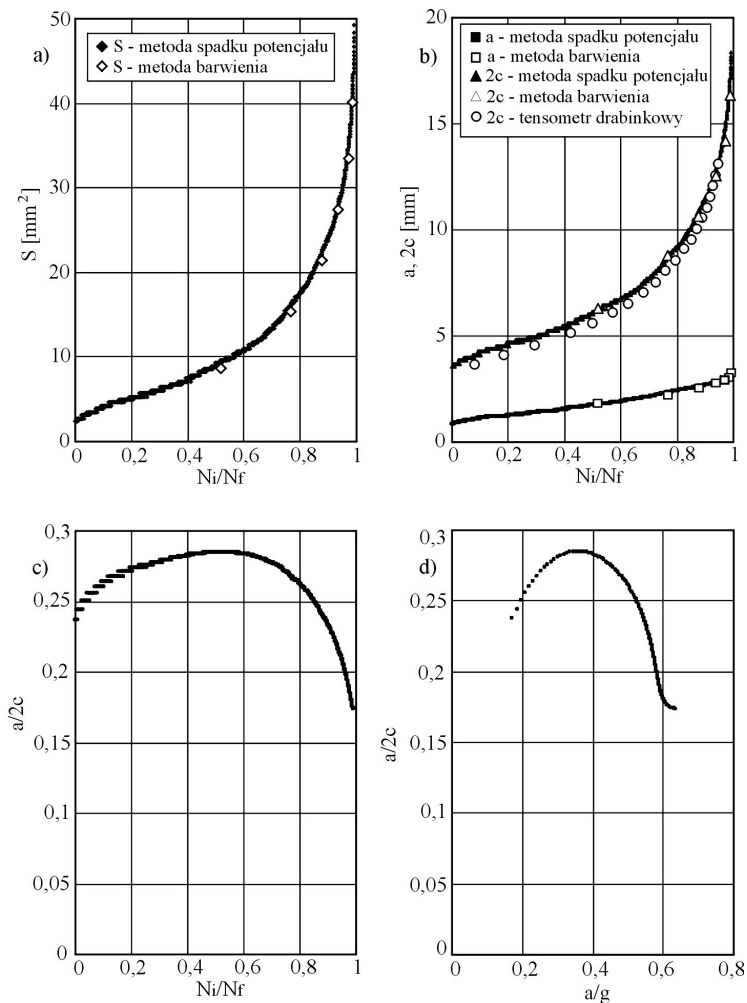
Przykładowe przebiegi zmian pola powierzchni S oraz wymiarów $2c$ i a pęknięcia półeliptycznego dla ustalonej liczby cykli N uzyskane na podstawie pomiaru spadku potencjału w zginanej próbce badanej przy $\sigma_{\max} = 250$ MPa przedstawiono na wykresach (rys. 10). Wybrano przebiegi zmian $S = f(N_i/N_f)$, $a, 2c = f(N_i/N_f)$, $a/2c = f(N_i/N_f)$ 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 wykresach z rysunków 10a i 10b punktami niezaciemnionymi zaznaczono wyniki pomiarów uzyskane metodą barwienia oraz za pomocą tensometrów drabinkowych. Rejestrowane za pomocą tensometru drabinkowego przyrosty pęknięcia powierzchniowego (rys. 10b) wska-

zują 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 $N_i/N_f = 0÷0,4$ oraz maleją wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. W przedziale $N_i/N_f = 0,8÷0,9$ 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 pomiaru przyrostów długości pęknięć, wskazują jednak na konieczność uwzględnienia wpływu zastosowanej metodyki na otrzymane wyniki. W badaniach własnych stali austenitycznej uwzględniono pewną bezwładność zrywania poszczególnych drabinek tensometru, a otrzymane wyniki posłużyły jedynie do celów porównawczych.

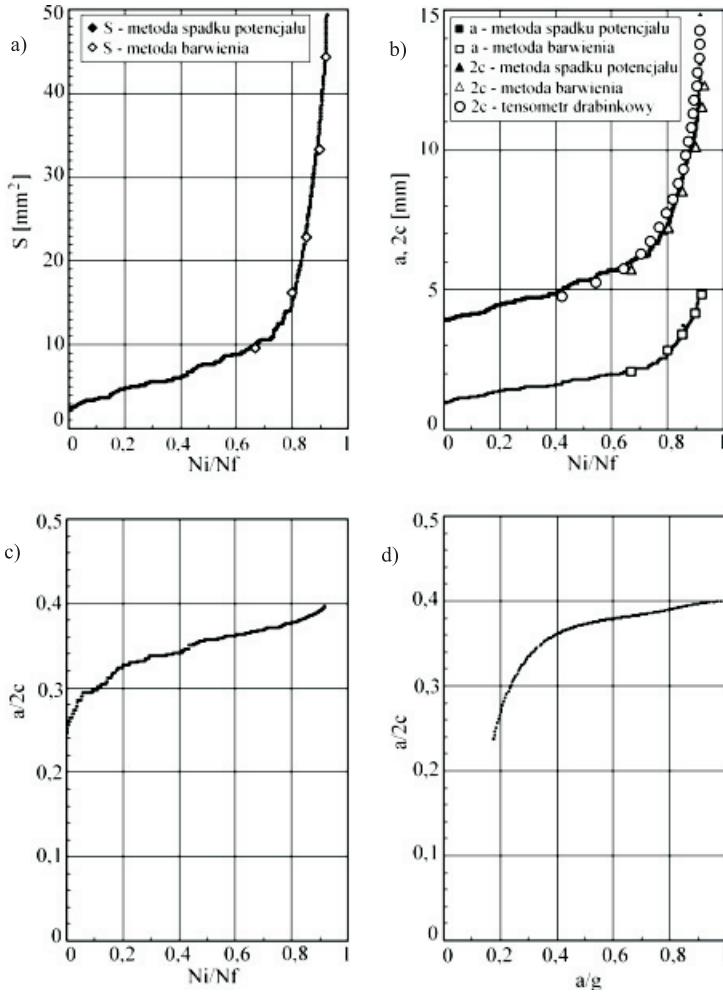
Uzyskane układy punktów pomiarowych i obliczeniowych wykazują cechy prezentowane w publikacjach poświęconych zagadnieniu propagacji pęknięć półeliptycznych [9, 10]. Analiza otrzymanych wyników wykazała między innymi, że podczas zmiennego zginania próbek badanych przy $\sigma_{\max} = 250$ MPa, parametr wymiaru pęknięcia $a/2c$ narasta do wartości maksymalnej $(a/2c)_{\max} = 0,28$ wraz ze wzrostem liczby cykli zmian obciążenia pęknięcia w przedziale $N_i/N_f = 0÷0,5$ (rys. 10c). 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. 10d).

Analogiczne wykresy opracowane dla próbki poddanej osiowemu rozciąganiu przy $\sigma_{\max} = 275$ MPa przedstawiono na rysunku 11.

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 (rys. 11b). Różnica ta sięga 5% wartości mierzonej. W przedziale $N_i/N_f = 0,7÷0,9$ 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 próbki badanej przy $\sigma_{\max} = 275$ MPa, parametr wymiaru pęknięcia $a/2c$ narasta do wartości maksymalnej $(a/2c)_{\max} = 0,4$ wraz ze wzrostem liczby cykli zmian obciążenia (rys. 11c). Największa wartość $a/2c$ odpowiada głębokości pęknięcia równej grubości próbki (rys. 11d).



Rys. 10. Przebiegi zmian wymiarów pęknięcia półeliptycznego wyznaczone metodami spadku potencjału, barwienia i za pomocą tensometrów drabinkowych w zginanej próbce badanej przy $\sigma_{\max} = 250$ MPa; objaśnienie w tekście



Rys. 11. Przebiegi zmian wymiarów pęknięcia półeliptycznego wyznaczone metodami spadku potencjału, barwienia i za pomocą tensometrów drabinkowych w rozciąganej próbce badanej przy $\sigma_{\max} = 275$ MPa; objaśnienie w tekście

5. 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.

Pracę wykonano w ramach Projektu Badawczego nr 5 T07B 031 25 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2003-2006.

Artykuł wpłynął do redakcji 15.11.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2006 r.

LITERATURA

- [1] K. WERNER, *Pomiary pęknięć i odkształceń*, WPK Jacka Skalmierskiego, Katowice, 2003, 128-132.
- [2] *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM E 647-95a.
- [3] *Metoda badania prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego przy stałej amplitudzie obciążenia*, PN-84/H-04333.
- [4] N. B. McFADYEN, R. BELL, O. VOSIKOVSKY, *Fatigue crack growth of semielliptical surface cracks*, International Journal of Fatigue, vol. 12, 1990, 43-50.
- [5] W. D. DOVER, R. COLLIN, D. M. MICHAEL, *The use of AC-field measurements for crack detection and sizing in air and underwater*, Transactions of the Royal Society, vol. 320, London, 1986, 217-283.
- [6] R. F. HALL, B. E. POWELL, *The growth of corner cracks by fatigue*, International Journal of Fatigue, vol. 5, 1997, 429-435.
- [7] P. S. SONG, B. C. SHEU, Y. L. SHIEH, *Prediction of semi-elliptical surface crack growth in 2024-T4 aluminium alloy*, Pressure Vessels and Piping, vol. 79, 2002, 273-278.
- [8] Z. BIERNACKI, K. WERNER, *The investigation of fatigue cracks in higher strength steels by using system with the magnetic comparator*, International Conference „MECHATRONICS 2000”, vol. 2, Warszawa, 2000, 431-434.
- [9] A. LIKOWSKI, *Badania prędkości pęknięcia i kształtu pęknięć w elementach ze stali o podwyższonej wytrzymałości 20G2ANbY przy zmiennym zginaniu*, praca doktorska, WAT, Warszawa, 1981.
- [10] K. WERNER, *Analiza rozwoju półeliptycznych pęknięć zmęczeniowych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej — Seria Monografie, nr 70, Częstochowa, 2000.

L. ŚNIEŻEK, J. MIERZYŃSKI, J. TORZEWSKI

Analysis of semi-elliptic cracks propagation in austenitic steel using EPD method

Abstract. The paper deals with practical application of the electric potential difference procedures (EPD) in order to record the changes of the front shape of an elliptic crack extending in the specimens under cyclic variable amplitude tension and bending. The material used was the austenitic steel which usually utilizes the pipeline structure construction. Load spectrum performs the transformed exploitive stress amplitudes acting on the pipeline wall. The calibration of the measure system enabling continuous recording of the elliptic semi-axes was made by means either of optical or dyeing methods. Additionally, the crack propagation patters were applied in order to measure surface rack length. The obtained results confirm the capacity of the EPD method which can be used to record the semi-elliptic crack growth. This mentioned method improves significantly the analysis of the crack propagation.

Keywords: Fatigue crack propagation, electric potential difference procedures, semi-elliptic cracks

Universal Decimal Classification: 539.431