MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-M/2010
ZESZYT 9
ROK 107
ISSUE 9
YEAR 107

LUCJAN ŚNIEŻEK*, VOLODYMYR HUTSAYLYUK*, VLADIMIR GLIHA**,
TOMAZ VUHERER**, SŁAWOMIR STĘPEŃ***

ANALIZA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ RUROCIĄGU ZE STALI AUSTENITYCZNEJ

FATIGUE LIFE ANALYSIS OF PIPELINES MADE OF THE AUSTENITIC STEEL

Streszczenie

Artykuł dotyczy badań zmian właściwości wytrzymałościowych statycznych i cyklicznych oraz struktury stali zastosowanych do konstrukcji rurociągu po wieloletniej jego eksploatacji. Zakres niniejszej pracy obejmuje także badania porównawcze trwałości zmęczeniowej elementów modelowych wyciętych z obiektów rzeczywistych oraz poznanie charakteru pękania elementów modelowych z karbem półeliptycznym odwzorowującym wadę materiału rodzimego z uwzględnieniem spiętrzenia naprężeń w miejscu inicjacji pęknięcia. W toku przeprowadzonych badań opracowano probabilistyczny model propagacji pęknięć zmęczeniowych.

Słowa kluczowe: *rurociągi chemiczne*, *stal austenityczna*, *trwałość zmęczeniowa*, *pęknięcia półeliptyczne*

Abstract

The intended aim of the paper is to investigate into both static and cyclic mechanical properties and structures of steels used to build pipelines, after the many-years' operational use thereof. The scope of work comprises also: trade-off studies of lives of model components cut out from real objects and recognition of the nature cracking of model components with semi-elliptic notches which represent defects in the native material or the weld, with account taken of stress concentrations where a crack has been initiated. In the course of the study a probabilistic model of fatigue crack propagation has been formulated to provide probability density distributions of crack lengths and areas.

Keywords: *chemical pipelines*, *austenitic steel*, *fatigue life*, *semi-elliptical fatigue crack*

* Dr inż. Lucjan Śnieżek, dr inż. Volodymyr Hutsaylyuk, Katedra Budowy Maszyn, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna.
** Dr inż. Vladimir Gliha, dr inż. Tomaz Vuherer, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet w Maribor.
*** Dr inż. Sławomir Stępień, Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki, Wojskowa Akademia Techniczna.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Rurociągi przemysłowe, a w szczególności rurociągi chemiczne, naziemne eksploatowane w obrębie zakładów chemicznych, zasługują na wyjątkową uwagę ze względu na zagrożenie, jakie stwarzają dla ludzi i środowiska naturalnego. Zagrożenie wynika z możliwości przedostania się do atmosfery mediów niebezpiecznych przesyłanych pomiędzy wydziałami produkcyjnymi oraz w trakcie ich magazynowania. Świadczą o tym liczne zapisy w bazach danych o awariach rurociągów. W bazie danych PCFACTS [1] odnotowano na przestrzeni dwóch lat dane o 720 wypadkach, jakie zdarzyły się w świecie, a w bazie *The Accident Database* [2] zapisano ponad 80 takich zdarzeń. Wymusza to, oprócz niezwykle skrupulatnego monitorowania podstawowych parametrów eksploatacyjnych oraz diagnozowania stanu newralgicznych węzłów konstrukcyjnych rurociągu, okresową weryfikację struktury i własności wytrzymałościowych w celu identyfikacji postępującej degradacji materiału konstrukcyjnego.

Na bezawaryjność pracy rurociągów zasadniczy wpływ wywiera charakter zmian i wielkość obciążeń eksploatacyjnych, materiał oraz oddziaływanie zewnętrzne otoczenia i czynników przesyłanych. Przyczynami uszkodzeń rurociągów są między innymi: korozja, błędy konstrukcyjne oraz karby i wady spawalnicze. Te ostatnie, związane z wszelkimi nieciągłościami oraz zmianą kształtu przekroju rurociągu, stanowią potencjalne miejsca pękania z uwagi na obecność spiętrzenia naprężenia w strefie wpływu karbu. Z tego względu niezwykle istotnym jest określenie wpływu obciążeń i warunków eksploatacji prowadzących do inicjacji i rozwoju pęknięć zmęczeniowych w obszarach o największym wytężeniu materiału.

W trakcie 5,5-letniej eksploatacji analizowanego rurociągu prowadzono rejestrację wartości ciśnienia przesyłanego medium w postaci 10,5 procentowego tlenku azotu o temperaturze 436 K. Na tej podstawie sporządzono wykresy zmian ciśnienia p_w i wyliczonej amplitudy naprężenia w ściance rurociągu σ_a. Zapisu pomiarów dokonywano każdego dnia o godzinie 6^{00} ze względu na występowanie w tym czasie maksymalnych obciążeń rurociągu. Na tej podstawie opracowano histogram, stosując do zliczania cykli metodę spływającego deszczu (*rein flow*). W trakcie opracowania histogramu stwierdzono wystąpienie w ściance rurociągu naprężeń zmiennych wywołanych obciążeniami rozruchowymi i eksploatacyjnymi związanymi ze stanami nieustalonymi i ustalonymi, w różnych okresach eksploatacji rurociągu. Opracowane widmo amplitudy naprężeń obwodowych w ściance rury było podstawą do wyznaczenia blokowego programu naprężeń wykorzystanego podczas badań doświadczalnych.

2. Struktura i właściwości wytrzymałościowe

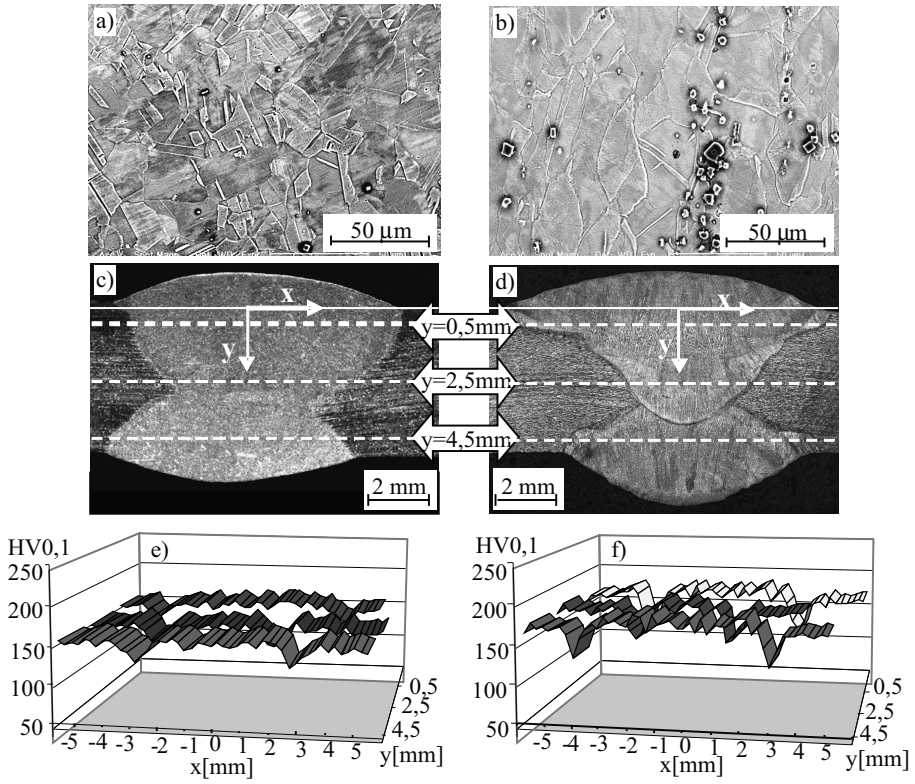
Ocena stanu konstrukcji rurociągu oraz jego trwałości nie mogą być rozpatrywane w oderwaniu od aktualnych cech materiałowych związanych ze zmianami struktury i właściwości wytrzymałościowych. Problem ten dotyczy zarówno etapu projektowania, jak i oceny stanu instalacji rurociągowych eksploatowanych od kilku lub kilkunastu lat [3–6].

Rurociągi chemiczne wykonuje się najczęściej z austenitycznych stali kwasoodpornych typu 18/8, których właściwości użytkowe są silnie zdeterminowane uwarunkowaniami strukturalnymi. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego materiału

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

rur w stanie dostawy odpowiadają gatunkowi stali 1.4541. Struktura badanego stopu (rys. 1a, 1b) składa się z ziaren austenitu o średniej wielkości 20 μm z licznymi bliźniakami rekrystalizacji powstałymi podczas wytwarzania elementów rurociągu za pomocą walcowania na gorąco. Analiza struktury i składu chemicznego materiału po wieloletniej eksploatacji rurociągu wykazała zauważalną fluktuację zawartości poszczególnych pierwiastków stopowych. W granicach międzyziarnowych tej stali obserwuje się pasmowe wydzielenia ferrytu oraz liczne, punktowe wtrącenia azotków tytanu (rys. 1b).

Zróżnicowanie składu chemicznego i struktury w obrębie połączeń spawanych (rys. 1 c–d) znalazło swoje odzwierciedlenie w wartościach i rozkładach mikrotwardości w obrębie spoin. Na rys. 1 e–f przedstawiono wyniki pomiarów mikrotwardości połączeń spawanych rurociągów nowych (rys. 1e) i po eksploatacji (rys. 1f). We wszystkich badanych próbkach obserwowano spadek mikrotwardości w strefie wpływu ciepła, obejmującej wąski obszar o szerokości 200–350 μm. Mikrotwardość SWC wynosi od 120–130HV0.1. Mikrotwardość spoin rurociągów eksploatowanych sięga 200HV0.1 i jest wyższa od rurociągów nowych, w których zmierzono 150–160HV0.1.



Rys. 1. Struktura i mikrotwardość materiału rodzimego i złączy spawanych stali 1.4541 zastosowanej do konstrukcji rurociągów nowych (a, c, e) i rurociągu po wieloletniej eksploatacji (b, d, f)

Fig. 1. Structure and microhardness virgins material welding joint steel 1.4541 used making new pipelines (a, c, e) and pipelines after long-time exploitation (b, d, f)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych próbek wykonanych ze stali zastosowanych do konstrukcji badanych rurociągów, z uwzględnieniem wpływu wieloletniej eksploatacji, przedstawiono w tabeli 1. Badania wytrzymałościowe uzupełniono o badania próbek wykonanych ze stali 1.4541 w stanie wyjściowym, z tego samego wytopu co stal zastosowana do konstrukcji rurociągu po wieloletniej eksploatacji. Niewielkie wycinki arkuszy stali zachowano w zakładzie budowy aparatury chemicznej do chwili obecnej.

Tabela 1

Właściwości wytrzymałościowe materiału rodzimego i połączeń spawanych badanych próbek

Stal 1.4541	Rodzaj próbek	$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [MPa]	A [%]	Z [%]	U [J/cm^2]	
							Mat. rodzimy	SWC
po wieloletniej eksploatacji	Bez spoiny	325	638	178,5	51,5	40,7	130	127
	Ze spoiną	270	490	197,1	21,4	18,3		
w stanie „wyjściowym" zastosowana do konstrukcji rurociągu eksploatowanego	Bez spoiny	291	612	192,5	58,8	43,2	208	198
zastosowana do konstrukcji rurociągu nowego	Bez spoiny	284	600	193,9	63,6	45,3	226	224
	Ze spoiną	345	584	253,4	50,1	37,2		

Stwierdzono m.in., że w wyniku wieloletniej eksploatacji badanej stali nastąpił wzrost umownej granicy plastyczności R_e (z 291 MPa do 325 MPa) i granicy wytrzymałości R_m (z 612 MPa do 638 MPa). Obniżeniu uległy natomiast: wydłużenie A_5 (z 58,8% do 51,5%), przewężenie Z (z 43,2% do 40,7%), moduł Younga E (z 192,5 GPa do 178,5 GPa) oraz udarność U (z 208 J/cm^2 do 130 J/cm^2). Stal 1.4541 zastosowana do konstrukcji nowego rurociągu wykazuje właściwości wytrzymałościowe zbliżone do stali zastosowanej do konstrukcji rurociągu eksploatowanego. Obserwowane zmiany należy wiązać raczej z oddziaływaniem chemicznym przesyłanego, którego skutki obserwowano podczas badań struktury i mikroanalizy składu chemicznego. Stwierdzono m.in. obecność licznych, warstwowych wydzieleń azotków tytanu będących potencjalnymi czynnikami strukturalnymi tworzącymi lokalne mikroogniwa galwaniczne, sprzyjające powstawaniu i rozwojowi wżerów korozyjnych. Istotne zmiany zaszły również na powierzchni roboczej materiału rury bezpośrednio stykającej się z agresywnym medium. Zaobserwowano tu ubytki materiału będące efektem złożonych zjawisk erozyjno-korozyjnych. Uszkodzenia powierzchni materiału rury zlokalizowano w miejscach występowania, w granicach ziaren austenitycznej osnowy, wydzieleń azotków tytanu. Oddziaływanie przesyłanej cieczy wspomaga jednocześnie procesy destrukcji materiału rury, atakując miejsca rozwoju korozji wżerowej i powodując wypadanie pojedynczych ziaren stali.

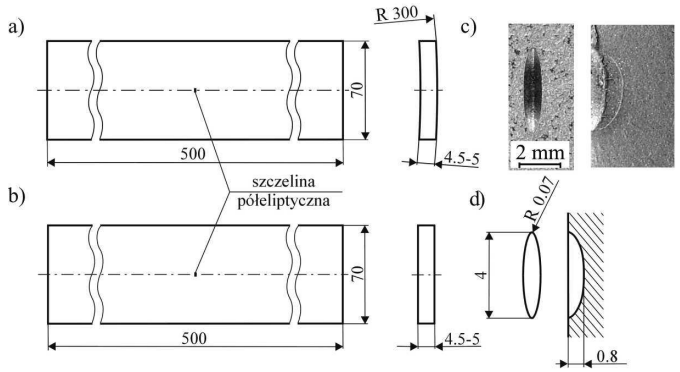
3. Przedmiot i metodyka badań

Badane odcinki spawanego, napowietrznego rurociągu przemysłowego o średnicy ϕ600 wykonano z blach o grubości 5 mm. Ukształtowane rury połączono za pomocą spoin czołowych dwustronnych, dokonując wycięcia grani a następnie podpawania. Z takich

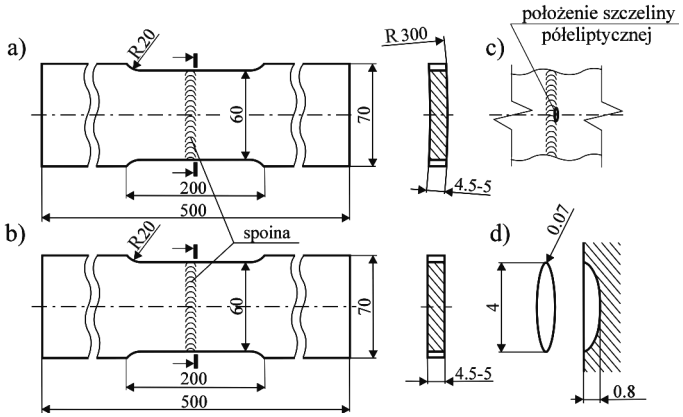
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

obiektów wycięto elementy modelowe o wymiarach przedstawionych na rys. 2a i 3a. Do badań porównawczych wykorzystano również próbki wycięte z arkuszy blachy nie poddanych procesowi kształtowania rur (rys. 2b i 3b). Wyboru tego dokonano na podstawie wyników analizy numerycznej stanu odkształceń i naprężeń w próbkach płaskich, wyciętych z arkuszy blachy o grubości 5–7 mm przy założonych obciążeniach, które wykazały nieznaczne, 1,8–2,3%, różnice wartości maksymalnych i zasięgu spiętrzenia naprężeń względem wartości wyznaczonych dla próbek wyciętych z rurociągu.

W próbkach wykonano za pomocą elekrodrążarki półeliptyczne inicjatory pękania. W celu ograniczenia wpływu powstającego podczas drążenia ciepła na strukturę stali w obszarze inicjatora, maksymalną amplitudę prądu roboczego w impulsie ograniczono do 3 A, a czas trwania impulsu do 160 μs z taką samą przerwą pomiędzy impulsami. Przyjęto stosunek małej półosi elipsy a_o do półosi dużej c_o równy 0,2.



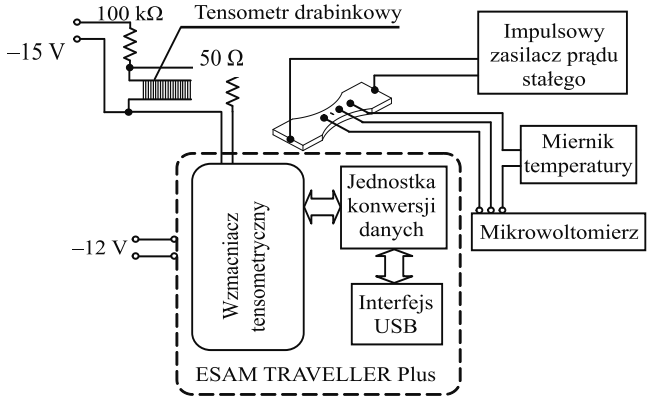
Rys. 2. Próbki do badań rozwoju pęknięć zmęczeniowych; wymiary próbek (a, b), kształt i wymiary szczeliny półeliptycznej (c, d)
Fig. 2. Tests specimens for research fatigue crack growth: size specimen (a,b) form and size semi-elliptical notch (c,d)



Rys. 3. Próbki spawane do badań rozwoju pęknięć zmęczeniowych; wymiary próbek (a, b), położenie (c) i wymiary szczeliny półeliptycznej (d)
Fig. 3. Welded tests specimens for research fatigue crack growth: size specimen (a, b), position (c) and size semi-elliptical notch (d)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dla potrzeb realizacji niniejszego artykułu opracowano i zweryfikowano metodykę oraz zbudowano stanowisko pomiarowe umożliwiające rejestrację przyrostów długości pęknięć w oparciu o metodę spadku potencjału. 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. Schemat układu zastosowanego do pomiaru przyrostu pęknięć półeliptycznych metodą spadku potencjału i z użyciem tensometru drabinkowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat układu do pomiaru pęknięć półeliptycznych metodą spadku potencjału, z wykorzystaniem tensometru drabinkowego
Fig. 4. Scheme system for measured semi-elliptical cracks by electric potential difference procedures (EPD) which used crack propagation patters

4. Badania trwałości zmęczeniowej

Badania doświadczalne przeprowadzono w warunkach obciążeń zmiennych, opisanych blokowym programem naprężeń (BPN). Dane niezbędne do opracowania blokowego programu naprężeń zawarto w tabeli 2.

Tabela 2

Zestawienie wartości amplitud naprężeń do opracowania blokowego programu naprężeń

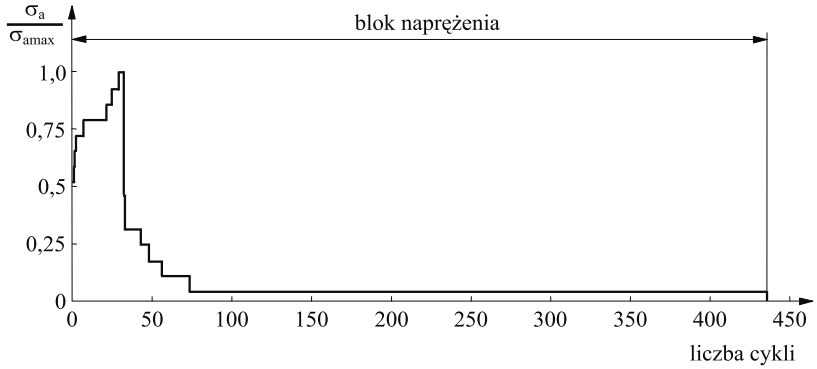
	Poziomy naprężeń dla liczby przedziałów klasowych k = 16															
σ_a [MPa]	22,0	24,8	27,5	30,3	33,0	35,8	38,5	41,3	44,0	19,3	16,5	13,8	11,0	8,3	5,5	2,8
Liczba cykli	2	3	1	3	15	43	10	13	9	–	–	31	15	25	52	219
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Na rys. 5 przedstawiono sekwencję poziomów naprężeń wchodzących w skład jednego bloku programu naprężeń. Podczas jego opracowania przyjęto sekwencję poziomów stopniowo rosnącą – od amplitud średnich w pierwszej części z jednoczesnym zachowaniem jednak nagłych, malejących sekwencji w części drugiej. W pierwszej części oddano charakter tzw. najeżdżania na zadane parametry pracy instalacji, a w drugiej zaś ujęto

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

wyłączenia instalacji zamierzone i niezamierzone. Przez takie ułożenie programu blokowego naprężeń starano się oddać charakter losowy pracy, szczególnie wyłączeń instalacji stanowiących istotny problem decydujący o wstrzymaniu produkcji (50% przestojów zawiera znamiona przestojów awaryjnych).

W celu skrócenia czasu badań przyjęto liczbowe przeliczniki wartości amplitud naprężeń w badanych próbkach σ_{ap}, zachowując stałą wartość stosunku σ_{ap}/σ_a oraz $R_i = 0$ na poszczególnych poziomach obciążenia. Badania doświadczalne przeprowadzono stosując blokowe programy naprężeń, w których $\sigma_{a\max}$=125 MPa, 137,5 MPa, 150 MPa, 162,5 MPa i 175 MPa.



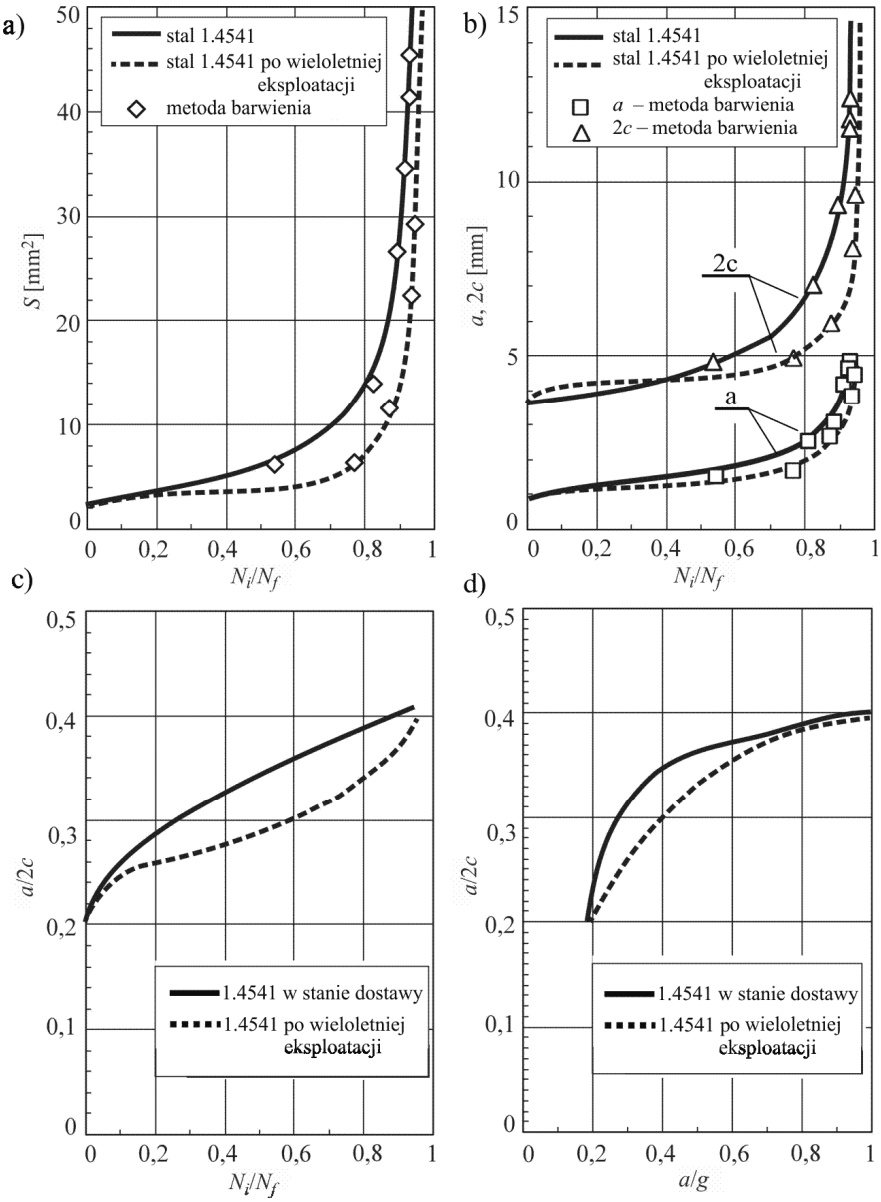
Rys. 5. Schemat blokowego programu naprężeń
Fig. 5. Scheme of block program loading

Wyniki badań zmęczeniowych posłużyły do sporządzenia odpowiednich wykresów w postaci $S = f(Ni/N_f)$, a, $2c = f(Ni/N_f)$, $a/2c = f(Ni/N_f)$, i $a/2c = f(a/g)$. Spośród licznej grupy opracowanych wykresów na rys. 6 przedstawiono wybrane wyniki badań próbek o grubości g = 5,0 mm, wykonanych ze stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji i stali zastosowanej na rurociągi nowe, badanych przy $\sigma_{a\max}$ = 150 MPa. Na wykresach przyrostów pola powierzchni pęknięcia S, długości pęknięcia $2c$ mierzonej na powierzchni próbki i jego głębokości a, punktami niezaciemnionymi zaznaczono wyniki pomiarów uzyskane za pomocą metodą barwienia. Analizie poddano zmiany wymiarów w przedziale odpowiadającym osiągnięciu przez czoło pęknięcia głębokości a równej grubości próbki g. Otrzymano zadawalającą zgodność wyników pomiarów długości pęknięć uzyskanych za pomocą metod spadku potencjału i barwienia.

Analiza przebiegu propagacji półeliptycznego pęknięcia w próbce wykonanej ze stali po wieloletniej eksploatacji wykazała między innymi, że podczas zmiennego rozciągania parametr wymiaru pęknięcia $a/2c$ narasta do wartości maksymalnej $(a/2c)_{\max}$ = 0,39, odpowiadającej osiągnięciu przez pęknięcie głębokości równej grubości próbki (a/g = 1). Proces ten przebiega przez 93% liczby cykli do zniszczenia próbki (N_i/N_f = 0,93).

W próbce wykonanej ze stali 1.4541, zastosowanej do konstrukcji nowych odcinków rurociągu, stwierdzono bardziej równomierny przyrost wymiarów pęknięcia, w całym przedziale jego rozwoju. Maksymalna wartość parametru $a/2c$ = 0,41 odpowiada osiągnięciu przez pęknięcie głębokości równej grubości próbki. Pęknięcie na wskroś zaobserwowano po liczbie cykli zmian obciążenia odniesionej do liczby cykli do zniszczenia próbki N_i/N_f = 0,90.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

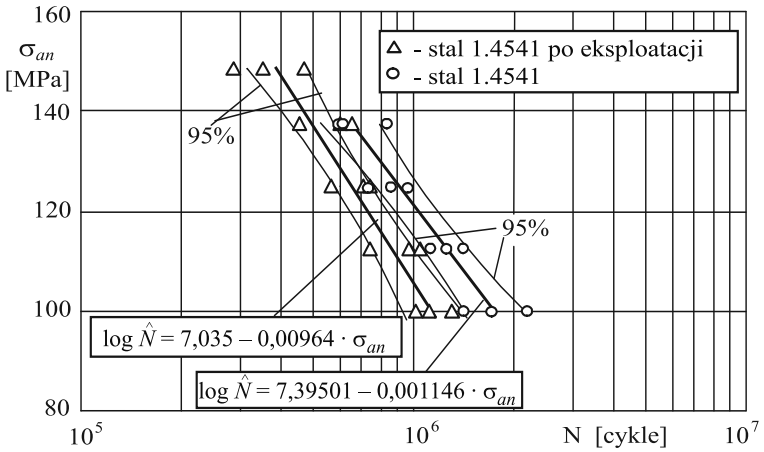


Rys. 6. Przebiegi zmian wymiarów pęknięcia półeliptycznego w próbkach ze stali 1.4541 zastosowanej do konstrukcji rurociągu nowego i po wieloletniej eksploatacji, badanych przy $\sigma_{a\max}$ = 137,5 MPa

Fig. 6. Changed measured semi-elliptical crack in specimens of steel 1.4541 used making new pipelines and pipelines after long-time exploitation tested by $\sigma_{a\max}$=137,5 MPa

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Zaobserwowane różnice w przebiegach parametru wymiaru pęknięcia $a/2c$, przedstawione na wykresach (rys. 6), znalazły swoje odzwierciedlenie na przebiegach zmian głębokości pęknięcia półeliptycznego w zależności od jego długości na powierzchni próbki $a = f(2c)$. W początkowym etapie rozwoju pęknięcia, w obu przypadkach, dominuje przyrost głębokości pęknięcia, do chwili osiągnięcia wymiaru $a = 1{,}0 - 1{,}1$ mm (co odpowiada $N_i/N_f = 0{,}1 - 0{,}18$). Dalszy rozwój pęknięcia charakteryzuje zbliżona do liniowej zależność wymiarów pęknięcia w dwóch rozpatrywanych kierunkach, przy czym w stali 1.4541 w stanie dostawy zaobserwowano wolniejszy niż w stali po eksploatacji rozwój pęknięcia w głąb materiału. W elementach ze stali po eksploatacji, po przekroczeniu głębokości $a = 3{,}6$ mm – co odpowiada $(a/2c)_{max} = 0{,}39$, wyraźnie wzrasta prędkość rozwoju pęknięcia na powierzchni. Tego zjawiska nie stwierdzono podczas badań elementów ze stali 1.4541 w stanie dostawy.



Rys. 7. Trwałość zmęczeniowa próbek spawanych z półeliptycznymi inicjatorami pękania, wyciętych z rurociągu nowego i eksploatowanego
Fig. 7. Fatigue resistance welded specimens which semi-elliptical initiators cracks cutting from new and long-time exploited pipelines

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek ze spoinami oraz półeliptycznymi szczelinami, naciętymi na granicy lica i materiału rodzimego próbki, przedstawiono w postaci wykresu na rys. 7.

5. Deterministyczny i probabilistyczny opis rozwoju pękania i trwałości zmęczeniowej

W zaproponowanym opisie rozwoju pęknięć półeliptycznych założono, że zjawisko pękania można zamodelować w oparciu o współczynnik intensywności naprężeń K.

Do opisu propagacji pęknięcia przyjęto wzór w postaci ogólnej:

$$\frac{dS}{dN} = F(\Delta K_1, \Delta K_2) \tag{1}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

$S = \pi l_1 l_2$ – pole powierzchni pęknięcia,

l_1, l_2 – półosie elipsy, jednoznacznie określające jej kształt,

$\Delta K_1 = M_{k1}\Delta\sigma\sqrt{\pi\, l_1}$, $\Delta K_2 = M_{k2}\Delta\sigma\sqrt{\pi\, l_2}$ – zakresy współczynnika intensywności naprężeń dla dwóch, prostopadłych kierunków propagacji pęknięcia;

$\Delta\sigma$ – zakres naprężenia,

F – pewna założona funkcja,

M_{k1}, M_{k2} – współczynniki poprawkowe uwzględniające skończoność wymiarów elementu dla dwóch, prostopadłych kierunków propagacji pęknięcia.

W ogólnym przypadku opisu pęknięcia typu eliptycznego:

$$F(\Delta K_1, \Delta K_2) = f(l_1, l_2)\left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \tag{2}$$

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej postać funkcji F, można zapisać:

$$\frac{dS}{dN} = \pi\left[l_2 \frac{dl_1}{dN} + l_1 \frac{dl_2}{dN}\right] = 2\pi l_R C'_R \left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \tag{3}$$

Analizując zależność (3), można wprowadzić nowe funkcje $f_1(l_1, l_2)$ oraz $f_2(l_1, l_2)$ tak, aby prawdziwe były poniższe zapisy:

$$\begin{cases} \pi l_1 \dfrac{dl_2}{dN} = f_1(l_1, l_2)\left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \\ \pi l_2 \dfrac{dl_1}{dN} = f_2(l_1, l_2)\left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \end{cases} \tag{4}$$

Przy czym

$$f_1(l_1, l_2) + f_2(l_1, l_2) = 2\pi l_R C'_R = 2\pi C'_R \sqrt{l_1 l_2} \tag{5}$$

Aby wyznaczyć zależności na prędkości przyrostu współrzędnych szczeliny, należy przyjąć odpowiednią postać funkcji $f_1(l_1, l_2)$ oraz $f_2(l_1, l_2)$, co wiąże się również z postawieniem odpowiedniej hipotezy dotyczącej powiązania ze sobą obu kierunków propagacji pęknięcia. Proponuje się nałożyć więzy na prędkości przyrostu szczeliny w obu kierunkach. Wprowadzając oznaczenia:

$$V_1 = \frac{dl_1}{dN}, \quad V_2 = \frac{dl_2}{dN} \quad \text{i} \quad k = \frac{V_1}{V_2} = \frac{c'_1}{c'_2} \tag{6}$$

otrzymujemy:

$$\begin{cases} \pi\, l_1 \dfrac{V_1}{k} = f_1(l_1, l_2)\left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \\ \pi\, l_2 k V_2 = f_2(l_1, l_2)\left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \end{cases} \tag{7}$$

Odpowiada to sytuacji, w której pęknięcie rozwija się równomiernie w obu kierunkach. Przyjmując $C'_R = \sqrt{c'_1 c'_2}$, zależności (4) przyjmą postać:

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

$$\begin{cases} \dfrac{dl_1}{dN} = c_1' \dfrac{2\sqrt{c_1'c_2'}\sqrt{l_1 l_2}}{c_1' l_1 + c_1' l_2} \left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \\ \dfrac{dl_2}{dN} = c_2' \dfrac{2\sqrt{c_1'c_2'}\sqrt{l_1 l_2}}{c_2' l_1 + c_1' l_2} \left(\sqrt{\Delta K_1 \Delta K_2}\right)^m \end{cases} \tag{8}$$

Wynikowe zależności wiążące długości pęknięcia z liczbą cykli obciążenia mają postać:

$$\begin{cases} \begin{cases} l_1 = \dfrac{(c_2 l_{10} - c_1 l_{20}) + \sqrt{(c_2 l_{10} - c_1 l_{20})^2 + 4c_1 c_2 l_{10} l_{20} e^{2\sqrt{c_1 c_2}\Delta\sigma^2 \pi N}}}{2c_2} \\ l_2 = \dfrac{(c_1 l_{20} - c_2 l_{10}) + \sqrt{(c_1 l_{20} - c_2 l_{10})^2 + 4c_1 c_2 l_{10} l_{20} e^{2\sqrt{c_1 c_2}\Delta\sigma^2 \pi N}}}{2c_1} \end{cases} & m = 2 \\ \begin{cases} l_1 = \dfrac{(c_2 l_{10} - c_1 l_{20}) + \sqrt{(c_2 l_{10} - c_1 l_{20})^2 + 4c_1 c_2 \left[\dfrac{2-m}{2}\sqrt{c_1 c_2}\Delta\sigma^m \pi^{\frac{m}{2}} N + (l_{10} l_{20})^{\frac{2-m}{4}}\right]^{\frac{4}{2-m}}}}{2c_2} \\ l_2 = \dfrac{(c_1 l_{20} - c_2 l_{10}) + \sqrt{(c_1 l_{20} - c_2 l_{10})^2 + 4c_1 c_2 \left[\dfrac{2-m}{2}\sqrt{c_1 c_2}\Delta\sigma^m \pi^{\frac{m}{2}} N + (l_{10} l_{20})^{\frac{2-m}{4}}\right]^{\frac{4}{2-m}}}}{2c_1} \end{cases} & m \neq 2 \end{cases} \tag{9}$$

Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wynikami badań doświadczalnych rozwoju pęknięć. Wybrane wykresy przyrostów podstawowych wymiarów a i c, uzyskane w trakcie doświadczenia oraz z wynikami obliczeń wykonanych w oparciu o równania (9) przedstawiono na rys. 8.

Opracowanie modelu probabilistycznego rozwoju pęknięcia półeliptycznego oparto na następujących założeniach:

– istnieją takie długości pęknięć zmęczeniowych (w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach), iż w pewnym przedziale (lub dla pewnej liczby cykli obciążenia) prawdopodobieństwo katastroficznego pęknięcia elementu jest równe zeru,
– prędkości zmęczeniowego pękania opisane są w ujęciu deterministycznym zależnościami (8),
– cykle obciążenia, których czas trwania wynosi Δt, nie muszą pojawiać się w sposób ciągły, ale występować losowo z intensywnością λ, tzn. $\lambda \Delta t \leq 1$.

Dążąc do wyznaczenia trwałości elementu, należy jej oszacowanie uzależnić zarówno od prawdopodobieństwa przekroczenia przez długości pęknięcia odpowiednich długości dopuszczalnych, jak i uwzględnić prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnej powierzchni pęknięcia. Przyjmując, że kształt eliptyczny w pewnym przybliżeniu odzwierciedla kształt rzeczywisty pęknięcia, celowym wydaje się ułożenie równania opisującego w ujęciu probabilistycznym dynamikę narastania powierzchni pęknięcia niezależnie od opisu dynamiki przyrostu długości pęknięcia.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Do opisu propagacji długości pęknięcia w ogólnym przypadku obciążenia losowego użyto równania (10), sformułowanego przez prof. Tomaszka, opisanego m. in. w pracach [7–9]:

$$\frac{\partial U(l_1,l_2,t)}{\partial t} = -C(l_1,l_2)U(l_1,l_2,t) - \frac{\partial b_1(l_1,l_2)U(l_1,l_2,t)}{\partial l_1} - \frac{\partial b_2(l_1,l_2)U(l_1,l_2,t)}{\partial l_2} + \\ + \frac{\partial^2 \mu(l_1,l_2)U(l_1,l_2,t)}{\partial l_1 \partial l_2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 a_1(l_1,l_2)U(l_1,l_2,t)}{\partial l_1^2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 a_2(l_1,l_2)U(l_1,l_2,t)}{\partial l_2^2} \tag{10}$$

gdzie:

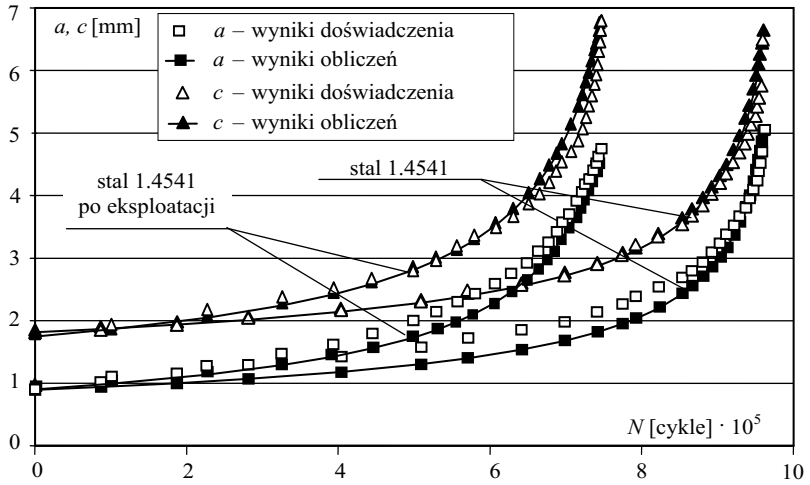
$U(l_1, l_2, t)$ – funkcja gęstości długości pęknięć w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach w chwili t,

$C(l_1, l_2)$ – współczynnik charakteryzujący możliwość zaistnienia katastroficznego pęknięcia elementu, gdy długość pęknięcia w jednym kierunku wynosi l_1, a w drugim l_2,

$a_1(l_1, l_2)$, $a_2(l_1, l_2)$ – średni kwadrat przyrostu pęknięcia w kierunkach l_1 i l_2 w przyjętej jednostce czasu,

$b_1(l_1, l_2)$, $b_2(l_1, l_2)$ – wartość średnia przyrostu pęknięcia w kierunkach l_1 i l_2 w przyjętej jednostce czasu,

$\mu(l_1, l_2)$ – moment korelacyjny w przyjętej jednostce czasu $\mu(l_1,l_2) = r\sqrt{a_1(l_1,l_2)}\sqrt{a_2(l_1,l_2)}$, przy czym r jest współczynnikiem korelacji.



Rys. 8. Wyznaczone doświadczalnie i analitycznie przyrosty podstawowych wymiarów pęknięcia półeliptycznego a i c w próbkach badanych przy σ_{amax} = 137,5 MPa

Fig. 8. Experimental and analytical data growth basis measure a and c semi-elliptical crack in specimens tested by σ_{amax} = 137,5 MPa

Dalsza analiza równania (10) jest utrudniona z uwagi na brak jego analitycznego rozwiązania. Jednak uwzględniając przedstawione wcześniej założenia, można sformu-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

łować następujące równanie różniczkowe opisujące dynamikę przyrostu długości pęknięć l_1 i l_2:

$$U(l_1, l_2 t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t) U(l_1, l_2, t) + \lambda \Delta t U(l_1 - \Delta l_1, l_2 - \Delta l_2, t) \tag{11}$$

gdzie:

$U(l_1, l_2, t)$ – funkcja gęstości długości pęknięcia.

Zależność (11) pozwala na analizę propagacji pęknięcia w dwóch kierunkach.

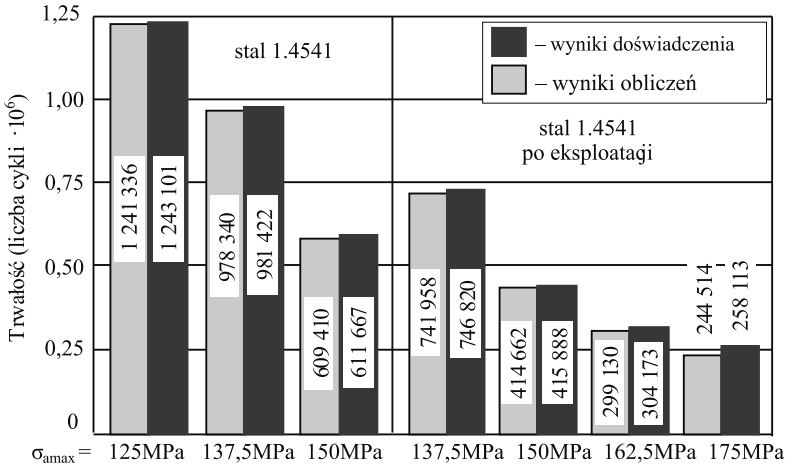
Rozwiązaniem równania (11) jest funkcja gęstości dwuwymiarowego rozkładu normalnego. Na podstawie danych eksperymentalnych oszacowano parametry rozkładu długości pęknięcia.

Opierając się na powyższym rozkładzie, można wyznaczyć prawdopodobieństwo nieprzekraczania dopuszczalnych długości pęknięcia $R_L(t)$.

$$R_L(t) = P(l_1 \le l_{1d}, l_2 \le l_{2d}, t) = \int_{-\infty}^{l_{1d}} \int_{-\infty}^{l_{2d}} U(l_1, l_2, t) dl_1 dl_2 \tag{12}$$

Zgodnie z założeniami modelu probabilistycznego dopuszczalne długości pęknięcia l_{1d} i l_{2d} należy wyznaczyć tak, aby ryzyko doraźnego zniszczenia elementu było dostatecznie małe.

Zakładając, że $R_L(t) \ge R_0$, gdzie R_0 jest dopuszczalnym minimalnym prawdopodobieństwem na przekroczenie dopuszczalnych długości pęknięcia l_{1d} i l_{2d}, można określić trwałość zmęczeniową elementu.



Rys. 9. Porównanie trwałości zmęczeniowej doświadczalnej i obliczeniowej elementów ze stali 1.4541, badanych w warunkach osiowego rozciągania

Fig. 9. Compared resistance of fatigue experimental and analytical elements making from steel 1.4541and tested in conditions axial tension

Zestawienie uzyskanych wyników badań doświadczalnych i analitycznych trwałości zmęczeniowych, przeprowadzonych dla przyjętych w programie badań wartości amplitudy naprężeń $\sigma_{a\max}$, przedstawiono na rys. 9. Zarejestrowane podczas badań doświadczalnych

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

i przewidywane długości pęknięć w próbkach wykazują zadawalającą zgodność. Uzyskano bezpieczne oszacowanie trwałości badanych elementów. Wyliczone trwałości próbek, wyrażone liczbą cykli do osiągnięcia krytycznej długości pęknięcia, są mniejsze i różnią się o 0,1−5,5% (w zależności od wartości amplitudy naprężenia) od trwałości wyznaczonych doświadczalnie.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych trwałości zmęczeniowej elementów modelowych wyciętych z rurociągów po wieloletniej eksploatacji oraz z odcinków rurociągów nowych, przed włączeniem ich do instalacji. Analizie poddano elementy z karbem w postaci szczeliny półeliptycznej. Przeprowadzone badania struktury i właściwości wytrzymałościowych ułatwiły interpretację przyczyn obniżenia trwałości zmęczeniowej spowodowanej w głównej mierze degradacją struktury materiału eksploatowanego w obecności 10,5 procentowego tlenku azotu o temperaturze 436 K. Obserwowany spadek trwałości sięgał 32% dla $\sigma_{a\max}$ = 137,5 MPa i 47% dla $\sigma_{a\max}$ = 150 MPa podczas badań w warunkach zmiennego rozciągania, zgodnie z blokowym programem zmian naprężenia opracowanym na podstawie rzeczywistego przebiegu zmian obciążenia eksploatacyjnego badanego rurociągu.

Opracowany model obliczeniowych w ujęciu deterministycznym i probabilistycznym wykorzystano do przewidywania rozwoju pęknięć zmęczeniowych w elementach konstrukcyjnych i oceny ich trwałości. Obszerne badania doświadczalne trwałości zmęczeniowej elementów modelowych z propagującym pęknięciem półeliptycznym umożliwiły zasilenie modelu obliczeniowego w niezbędne dane opisujące charakter rozwoju rozpatrywanych pęknięć dwuwymiarowych. Zarejestrowane podczas badań doświadczalnych i przewidywane długości pęknięć w próbkach wykazują zadawalającą zgodność. Uzyskano bezpieczne oszacowanie trwałości zmęczeniowej badanych elementów modelowych.

Literatura

[1] *FACTS*, *Failure and Accidents Technical Information System*, Department of Industrial Safety TNO-MEP, Apeldoorn, Netherlands 2002.

[2] *The Accident Databasis*, Rugby, IchemE, UK 1999.

[3] Śnieżek L., Goss Cz., Mazur A., *Experimental and Theoretical Investigations of Fatigue Life of Chemical Pipelines*, Arch. of Civil Engineering, 2007, LII, I, 75-84.

[4] Śnieżek L., Stępień S., *Trwałość zmęczeniowa rurociągu chemicznego z propagującym pęknięciem półeliptycznym*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2007.

[5] DeWolf G.B., *Process safety management in the pipeline industry: paralles 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, Vol. 104, 2003, 169-192.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[6] Papadakis G.A., *Major hazard pipelines: a comparative study of onshore transmission accidents*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 12, 1999, 91-107.

[7] Kocańda S., Tomaszek H., *Modelling of fatigue crack propagation in two--dimensional aspect under random loadings*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 37, No. 7-12, 1989, 419-428.

[8] Kocańda S., Tomaszek H., *Probabilistyczny opis rozwoju pękania i trwałości zmęczeniowej konstrukcji metalowych w ujęciu dwuwymiarowym*, Biul. WAT nr 8 (492), 1993, 39-60.

[9] Kocańda S., Tomaszek H., Smoliński H., *On predicting the fatigue life on aircraft structural components under random loadings in case of two-dimensional crack propagation process*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 38, No. 1–12, 1990, 29-38.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ