



## Badania własności zmęczeniowych stali 1.4541 na rurociągi przemysłowe z uwzględnieniem czasu eksploatacji

LUCJAN ŚNIEŻEK

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

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych zmian właściwości wytrzymałościowych statycznych i cyklicznych oraz struktury stali 1.4541, zastosowanej do konstrukcji rurociągu przemysłowego. Zmiany zostały spowodowane wieloletnią eksploatacją w środowisku tlenu azotu. Badania wykonano na próbkach wyciętych z dostarczonych rur o średnicy 600 i 900 mm i grubości ścianki 5-7 mm. Próbkę poddano osiowemu rozciąganiu z amplitudą zmian naprężenia  $\sigma_a$  opisaną blokowym programem opracowanym na podstawie zbioru przebiegów zmian ciśnienia, zarejestrowanych w wybranym, 5,5-letnim okresie eksploatacji rurociągu. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do przewidywania trwałości rurociągów chemicznych w celu uniknięcia zagrożeń związanych z rozszczeniem instalacji podczas przesyłania substancji niebezpiecznych.

**Słowa kluczowe:** budowa i eksploatacja maszyn, rurociągi chemiczne, stale austenityczne, trwałość zmęczeniowa

**Symbole UKD:** 539.431

### 1. Wstęp

Praca niniejsza jest fragmentem szerszych badań dotyczących oceny trwałości i niezawodności rurociągów przemysłowych z uwzględnieniem wpływu czasu eksploatacji oraz obciążeń eksploatacyjnych obiektów rzeczywistych. Wyniki dotychczasowych badań prezentowano między innymi w pracach [1-6].

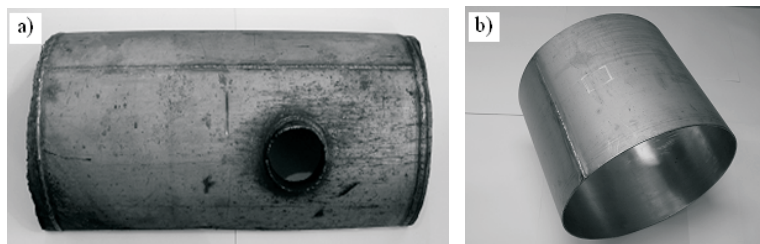
Bezpośrednią inspiracją do podjęcia prac dotyczących oceny własności zmęczeniowych stali stosowanej do konstrukcji rurociągów przemysłowych jest konieczność określenia postępu degradacji, trwałości, a w konsekwencji uzyskanie wiadomości

o aktualnym stanie zmęczeniowym konstrukcji rurociągów chemicznych eksploatowanych w jednym z krajowych zakładów chemicznych. Podjęcie niniejszej pracy wynika z braku ustalonych opisów i procedur wyznaczania trwałości zmęczeniowej rurociągów chemicznych umożliwiającą przeprowadzenie obliczeń sprawdzających dla pęknięć lub naprężeń granicznych, mających na celu wydłużenie czasu bezpiecznej pracy rurociągu, nawet do wystąpienia pęknięcia określanego jako pęknięcie „mokre” lub „przeciekowe”. Stąd główny cel praktyczny projektu — ocena trwałości zmęczeniowej elementów modelowych wyciętych z rurociągów chemicznych eksploatowanych od kilkudziesięciu lat z uwzględnieniem zmian właściwości mechanicznych i struktury materiału.

Aspekt naukowy pracy zawiera się w badaniach zmian struktury i właściwości wytrzymałościowych statycznych i cyklicznych stali zastosowanych do konstrukcji rurociągów i badaniach porównawczych trwałości elementów modelowych wyciętych z obiektów rzeczywistych z karbem półeliptycznym odwzorowującym wadę materiału rodzimego.

## 2. Przedmiot i metodyka badań

Badania doświadczalne przeprowadzono na elementach rurociągu przemysłowego napowietrznego, spawanego, o wymiarach  $\varphi 600 \times 5-7$  mm i  $\varphi 900 \times 5-7$  mm (średnica zewnętrzna  $x$  — grubość ścianki), wykonanego ze stali austenitycznej 1.4541 (wg EN 10088-3: 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,  $a = 63,6\%$ ,  $z = 45,3\%$ . Dostarczone do badań odcinki rur pochodziły zarówno z rurociągu po wieloletniej eksploatacji w warunkach oddziaływania przesyłanego medium w postaci 10,5 procentowego tlenu azotu o temperaturze roboczej 436 K (rys. 1a), jak i z rurociągu nowego, przed włączeniem do procesu eksploatacji (rys. 1b).



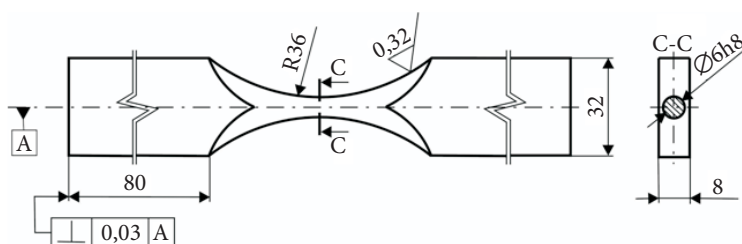
Rys. 1. Odcinki badanych rurociągów po wieloletniej eksploatacji (a) i przed włączeniem do procesu eksploatacji (b)

Badania struktury i analizę składu chemicznego stali wykonano po wytrawieniu elektrochemicznym za pomocą bezwodnika kwasu chromowego, wykorzystując mikroskop skaningowy Philips XL-30/LaB<sub>6</sub> z mikroanalizatorem składu chemicznego EDAX. Właściwości wytrzymałościowe statyczne wyznaczono podczas prób wytrzymałościowych przeprowadzonych na pulsatorze hydraulicznym INSTRON 8802 z ekstensometrem INSTRON typu 2630-112.

Badania niskocyklowe zrealizowano w warunkach stałego odkształcenia całkowitego  $\varepsilon_{ac} = \text{const}$ . Dla badań stali po wieloletniej eksploatacji przyjęto sześć poziomów odkształcenia ( $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$ ;  $0,52\%$ ;  $0,73\%$ ;  $0,93\%$ ;  $1,11\%$ ;  $1,75\%$ ), a stal na nowy rurociąg badano przy pięciu poziomach odkształcenia ( $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$ ;  $0,50\%$ ;  $1,00\%$ ;  $1,30\%$ ;  $1,90\%$ ). Poziomy odkształceń określono na podstawie wyników próby statycznego rozciągania.

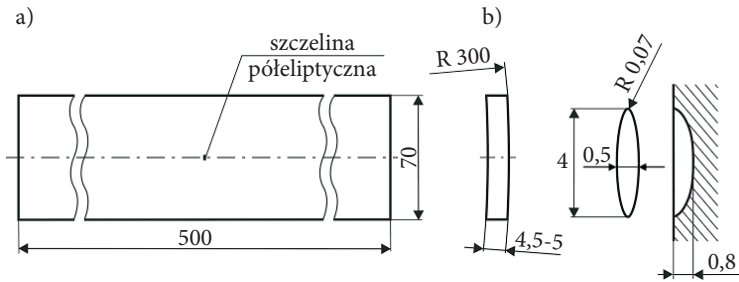
Badania zmęczeniowe przeprowadzono na próbkach klepsydrowych (rys. 2) wykonanych z wycinków rur o grubości 7 mm, zgodnie z normą ASTM E 606-80 [7].

Próby zmęczeniowe przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy MTS typu 810.23. Pomiar odkształceń poprzecznych wykonano z użyciem ekstensometru MTS typu 632.31F-24. Podczas badań przyjęto sinusoidalny przebieg zmiennej sterującej ( $\varepsilon_{as}$ ) o współczynniku asymetrii cyklu  $R = -1$ . Próby realizowano z częstotliwością  $f = 0,2$  Hz. Dla każdego poziomu odkształcenia zrealizowano po trzy próby zmęczeniowe. Jako kryterium zniszczenia w obrębie części pomiarowej przyjęto pięcioprocentowy spadek naprężenia rozciągającego w stosunku do naprężenia cyklu stabilnego.



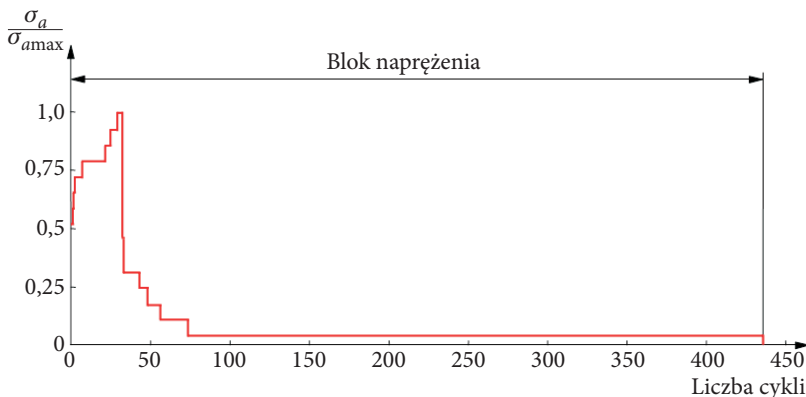
Rys. 2. Wymiary próbki do badań niskocyklowych

Obszerne badania propagacji pęknięć zmęczeniowych i trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na pulsatorze hydraulicznym INSTRON 8802 dla próbek z naciętymi, półeliptycznymi inicjatorami pęknięcia, dla których stosunek wymiarów mniejszej półosi elipsy —  $a$  do większej osi —  $2c$  wynosił  $0,2$ . Takie wymiary inicjatora przyjęto na podstawie analizy prac [8-10] poświęconych badaniom propagacji półeliptycznych pęknięć zmęczeniowych, w których założono  $a/2c = 0,12-0,32$ . Próbki o wymiarach przedstawionych na rysunku 3 badano w warunkach osiowego rozciągania przy amplitudzie naprężenia  $\sigma_a$  opisaną blokowym programem opracowanym na podstawie 5,5-letniej eksploatacji rurociągu.



Rys. 3. Geometria próbek z półeliptycznym inicjatorem pęknięcia do badań propagacji pęknięć zmęczeniowych

Podstawą do wyznaczenia blokowego programu naprężeń było opracowane wcześniej widmo naprężeń obwodowych w ścianie rury, wyliczonych na podstawie pomiaru ciśnień przesyłanego medium. Podczas sporządzania histogramu naprężeń uwzględniono występowanie naprężeń wywołanych obciążeniami rozruchowymi (poprawnymi i odbiegającymi od charakterystycznego przebiegu) i eksploatacyjnymi (z uwzględnieniem przestojów i przeglądów instalacji) związanych ze stanami niestabilnymi i ustalonymi w różnych okresach eksploatacji. Na rysunku 4 przedstawiono sekwencję poziomów naprężeń wchodzących w skład 1 bloku obejmującego  $k_1 = 16$  poziomów naprężeń o szerokości  $k = 2,747$  MPa każdy. Przyjęto za monografią [11] 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 ujęto wyłączenia instalacji zamierzone i niezamierzone. Przez takie ułożenie programu blokowego naprężeń starano się oddać charakter losowy pracy, szczególnie wyłączeń instalacji



Rys. 4. Blokowy program naprężeń z nieregularnym następstwem poziomów zastosowany podczas badań trwałości zmęczeniowej stali 1.4541

stanowiących istotny problem decydujący o wstrzymaniu produkcji (50% przestojów zawiera znamiona przestojów awaryjnych).

Dane niezbędne do opracowania blokowego programu naprężeń zawarto w tabeli 1.

TABELA 1

Zestawienie wartości amplitud naprężeń do opracowania blokowego programu naprężeń

		Poziomy naprężeń dla $k_1 = 16$														
$\sigma_a$ [MPa]	22,01	24,76	27,50	30,25	33,00	35,75	38,50	41,24	43,99	19,27	16,51	13,77	11,02	8,28	5,55	2,78
Liczba cykli	2	3	1	3	15	43	10	13	9	-	-	31	15	25	52	219
$k_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Przebiegi zmian naprężeń w postaci blokowego programu, zastosowanego podczas badań w warunkach osiowego rozciągania, opracowano na podstawie pomiarów wartości eksploatacyjnych amplitud naprężenia w ścianie rurociągu. W celu skrócenia czasu badań przyjęto liczbowe przeliczniki wartości amplitud naprężeń w badanych próbkach  $\sigma_{ap}$ , zachowując stałą wartość stosunku  $\sigma_{ap}/\sigma_a$  oraz  $R_i = 0$  na poszczególnych poziomach obciążenia. Zestawienie naprężeń wchodzących w skład poszczególnych bloków przyjętego programu badań, wraz z wartościami maksymalnej amplitudy naprężenia  $\sigma_{amax}$ , przedstawiono w tabeli 2.

Dla potrzeb realizacji niniejszej pracy opracowano i zweryfikowano metodykę oraz zbudowano stanowisko pomiarowe umożliwiające rejestrację przyrostów długości pęknięć w oparciu o metodę spadku potencjału. 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 wymiarów 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 od 5 do 50 A, w zależności od wymiarów i materiału badanych próbek. W obwodzie pomiarowym należy stosować przyrządy umożliwiające pomiar zmiany napięcia o wartości

TABELA 2

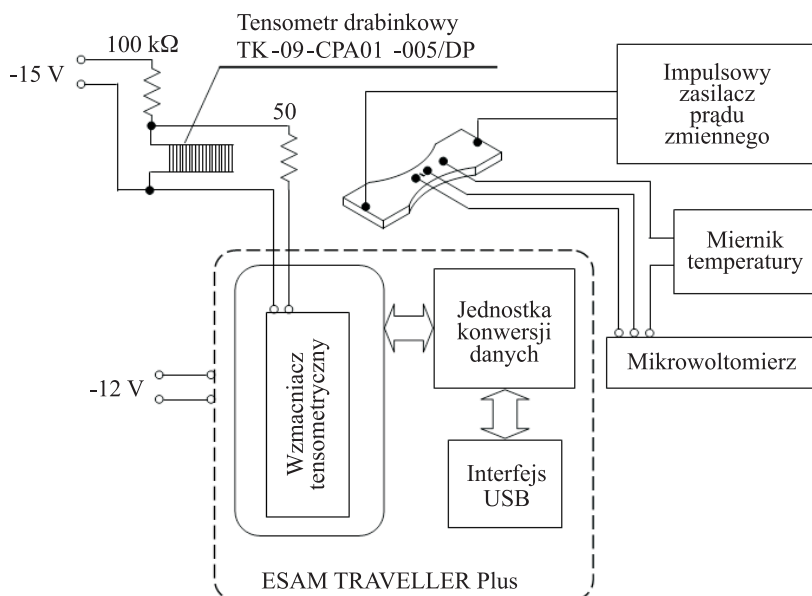
Zestawienie wartości naprężeń wchodzących w skład poszczególnych bloków przyjętego programu badań

$k_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Liczba cykli	2	3	1	3	15	43	10	13	9	-	-	31	15	25	52	219
$\sigma_{\text{amax}} = 175 \text{ MPa}$																
$\sigma_{ap}$ [MPa]	87,6	98,5	109,4	120,3	131,3	131,3	153,2	164,1	175,0	76,7	65,7	54,8	43,8	32,9	22,1	11,1
$\sigma_{\text{amax}} = 162,5 \text{ MPa}$																
$\sigma_{ap}$ [MPa]	81,3	91,5	101,6	111,7	121,9	132,1	142,2	152,3	162,5	71,2	61,0	50,9	40,7	30,6	20,5	10,3
$\sigma_{\text{amax}} = 150 \text{ MPa}$																
$\sigma_{ap}$ [MPa]	75,1	84,4	93,8	103,1	112,5	121,9	131,3	140,6	150,0	65,7	56,3	47,0	37,6	28,2	18,9	9,5
$\sigma_{\text{amax}} = 137,5 \text{ MPa}$																
$\sigma_{ap}$ [MPa]	68,8	77,4	86,0	94,6	103,1	111,7	120,3	128,9	137,5	60,2	51,6	43,0	34,4	25,9	17,4	8,7
$\sigma_{\text{amax}} = 125 \text{ MPa}$																
$\sigma_{ap}$ [MPa]	62,5	70,4	78,1	86,0	93,8	101,6	109,4	117,2	125,0	54,8	46,9	39,1	31,3	23,5	15,8	7,9

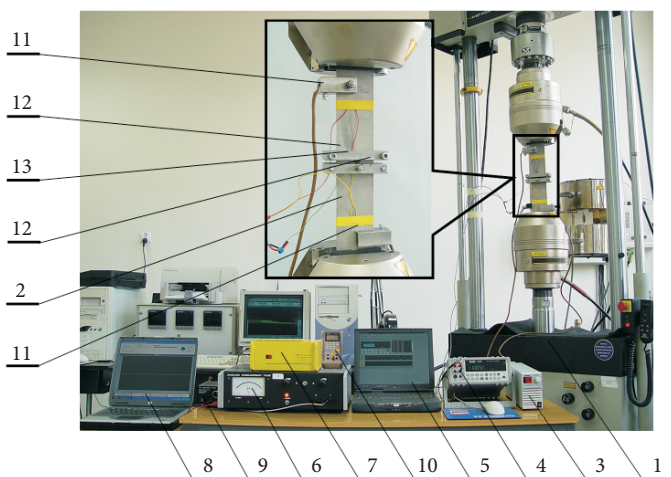
od 0,05 do 0,5  $\mu\text{V}$ . W badaniach własnych gęstość prądu przepływającego przez próbki wynosiła 0,1 A/mm<sup>2</sup>. W obwodzie pomiarowym zastosowano mikrowoltomierz cyfrowy o rozdzielczości 0,5  $\mu\text{V}$  z korekcją temperaturową, umożliwiający automatyczną rejestrację wyników pomiarów. Do weryfikacji uzyskanych tą metodą wyników pomiarów zastosowano dodatkowo tensometry drabinkowe, pozwalające na rejestrację długości propagującego pęknięcia na powierzchni próbki z krokiem 0,25 mm. Do odtworzenia kształtu czoła pęknięcia półeliptycznego zastosowano ponadto metodę barwienia. Schemat układu zastosowanego do pomiaru przyrostu pęknięć półeliptycznych metodą spadku potencjału i z użyciem tensometru drabinkowego przedstawiono na rysunku 5.

Stanowisko do badań propagacji pęknięć zmęczeniowych w warunkach osiowego rozciągania przedstawiono na rysunku 6.

Korelacja wyników otrzymanych podczas pomiarów spadków potencjału oraz pól powierzchni propagującego pęknięcia wyznaczonych na podstawie jego zarysu uzyskanego za pomocą barwienia pozwoliła na sporządzenie przebiegów zmian tych wielkości wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Przykładowe przebiegi

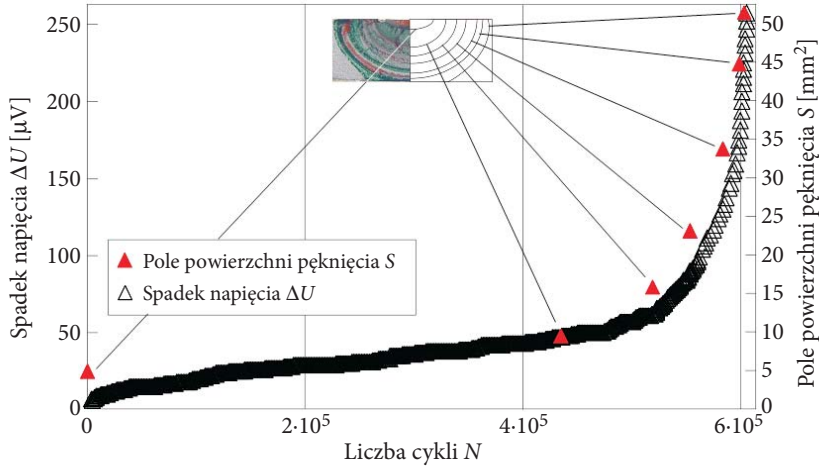


Rys. 5. Schemat układu do pomiaru wymiarów pęknięć półeliptycznych metodą spadku potencjału i z wykorzystaniem tensometru drabinkowego



Rys. 6. Stanowisko do badań propagacji pęknięć zmęczeniowych w warunkach osiowego rozciągania: 1 — maszyna wytrzymałościowa; 2 — badana próbka; 3 — zasilacz prądu stałego (w obwodzie zasilania układu pomiaru spadku potencjału); 4 — mikrowoltomierz cyfrowy; 5 — PC rejestrujący wyniki pomiarów spadku napięcia; 6 — zasilacz prądu stałego (w obwodzie zasilania układu pomiaru tensometrem drabinkowym); 7 — system pomiarowy ESAM TRAVELLER Plus; 8 — PC rejestrujący pomiary tensometrem drabinkowym; 9 — zasilacz systemu pomiarowego; 10 — miernik temperatury; 11 — zaciski zasilające; 12 — zaciski pomiarowe; 13 — tensometr drabinkowy

dla badań przeprowadzonych w warunkach rozciągania przy  $\sigma_{amax} = 137,5$  MPa pokazano na rysunku 7.



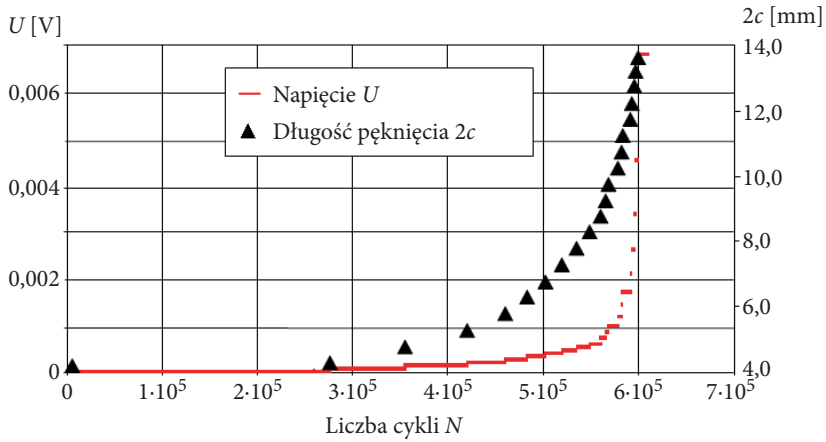
Rys. 7. Przebiegi zmian pola powierzchni pęknięcia  $S$  i spadku napięcia  $\Delta U$  wyznaczone dla próbki rozciąganej przy  $\sigma_{amax} = 137,5$  MPa

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.

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

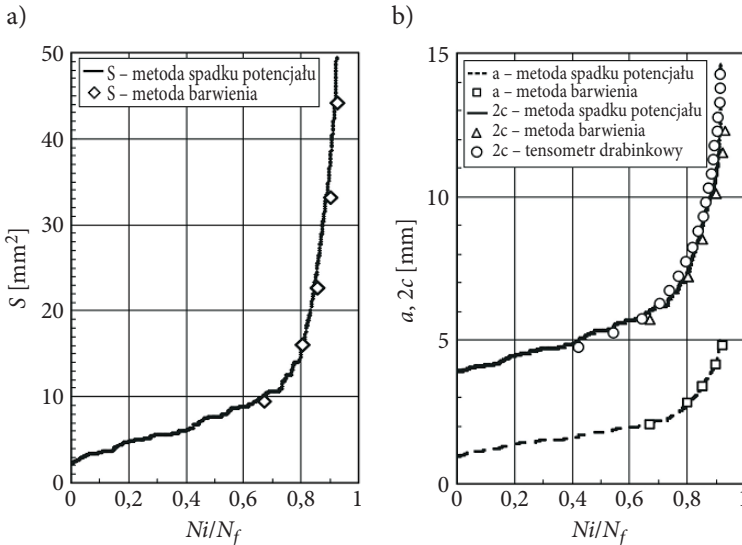
Wybrane przebiegi zmian pola powierzchni  $S$  oraz wymiarów  $2c$  i  $a$  pęknięcia półeliptycznego dla ustalonej liczby cykli  $N$  uzyskane na podstawie pomiaru spadku potencjału w próbce badanej przy  $\sigma_{amax} = 137,5$  MPa, przedstawiono na wykresach  $S = f(N_i/N_f)$  oraz  $a, 2c = f(N_i/N_f)$ , przy czym  $N_i$  stanowi bieżącą liczbę cykli, a  $N_f$  — liczbę cykli do zniszczenia. Na wykresach z rysunku 9 punktami niezaciemnionymi zaznaczono wyniki pomiarów wykonanych metodą barwienia oraz za pomocą tensometru drabinkowego. Otrzymano zadawalającą zgodność wyników pomiarów uzyskanych metodami barwienia i spadku potencjału. Rejestrowane za pomocą tensometru drabinkowego przyrosty pęknięcia powierzchniowego przy  $N_i/N_f < 0,7$  wskazują na jego wolniejszy rozwój w porównaniu z wynikami pomiarów optycznych i spadku napięcia (rys. 9b). Różnica ta sięga 5% wartości mierzonej.





Rys. 8. Wyniki badań długości pęknięcia na powierzchni  $2c$  uzyskane za pomocą tensometru drabinkowego (próbka rozciągana przy  $\sigma_{amax} = 137,5$  MPa)

W przedziale  $N_i/N_f = 0,7-0,9$  wyniki pomiarów tensometrem drabinkowym wskazują szybszy rozwój pęknięcia o 2-8%. Wykazane rozbieżności długości pęknięć nie ograniczają możliwości stosowania tensometrów drabinkowych do pomiarów przyrostów długości pęknięć, potwierdzają jednak konieczność uwzględnienia wpływu zastosowanej metodyki na wyniki pomiarów.



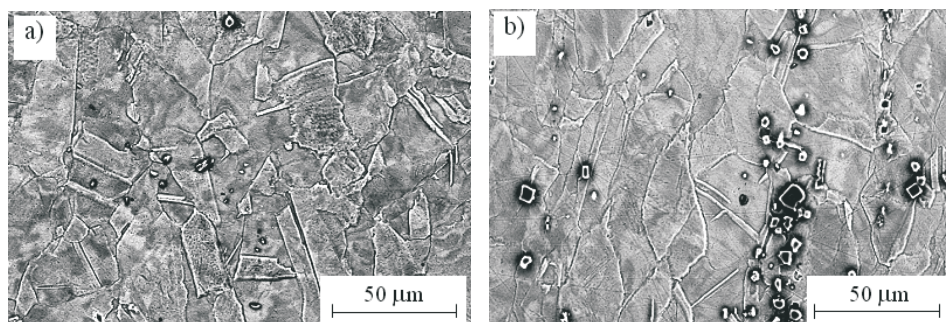
Rys. 9. Przebiegi zmian wymiarów pęknięcia półeliptycznego wyznaczone metodami spadku potencjału, barwienia i za pomocą tensometrów drabinkowych w próbce rozciąganej ze stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji, badanej przy  $\sigma_{amax} = 137,5$  MPa;  $S = f(Ni/N_f)$  (a),  $a, 2c = f(Ni/N_f)$  (b)

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Badania struktury i właściwości wytrzymałościowych

Mikroanaliza rentgenowska EDS składu chemicznego materiału rur w stanie dostawy odpowiada gatunkowi stali 1.4541. Struktura badanego stopu (rys. 10a) 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 zgładach widoczne są, pomiędzy ziarnami austenitycznej osnowy, pasmowe wydzielania, które zidentyfikowano jako ferryt  $\delta$  powstały podczas procesu metalurgicznego. W strukturze badanego stopu widoczne są również pojedyncze wydzielania wtrąceń niemetalicznych w postaci azotków tytanu.

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. Struktura stali składa się z ziaren austenitu z licznymi bliźniakami rekrytalizacji. W granicach między ziarnami obserwuje się pasmowe wydzielania ferrytu oraz liczne punktowe wtrącenia azotków tytanu (rys. 10b).



Rys. 10. Austenityczna struktura stali: 1.4541 w stanie dostawy (a) i po wieloletniej eksploatacji (b)

Zestawienie wyników badań właściwości wytrzymałościowych statycznych i udarności badanych stali przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3

Właściwości wytrzymałościowe badanej stali

Stal	$R_{0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$E$ [MPa]	$A$ [%]	$Z$ [%]	$U$ [J/cm <sup>2</sup> ]
1.4541 w stanie dostawy	284	600	193900	63,6	45,3	226
1.4541 po eksploatacji	325	638	178500	51,5	40,7	130

### 3.2. Właściwości wytrzymałościowe niskocyklowe

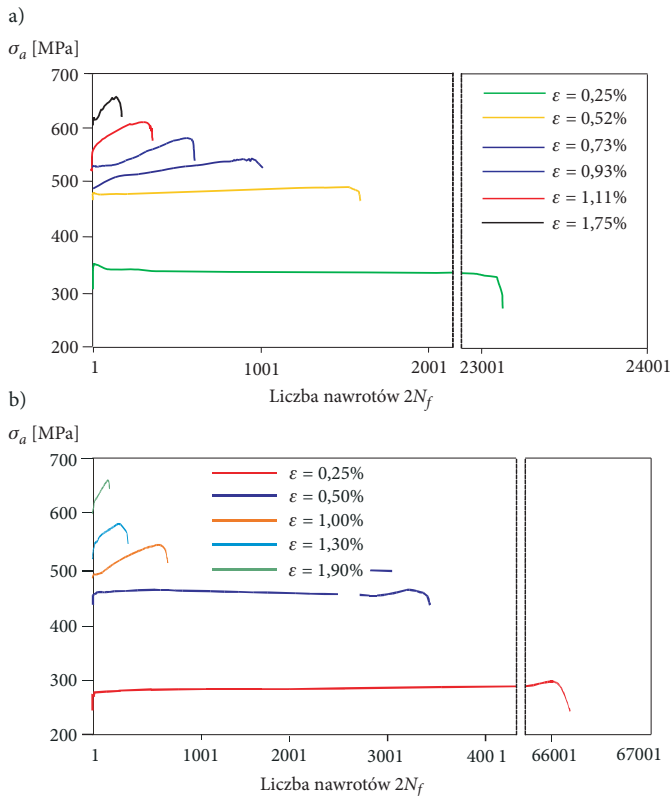
Określenie zachowania materiału w warunkach obciążeń zmiennych z zakresu małej liczby cykli jest szczególnie istotne ze względu na możliwość badania mechanizmów cyklicznego odkształcenia, które doprowadzają do lokalizacji odkształcenia, powstawania pęknięć, a w konsekwencji do zniszczenia elementu konstrukcji.

Badania trwałości zmęczeniowej w warunkach niskocyklowych dostarczają informacji umożliwiających szacowanie trwałości elementów konstrukcji zarówno na etapie projektowania, jak i w okresie ich eksploatacji. Są pomocne także w analizach oceny możliwości przedłużania rezerwy technicznej konstrukcji [12-14]. Kształt pętli histerezy uzyskanych w trakcie badań zmęczenia niskocyklowego (*low cycle fatigue* — LCF) i jej charakterystyczne wymiary w stanie ustabilizowania zależą od rodzaju materiału i od warunków obciążenia. Jej szerokość przy naprężeniu równym zero odpowiada zakresowi odkształcenia plastycznego  $\Delta\varepsilon_{pb}$ , który decyduje o trwałości w badaniach zmęczenia niskocyklowego — zgodnie z prawem Mansona-Coffina [15-16]. W stosunku do niektórych materiałów ustabilizowana pętla histerezy, otrzymana w badaniach przeprowadzonych w różnych sekwencjach odkształceń, nie wykazuje zgodności z prawem Masinga, lub spełnienie tej zależności zachodzi np. w badaniach z narastającymi zakresami odkształceń, a nie występuje dla zakresów odkształceń malejących — w konsekwencji krzywe cyklicznego rozciągania różnią się dla obu przypadków. Wyznaczanie takich charakterystyk jest możliwe jedynie na nowoczesnych maszynach wytrzymałościowych spełniających wysokie wymagania co do ich sztywności, dokładności pomiaru i precyzji automatycznego sterowania procesem obciążenia. Szeroką analizę własności zmęczeniowych w połączeniu ze zmianami kształtu pętli histerezy w różnych warunkach badań i eksploatacji przedstawiono w monografii [17]. Wpływ zmian własności materiałów w warunkach obciążeń cyklicznych i obciążeń o zmiennych sekwencjach (w tym przeciążeń) na trwałość zmęczeniową i kształt pętli histerezy zaprezentowano w [18]. Wyniki wyżej wymienionych analiz i charakterystyki niskocyklowe materiałów oraz parametry obciążeń są niezbędnym elementem metodyk oceny trwałości elementów konstrukcji [19] — głównie w zakresie metod sumowania uszkodzeń, jak również z pominięciem tych

metod [20-21], np. przez porównanie charakterystyk zmęczeniowych wyznaczanych w warunkach stałoaamplitudowego i losowego obciążenia. Mają one już swój trwały ślad w standardach międzynarodowych dotyczących nadzoru i kontroli stanu technicznego elementów konstrukcji [22].

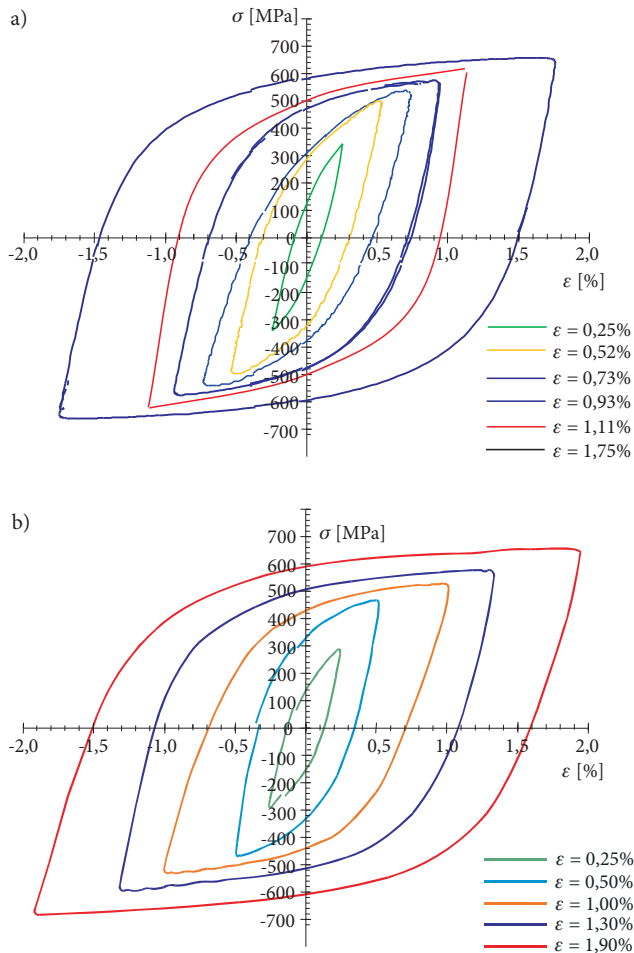
Zachowanie się materiałów w obszarze wytrzymałości niskocyklowej może być bardzo różnorodne. W zależności od stanu po zabiegach cieplnych i technologicznych oraz historii obciążenia mogą one się osłabiać, wzmacniać lub być stabilne.

Celem przeprowadzonych badań niskocyklowych było zbadanie zmęczenia materiału nowego jak i po wieloletniej eksploatacji w warunkach stałego odkształcenia poprzecznego próbki ( $\Delta \varepsilon'_{ac} = \text{const}$ ) oraz wyznaczenie dla tych stali wykładników cyklicznego wzmocnienia  $n'$ . Opracowanie wyników rozpoczęto od analizy zmian wartości zmiennej zależnej (naprężenie  $\sigma_a$ ) w funkcji liczby nawrotów. Wyniki tych pomiarów, wykonanych dla realizowanych poziomów odkształcenia przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Zmiana amplitudy naprężenia  $\sigma_a$  w funkcji liczby cykli zmian obciążenia dla realizowanych poziomów odkształcenia uzyskana podczas badań stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji (a) i zastosowanej na rurociągi nowe (b)

Na podstawie powyższego wykresu można stwierdzić istotne zmiany amplitudy naprężenia w zależności od bieżącej liczby cykli zmian odkształcenia. Do opracowania wyników badań parametrów pętli histerezy ( $\varepsilon_{ac}$ ,  $\varepsilon_{ap}$  i  $\sigma_a$ ) wprowadzono trwałość odpowiadającą  $0,5 N_f$  (gdzie  $N_f$  stanowi liczbę cykli do zniszczenia próbki). Takie podejście do określenia okresu stabilizacji (w przypadku materiałów cyklicznie niestabilnych) można znaleźć dość często w literaturze. Kształt pętli histerezy dla poziomów odkształcenia realizowanych podczas badań przedstawiono na rysunku 12.



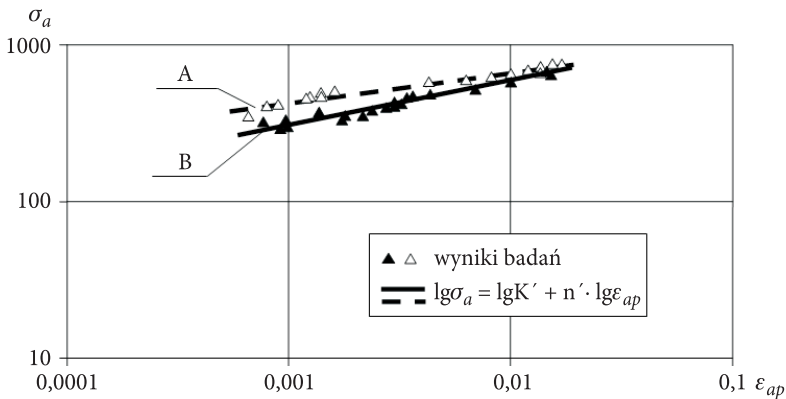
Rys. 12. Ustabilizowane pętli histerezy dla realizowanych poziomów odkształcenia uzyskane podczas badań stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji (a) i zastosowanej na rurociągi nowe (b)

Uzyskane wyniki opracowania  $\varepsilon_{ap} - \sigma_a$  aproksymowano linią prostą o równaniu:

$$\log \sigma_a = \log K' + n' \log \varepsilon_{ap}. \quad (1)$$

Wyniki badań całej serii opracowano metodą najmniejszych kwadratów i wyznaczono współczynnik  $K'$  i wykładnik  $n'$ . Wyniki obliczeń i badań w formie graficznej oraz wyniki opracowania statystycznego przedstawiono na rysunku 13.

Stal	Liczba prób	$K'$	$n'$	$r'$
A-1.4541 po wieloletniej eksploatacji	17	1544,60	0,1884	0,09010
B-1.4541 w stanie dostawy	20	1956,20	0,2723	0,08879

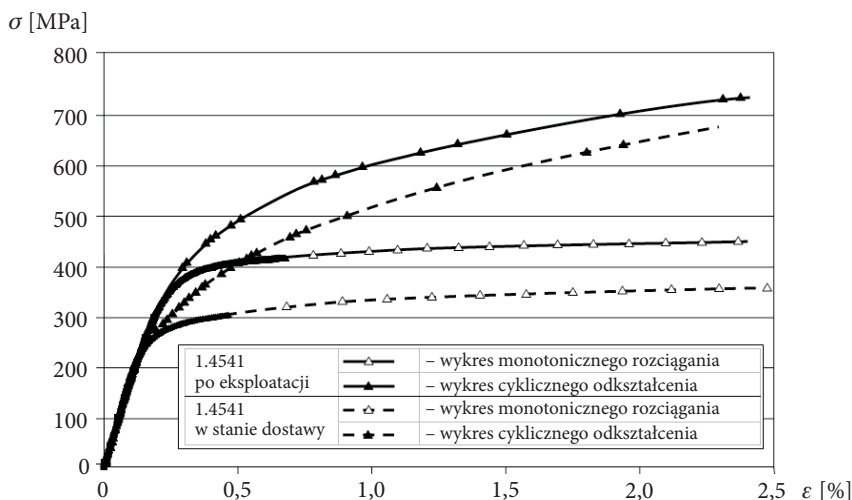


Rys. 13. Wykresy cyklicznego odkształcenia w układzie współrzędnych  $\varepsilon_{ap} - \sigma_a$  uzyskane podczas badań stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji i zastosowanej na rurociągi nowe

Wyznaczone wartości współczynnika  $K'$  i wykładnika  $n'$  wykorzystano do opisu wykresu cyklicznego odkształcenia zależnością Ramberga-Osgooda o postaci:

$$\varepsilon_a = \sigma_a / E + (\sigma_a / K')^{1/n'}. \quad (2)$$

W celu analizy własności cyklicznych materiału wykres ten przedstawia się razem z wykresem monotonicznego rozciągania. Powyższe wykresy zestawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Wykresy monotonicznego oraz cyklicznego rozciągania próbek ze stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji i zastosowanej na rurociągi nowe

## 5. Zmęczeniowe pękanie

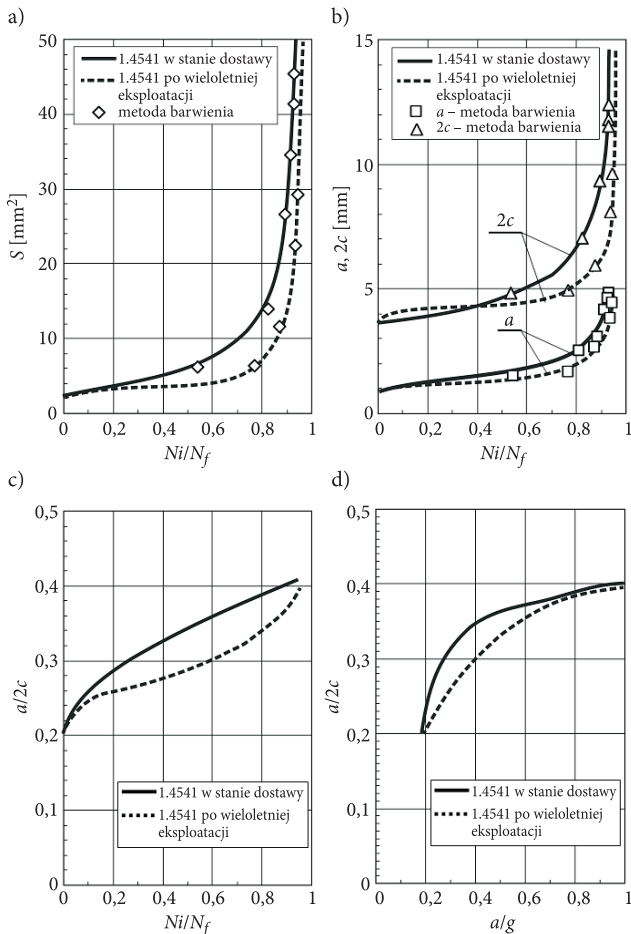
### 5.1. Propagacja pęknięć zmęczeniowych

Wyniki badań zmęczeniowych prowadzonych w warunkach osiowego rozciągania przy amplitudzie naprężenia  $\sigma_a$  opisanej blokowym programem naprężeń, posłużyły do sporządzenia odpowiednich wykresów w postaci  $S = f(N_i/N_f)$ ,  $a/2c = f(N_i/N_f)$ ,  $a/2c = f(N_i/N_f)$  i  $a/2c = f(a/g)$ . Spośród licznej grupy opracowanych wykresów, na rysunku 15 przedstawiono wybrane wyniki badań próbek o grubości  $g = 4,5-5$  mm, wykonanych ze stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji i stali zastosowanej na rurociągi nowe, badanych przy  $\sigma_{amax} = 150$  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 metody 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 odciników rurociągu stwierdzono monotony 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 wskrosz zaobserwowano po liczbie cykli zmian obciążenia odniesionej do liczby cykli do zniszczenia próbki  $N_i/N_f = 0,90$ .

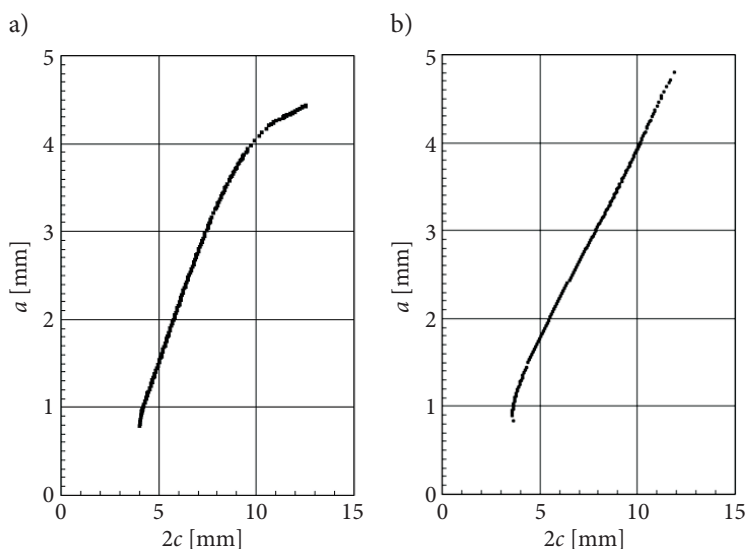
Zaobserwowane różnice w przebiegach parametru wymiaru pęknięcia  $a/2c$ , przedstawione na wykresach (rys. 15), znalazły swoje odzwierciedlenie na przebiegach zmian głębokości pęknięcia półeliptycznego w zależności od jego długości na powierzchni próbki  $a = f(2c)$ , przedstawionych na rysunku 16. W początkowym



Rys. 15. Przebiegi zmian wymiarów pęknięcia półeliptycznego w próbkach ze stali 1.4541, badanych przy  $\sigma_{\text{amax}} = 150$  MPa;  $S = f(N_i/N_f)$  (a),  $a/2c = f(N_i/N_f)$  (b),  $a/2c = f(N_i/N_f)$  (c) i  $a/2c = f(a/g)$  (d)



etapie rozwoju pęknięcia, zarówno w elementach ze stali w stanie dostawy, jak i po wieloletniej eksploatacji, 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 (rys. 16b) zaobserwowano wolniejszy niż w stali po eksploatacji (rys. 16a) 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. Opisane powyżej zależności pomiędzy wymiarami propagującego pęknięcia, w dwóch prostopadłych kierunkach, obserwowano podczas pomiarów rozwoju pęknięć półeliptycznych we wszystkich badanych próbkach.



Rys. 16. Wyniki pomiarów rozwoju pęknięcia półeliptycznego  $a = f(2c)$  w próbkach ze stali 1.4541 po wieloletniej eksploatacji (a) i w stanie dostawy (b), badanych przy  $\sigma_{\max} = 150$  MPa

## 5.2. Prędkość zmęczeniowego pęknięcia

Wyniki pomiarów długości pęknięć oraz wykresy  $2c = f(N)$  i  $a = f(N)$  stanowiły podstawę do obliczeń i opisu prędkości pęknięcia. W obliczeniach tych uwzględniono opracowane w oparciu o przebiegi krzywych pomiarowych przyrosty długości pęknięć  $\Delta 2c_j$  i  $\Delta a_j$  oraz odpowiadające im przyrosty liczby cykli obciążenia  $\Delta N_j$ . Wartości stosunku tych przyrostów określały wartość prędkości pęknięcia:

$$\frac{\Delta 2c_j}{\Delta N_j} = \left[ \frac{\Delta 2c}{\Delta N} \right]_j \cong \left[ \frac{d2c}{dN} \right]_j \quad i \quad \frac{\Delta a_j}{\Delta N_j} = \left[ \frac{\Delta a}{\Delta N} \right]_j \cong \left[ \frac{da}{dN} \right]_j, \quad (3)$$

przy czym:  $\Delta 2c_j = 2c_{i+1} - 2c_i$ ;  $\Delta a_j = a_{i+1} - a_i$ ;  $\Delta N_j = N_{i+1} - N_i$ .

Spośród licznej grupy wzorów opisujących prędkość zmęczeniowego pęknięcia, do obliczeń wybrano wzór Parisa o najprostszej postaci:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m. \quad (4)$$

We wzorze tym  $C$  i  $m$  są współczynnikami materiałowymi, zależnymi od materiału, warunków obciążenia oraz geometrii badanych elementów.  $\Delta K$  jest zakresem intensywności naprężeń.

Wartość  $\Delta K$  w przypadku rozwoju pęknięcia półeliptycznego w warunkach rozciągania lub zginania albo kombinacji tych naprężeń wyznacza się analogicznie do propozycji przedstawionej w [23] dla półeliptycznej szczeliny w płaskiej płycie:

$$\Delta K = (\sigma_r + H\sigma_g) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{g}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \varphi\right) \quad (5)$$

dla:  $0 < \frac{a}{c} \leq 1$ ,  $0 \leq \frac{a}{g} \leq 1$ ,  $\frac{c}{b} \leq 0,5$  oraz  $0 \leq \varphi \leq \pi$ ,

gdzie:  $\sigma_g$  — naprężenie zginające w próbce;

$\sigma_r$  — naprężenie rozciągające w próbce (w badaniach własnych zmiennoamplitudowych — naprężenie zastępcze);

$a, g, c, b, \varphi$  — wielkości geometryczne dotyczące wymiarów próbki oraz kształtu półeliptycznego pęknięcia przedstawione na rysunku 17;

$Q$  — funkcja opisana wzorem (6);

$F$  — funkcja opisana wzorem (7);

$H$  — funkcja opisana wzorem (14).

Funkcje  $Q$  i  $F$  obliczamy ze wzorów:

$$Q = 1 + 1,464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,65}, \quad (6)$$

$$F = \left[ M_1 + M_2 \left( \frac{a}{g} \right)^2 + M_3 \left( \frac{a}{g} \right)^4 \right] h f_\varphi f_w, \quad (7)$$

gdzie:

$$M_1 = 1,13 - 0,09 \left( \frac{a}{c} \right), \quad (8)$$

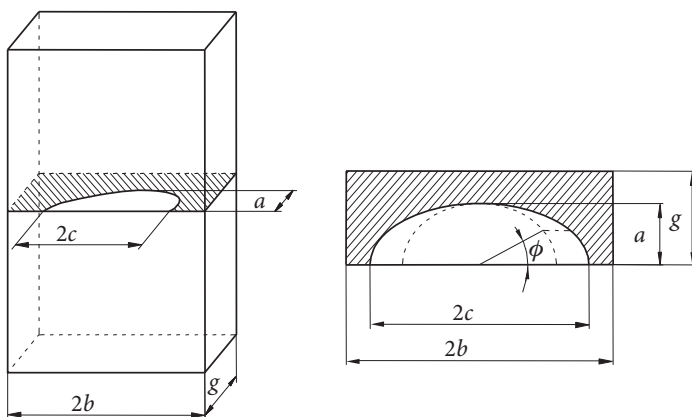
$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}}, \quad (9)$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left( 1 - \frac{a}{c} \right)^{24}, \quad (10)$$

$$h = 1 + \left[ 0,1 + 0,35 \left( \frac{a}{g} \right)^2 \right] (1 - \sin \varphi)^2, \quad (11)$$

$$f_\varphi = \left[ \left( \frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (12)$$

$$f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{g}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$



Rys. 17. Schemat pęknięcia półeliptycznego w płycie

Z kolei funkcję  $H$  zapisujemy w postaci:

$$H = H_1 + (H_2 - H_1)\sin^p \varphi, \quad (14)$$

dla której:

$$p = 0,2 + \frac{a}{c} + 0,6 \frac{a}{g} \quad (15)$$

oraz

$$H_1 = 1 - 0,34 \frac{a}{g} - 0,11 \left( \frac{a}{c} \right) \left( \frac{a}{g} \right), \quad (16)$$

$$H_2 = 1 + G_1 \left( \frac{a}{g} \right) + G_2 \left( \frac{a}{g} \right)^2. \quad (17)$$

Wielkości  $G_1$  i  $G_2$  występujące we wzorze (9.15) określamy z zależności:

$$G_1 = -1,22 - 0,12 \frac{a}{c} \quad (18)$$

oraz

$$G_2 = 0,55 - 1,05 \left( \frac{a}{c} \right)^{0,75} + 0,47 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,5}. \quad (19)$$

Należy podkreślić, że dla obliczenia wartości zakresu współczynnika intensywności naprężeń  $\Delta K$ , na czole pęknięcia w głąb próbki przyjmujemy w obliczeniach kąt  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , a na powierzchni  $\varphi = 0$ .

Opis prędkości zmęczeniowego pęknięcia elementów poddanych badaniom zmiennoamplitudowych wymaga wyznaczenia amplitudy zastępczej naprężeń. W literaturze obejmującej zagadnienia obliczeń zmęczeniowych proponowane są różne sposoby zastąpienia blokowego widma obciążeń cyklicznych, o zmieniającym się w blokach naprężeniu średnim i amplitudzie cyklu, poprzez równoważne mu widmo z zastępczą amplitudą dla cykli symetrycznych lub niesymetrycznych (odzerowo-tętniących rozciągających). W niniejszym opracowaniu wykorzystano propozycję podaną wcześniej przez Klesnila [24], a następnie przez Walkera [za 25], która prowadzi do widma niesymetrycznego o współczynniku  $R = 0$  i zakresie naprężeń w poszczególnych blokach  $\Delta\sigma_i$  obliczanych według wzoru:

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{\max,i} \cdot (1 - R_i)^\gamma, \quad i = 1 \dots q, \quad R_i \geq 0, \quad (20)$$

gdzie:  $q$  oznacza liczbę bloków naprężeń,  $\sigma_{\max,i}$  i  $R_i = 0$  jest odpowiednio maksymalną wartością naprężenia i współczynnikiem asymetrii cyklu w poszczególnym bloku naprężeń, a  $\gamma$  jest doświadczalnym wykładnikiem potęgi zależnym od rodzaju materiału. Dla stali austenitycznej przyjęto za [25]  $\gamma = 0,5$ .

Zakres zmian uśrednionego naprężenia dla widma blokowego wyznaczany jest z równania:

$$\Delta\sigma_{zas} = \left[ \sum_{i=1}^q n_i (\Delta\sigma_i)^m / N_B \right]^{1/m}, \text{ przy czym } N_B = \sum_{i=1}^q n_i, \quad (21)$$

gdzie:  $n_i$  oznacza liczbę cykli w  $i$ -tym bloku, a  $N_B$  jest liczbą cykli w programie obciążenia.

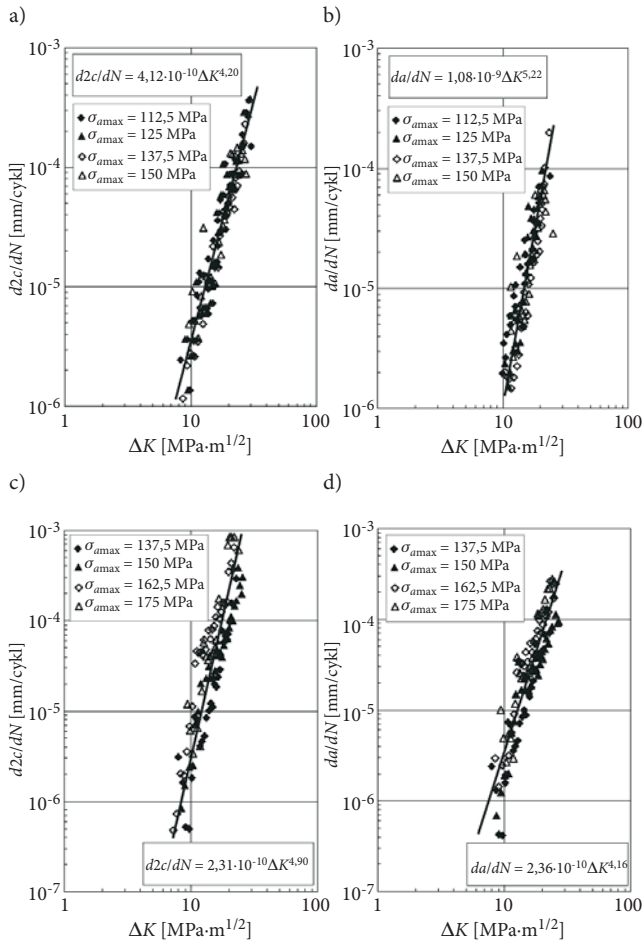
Dla stali austenitycznej przyjęto wykładnik potęgowy  $m = 3,25$  [25]. Rozpatrując opracowany program obciążeń przedstawiony na rysunku 4 i przyjmując podaną wyżej wartość wykładnika  $m$ , wielkość  $\Delta\sigma_{zast}$  zależy od maksymalnej wartości obciążenia w programie obciążeń. Wyliczone wartości  $\Delta\sigma_{zast}$  dla przyjętych w badaniach doświadczalnych blokowych programów naprężeń przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Wyniki obliczeń naprężenia zastępczego dla przyjętych blokowych programów naprężeń

Stopień obciążenia	$n_i$	$\sigma_{max} = 350$ MPa		$\sigma_{max} = 300$ MPa		$\sigma_{max} = 275$ MPa		$\sigma_{max} = 250$ MPa		$\sigma_{max} = 225$ MPa	
		$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_{zast}$ [MPa]	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_{zast}$ [MPa]	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_{zast}$ [MPa]	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_{zast}$ [MPa]	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_{zast}$ [MPa]
1	2	175,1	186,2	150,1	159,6	137,6	146,3	125,1	133,0	112,6	119,7
2	3	197,0		168,9		154,8		140,7		126,6	
3	1	218,8		187,5		171,9		156,3		140,7	
4	3	240,7		206,3		189,1		171,9		154,7	
5	15	262,6		225,1		206,3		187,5		168,8	
6	43	284,4		243,8		223,5		203,2		182,9	
7	10	306,3		262,6		240,7		218,8		196,9	
8	13	328,1		281,2		257,8		234,4		210,9	
9	9	350,0		300,0		275,0		250,0		225,0	
10	31	109,6		93,9		86,1		78,3		70,4	
11	15	87,7		75,2		68,9		62,6		56,4	
12	25	65,9		56,5		51,7		47,0		42,3	
13	52	44,2		37,9		34,7		31,6		28,4	
14	219	22,2		19,0		17,4		15,8		14,2	

Wykorzystując podane wzory, wykonano obliczenia prędkości pęknięcia i sporządzono wykresy  $d2c/dN = f(\Delta K)$  i  $da/dN = f(\Delta K)$  dla wszystkich badanych próbek ze stali 1.4541 w stanie dostawy i po wieloletniej eksploatacji (rys. 18).

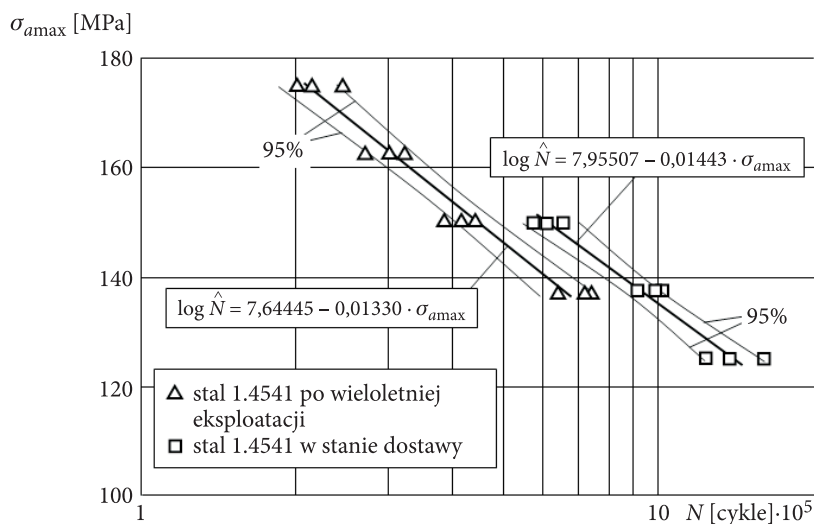


Rys. 18. Prędkość rozwoju pęknięcia na powierzchni  $d2c/dN = f(\Delta K)$  i w głąb  $da/dN = f(\Delta K)$  próbek poddanych osiowemu rozciąganiu w warunkach blokowego programu naprężeń, wykonanych ze stali 1.4541 w stanie dostawy (a, b) i po wieloletniej eksploatacji (c, d)

### 5.3. Trwałość zmęczeniowa

Wyniki badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej próbek z propagującym pęknięciem półeliptycznym, przeprowadzonych w warunkach osiowego rozciągania przy amplitudzie naprężenia opisanej blokowym programem, przedstawiono na wykresie (rys. 19). Jako kryterium trwałości badanych próbek przyjęto osiągnięcie

przez pęknięcie głębokości równej grubości próbki ( $a = g$ ). Tak określona trwałość próbek ze stali 1.4541 zastosowanej do konstrukcji nowych odcinków rurociągu jest wyższa o 24-32% od trwałości próbek wykonanych ze stali po wieloletniej eksploatacji w przedziale amplitudy naprężeń  $\sigma_{amax} = 137,5-150$  MPa.



Rys. 19. Trwałość zmęczeniowa próbek poddanych osiowemu rozciąganiu w warunkach blokowego programu naprężeń wykonanych ze stali 1.4541 w stanie dostawy i po wieloletniej eksploatacji

## 6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych własności zmęczeniowych elementów modelowych wyciętych z rurociągu wykonanego ze stali 1.4541 i eksploatowanego w jednym z krajowych zakładów chemicznych, z uwzględnieniem zmian właściwości wytrzymałościowych i struktury spowodowanych wieloletnim użytkowaniem.

O degradacji struktury stali wywołanej oddziaływaniem przesyłanego medium w postaci 10,5-procentowego tlenu azotu o temperaturze roboczej 436 K świadczy obecność licznych warstwowych wydzielań 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, wydzielań azotków tytanu. Oddziaływanie przesyłanej cieczy wspomaga jednocześnie procesy

destrukcji materiału rury, atakując miejsca rozwoju korozji wżerowej i powodując wypadanie pojedynczych ziaren stali.

Obserwowane zmiany struktury wpłynęły na właściwości wytrzymałościowe zarówno statyczne jak i cykliczne. Stwierdzono m.in. dla stali po wieloletniej eksploatacji wzrost umownej granicy plastyczności  $R_e$  (z 284 MPa do 325 MPa) i granicy wytrzymałości  $R_m$  (z 600 MPa do 638 MPa). Obniżeniu uległy natomiast: wydłużenie  $A_5$  (z 63,6% do 51,5%), przewężenie  $z$  (z 45,3% do 40,7%), moduł Younga (z 193,9 GPa do 178,5 GPa) oraz udarność  $U$  (z 226 J/cm<sup>2</sup> do 130 J/cm<sup>2</sup>). Wyznaczone wykładniki cyklicznego wzmocnienia  $n'$  wyniosły 0,1884 dla stali po wieloletniej eksploatacji i 0,2723 dla stali w stanie dostawy, a współczynniki wykresu cyklicznego odkształcenia  $K'$  odpowiednio 1544,6 MPa i 1956,2 MPa.

Przeprowadzone badania struktury i właściwości wytrzymałościowych ułatwiły interpretację przyczyn obniżenia trwałości zmęczeniowej, spowodowanej w głównej mierze degradacją struktury materiału eksploatowanego. Obserwowany spadek trwałości podczas badań w warunkach zmiennego rozciągania, zgodnie z blokowym programem zmian naprężenia opracowanym na podstawie rzeczywistego przebiegu zmian obciążenia eksploatacyjnego badanego rurociągu, wyniósł 24-32%. Do pomiaru przyrostów pęknięć w kierunkach dwóch półosi elipsy zastosowano metody: barwienia, tensometrów drabinkowych i spadku potencjału. Tę ostatnią wdrożono dla potrzeb prezentowanych w pracy badań, umożliwiając ciągłą rejestrację wymiarów rozwijających się pęknięć.

Uzyskane wyniki otwierają kierunki dalszych prac mających na celu z jednej strony zapewnienie wymaganego poziomu bezpieczeństwa i minimalizacji ryzyka katastrofy konstrukcji poddanej zmiennym w czasie obciążeniom, z drugiej, jak najdokładniejsze określenie przewidywanej trwałości eksploatowanej instalacji w postaci rurociągu przemysłowego.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2009 r.

#### LITERATURA

- [1] L. ŚNIEŻEK, V. GLIHA, V. HUTSAYLYUK, T. VUHERER, *Modelling fatigue crack growth in heat affected zone of welded area*, The Archive of Mechanical Engineering, 3, 2008, 4.
- [2] L. ŚNIEŻEK, S. STĘPIEŃ, *Trwałość zmęczeniowa rurociągu chemicznego z propagującym pęknięciem półeliptycznym*, WAT, Warszawa, 2007.
- [3] L. ŚNIEŻEK, Cz. GOSS, A. MAZUR, *Experimental and Theoretical Investigations of Fatigue Life of Chemical Pipelines*, Archives of Civil Engineering, 52, 1, 2007, 75-84, 4.
- [4] L. ŚNIEŻEK, J. MIERZYŃSKI, J. TORZEWSKI, *Analiza propagacji pęknięć półeliptycznych w stali austenitycznej z wykorzystaniem metody spadku potencjału*, Biul. WAT, 2007, 56, 1(645), 259-272.
- [5] L. ŚNIEŻEK, Cz. GOSS, A. MAZUR, *Analysis of chemical pipeline loads after some estimated operational-use interval*, First International Conference on Engineering Failure Analysis, Lisboa, P2.25, 2004.



- [6] L. ŚNIEŻEK, W. KRASOŃ, M. LECH-GREGA, *Analysis of Residual Stresses in Welded Chemical Pipelines made of the Austenitic Steel 1H18N9T*, European Congress on Advanced Materials and Processes, Prague–Czech Republic 2005, 55, www.euromat2005.fems.org.
- [7] ASTM Description E 606-80, *Standard Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing*.
- [8] K. WERNER, *Analiza rozwoju półeliptycznych pęknięć zmęczeniowych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2000.
- [9] K. WERNER, *Pomiary pęknięć i odkształceń*, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmarskiego, Katowice, 2003.
- [10] A. LIKOWSKI, *Badania prędkości pękania i kształtu pęknięć w elementach ze stali o podwyższonej wytrzymałości 20G2ANbY przy zmiennym zginaniu*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1981.
- [11] S. KOCAŃDA, *Zmęczeniowe pękanie metali*, Warszawa, WNT, 1985.
- [12] *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej*, t. 2, praca zbiorowa pod red. J. Lewitowicza, J. Borgonia, W. Ząbkowicza, Wyd. ITWL, 1993.
- [13] L. L. JR MISHNAEVSKY, *Methods of the theory of complex system in modelling of fracture: a brief review*, Engng. Fract. Mech., 56, 1, 1997, 47.
- [14] H. O. FUCHS, R. I. STEPHENS, *Metal fatigue in engineering*, a Wiley-Interscience Publication, 1980.
- [15] J. POLÁK, *Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals*, Materials Science Monographs, 63, Elsevier, Amsterdam, 1991.
- [16] S. KOCAŃDA, J. SZALA, *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, Warszawa, PWN, 1991.
- [17] Cz. GOSS, *Doświadczalna i teoretyczna analiza własności stali o podwyższonej wytrzymałości w zakresie małej liczby cykli obciążenia*, Biul. WAT, 11, Warszawa, 1982.
- [18] S. KŁYSZ, *Wpływ przeciążeń i sekwencji obciążeń na własności niskocyklowe stali 18G2A i St3SY*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 4, 124, 2000, 139-154.
- [19] J. SZALA, *Ocena trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowalnych*, Zeszyty Naukowe ART, Mechanika 2, 1980.
- [20] W. SOB CZYKIEWICZ, *Metoda oszacowania okresów przeglądowych silnie obciążonych węzłów konstrukcji stalowej na przykładzie połączenia skrzydło–kadłub wybranego samolotu*, praca n-b, PW, nr 121/501/119/9, Warszawa, 1983.
- [21] E. GASSNER, W. SCHUTZ, *The significance of constant load amplitude tests for the fatigue evaluation of aircraft structures*, Pergamon Press, 1961.
- [22] *Recommended practices for monitoring gas turbine engine life consumption*, RTO/AGARD-WG, 28, 1999.
- [23] J. C. NEWMAN, I. S. RAJU, *An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack*, Engineering Fracture Mechanics, 15, 1-2, 1981, 185-192.
- [24] J. POLÁK, M. KLESNIL, J. HELEŠIK, *The hysteresis loop.2. analysis of the loop shape*, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 1.5, 1982, 33-44.
- [25] N. DOWLING, *Mechanical behaviour of materials*, 2<sup>nd</sup> edition, Prentice Hall International, New Jersey, 1999.

L. ŚNIEŻEK

**Experimental research on fatigue properties of 1.4541 steel used in industrial pipelines with taking operation time into consideration**

**Abstract.** The paper presents experimental results of the changes in static and cyclic strength properties as well as in the structure of 1.4541 steel, used for construction of industrial pipelines, as a result of their many-year exploitation. Tests were conducted on specimens cut from the delivered 5-7-mm-thick pipes of 600- and 900-mm diameters. The specimens were subjected to axial tension under the stress amplitude  $\sigma_a$ , characterized by a block stress programme prepared on the basis of a set of courses of pressure changes recorded in a selected 5.5-year period of pipeline operation. The obtained results may be used for predicting fatigue life of chemical pipelines in order to prevent danger connected with installation unsealing while transferring hazardous substances.

**Keywords:** mechanical engineering and machinery maintenance, chemical pipelines, austenitic steel, fatigue life

**Universal Decimal Classification:** 539.431