

GRZEGORZ ROBAK*

ANALIZA ROZWOJU PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH
W ZAŁOŻONYCH STANACH OBCIĄŻENIAANALYSIS OF FATIGUE CRACK GROWTH RATE
UNDER MIXED-MODE LOADING

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych oraz ich analizę dotyczącą wyznaczenia prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w próbkach przyrządowych poddanych złożonemu obciążeniu, tj. zginania ze skręcaniem. Próbki wykonane były ze stali konstrukcyjnej 10HNAP. Badania doświadczalne przeprowadzone zostały na maszynie zmęczeniowej MZGS 100. Wyniki badań doświadczalnych zostały aproksymowane za pomocą związków Paris'a z wprowadzonym ekwiwalentnym współczynnikiem intensywności naprężenia ΔK_{eq} . Badania prowadzone były dla czterech kombinacji stosunków amplitud $M_{ag}/M_{as} = 3,59, 1,73, 1,00$ oraz dla $M_{as} = 0$.

Słowa kluczowe: ekwiwalentny współczynnik intensywności naprężenia, zginanie ze skręcaniem

Abstract

The paper contains test results connected with determination of fatigue crack propagation rate in prism-shaped specimens subjected to complex loading, i.e. bending with torsion. The specimens were made of 10HNAP steel. Experimental tests were carried out on MZGS 100 fatigue test stand. The author describes test results using the Paris formula with equivalent stress intensity factor range ΔK_{eq} . The results were made for four combinations of amplitudes in the following relation $M_{ag}/M_{as} = 3.59, 1.73, 1.00$ and for $M_{as} = 0$.

Keywords: equivalent stress intensity factor range, mixed mode (I + III)

* Dr inż. Grzegorz Robak, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska.

1. Wstęp

Analiza zagadnień związanych z rozwojem pęknięć zmęczeniowych prędkością rozwoju dotyczy przeważnie prostych stanów obciążenia, głównie rozciągania. Również opracowane dotychczas modele do analizy prędkości propagacji pęknięć [1] sprawdzane były dla prostych przypadków obciążenia. W rzeczywistych elementach maszynowych często jednak występują złożone stany obciążenia, takie jak np.: zginanie ze skręcaniem, rozciąganie ze skręcaniem. Kombinacja obciążeń zginania ze skręcaniem, czyli połączenia I i III sposobu obciążenia, jest jedną z częściej występujących w rzeczywistych elementach konstrukcyjnych, takich jak: wały napędowe, drążki skrętne itp. Prowadzone badania przy połączeniu I i III sposobu obciążenia obejmują głównie zakres jego progowego wzrostu ze względu na trudności z utrzymaniem stałości obciążenia [2]. Natomiast w pracach [3, 4] przyjęto, że w zakresie progowego wzrostu pęknięcia do jego opisu wystarczające jest użycie zakresu współczynnika intensywności naprężenia wyłącznie dla I sposobu obciążenia. Dobór odpowiedniego związku, opisującego prędkość propagacji pęknięć zmęczeniowych, powinien opierać się na znajomości zjawisk i parametrów, jakie występują w badaniach doświadczalnych i ich wzajemnego oddziaływania na siebie. Konieczna jest również weryfikacja istniejących związków opisujących prędkość propagacji pęknięć zmęczeniowych dla złożonych stanów obciążenia.

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę rozwoju pęknięć zmęczeniowych w złożonych stanach obciążenia oraz wyznaczono prędkość propagacji pęknięć w próbkach wykonanych ze stali 10HNAP.

2. Opis propagacji pęknięć

Do opisu prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych użyto związku Paris'a (1) wprowadzając ekwiwalentną wartość współczynnika intensywności naprężenia (2).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eq})^m, \quad (1)$$

gdzie:

C, m – parametry wyznaczone doświadczalnie,

ΔK_{eq} – ekwiwalentny zakres współczynnika intensywności naprężenia.

Zakres ekwiwalentnego współczynnika intensywności naprężeń ΔK_{eq} [5, 6], opisano:

$$\Delta K_{eq} = \sqrt{\Delta K_I^2 + \frac{1}{(1-\nu)} \Delta K_{III}^2}, \quad (2)$$

gdzie zakresy współczynników intensywności naprężeń dla pierwszego i drugiego sposobu obciążenia ΔK_I i ΔK_{III} wyrażono związkami:

$$\Delta K_I = M_{K_I} \Delta \sigma_I \sqrt{\pi a}; \quad (3)$$

$$\Delta K_{III} = M_{K_{III}} \Delta \tau_{III} \sqrt{\pi a}; \quad (4)$$

gdzie:

$$\Delta\sigma_I = \frac{6M_{aw} \cos \alpha}{b(h-a)^2}; \Delta\tau_{III} = \frac{M_{aw} \sin \alpha}{k_2 b(h-a)^2}; a = a_0 + a_i;$$

a – rzeczywista długość pęknięcia,

a_0 – początkowa długość pęknięcia,

a_i – bieżąca mierzona długość pęknięcia,

k_2 – współczynnik zależny od stosunku $b/(h-a)$.

Współczynniki M_{KI} i M_{KIII} wyznaczone za pomocą równań (5) i (6) [7, 8]:

$$M_{KI} = \frac{5}{\sqrt{20 - 13\frac{a}{h} - 7\left(\frac{a}{h}\right)^2}}, \quad (5)$$

$$M_{KIII} = \sqrt{2\frac{h}{a} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi a}{2h}\right)}; \quad (6)$$

gdzie:

b – szerokość próbki,

h – wysokość próbki.

Parametry C i m wyznaczone na podstawie wyników doświadczalnych przyjmując kryterium największej dokładności dopasowania krzywej teoretycznej do punktów eksperymentalnych metodą minimum kwadratów odległości od krzywej teoretycznej [9].

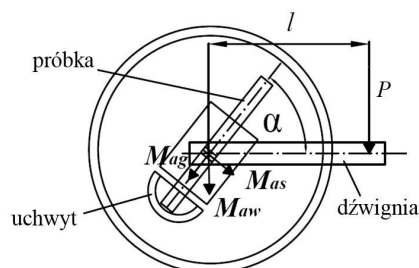
3. Badania doświadczalne

Do badań trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnej oraz pomiaru prędkości propagacji pęknięć użyto maszyny zmęczeniowej typu MZGS 100 wraz z urządzeniem do rejestracji długości pęknięć [10, 11] pokazanej na rys. 1.

a)



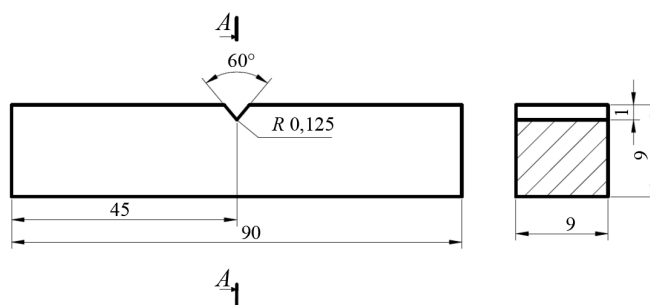
b)



Fot. 1. a) zdjęcie maszyny zmęczeniowej MZGS 100; b) schemat obciążenia próbki
Photo 1. a) fatigue test stand MZGS 100; b) specimen loading

Badania przeprowadzono dla dwóch amplitud momentu wypadkowego $M_{aw0} = 13$ i 16 N·m. Do obliczeń przyjęto, że amplituda momentu wypadkowego M_{aw0} zmienia się wraz z propagującym pęknięciem. Zmiana ta spowodowana jest zmianą sztywności próbki

podczas propagacji pęknięć zmęczeniowych [12]. Zastosowano próbki o przekroju prostokątnym z jednostronnym karbem typu V, o geometrii przedstawionej na rys. 2. Próbkę wykonano ze stali konstrukcyjnej 10HNAP (S355J2WP).



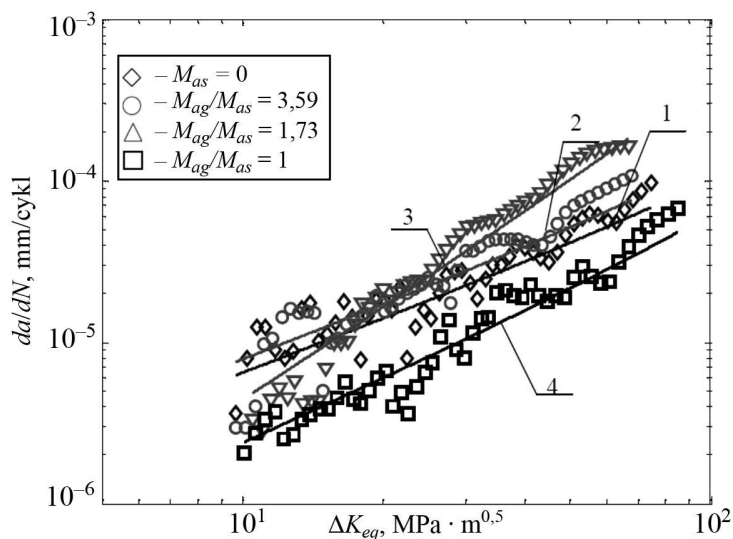
Rys. 1. Kształt i wymiary próbki
Fig. 1. Shape and dimensions of a specimen

Do pomiaru długości pęknięć zmęczeniowych użyto mikroskopu przenośnego o powiększeniu $50\times$ i mikrometru o dokładności pomiaru $0,01$ mm. Badania przeprowadzono dla dwóch poziomów obciążenia tj. dla początkowej amplitudy momentu wypadkowego $M_{aw0} = 13$ i 16 N·m. Badania prowadzono dla zmieniającego się kąta skręcenia dźwigni α , co powodowało zmianę stosunku amplitud momentu zginającego M_{ag} do amplitudy momentu skręcającego M_{as} .

4. Analiza wyników badań

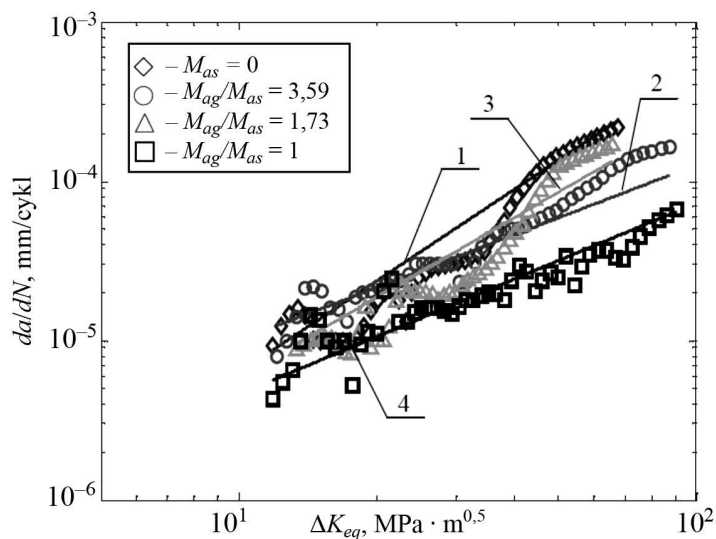
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przebiegi prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w funkcji ekwiwalentnego zakresu współczynnika intensywności naprężenia dla czterech stosunków momentu zginającego M_{ag} do momentu skręcającego M_{as} , tj. $M_{as}=0, 3,59, 1,73, 1$, co odpowiadało wychyleniu dźwigni na maszynie o kąt $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ i 45° dla stali 10HNAP.

W przypadku badań trwałości zmęczeniowej próbek zmniejszenie stosunku amplitud momentów M_{ag}/M_{as} powodowało wzrost trwałości próbek [9]. Natomiast prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych nie zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem się stosunku amplitud M_{ag}/M_{as} w sposób ciągły tj. w początkowej fazie rozwoju pęknięcia jego prędkość zmniejszała się wraz ze wzrostem udziału obciążeń skręcających, jednakże w późniejszej fazie rozwoju prędkość dla stosunku amplitud $M_{ag}/M_{as} = 3,59$ i $1,73$ była większa od prędkości dla zginania (rys. 2). Największy spadek prędkości występuje przy stosunku amplitud $M_{ag}/M_{as} = 1$, co potwierdza największy wzrost trwałości zmęczeniowej przy tej kombinacji obciążenia dla obu stali. Efekt ten może być spowodowany tym, że w początkowej fazie rozwoju pęknięcia przy wzroście udziału obciążeń skręcających istnieje silne oddziaływanie pomiędzy powierzchniami pęknięć, spowalniając ich rozwój. Uzyskane wyniki zostały aproksymowane za pomocą związku (1) uwzględniającego zakres ekwiwalentnego współczynnika intensywności naprężenia ΔK_{eq} . Współczynniki C i m podane zostały w tabeli 1 i 2.



Rys. 2. Przebiegi prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w funkcji zakresu ekwiwalentnego współczynnika intensywności naprężenia dla stali 10HNAP przy $M_{av0} = 13 \text{ N}\cdot\text{m}$

Fig. 2. Fatigue crack propagation rates versus the equivalent stress intensity factor for 10HNAP steel for $M_{av0} = 13 \text{ N}\cdot\text{m}$



Rys. 3. Przebiegi prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w funkcji zakresu ekwiwalentnego współczynnika intensywności naprężenia dla stali 10HNAP przy $M_{av0} = 16 \text{ N}\cdot\text{m}$

Fig. 3. Fatigue crack propagation rates versus the equivalent stress intensity factor for 10HNAP steel for $M_{av0} = 16 \text{ N}\cdot\text{m}$

Tabela 1

Wartości współczynników C i m oraz współczynników korelacji r
dla materiału 10HNAP przy $M_{aw0} = 13 \text{ N}\cdot\text{m}$

Nr linii	C	M	r
1	$0,379 \cdot 10^{-3}$	1,08	0,971
2	$0,498 \cdot 10^{-3}$	1,10	0,978
3	$0,330 \cdot 10^{-2}$	1,88	0,983
4	$0,450 \cdot 10^{-3}$	1,30	0,970

Tabela 2

Wartości współczynników C i m oraz współczynników korelacji r
dla materiału 10HNAP przy $M_{aw0} = 16 \text{ N}\cdot\text{m}$

Nr linii	C	M	r
1	$0,150 \cdot 10^{-2}$	1,42	0,985
2	$0,575 \cdot 10^{-3}$	1,10	0,987
3	$0,240 \cdot 10^{-2}$	1,71	0,978
4	$0,301 \cdot 10^{-2}$	2,01	0,954

Na fotografii 2 przedstawiono zdjęcia powierzchni próbek, gdzie można zaobserwować kierunek rozwoju pęknięć w zależności od stosunku M_{ag}/M_{as} . Fotografie pęknięć zmęczeniowych wykonano przy powiększeniu $\times 7$ na mikroskopie stereoskopowym (fot. 1).

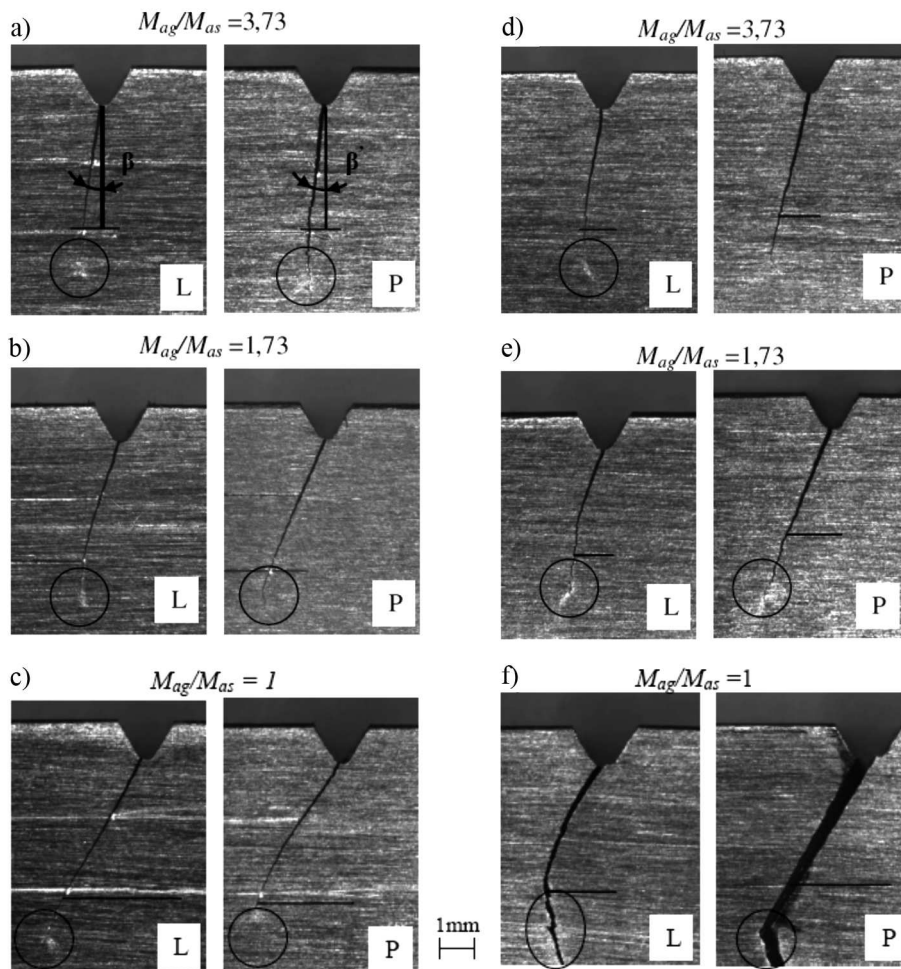
W przypadku obciążenia tylko momentem zginającym (kat $\alpha = 0^\circ$) pęknięcie rozwijało się pionowo w kierunku równoległym do działania siły obciążającej. Dla kombinacji obciążeń zginających i skręcających, tj. różnych stosunków M_{ag}/M_{as} rozwój pęknięć odbywał się pod kątem β (fot. 2). Wartość kąta β wraz z przedziałami ufności dla różnych stosunków M_{ag}/M_{as} podano w tabeli 3. Ponieważ rozwój pęknięć podczas badań był obserwowany tylko z jednej strony próbki, wykonano zdjęcia obydwu stron próbek w celu porównania, czy długości pęknięć przyjmowały takie same długości. Na fotografii 2 można zauważyć, że pęknięcia przyjmują podobne długości, oraz że kąt β przyjmuje podobne wartości dla strony lewej i prawej próbki (tabela 3). Wraz ze zmniejszaniem się stosunku M_{ag}/M_{as} następuje wzrost kąta β , przy którym rozwijają się pęknięcia zmęczeniowe.

Linia poziomą na fotografii 2 zaznaczono długość pęknięcia, do której mierzono jego rozwój. Okręgiem zaznaczono widoczną strefę odkształceń plastycznych (lekkie rozjaśnienie na powierzchni próbki), pojawienie się której często powodowało zmianę kierunku rozwoju pęknięć.

Tabela 3

Wartości kąta β dla materiału 10HNAP

Stosunek M_{ag}/M_{as}	Kąt wychylenia dźwigni α [°]	Wartość amplitudy początkowej momentu wypadkowego M_{aw0}			
		$M_{aw0} = 13 \text{ N}\cdot\text{m}$		$M_{aw0} = 16 \text{ N}\cdot\text{m}$	
		Lewa strona próbki β [°]	Prawa strona próbki β [°]	Lewa strona próbki β [°]	Prawa strona próbki β [°]
3,73	15	$13,20 \pm 2,83$	$15,33 \pm 1,01$	$14,47 \pm 2,91$	$15,37 \pm 3,41$
1,73	30	$19,30 \pm 1,92$	$21,23 \pm 3,09$	$23,13 \pm 2,99$	$23,87 \pm 2,50$
1	45	$30,30 \pm 1,86$	$33,53 \pm 1,35$	$31,40 \pm 4,64$	$32,13 \pm 7,99$



Fot. 2. Fotografie pęknięć zmęczeniowych w próbkach wykonanych z materiału 10HNAP: a), b), c) – dla $M_{av0} = 13\text{N}\cdot\text{m}$, d), e), f) – dla $M_{av0} = 16\text{N}\cdot\text{m}$, gdzie oznaczono: L i P – odpowiednio lewa i prawa powierzchnia próbki

Photo 2. Pictures of fatigue cracks in specimens made of 10HNAP steel: a), b), c) – for $M_{av0} = 13\text{N}\cdot\text{m}$, d), e), f) – for $M_{av0} = 16\text{N}\cdot\text{m}$ where L and P mean left and right specimen surface respectively

5. Wnioski

Przeprowadzone badania zmęczeniowe stali 10HNAP przy cyklicznym zginaniu ze skręcaniem umożliwiły poznanie wpływu obciążeń skręcających na zachowanie się rozwoju pęknięć w badanych stalach. Na podstawie tych badań wyznaczona została prędkość propagacji pęknięć. Wykazano istotny wpływ obciążeń skręcających na prędkość propagacji pęknięć. Stwierdzono, że wzrost amplitudy momentu skręcającego M_{as} przy

stałej wartości początkowej amplitudy momentu wypadkowego M_{aw0} powoduje spadek prędkości propagacji pęknięć szczególnie w ich początkowym stadium rozwoju. Na zmniejszenie prędkości propagacji ma wpływ redystrybucja składowych naprężeń normalnych od zginania i stycznych od skręcania w strefie pęknięcia zmęczeniowego oraz wzrost sił tarcia pomiędzy powierzchniami pęknięcia wraz ze zwiększeniem amplitudy momentu skręcającego. Również kąt rozwoju pęknięć zmienia się (rośnie) wraz ze wzrostem obciążeń skręcających. Natomiast przy wyznaczaniu współczynników C i m w związku Paris'a należy zwrócić uwagę, że zależą one zarówno od własności materiałowych, jak i od zmiany stosunków amplitud momentów M_{ag}/M_{as} .

Literatura

- [1] Gasiak G., *Trwałość materiałów konstrukcyjnych przy obciążeniach cyklicznych z udziałem wartości średniej obciążenia*, Oficyna wydawnicza PO, Opole 2002.
- [2] Yates J.R., Miller K.J., *Mixed mode (I + III) fatigue thresholds in a forging steel*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 12, No. 3, 1989, 259-270.
- [3] Yates J.R., Mohammed R.A., *The determination of fatigue crack propagation rates under mixed mode (I+III) loading*, International Journal of Fatigue, Vol. 18, No. 5, 1996, 197-203.
- [4] Yates J.R., Mohammed R.A., *Crack propagation rates under mixed mode (I+III) loading*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 19, No. 10, 1996, 1285-1290.
- [5] Socie D.F., Hua C.T., Worthem D.W., *Mixed mode small crack growth*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 10, 1987, 1-16.
- [6] You B.R., Lee S.B., *Fatigue crack growth behaviour of SM45C steel under mixed – mode I and II loading*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 21, 1998, 1037-1048.
- [7] Picard A.C., *The application of 3 – dimensional finite element methods to fracture mechanics and fatigue prediction*, London 1986.
- [8] Hellier A.K., Corderoy D.J.H., McGirr M.B., *A practical mixed mode II/III fatigue test rig*, International Journal Fatigue, Vol. 9, 1987, 95-101.
- [9] Gasiak G., Grzelak J., Robak G., *Modelowanie trwałości w zakresie rozwoju pęknięć zmęczeniowych przy zginaniu ze skręcaniem*, X Konferencja Mechaniki Pękania, Wisła 2005, Zeszyty Naukowe PO, Mechanika Nr 304, z 82, Opole 2005, 297-304.
- [10] Ahtelik H., Jamroz L., Patent PRL nr 112497, CSR nr200236 i HDR nr 136544.
- [11] Robak G., Gasiak G., *Zestaw badawczy do pomiaru rozwoju pęknięć zmęczeniowych przy obciążeniach złożonych*, Przegląd Mechaniczny, 2/08, 34-35.
- [12] Gasiak G., Robak G., *Trwałość stali konstrukcyjnych w zakresie mieszanych sposobów rozwoju pęknięć zmęczeniowych*, Oficyna Wydawnicza PO, z. 211, Opole 2007.