



## Wpływ amplitudy i prędkości obciążania na wielkość energii dyssypowanej podczas cyklicznego skręcania stopu aluminium

TOMASZ KARASIEWICZ\*, ZDZISŁAW BOGDANOWICZ,  
JULIAN POLAŃSKI\*

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

\*Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki,  
85-064 Bydgoszcz, ul. Chodkiewicza 30

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano wyniki badań stopu aluminium PA6 poddanego cyklicznemu skręcaniu w zakresie małej liczby cykli przy wymuszeniu naprężeniowym. Przedstawiono zależność energii dyssypowanej w funkcji amplitudy naprężenia dla różnych prędkości obciążania. Określono charakter pękania elementów poddanych cyklicznemu skręcaniu.

**Słowa kluczowe:** cykliczne skręcanie, dyssypacja energii, pętla histerezy

**Symbole UKD:** 669.715

### 1. Wstęp

Określanie trwałości zmęczeniowej jest zagadnieniem bardzo ważnym dla wielu konstrukcji i urządzeń i dlatego często opisywanym w wielu publikacjach. Pomimo to, do tej pory brak jest uniwersalnego kryterium trwałości zmęczeniowej uwzględniającego różne warunki obciążenia. W konsekwencji powstało wiele kryteriów oceny trwałości zmęczeniowej opartych na różnych parametrach zniszczenia [1, 2, 5, 6, 8]: kryteria naprężeniowe, odkształceniowe oraz energetyczne.

Ujęcie energetyczne zapewnia dokładniejsze i pełniejsze szacowanie trwałości zmęczeniowej, gdyż bazuje na wielkości naprężenia i odkształcenia. Miarą trwałości zmęczeniowej w kryteriach energetycznych jest energia dyssypowana,

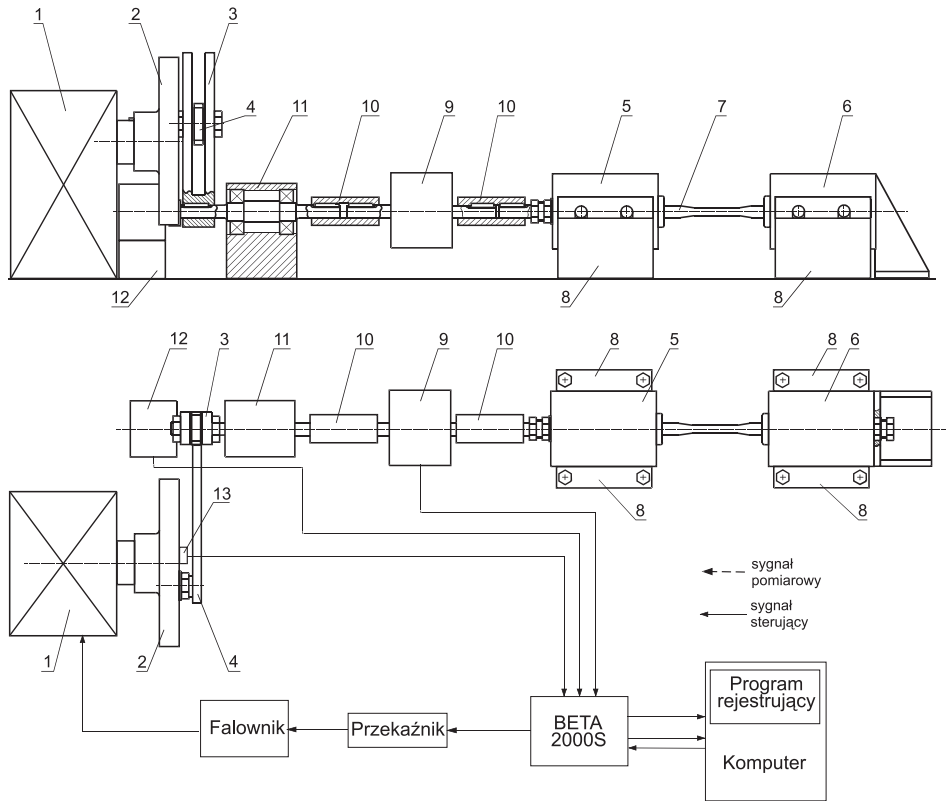
której wielkość określa pole pętli histerezy w układzie naprężenie-odkształcenie. Podejście energetyczne jest szczególnie przydatne do określania trwałości zmęczeniowej w zakresie niskocyklowym, tj. do około  $10^4$  liczby cykli do zniszczenia [3, 5]. Taka liczba cykli odkształceń plastycznych występuje często w czasie eksploatacji maszyn i urządzeń.

Celem badań było eksperymentalne określenie wpływu amplitudy oraz prędkości zmian naprężenia na wielkość dyssypowanej energii podczas cyklicznego skręcania w zakresie małej liczby cykli stopu aluminium PA6. Poznawczym celem było również określenie przebiegu pęknięcia badanych elementów

## 2. Stanowisko badawcze i badane próbki

Ze względu na brak odpowiedniej aparatury do badań przy obciążeniu skręcającym zbudowano w Katedrze Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy specjalne stanowisko badawcze z komputerowym sterowaniem i rejestracją wyników (rys. 1). Stanowisko to umożliwia określanie energii dyssypowanej podczas cyklicznego skręcania przy zadanej amplitudzie naprężenia lub zadanej amplitudzie odkształcenia. Istotną zaletą stanowiska jest możliwość regulacji prędkości obciążania. Powszechnie wiadomy jest wpływ prędkości obciążania na zachowanie się materiału pod wpływem obciążeń cyklicznych [4]. Cykliczne skręcanie próbek jest realizowane za pomocą motoreduktora poprzez mechanizm korbowodowy. Amplituda naprężenia zadawana jest przez układ elektroniczny sterowany komputerowo. Natomiast regulacja amplitudy odkształcenia odbywa się w mechanizmie korbowodowym. Sterowanie prędkością odkształcenia lub naprężenia odbywa się za pomocą przemiennika częstotliwości (falownika) w układzie zasilania motoreduktora. Zastosowanie falownika umożliwia zmianę częstotliwości obciążania w zakresie od 0,1 Hz do 1,2 Hz, odbywa się to poprzez zmianę częstotliwości prądu zasilającego motoreduktor w zakresie od 6 Hz do 75 Hz. Stanowisko zapewnia obciążenie momentem skręcającym do wartości  $\pm 100$  Nm. Wartość maksymalnego kąta skręcenia regulować można w zakresie  $\pm 45$  stopni.

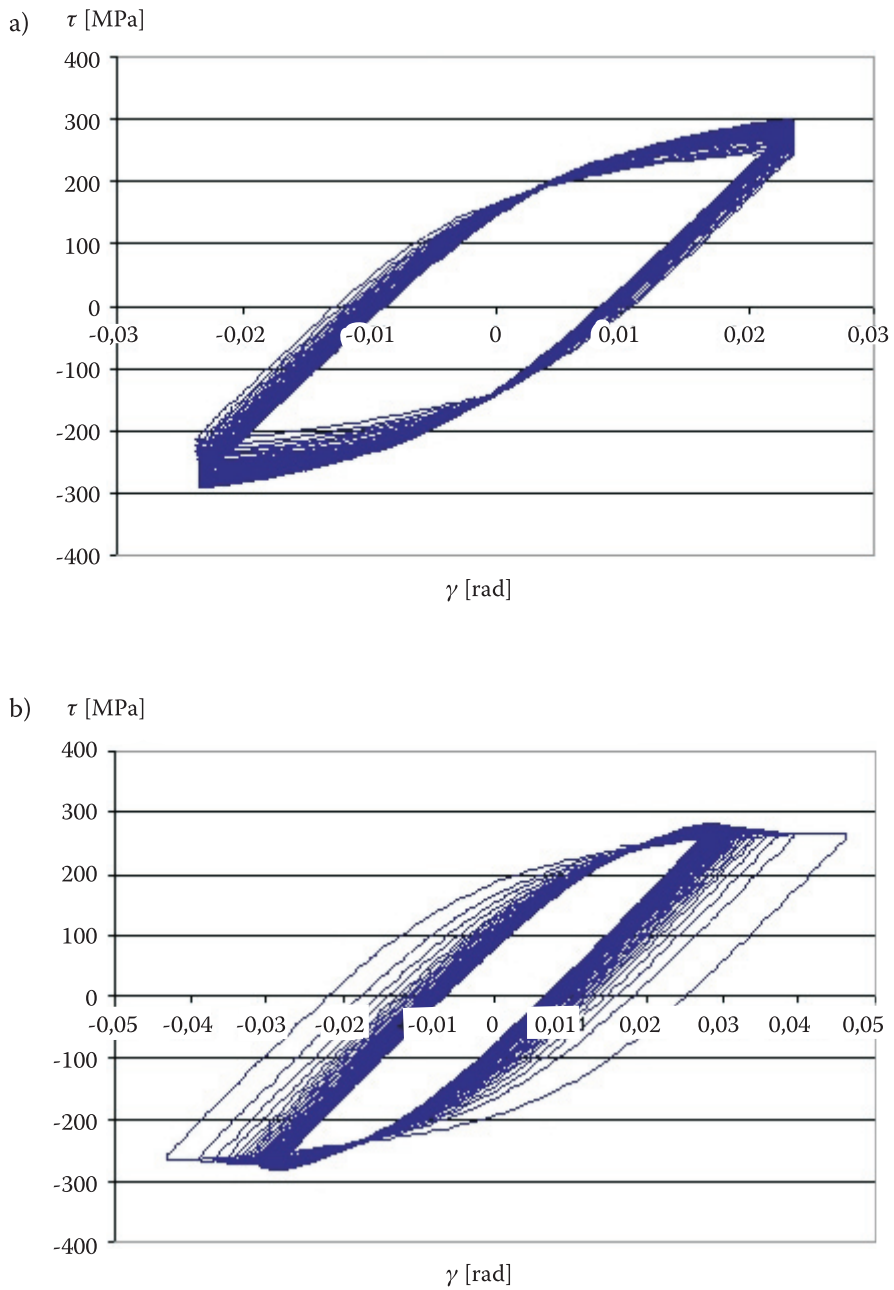
Współczesne techniki pomiarowe umożliwiają, dzięki zastosowaniu cyfrowych systemów sterowania i pomiaru, dyskretny zapis wartości sygnałów uzyskiwanych z przetworników pomiarowych. W celu rejestracji oraz przetwarzania danych stanowisko wyposażono w autorskie oprogramowanie. Układ pomiarowy na podstawie wielkości pola pętli histerezy umożliwia ciągłą rejestrację dyssypowanej energii. Odbywa się to poprzez pomiary cyfrowego sygnału momentu i odkształcenia. Tworzą one punktowy opis pętli histerezy w układzie naprężenie-odkształcenie. Dokładność odwzorowania pętli zależy od przyjętej częstotliwości próbkowania — od 50 do 200 Hz.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań zmęczeniowych w warunkach wahadłowego skręcania (1 — motoreduktor; 2 — koło napędowe; 3 — korba; 4 — korbowód; 5, 6 — uchwyty; 7 — próbka; 8 — podpora; 9 — momentomierz; 10 — sprężęto; 11 — podpora pośrednia; 12 — czujnik kąta skręcania, 13 — licznik obrotów)

W skład układu pomiarowego wchodzi: momentomierz MT200 o zakresie pomiarowym  $\pm 200$  Nm; optoelektroniczny przetwornik obrotowo-impulsowy M500 o rozdzielczości  $1/4096$  części kąta pełnego; elektroniczny licznik obrotów; interfejs Beta2000S oraz komputer PC.

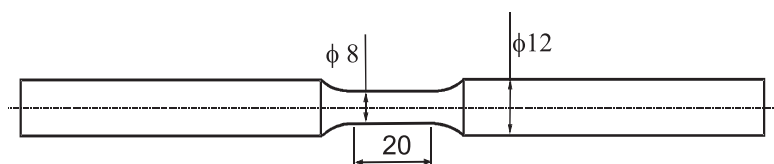
W zależności od zadanych parametrów (momentu skręcającego —  $M_S$  lub kąta skręcania —  $\varphi$ ) można realizować badania zmęczeniowe w dwóch trybach: I — przy wymuszeniu naprężeniowym lub II — przy wymuszeniu odkształceniowym. Przykładowe wyniki badań w postaci pętli histerezy przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowe doświadczalne pętle histerezy uzyskane dla materiału PA6 przy: a) zadanym odkształceniu; b) zadanym naprężeniu

### 3. Badania i wyniki

Badania przeprowadzone zostały na próbkach cylindrycznych wykonanych ze stopu aluminium wg EN: AW-2017 (PA6 oznaczenie wg PN). Próbki (rys. 3) wykonano z wyciskanych prętów o średnicy 12 mm, przy ich wykonywaniu kierowano się zaleceniami norm PN-76/H-04326, PN-74/H-04327, PN-76/H-04325 oraz PN-84/H-04334. Powierzchnie próbek na długości pomiarowej obrobiono poprzez skrawanie i szlifowanie. Następnie wypolerowano je w celu zmniejszenia wpływu karbu na trwałość zmęczeniową, tak aby chropowatość wynosiła co najwyżej 0,32  $\mu\text{m}$  parametru Ra. Właściwości mechaniczne oraz skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Próbką badawcza

TABELA 1

Skład chemiczny i własności mechaniczne badanych próbek

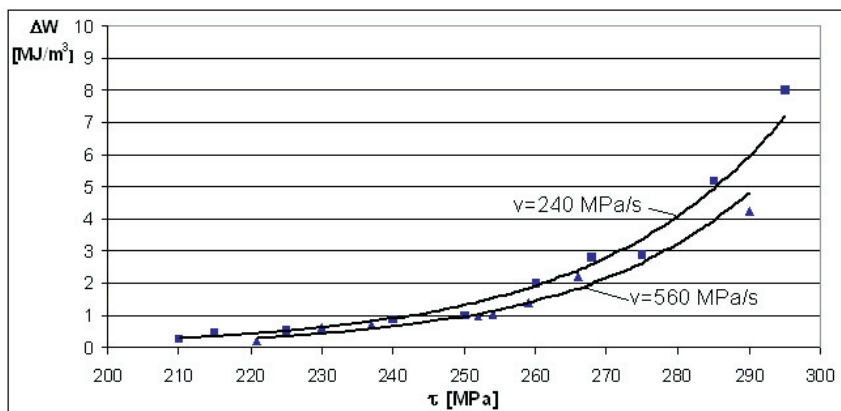
Skład chemiczny [%]							
Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zr+Ti	Zn	Cr
3,5-4,5	0,4-1,0	0,4-1,0	0,2-0,8	do 0,7	do 0,25	do 0,25	do 0,10
Własności mechaniczne							
$R_{0,2}$ [MPa]				$R_m$ [MPa]		$A_5$ [%]	
min 260,0				min 420,0		min 15,0	

Badania realizowano przy  $\Delta\sigma_a = \text{const}$  i dotyczyły one określenia wpływu amplitudy naprężenia na wielkość dyssypowanej energii ustabilizowanej pętli histerezy przy cyklicznym, symetrycznym obciążeniu. Przeprowadzono je dla dwóch zadanych częstotliwości obciążeń wynoszących odpowiednio:  $f_1 = 0,45$  Hz oraz  $f_2 = 1,15$  Hz, co odpowiadało prędkości obciążania 240 oraz 560 MPa/s. Dla prędkości  $v_1 = 240$  MPa/s amplitudę naprężenia przyjmowano od 210 do 295 MPa, natomiast dla prędkości  $v_2 = 560$  MPa od 220 do 290 MPa.

Na podstawie wyników badań uzyskano energię ustabilizowanych pętli dla różnych amplitud naprężenia. Za ustabilizowanie przyjęto pierwsze powtórzenie

się pętli (powstanie kolejnej pętli o takim samym kształcie). Zgodnie z danymi literaturowymi [1] stabilizacja następowała do  $\frac{1}{2}$  liczby cykli do zniszczenia.

Sporządzono wykresy przedstawiające zależność jednostkowej energii dyssypowanej od amplitudy naprężenia (rys. 4). Miarą jednostkowej energii jest pole pojedynczej pętli histerezy w stanie ustabilizowanym.

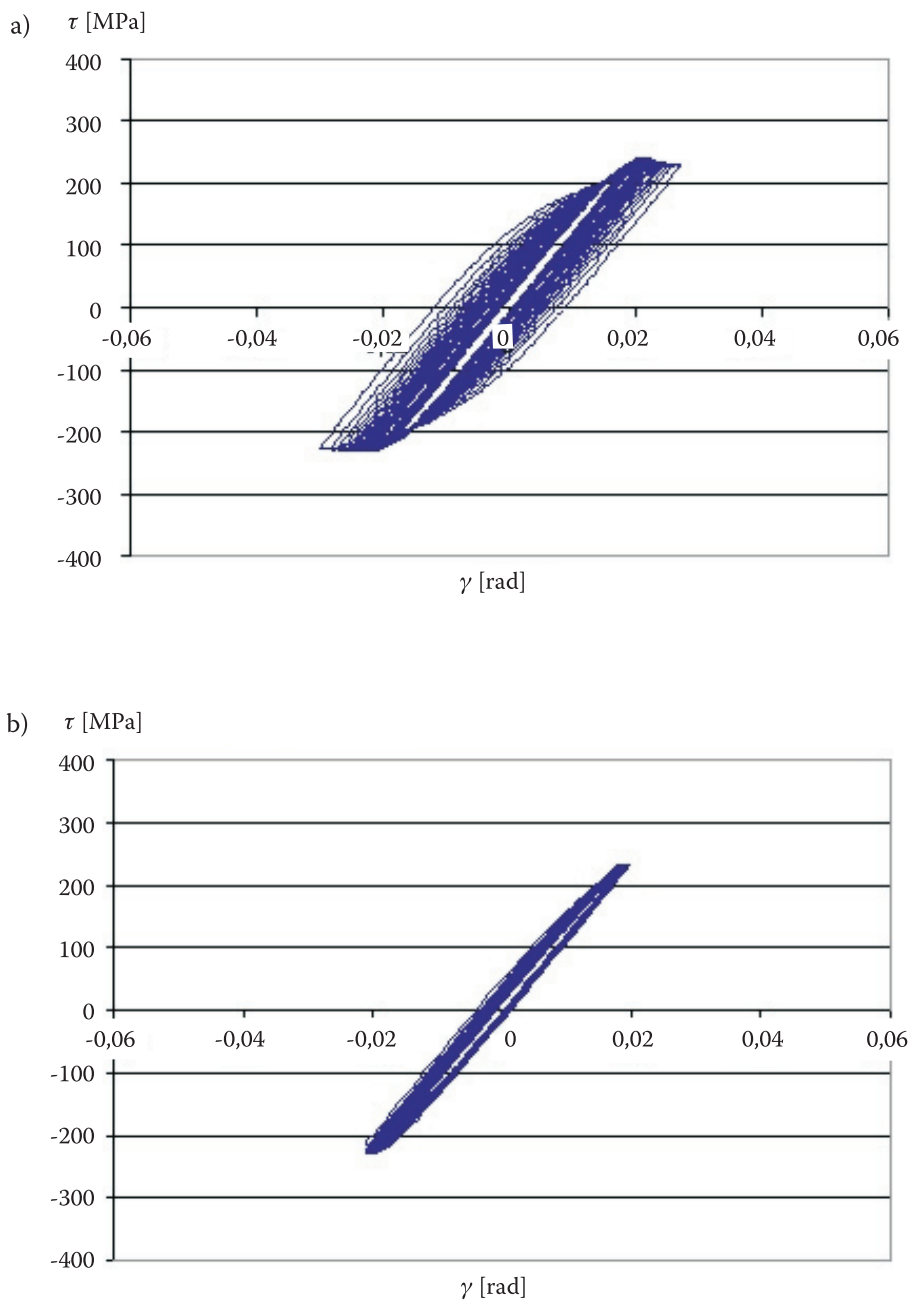


Rys. 4. Zależność jednostkowej energii dyssypowanej od amplitudy naprężenia przy cyklicznym skręcaniu dla dwóch prędkości obciążania

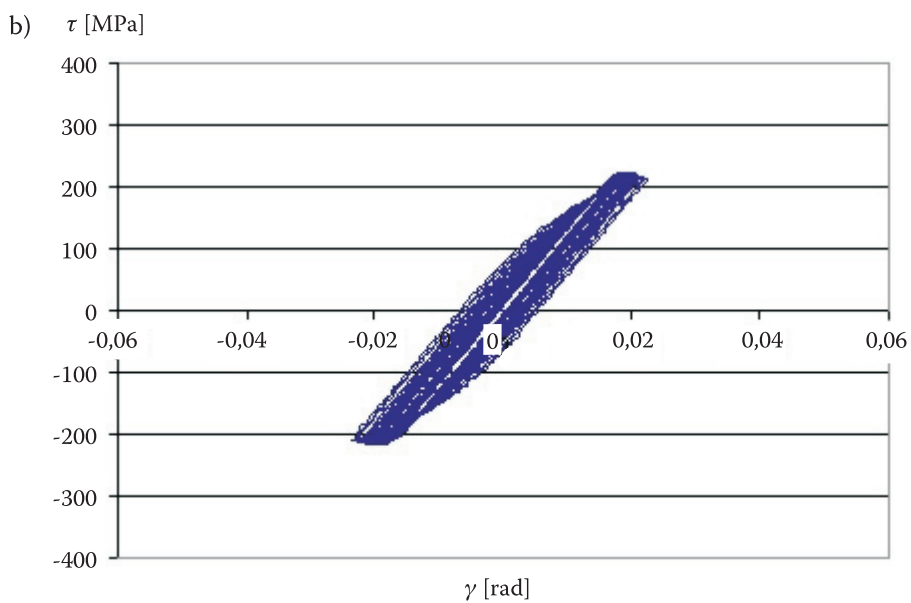
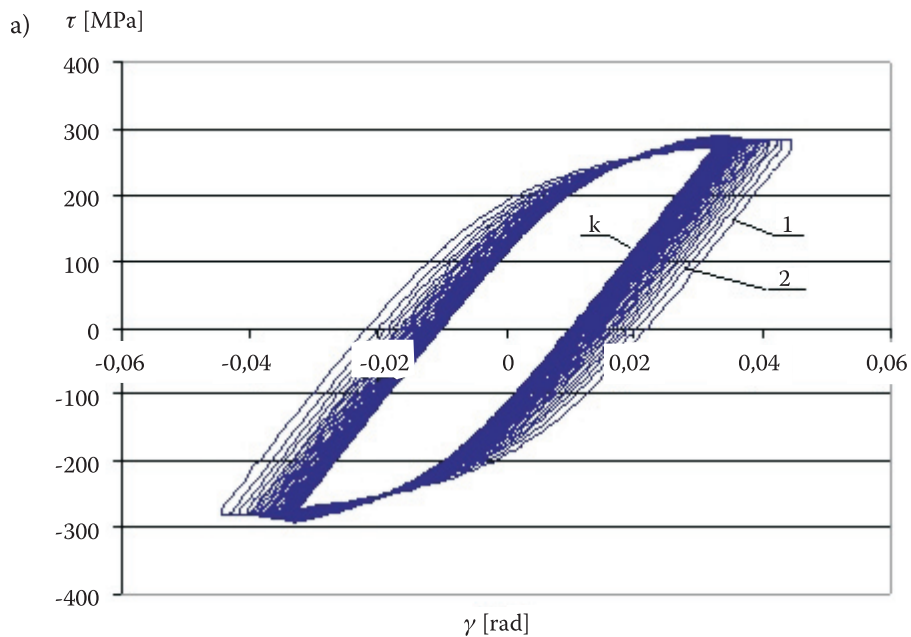
Badania potwierdziły powszechnie znany wpływ amplitudy naprężenia na wielkość energii  $\Delta W$  ustabilizowanej pętli histerezy. Wynika to stąd, że wielkość dyssypowanej energii związana jest z wielkością występujących odkształceń plastycznych, które rosną wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia. Ponadto obserwuje się również wpływ prędkości obciążania na wielkość energii ustabilizowanej pętli histerezy. Krzywa przedstawiająca zależność energii od amplitudy przy prędkości mniejszej  $v_1 = 240$  MPa/s ma wyższe wartości, tzn. przebiega powyżej krzywej sporządzonej dla wyższej prędkości  $v_2 = 560$  MPa/s. Oznacza to, że energia jednostkowa maleje wraz ze wzrostem prędkości obciążania. Jest to wynikiem umacniania się materiału i zmniejszania odkształceń plastycznych, co jest szczególnie widoczne na rysunku 6a.

Na rysunku 5 pokazano przykładowe wyniki badań wpływu prędkości zmian obciążania na energię dyssypacji dla prób przy prędkości 240 i 560 MPa/s oraz amplitudzie naprężenia w obu przypadkach równej 230 MPa. Pętle przy mniejszej prędkości mają większe pola powierzchni, co oznacza większą energię dyssypowaną, natomiast dla próby z większą prędkością pola mają mniejszą powierzchnię.

Badania zmęczeniowe przeprowadzono również na próbkach pełnych. Na rysunkach 7 i 8 pokazana jest powierzchnia niszczenia próbki po 7000 cykli do

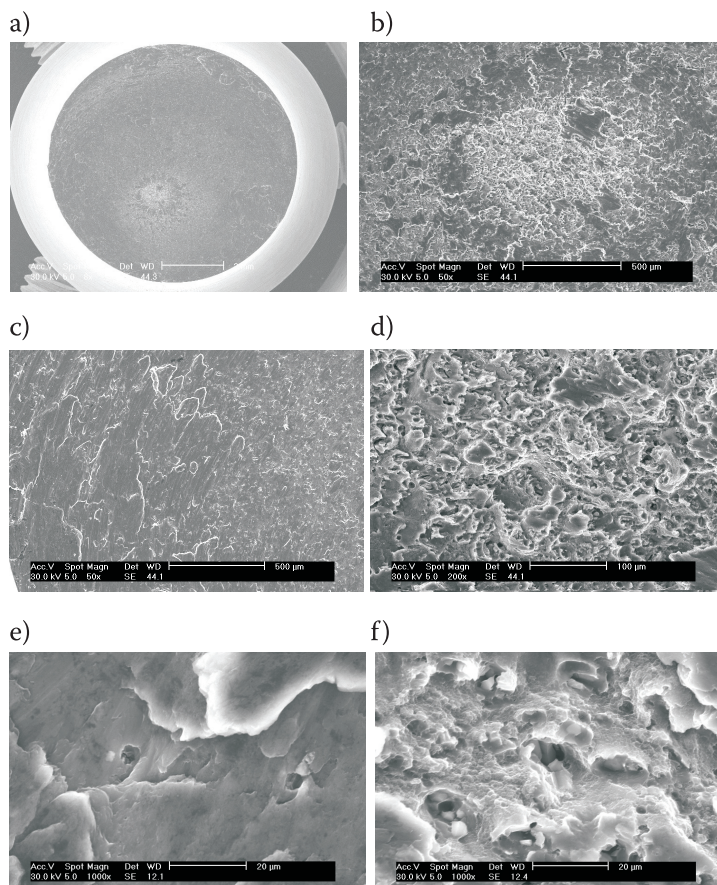


Rys. 5. Pętle histerezy przy stałej zadanej amplitudzie naprężenia 230 MPa: a) dla prędkości  $v = 240$  MPa/s;  
b) dla prędkości 560 MPa/s



Rys. 6. Pętle histerezy przy stałej zadanej prędkości naprężenia 240 MPa/s: a) dla amplitudy  $\tau = 295$  MPa; b) dla amplitudy  $\tau = 220$  MPa





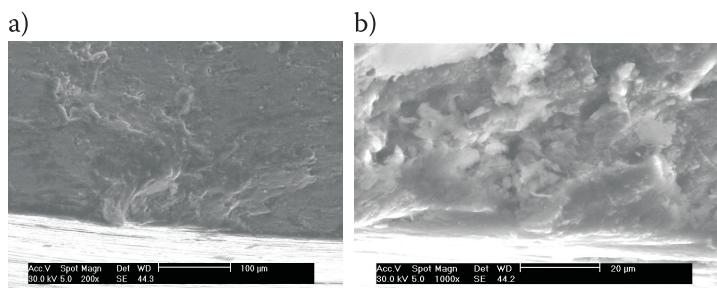
Rys. 7. Powierzchnia pękania zmęczeniowego próbki poddanej cyklicznemu skręcaniu przy naprężeniu 210 MPa i prędkości obciążania 240 MPa/s

zniszczenia, poddanej działaniu naprężenia wymuszającego 210 MPa przy prędkości 240 MPa/s. Zdjęcia wykonane na skaningowym mikroskopie elektronowym w Wojskowej Akademii Technicznej. Obserwacja powierzchni przełomu potwierdza ogólnie znany mechanizm niszczenia zmęczeniowego występujący przy cyklicznym skręcaniu w zakresie małej liczby cykli. Zdjęcie na rysunku 7a przedstawia przełom zmęczeniowy powstały w płaszczyźnie działania naprężeń stycznych, prostopadły do osi próbki. Na przełomie uwidacznia się niewielka kołowa powierzchnia skupiona wokół osi obojętnej rozkładu naprężeń stycznych w przekroju poprzecznym, przedstawiona przy większym powiększeniu na rysunkach 7b, d, f.

Mikrobudowa tej strefy wskazuje cechy przełomu plastycznego zbliżonego do przełomu występującego przy statycznym skręcaniu. Plastrowe układy o jamkowym kształcie zawierają wtrącenia fazy międzymetalicznej typu  $\text{CuAl}_2$  widoczne na ry-

sunku 7f. W części zmęczeniowej poza obszarem centralnym w przelomie widoczne są charakterystyczne motylkowe rozety zdeformowane cyklicznym ocieraniem się powierzchni pęknięcia (rys. 7c, e).

Początek niszczenia przy cyklicznym skręcaniu miał miejsce na powierzchni próbki (rys. 8a, b) skąd następnie propagowało wraz ze wzrostem liczby cykli w kierunku jej centrum.



Rys. 8. Miejsce początku niszczenia zmęczeniowego

## 4. Wnioski

1. Zaprojektowane i wykonane stanowisko spełniło oczekiwane założenia i w pełni potwierdziło swoją przydatność w badaniach trwałości zmęczeniowej. Wynika to z precyzyjnego i łatwego sterowania oraz szybkiego i wygodnego odczytywania wyników żądanych wielkości (energia ustabilizowanej pętli, całkowita energia do zniszczenia, ilość cykli do zniszczenia, amplitudy odkształcenia i naprężenia). Napisane oprogramowanie pozwala uzyskiwać wartości dysypowanej energii wykorzystywanej w energetycznych kryteriach trwałości zmęczeniowej, co potwierdziło jego praktyczną przydatność w badaniach.
2. Z przeprowadzonych badań doświadczalnych i analizy wyników stopu aluminium PA6 wynika, że wartość dysypowanej energii odpowiadająca ustabilizowanej pętli histerezy rośnie wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia i dla zadanych parametrów zawiera się w granicach od  $0,25 \text{ MJ/m}^3$  do  $8 \text{ MJ/m}^3$ . Ponadto obserwuje się zmniejszanie się dysypowanej energii ustabilizowanej pętli histerezy wraz ze wzrostem prędkości obciążania.
3. Obserwacja powierzchni przelomu potwierdziła ogólnie znany mechanizm niszczenia zmęczeniowego występujący przy cyklicznym skręcaniu w zakresie małej liczby cykli. Na przelomie uwidoczniła się niewielka kołowa powierzchnia skupiona wokół osi obojętnej rozkładu naprężeń stycznych w przekroju poprzecznym. W części zmęczeniowej poza obszarem centralnym w przelomie występowały charakterystyczne motylkowe rozety zdeformowane cyklicznym ocieraniem się powierzchni pęknięcia.

Artykuł wpłynął do redakcji 4.04.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2007 r.

## LITERATURA

- [1] K. GOŁOŚ, *Trwałość zmęczeniowa metali w ujęciu energetycznym*, Prace Naukowe, Mechanika, z. 123, Warszawa, 1989.
- [2] S. KOCAŃDA, A. KOCAŃDA, *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*, PWN, Warszawa, 1989.
- [3] S. KOCAŃDA, *Zmęczeniowe pękanie metali*, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1985.
- [4] D. KUJAWSKI, *Modelowanie trwałości zmęczeniowej i propagacji pęknięć w metalach*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1991.
- [5] D. KUJAWSKI, *Trwałość zmęczeniowa metali*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1991.
- [6] J. PARK, D. NELSON, *Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life*, International Journal of Fatigue 22, 2000, 23-39.
- [7] J. POLAŃSKI, T. KARASIEWICZ, *Koncepcja określania trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym przy wykorzystaniu matematycznego modelu zachowania się materiału*, Mechanika 53, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz, 2002, 181-188.
- [8] J. SZALA, *Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych*, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz, 1998.

T. KARASIEWICZ, Z. BOGDANOWICZ, J. POLAŃSKI

**Influence of amplitude and load rate on quantity of dissipated energy during cyclic torsion loading of aluminium alloy**

**Abstract.** The paper presents experimental results of PA6 aluminium alloy subjected to cyclic torsion loading at a range of low numbers of cycles with stress control. Dependence of dissipated energy value on a stress amplitude and load rate is presented. Kinds of cracks in elements under cyclic torsion loading were determined.

**Keywords:** cyclic torsion, energy dissipation, hysteresis loop, aluminium alloy

**Universal Decimal Classification:** 669.715