

# **Wczesne wykrywanie i monitorowanie zniszczenia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych**

**Dr inż. Grzegorz Socha**

**IPPT PAN**

## **1. Wstęp**

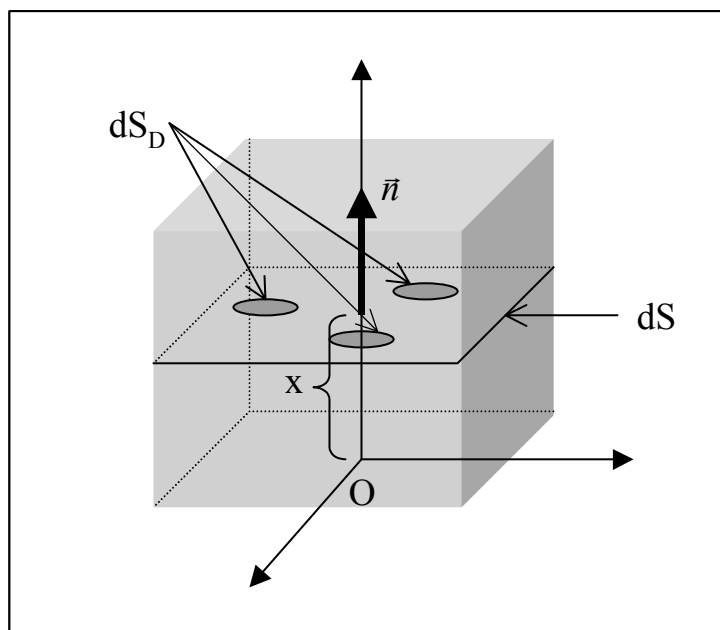
Zniszczenie zmęczeniowe materiałów konstrukcyjnych jest zjawiskiem groźnym dla bezpieczeństwa konstrukcji inżynierskich. Proces degradacji postępujący w czasie eksploatacji prowadzi do obniżenia rezydentnej wytrzymałości konstrukcji co w efekcie może być przyczyną wielu groźnych wypadków. Dzieje się tak na wskutek wywołanych naprężeniami eksploatacyjnymi zmian zachodzących w strukturze materiału: poślizgów defektów sieci krystalicznej, koncentracji tych defektów w miejscach gdzie napotykają one na przeszkody uniemożliwiające dalsze przemieszczanie (granice ziaren, wtrącenia), formowaniu tak zwanych uporczywych pasm poślizgu (ang. Persistent Slip Band ), a także innym procesom jak na przykład transformacje fazowe wywołane naprężeniami lub temperaturą oraz procesy dyfuzyjne. Ostatecznym efektem wspomnianych zjawisk jest nukleacja i wzrost mikropęknięć, a w końcowej fazie procesu zniszczenia uformowanie w materiale szczeliny dominującej. Szczelina ta następnie propaguje w elemencie konstrukcji aż do momentu gdy osiągnie ona wielkość krytyczną. Po osiągnięciu krytycznej wielkości szczeliny obciążenie

eksploatacyjne może wywołać jej niekontrolowany wzrost prowadzący do zniszczenia konstrukcji.

Jak można się łatwo zorientować z powyższego opisu, istotą procesu zniszczenia zmęczeniowego jest nukleacja i wzrost mikroszczelin. Jest więc oczywiste, że w pracach teoretycznych dotyczących zniszczenia zmęczeniowego przyjmowano od początku miarę zniszczenia zmęczeniowego związaną z wielkością mikropęknięć występujących w materiale. Najbardziej rozpowszechniona koncepcja (Kaczanow, 1958) Przyjmowała za miarę zniszczenia materiału gęstość powierzchniową mikropęknięć w reprezentatywnej jednostce objętości materiału. Zaproponowany przez Kaczanowa parametr zniszczenia zdefiniowany był w następujący sposób:

$$D(\vec{n}, x) = \frac{dS_D}{dS}, \quad (1)$$

gdzie  $dS_D$  oznacza powierzchnię defektów (mikropęknięć) a  $dS$  oznacza pole przekroju reprezentatywnej jednostki objętości płaszczyzną prostopadłą do wektora  $n$  położoną w odległości  $x$  od początku układu współrzędnych (patrz rys.1).



Rys.1 Reprezentatywna jednostka objętości uszkodzonego materiału

Jak widać z powyższej definicji parametr zniszczenia nie jest wielkością skalarną ale zależy od kierunku wektora  $n$ . W związku z tym koncepcja Kaczanowa została rozwinięta przez kolejnych badaczy, w roku 1981 S. Murakami wprowadził jako miarę zniszczenia materiału tensor drugiego rzędu. Parametr zniszczenia w postaci wspomnianego tensora jest do dziś stosowany przez wielu badaczy.

Mogłoby się wydawać, że koncepcja parametru zniszczenia została dopracowana w szczegółach a opis zniszczenia materiałów konstrukcyjnych nie następuje żadnych trudności. Kłopoty pojawiają się w momencie, gdy niezbędne jest doświadczalne prześledzenie zmian parametru zniszczenia  $D$  w trakcie eksploatacji konstrukcji lub w trakcie badań laboratoryjnych. Okazuje się bowiem, że tak zdefiniowany parametr uszkodzenia nie daje się zmierzyć żadną ze znanych obecnie metod w okresie poprzedzającym uformowanie się szczeliny dominującej w badanym materiale. Eksperymentalne zbadanie zmian miary uszkodzenia materiału w trakcie eksploatacji konstrukcji lub badań laboratoryjnych jest jednak warunkiem niezbędnym zarówno w przypadku przewidywania trwałości zmęczeniowej jak i dla oceny stopnia ryzyka związanego z dalszą eksploatacją konstrukcji. W związku z tym nadal trwają poszukiwania mierzalnej wielkości reprezentującej zniszczenie zmęczeniowe materiałów konstrukcyjnych.

Współczesne teorie fenomenologiczne opisu procesu zniszczenia zmęczeniowego można podzielić na następujące grupy:

1. opis oparty o krzywą przebiegu zniszczenia
2. modyfikację krzywej Wöhlera
3. opis oparty na mechanice pękania

Najbardziej użyteczna z punktu widzenia konstruktorów i służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo konstrukcji jest pierwsza z tych koncepcji (ang. Damage Curve Approach – DCA). Krzywa przebiegu zniszczenia przedstawia zmiany parametru zniszczenia  $D$  jako

funkcje numeru cyklu obciążenia. Często zamiast numeru cyklu obciążenia na osi rzędnych umieszcza się stosunek liczby cykli wykonanych przy danej amplitudzie obciążenia do liczby cykli powodujących zniszczenie materiału przy tej amplitudzie. Niestety koncepcja krzywej przebiegu zniszczenia może być bezpiecznie stosowana w praktyce inżynierskiej wtedy, gdy parametr  $D$  będzie wielkością mierzalną.

Wiele wysiłku zostało włożone w znalezienie odpowiedniej miary zniszczenia zmęczeniowego. Przykładem interesujących propozycji mogą być pomiary temperatury lub własności magnetycznych. Jakkolwiek udowodniono, że zmiany wymienionych parametrów są związane z procesem zniszczenia zmęczeniowego, jest też oczywiste że pomiary temperatury lub własności magnetycznych mogą być zakłócone przez wiele czynników takich jak na przykład przepływ ciepła lub wpływ pola magnetycznego pochodzącego od źródeł zewnętrznych. W związku z tym są to raczej metody mogące ułatwić znalezienie najbardziej uszkodzonych miejsc konstrukcji niż umożliwiające dokładne określenie stopnia zniszczenia zmęczeniowego materiału konstrukcji.

## **2. Metoda pomiaru zniszczenia zmęczeniowego**

W prezentowanych badaniach przyjęto miarę zniszczenia zmęczeniowego opartą o zmierzone w trakcie badań odkształcenia niesprężyste materiału (w przypadku stali konstrukcyjnych są to odkształcenia plastyczne). Przyjęto, że zmiany odkształcenia niesprężystego po okresie stabilizacji pętli histerezy związanej z umocnieniem lub osłabieniem cyklicznym można przypisać formowaniu się obszarów koncentracji naprężenia wokół wierzchołków mikroszczelin. Jeżeli globalne naprężenia w materiale są niższe od granicy plastyczności, to odkształcenie niesprężyste jest związane z formowaniem tych obszarów. Naprężenia te mogą lokalnie przekroczyć granicę plastyczności, formując wokół wierzchołka szczeliny obszar deformacji plastycznej. Można założyć, że przy braku defektów strukturalnych, odkształcenia niesprężyste nie powinny się pojawiać jeżeli materiał jest obciążany w zakresie sprężystym.

W rzeczywistości materiały konstrukcyjne wykazują zawsze pewne odkształcenie niesprężyste związane z tak zwanym „tarcie wewnętrzny”, nawet jeżeli są obciążane w zakresie sprężystym. Powstanie mikroszczelin powoduje wzrost tego odkształcenia niesprężystego, co daje się obserwować w skali makro jako zmianę szerokości pętli histerezy odkształcenie – naprężenie.

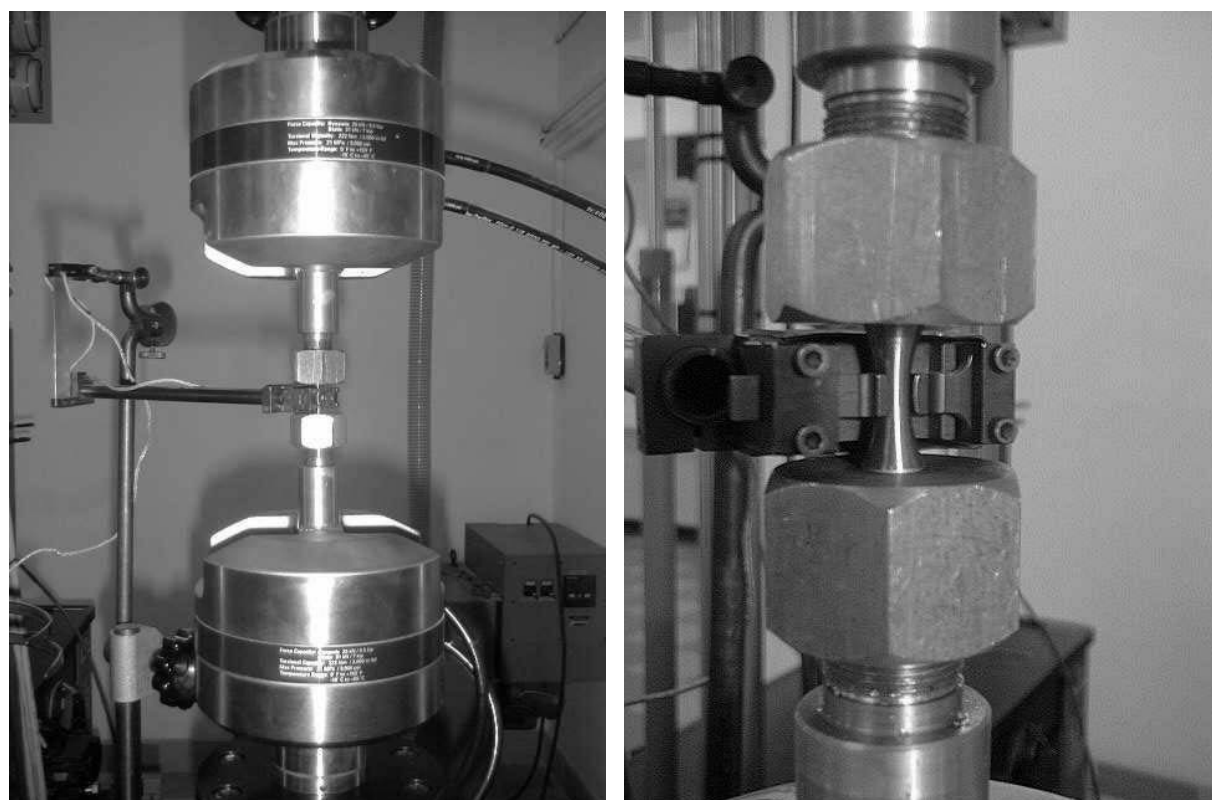
Prezentowane badania zniszczenia zmęczeniowego wykonane zostały przy użyciu serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej MTS 858 o maksymalnej sile  $\pm 25$  kN, sterowanej komputerem typu PC. W badaniach zastosowano specjalne, samo osiujące uchwyty w celu uniknięcia wyboczenia próbki poddanej naprężeniom ściskającym. Jest to bardzo ważne, jako że wyboczenie próbki może spowodować ogromny rozrzut wyników badań. Amplituda naprężeń była kontrolowana i utrzymywana na stałym poziomie w trakcie całego testu. Zastosowano cykle wahadłowe ( $R=-1$ , poziom średni naprężenia  $\sigma_m = 0$ ) o częstotliwości 20 Hz. Wszystkie testy wykonano w temperaturze otoczenia wynoszącej 21°C. W badaniach użyto próbki klepsydrycznej, zaprojektowanej w oparciu o normę ASTM [1]. Taki kształt zapewniał lokalizację procesu zniszczenia zmęczeniowego w najmniejszym przekroju części pomiarowej próbki. Wszystkie próbki wykonane zostały ze stali automatowej A10 (PN-73/H-84026). Skład chemiczny stopu oraz podstawowe własności wytrzymałościowe pokazane są w tabeli 1.

Skład chemiczny [%]					Własności wytrzymałościowe		
C	Mn	Si	P	S	R <sub>0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	Przewężenie [%]
0.12 max	0.9-1.3	0.05 max	0.04-0.8	0.24-0.34	450	570 min	6

*Tab.1 Skład chemiczny i własności wytrzymałościowe stali automatowej A10*

*(według PN-73/H-84026)*

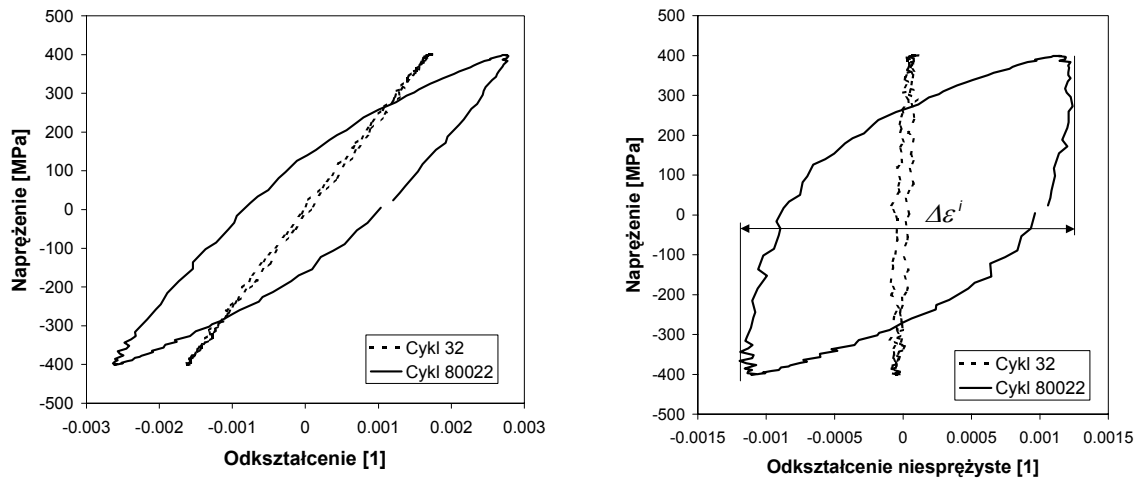
Pomiary odkształcenia poprzecznego wykonywano w najmniejszym przekroju części pomiarowej próbki, co pozwalało na obserwację procesu zniszczenia zmęczeniowego w miejscu, gdzie był on najbardziej zaawansowany. Widok próbki wraz z zamontowanym ekstensometrem mierzącym odkształcenie poprzeczne pokazano na rys.2. W oparciu o zmierzone odkształcenie poprzeczne możliwe było, przy znajomości współczynnika Poissona, obliczenie odkształcenia wzdłużnego.



*Rys.2 Stanowisko badawcze*

Dla wybranych cykli obciążenia, na podstawie zarejestrowanych przebiegów naprężenia i odkształcenia wykreślano pętlę histerezy. Na rys.3 pokazana jest przykładowa pętla histerezy zarejestrowana dla dwóch wybranych cykli obciążenia (cykl 32 oraz cykl 80022) przy amplitudzie naprężeń 400 MPa. Jak widać szerokość pętli histerezy uległa znacznej zmianie na skutek postępującego zniszczenia zmęczeniowego materiału próbki. Wielkość ta,

oznaczona na rysunku jako  $\Delta\varepsilon^i$  odpowiada zakresowi odkształceń niesprężystych w cyklu. Parametr ten będzie używany w dalszej analizie do obserwacji procesu zniszczenia zmęczeniowego.



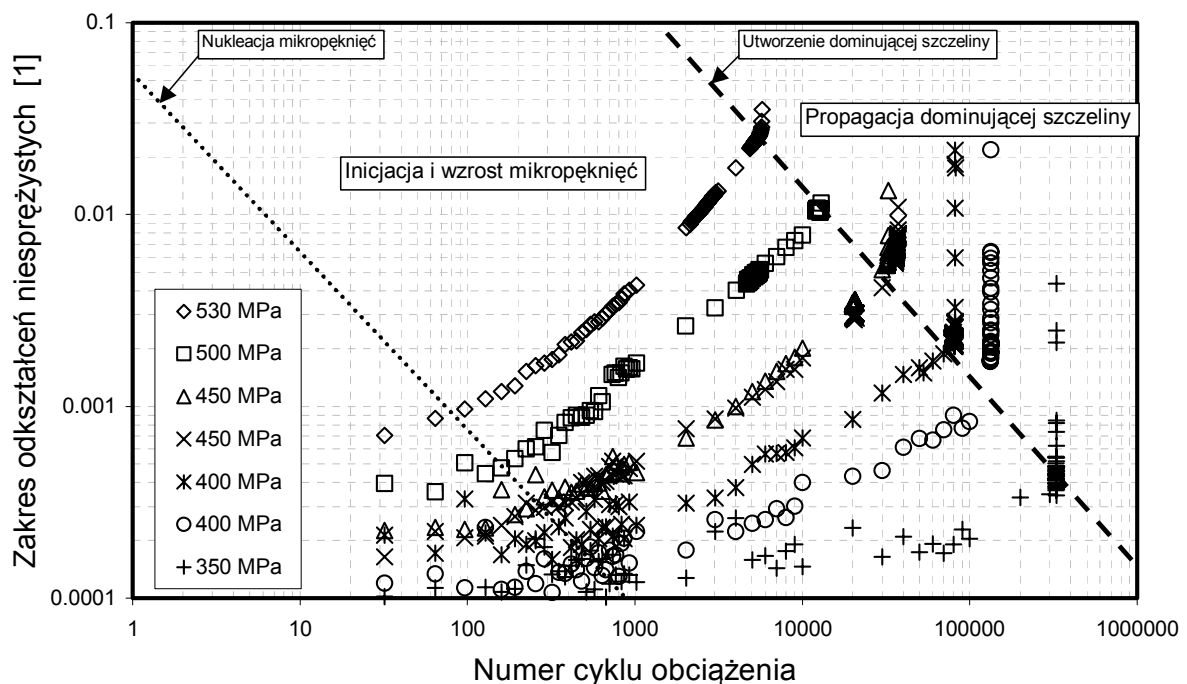
*Rys.3 Przykład pętli histerezy zarejestrowanej dla cyklu numer 32 oraz 80022, przy amplitudzie naprężeń 400 MPa.*

### 3. Analiza wyników badań

Zmiany zakresu odkształceń niesprężystych jako funkcja numeru cyklu obciążenia dla wszystkich badanych próbek pokazane są na rys.4. Badania wykonano dla następujących amplitud naprężenia: 350, 400, 450, 500, 530 MPa . Dzięki przedstawieniu wyników badań w skali podwójnie logarytmicznej możliwe jest wyznaczenie przy pomocy techniki ekstrapolacji powrotnej dwóch linii: linia kropkowana reprezentuje moment nukleacji mikropeknięć, natomiast linia kreskowana reprezentuje moment powstania dominującej szczeliny zmęczeniowej. Wspomniane linie rozdzielają trzy obszary o różnej prędkości procesu zniszczenia zmęczeniowego:

1. Obszar sprężystej deformacji niezniszczonego materiału – brak mikropeknięć, stała szerokość pętli histerezy wywołana tarcieniem wewnętrznym materiału.

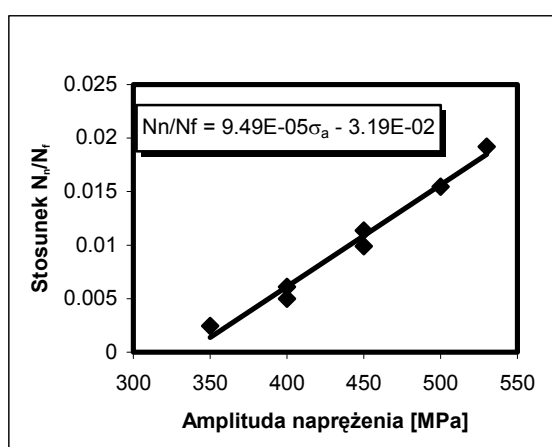
- Obszar inicjacji i stabilnego wzrostu mikropeknięć – w materiale następuje inicjacja wielu mikropeknięć oraz ich stabilny wzrost (wartość odkształceń niesprężystych rośnie z umiarkowaną prędkością).
- Obszar propagacji dominującej szczeliny zmęczeniowej – po połączeniu się kilku mikropeknięć i utworzeniu dominującej szczeliny zmęczeniowej następuje propagacja tej szczeliny w materiale próbki (prędkość przyrostu odkształceń niesprężystych wzrasta gwałtownie).



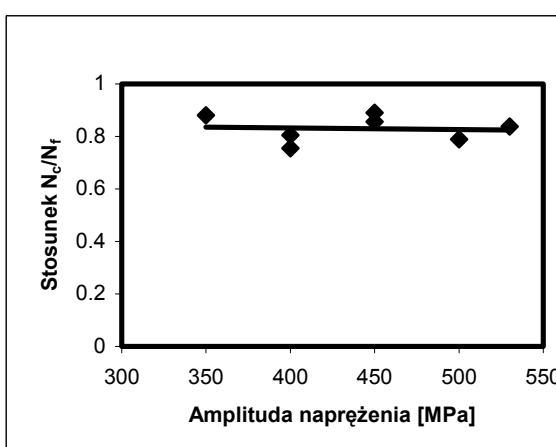
Rys.4 Zakres odkształceń niesprężystych jako funkcja numeru cyklu obciążenia dla wszystkich zastosowanych amplitud naprężenia

Na podstawie analizy danych przedstawionych w opisany powyżej sposób, można określić jaka część czasu eksploatacji konstrukcji przypada na poszczególne etapy procesu zniszczenia zmęczeniowego. Na rys.5 przedstawiono liczbę cykli do nukleacji mikropeknięć  $N_n$  (rys.5a) oraz liczbę cykli do utworzenia pęknięcia dominującego  $N_c$  (rys.5b) jako ułamek liczby cykli do zniszczenia próbki. Dla badanej w postaci przedstawionej na rys.2 próbki stali A10 nukleacja mikropeknięć zajmuje od 0 do 2 % czasu eksploatacji w zależności od amplitudy

naprężenia (a więc następuje bardzo szybko). Natomiast utworzenie dominującej szczeliny zmęczeniowej następuje po około 85 % czasu eksploatacji (dlatego jej wykrycie jest zazwyczaj możliwe dopiero w końcowej fazie procesu zniszczenia konstrukcji). Możliwość wczesnego wykrycia zniszczenia zmęczeniowego w oparciu o pomiary odkształceń niesprężystych umożliwia zatem radykalne zwiększenie marginesu bezpieczeństwa w trakcie eksploatacji konstrukcji jako że monitorowanie postępów zniszczenia jest możliwe już po około 2 % czasu eksploatacji.



a) Stosunek  $N_n/N_f$



b) Stosunek  $N_c/N_f$

*Rys.5 Liczba cykli do nukleacji mikropęknięć  $N_n$  oraz liczba cykli do utworzenia pęknięcia dominującego  $N_c$  jako ułamek liczby cykli do zniszczenia próbki.*

#### 4. Podsumowanie

Badanie procesu zniszczenia zmęczeniowego za pomocą pomiarów odkształceń niesprężystych jest efektywną metodą badania degradacji materiału w warunkach laboratoryjnych. Opisaną metodę badawczą można jednak wykorzystać w wielu innych zastosowaniach.

1. Czas bezpiecznej eksploatacji konstrukcji można oszacować w sposób opisany w pracy [2]. Jest to możliwe pod warunkiem, że wszystkie użyte w tej pracy parametry materiałowe wyznaczono na podstawie opisanych w tym artykule badań.

2. Badanie niszczące stopnia zniszczenia zmęczeniowego materiału konstrukcji można wykonać wycinając z tej konstrukcji próbkę i poddając ją kilku cyklom siły z jednoczesnym pomiarem zakresu odkształceń niesprężystych. Jeżeli dla danego materiału wykonano uprzednio badania opisane w tym artykule to możliwe jest obliczenie zniszczenia zmęczeniowego elementu konstrukcji.
3. Nieniszczący pomiar zniszczenia zmęczeniowego w oparciu o opisaną metodę jest możliwy pod warunkiem że możemy zmierzyć lub obliczyć stan odkształcenia oraz naprężenia w danym punkcie konstrukcji. Niezbędne jest także zadanie cyklu obciążenia umożliwiające zmierzenie odkształceń niesprężystych.
4. Opisany w tym artykule test może zostać przerwany bez doprowadzenia próbki do zniszczenia. Dla takiej próbki można precyzyjnie obliczyć stopień zniszczenia zmęczeniowego, a następnie użyć jej jako wzorca do kalibracji nieniszczących metod pomiaru zniszczenia zmęczeniowego (ultradźwiękowych, magnetycznych lub innych).

## **5. Literatura**

1. ASTM Standard E 466-96: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests on Metallic Materials, 1997
2. G. Socha, Experimental investigations of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel, *International Journal of Fatigue*, pp 139-147, vol. 25/2, 2003