

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Zastosowanie efektu stroboskopowego do badań zmęczenia materiałów

KRZYSZTOF ŁUKASZEWICZ

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA BUDOWY
I EKSPLOATACJI MASZYN

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono krótki przegląd metod i technik doświadczalnych wykorzystywanych w badaniach zmęzeniowych. Zaproponowano wykorzystanie metody optycznej, przy zastosowaniu mikroskopu pomiarowego z urządzeniem stroboskopowym. Zaprezentowano własną koncepcję i realizację układu badawczego do impulsowego oświetlenia części roboczej próbki, umożliwiające obserwację oraz pomiar powstającego uszkodzenia, bez przerywania cyklu obciążania.

Application of stroboscopic effect for fatigue tests of materials

ABSTRACT

The paper presents a short review of the basic experimental methods and techniques used for fatigue tests. The optical method utilization was proposed, use of measuring microscope from stroboscopic device. Own idea and realization of research arrangement were presented to impulse illumination of part of working specimen. The device makes possible the observation and measurement the forming damage, without stops of cycle of loading.

1. WPROWADZENIE

Warunkiem niezbędnym, w przypadku przewidywania trwałości oraz oceny ryzyka związanego z bezpieczną eksploatacją konstrukcji, jest potwierdzenie eksperymentalne przyjętej do obliczeń wielkości, reprezentującej zniszczenie zmęczeniowe. Należy zauważyć, że najbardziej dokładne i odpowiadające rzeczywistości rezultaty osiąga się poprzez prowadzenie badań podczas eksploatacji maszyny. Jest to jednak rozwiązanie często niezwykle kosztowne i pracochłonne. Otrzymane wyniki w wielu przypadkach nie pozwalają na uogólnienie wyciąganych wniosków i dlatego w praktyce badawczej najczęściej korzysta się z próbek.

Literatura dotycząca eksperymentów w warunkach zmęczenia jest bardzo bogata. Stosowane są różnorodne metody i techniki, z reguły dobierane w zależności od materiału oraz interesującej badacza fazy procesu zmęczenia. Można zauważyć, że bezpośrednio obserwowane wizualnych efektów zjawiska zmęczenia stanowią znaczącą grupę metod badawczych. Ponadto wykorzystywany jest często fakt, że zmiany strukturalne wywołane lokalnymi odkształceniami plastycznymi i uszkodzeniami zmęczeniowymi, na skutek działania obciążeń zmiennych, wpływają na zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych. Układ wzajemnie oddziałujących różnorodnych pól fizycznych często określa się jako zjawiska krzyżowe (sprzężone) [1, 2]. Zależą one od tych wszystkich czynników, jakie determinują powstawanie i rozwój zjawisk zmęczenia. Z tego względu rozwinął się szereg metod badawczych wykorzystujących obok bezpośrednich obserwacji wizualnych, także zmiany właściwości takich jak, np.: elektrycznych, magnetycznych, podatności, twardości, itp. Dogłębne przedstawienie wszystkich metod i technik, z oczywistych powodów, przekracza zakres niniejszej pracy, ale warto przytoczyć kilka, zdaniem autora, najbardziej interesujących.

2. NIEKTÓRE METODY I TECHNIKI BADAWCZE PROCESU ZMĘCZENIA

2.1. Metoda zmiany potencjału

Wykorzystywane jest tu zjawisko zmiany oporu elektrycznego wraz ze zmianą przekroju czynnego próbki. Metoda ta jest wykorzystywana głównie do badań w fazie propagacji pęknięcia i jest bardzo przydatna do automatyzacji pomiarów wzrostu pęknięć zmęczeniowych [3]. Przy stałym natężeniu prądu przepływającego przez próbkę zmianie ulega

potencjał mierzony po obu stronach krawędzi rozwijającego się pęknięcia. W literaturze można spotkać gotowe wzory na zależność przyrostów długości pęknięcia od zmiany potencjału. Na przykład, w pracy [4] przyrost długości pęknięcia wyrażono jako:

$$\Delta a_i = \frac{\Delta a_k \cdot \Delta U_i}{\Delta U_k} \quad (1)$$

gdzie: Δa_k – całkowity przyrost długości pęknięcia, ΔU_k – całkowity spadek potencjału w trakcie próby, Δa_i – aktualny przyrost długości pęknięcia, ΔU_i – aktualna zmiana potencjału.

Przed przeprowadzeniem testu dokonuje się kompensacji wartości napięcia, np. względem nieobciążonej próbki wzorcowej. Zmiany potencjału rejestrowane są poprzez elektrody zgrzewane do powierzchni próbki (w przypadku istnienia karbu – możliwie blisko jego krawędzi). Poprzez wzmacniacz sygnał trafia do rejestratora XY lub za pośrednictwem karty akwizycyjnej do komputera.

Metoda ta, jakkolwiek efektywna i prosta, wymaga specjalnego i dokładnego oprzyrządowania (zasilaczy, mikrowoltomierza, wzmacniacza i rejestratorów). Ponadto jej zastosowanie ogranicza się do przewodników. Metoda zawodzi w przypadku pęknięć o małej długości. Szacuje się, iż zastosowanie mikrowoltomierzy o wysokiej czułości powinno pozwolić na rejestrację pęknięć o długości co najmniej kilkudziesięciu mikrometrów [5].

2.2. Metoda zmiany podatności

Podstawowym założeniem jest liniowa zmiana przyrostów długości szczeliny w stosunku do zmiany podatności elementu. Metoda ta omówiona jest np. w normie ASTM E 813-89. Przyrost długości pęknięcia Δa_i określany jest wg wzoru:

$$\Delta a_i = \frac{b(C_i - C_o)}{2C_i} \quad (2)$$

gdzie: $C_i = (\Delta(D)/\Delta F_i)$ – aktualna podatność, F – siła obciążająca próbkę, D – przemieszczenie punktu przyłożenia siły, C_o – podatność podczas pierwszego odciążenia wykonanego w zakresie liniowego przebiegu wykresu $F=f(D)$, b – długość nie pękniętego odcinka materiału.

Krzywą podatności otrzymuje się zwykle przy użyciu ekstensometrów lub tensometrów oporowych. Metoda zmiany podatności jest wygodna i tania, gdyż nie wymaga dodatkowego oprzyrządowania. Niemniej wskazane jest, aby maszyna była sterowana cyfrowo, w celu dokonania częstych odciążań nie przekraczających 20% siły obciążającej. Autor

pracy [4] stwierdza, że „w metodyce wyznaczania przyrostów długości szczeliny za pomocą zmiany podatności sugerowanej przez normy istnieje poważna niejednoznaczność. Mianowicie, normy nie określają miejsca, w którym powinno się zmierzyć podatność początkową C_0 ”. Opisowana metoda daje dobre rezultaty, jeśli jest stosowana do niewielkich przyrostów długości szczeliny. Obserwuje się często duże rozbieżności w stosunku do rezultatów otrzymanych innymi metodami. Ponadto problemem jest zastosowanie jej w badaniach przy obciążeniach wieloosiowych.

2.3. Metody akustyczne

Wykorzystuje się tu aparaturę, w skład, której wchodzi: generator i czujnik sygnałów ultradźwiękowych, przedwzmacniacz, filtry i rejestratory. W czasie trwania obciążenia próbki rejestrowana jest, z reguły w sposób ciągły, emisja akustyczna w funkcji czasu. Najczęściej jako wskaźnik postępu zmęczenia proponuje się gradient wzrostu tłumienia. Ze względu na dużą czułość metoda wykorzystywana jest do badań inicjacji i rozwoju pęknięć oraz do wykrywania odkształceń plastycznych. Wymaga jednak odpowiednio dokładnego oprzyrządowania umożliwiającego eliminację niepożądanych szumów. Tłumienie fal ultradźwiękowych, poza nieciągłością, zależy także od wielkości ziaren, rodzaju i wielkości wtrąceń niemetalicznych oraz rozmieszczenia i rodzaju wydzielen [6, 7]. W pomiarach akustycznych materiałów istotne znaczenie mogą mieć czynniki związane z geometrią badanego obiektu, np.: obecność otworów w bezpośrednim sąsiedztwie wiązki ultradźwiękowej. Powierzchnia otworu może bowiem powodować odbicia skrajnych promieni wiązki, które następnie interferują z pierwotnym polem ultradźwiękowym zaburzając jego amplitudę oraz fazę [8]. Tak duża różnorodność czynników prowadzi niejednokrotnie do błędów w ocenie współczynnika tłumienia i oszacowania postępu zmęczenia.

2.4. Metoda wykorzystująca efekt termosprężystości

Istota tej metody polega na rejestracji zmian temperatury, wynikającej ze zmiany energii wewnętrznej materiału, na skutek zniekształceń sieci krystalicznej podczas deformacji. Uważa się, że teorię efektu termosprężystego sformułował w 1851 roku Thomson. Termometria często była wykorzystywana np.: do rejestracji odkształcenia plastycznego w strefie karbu, oceny stopnia nagromadzenia energii w materiale w procesie zmęczenia [9], lub do wyznaczenia granicy zmęczenia stali [10, 11]. W pracy [12] podjęto

problem weryfikacji modelu Thomsona do opisu termosprężystości w złożonym stanie naprężenia. Ponadto interesujące zastosowania tego efektu do badań zmęczeniowych można znaleźć w pracy [1]. Stwierdzono, że efekt Thomsona wykazuje silną zależność od amplitudy i częstotliwości obciążenia. Ponadto ze względu na charakter zmian temperatury w stosunku do obciążenia w zakresie odkształceń sprężystych i gwałtowną zmianę tego charakteru z chwilą pojawienia się materiału odkształceń plastycznych, staje się możliwe określenie różnorodnych parametrów związanych z przejściem materiału ze stanu sprężystego w stan plastyczny. Istotny jest również stosunkowo niski koszt układu pomiarowego, jego dostępność i szeroka gama zastosowań tej metody. Należy jednak zaznaczyć, że niektórzy autorzy, np. [13] sugerują możliwość odstępstwa od prawa Kelvina w odniesieniu do części materiałów konstrukcyjnych.

2.5. Metody wykorzystujące zmiany właściwości magnetycznych

Ze względu na to, iż obciążenia statyczne jak i dynamiczne wywołują zmiany właściwości magnetycznych materiałów, oraz to, że pomiary magnetyczne uważane są za szczególnie dokładne, powstało wiele prac teoretycznych i aplikacyjnych wykorzystujących efekty magnetomechaniczne w badaniach zmęczenia, np. [14]. Z wielu zjawisk o charakterze magnetycznym, w badaniach materiałów obciążonych statycznie i dynamicznie, wykorzystuje się między innymi: efekt Barkhausena, zjawisko tzw. magnetoabsorpcji, zmiany krzywej namagnesowania lub efekt Villariego. Wadą tych metod jest ograniczenie materiałów badanych do ferromagnetyków.

2.6. Inne metody badawcze

Można stwierdzić, że do badań zjawisk zmęczenia wykorzystuje się prawie wszystkie środki doświadczalne, jakimi dysponuje technika. Poza przedstawionymi, wymienić można np.: wykorzystanie prądów wirowych, metody rentgenograficzne, zmiany mikrotwardości i mikronierówności powierzchni, metody laserowe, itp.

Interesującą propozycję pomiaru strefy plastycznej na czole pęknięć zmęczeniowych metodą profilograficzną, zaproponował autor pracy [15]. Do tego celu wykorzystano profilograf z przetwornikiem magnetycznym, za pomocą którego wyznaczano profilogramy zagłębień występujących po zdjęciu obciążenia na powierzchni próbki, w obszarze strefy plastycznej na czole pęknięcia. Zagłębienia te są spowodowane deformacją plastyczną powierzchni

próbki, wynikającą z uruchamianych linii i pasm poślizgów. Jako miarę odkształcenia plastycznego można przyjmować wielkość zagłębienia na swobodnej powierzchni próbki. Obszar zagłębienia powierzchni próbki odpowiada strefie plastycznej na czole pęknięcia.

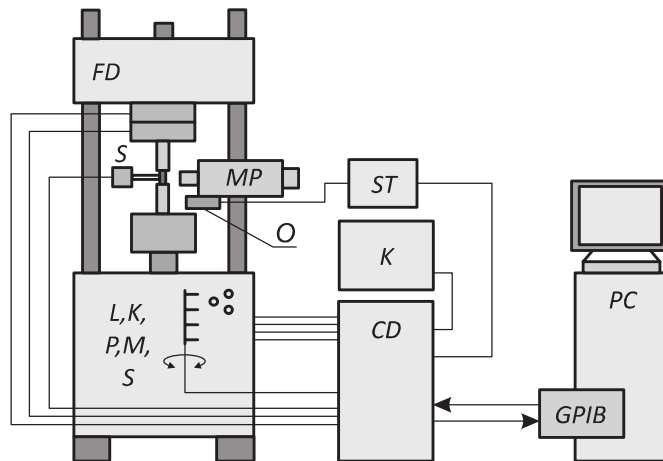
Obecnie dostępne środki doświadczalne nierzadko umożliwiają śledzenie przebiegu powstawania uszkodzeń bez kłopotliwego i nie zawsze możliwego w warunkach praktycznych przygotowania powierzchni. Niektóre pozwalają na głębokie wnikanie w materiał bez potrzeby uszkodzania otaczających obszarów. Wymagają jednak często skomplikowanej i kosztownej aparatury. Ponadto niektóre z nich są mało uniwersalne i ograniczone do określonego rodzaju badanego materiału czy kształtu elementu. Obecnie można zauważyć tendencję do wykorzystywania technik bezkontaktowych w pomiarach laboratoryjnych i przemysłowych. Dostrzega się trend do wykorzystywania mikroskopów nowej generacji, w badaniach zjawisk towarzyszących inicjacji i rozwojowi pęknięć zmęczeniowych [16]. Do takich urządzeń można zaliczyć np. współogniskowy laserowy mikroskop skaningowy, mikroskop sił atomowych lub skaningowy mikroskop tunelowy [4].

Pomimo dużego rozwoju wspomnianych metod wspieranych nowoczesną elektroniką i techniką cyfrową, bezpośrednie obserwacje mikroskopami optycznymi nadal stanowią, w wielu przypadkach, wystarczająco dokładne, uniwersalne i tanie sposoby badań rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych [17, 18, 19]. Główną zaletą jest ich nieniszczący charakter. W większości przypadków należą jednak do grupy technik statycznych. W celu obserwacji zmian zachodzących na powierzchni elementu wymagają zatrzymania maszyny, a nierzadko również demontażu próbki. Tymczasem proces zmęczenia przebiega dynamicznie. Odciążanie lub przeciążanie związane z demontażem i późniejszym ponownym montażem może znacząco wpłynąć na wyniki testów. Pojawia się wobec tego potrzeba adaptacji i rozszerzenia możliwości istniejących systemów badawczych w kierunku obserwacji obciążanych elementów bezpośrednio na stanowisku doświadczalnym, bez konieczności ich demontowania.

Biorąc pod uwagę, że proces zmęczenia najczęściej dzieli się na fazę inicjacji oraz fazę propagacji pęknięcia, wskazane jest przyjęcie takiej metody badań, która pozwala na powtarzalne i jednoznaczne różnicowanie tych faz. Ponadto pożądana jest możliwość obserwacji i rejestracji parametrów jak, np. długość i kształt pęknięcia, bez konieczności przerywania cyklu obciążania próbki.

3. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Stanowisko do badań eksperymentalnych składa się z trzech podstawowych zespołów funkcjonalnych (Rys. 1): dwuosiowej maszyny do badań zmęczeniowych INSTRON 8502 Plus (nr fabryczny H1718), mikroskopu pomiarowego firmy Carl Zeiss Jena z układem stroboskopowym autora oraz komputera z interfejsami sprzętowymi i programowymi.



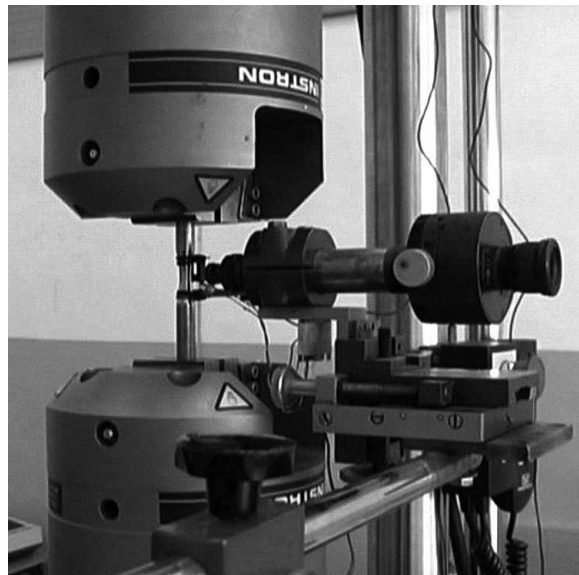
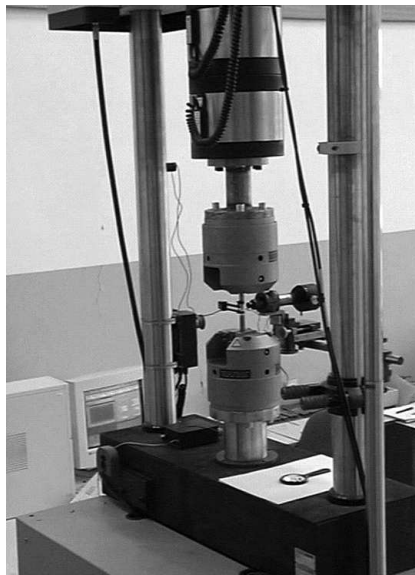
Rysunek 1. Schemat stanowiska badawczego: CD – sterownik cyfrowy maszyny do badań zmęczeniowych FD (FastTrack 8800); K – konsola; P, K, L, M, S – kanały sygnałów pomiarowych, odpowiednio przemieszczenia tłoka, kąta obrotu, siły, momentu skręcającego i odkształcenia mierzonego ekstensometrem S; PC – komputer z interfejsami sprzętowymi i programowymi; MP – mikroskop pomiarowy; ST – układ stroboskopowy; O – element oświetlający

Praca maszyny do badań zmęczeniowych FD kontrolowana jest przez cyfrowy sterownik CD, który jednocześnie zbiera sygnały pomiarowe z pięciu kanałów: przemieszczenia liniowego P i kąтового K tłoka, siły L i momentu skręcającego M oraz odkształcenia mierzonego ekstensometrem S. Sterownik CD połączony jest za pośrednictwem karty GPIB z zewnętrznym komputerem PC. Komputer ten odpowiada za zbieranie informacji z bufora danych sterownika CD oraz zadaje program pracy maszyny FD. Próbka poddana obciążeniu zmiennym obserwowana jest za pomocą mikroskopu pomiarowego MP. Ogólny widok stanowiska badawczego przedstawiono na Rysunku 2.

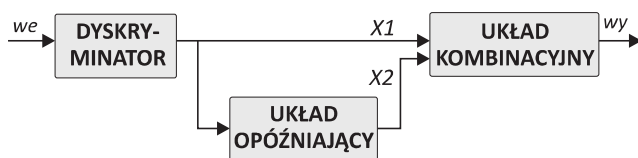
W celu wyeliminowania przerw podczas cyklu obciążania związanych z pomiarami długości pęknięcia zaprojektowano i wykonano urządzenie ST umożliwiające obserwację oraz pomiar powstającego uszkodzenia bez przerywania cyklu obciążania próbki. Idea układu ST oparta jest na impulsowym, zsynchronizowanym z częstotliwością zmian obciążenia lub odkształcenia, oświetlaniu badanego elementu tak, aby uzyskiwany obraz można było uznać za statycz-

ny. Do synchronizacji układu kontrolującego maszyny *FD* z urządzeniem stroboskopowym wykorzystano programowane wyjście analogowe typu BNC sterownika *CD*. Schemat blokowy członu impulsowego urządzenia *ST* przedstawiono na Rysunku 3.

Na programowanym wyjściu oscyloskopowym sterownika *CD* pojawia się przebieg zmienny o zadanym charakterze, którego



Rysunek 2. Stanowisko badawcze



Rysunek 3. Schemat blokowy członu impulsowego urządzenia stroboskopowego *ST*

amplituda zmienia się synchronicznie i wprost proporcjonalnie do odkształcenia lub siły obciążającej próbkę. Dlatego też pierwszym członem urządzenia jest dyskryminator o regulowanym progu przełączania. Na jego wyjściu możliwe są tylko dwa poziomy napięcia: 0 lub 1. Zmiana stanu na wyjściu dyskryminatora z 0 na 1 lub odwrotnie następuje po przekroczeniu przez sygnał wejściowy ustalonego regulatorem poziomu napięcia. Otrzymany na wyjściu dyskryminatora sygnał $X1$ jest podawany na wejście układu opóźniającego, którego zadaniem jest zapamiętanie na krótki okres czasu wartości sygnału $X1$. W efekcie takiego zabiegu na wyjściu bloku opóźniającego otrzymamy sygnał $X2$ opóźniony w czasie w stosunku do sygnału $X1$. Sygnały $X1$ i $X2$ mają charakter sygnału cyfrowego (mogą mieć tylko dwa stany logiczne 0 lub 1). Oba otrzymane sygnały podaje się na układ, który uruchomi element oświetlający próbkę tylko dla jednej kombinacji sygnałów wejściowych $X1$ i $X2$. Do konstrukcji urządzenia stroboskopowego wykorzystano bramki cyfrowe typu *NAND*. Blok opóźniający skonstruowano z elementów *R* i *C*. Jego opóźnienie określa stała czasowa $T=RC$. Rezystor *R* zastąpiono potencjometrem, dzięki czemu

uzyskano możliwość regulacji czasu opóźnienia, a co za tym idzie regulacji czasu trwania impulsu oświetlającego badaną próbkę. Układ kombinacyjny ma za zadanie włączyć element oświetlający tylko, gdy $X1=0$, a $X2=1$. Po utworzeniu tablicy stanów (Tab. 1) i skonstruowaniu siatki Karnaugh'a (Tab. 2) otrzymano równanie wyjścia w postaci:

$$Y=L(X1)X2=L(L(L(X1)X2))),$$

gdzie, *L* oznacza operację negacji. Na tej podstawie stworzono odpowiedni układ kombinacyjny, który steruje dodatkowym tranzystorem odciażającym układ cyfrowy. Ten z kolei wyzwala element oświetlający, w tym przypadku diodę *LED*, hiperjasną o świetle białym. Jako element cyfrowy wykorzystano układ *UCY 7400* zawierający 4 bramki typu *NAND*.

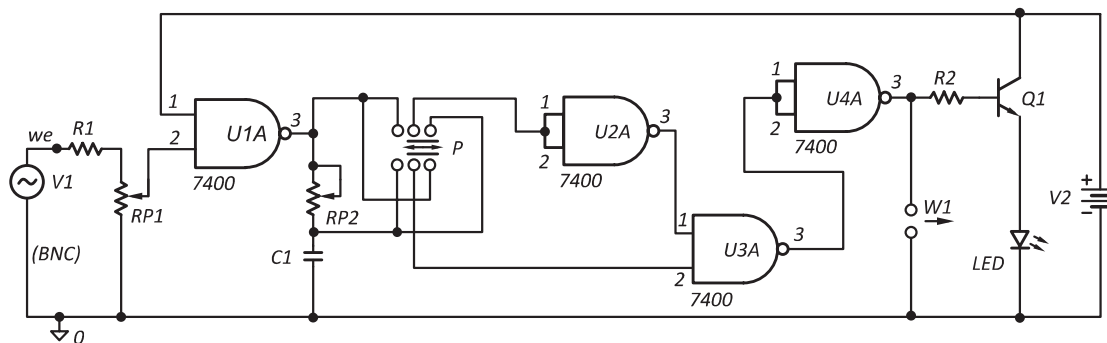
Układ wyposażono w dodatkowy przełącznik umożliwiający reakcję układu w zależności od przebiegu sygnału na wejściu (zbcze opadające lub rosnące). Schemat ideowy układu przedstawiono na Rysunku 4. Przykładowa symulacja działania omawianego układu, przy założeniu wartości napięcia na wejściu $U_{we}=7V$ i częstotliwości $f = 6Hz$ przedstawiona jest na Rysunku 5.

Tabela 1. Tablica stanów

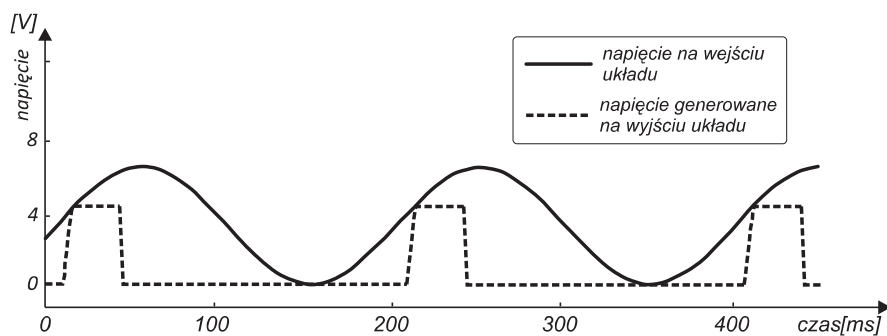
$X1$	$X2$	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	1
1	1	0

Tabela 2. Siatka Karnaugh'a

$X1 \backslash X2$	0	1
0	0	1
1	0	0



Rysunek 4. Schemat ideowy układu stroboskopowego



Rysunek 5. Symulacja działania układu

4. PODSUMOWANIE

Prezentowane rozwiązanie układu, dzięki możliwości współpracy z maszyną INSTRON, pozwala na prowadzenie badań przy dowolnych cyklach obciążeń. Możliwa jest obserwacja i pomiar pęknięcia w świetle odbitym lub przechodzącym w przypadku materiałów przepuszczających światło.

Do zalet przedstawionego układu można zaliczyć:

- łatwość wykonania przyrządu oraz niewysoki koszt, ogólnie dostępnych, elementów składowych,
- możliwość ciągłej obserwacji pęknięcia i pomiaru jego długości, bez przerywania testu,

- łatwość uzbrajania stanowiska badawczego,
- możliwość obserwacji i pomiaru długości pęknięcia w dowolnym momencie pojedynczego cyklu obciążenia lub odkształcenia.

Przy pomocy dodatkowego wyjścia sygnału W1 (Rys. 4) istnieje możliwość współpracy układu z innymi urządzeniami, np. kamerą cyfrową. Sprzężenie kamery cyfrowej z komputerem za pomocą np. karty typu „frame grabber” pozwala na automatyczną rejestrację zdjęć wybranej części powierzchni próbki w czasie działania obciążeń zmiennych.

LITERATURA

- [1] Kaleta J. Pomiary charakterystyk przemian nieodwracalnych w materiałach obciążonych cyklicznie. Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji, Badania podstawowe. Zbiór monografii pod red. J. Szali, Wyd. ATR w Bydgoszczy, 2000.
- [2] Turowski J. Pola sprężone. Analiza i synteza pól elektromagnetycznych. Ossolineum, Wrocław, 1990.
- [3] Skorupa M. Eksperymentalne badania zjawiska zamykania się pęknięć zmęczeniowych. Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji, Badania podstawowe. Zbiór monografii pod red. J. Szali, Wyd. ATR w Bydgoszczy, 2000.
- [4] Neimitz A. Mechanika pękania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
- [5] Kocańda D. Badania krótkich pęknięć zmęczeniowych. Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji, Badania podstawowe. Zbiór monografii pod red. J. Szali, Wyd. ATR w Bydgoszczy, 2000.
- [6] Deputat J. Nieniszczące metody wyznaczania odporności materiału na pęknięcie. XV Seminarium, Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13 marca 2009.
- [7] Kukla D., Socha G. Ocena stopnia degradacji zmęczeniowej stali stosowanych w przemyśle rafineryjnym wybranymi technikami nieniszczącymi. Materiały konferencyjne, Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji, Zakopane 2003. Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2003.
- [8] Mackiewicz S. Pomiary parametrów akustycznych materiałów w badaniach stopnia degradacji struktury. Materiały konferencyjne, Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji, Zakopane 2003. Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2003.
- [9] Kaleta J., Błotny R., Harig H. The accumulated internal energy in the fatigue strength region. Proc. of ICF-7, Houston, 1989.
- [10] Dengel D., Harig H. Estimation of the fatigue limit by progressively increasing load tests. Fatigue Fracture and Engng Mater. Struct. Vol. 3, No. 4, 1980.
- [11] Harig H., Frank E. Temperaturmessung als einfache Methode zur Charakterisierung des Ermüdungsgeschehens von Stählen. Werkstofftechnik 4, 1981.
- [12] Kaleta J., Moczko P. Efekt termosprężysty w cyklicznie obciążonym ferromagnetyku w złożonym stanie naprężenia. XVIII Sympozjum Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji, Bydgoszcz-Pieczyska 2000. Wyd. Uczelniane ATR w Bydgoszczy, 2000.
- [13] Kirsch G. Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchseinrichtung zur Untersuchung des Thermoelastischen Werkstoffverhaltens. Praca dyplomowa wykonana w Universität (GHS) - Essen, Institut für Werkstoffkunde, Essen 1997.
- [14] Witoś M., Wiśnioch M. Metoda magnetycznej pamięci metalu w diagnozowaniu techniki lotniczej. XV Seminarium, Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13 marca 2009.
- [15] Werner K. Analiza rozwoju półeliptycznych pęknięć zmęczeniowych. Monografie, Nr 70, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2000.
- [16] Mughrabi H. Cyclic slip irreversibilities and the evolution of fatigue damage. Metall. and Mater. Trans., Vol. 40A, 2009.
- [17] Kocańda A. Kocańda S. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa, 1998.
- [18] Kurzydłowski K.J. Metody monitorowania degradacji strukturalnej materiałów. Materiały konferencyjne, Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji, Zakopane 2003. Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2003.
- [19] Karolczuk A., Macha E. Selection of the critical plane orientation in two-parameter multiaxial fatigue failure criterion under combined bending and torsion. Eng. Fracture Mechanics 75, 2008.