Tadeusz Szymczak [1)]
Paweł Grzywna [2)]
Zbigniew L. Kowalewski [1), 2)]
[1)] Instytut Transportu Samochodowego
[2)] Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

NOWOCZESNE METODY OKREŚLANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

W artykule zaprezentowano współczesne maszyny wytrzymałościowe i przyrządy pomiarowe do badania właściwości mechanicznych materiałów. Zamieszczono oraz omówiono ich schematy ideowe, zalety, wady, ograniczenia i zastosowanie. W przypadku niektórych z nich przedstawiono literaturowe i własne wyniki z badań doświadczalnych.

MODERN METHODS FOR DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ENGINEERING MATERIALS

The paper reports modern testing machines and measuring instruments used to examine mechanical parameters of materials. Their schematic diagrams, advantages and disadvantages, limitations and applications are discussed. Selected already published results of tests and those achieved by the Authors are presented.

1. Wprowadzenie

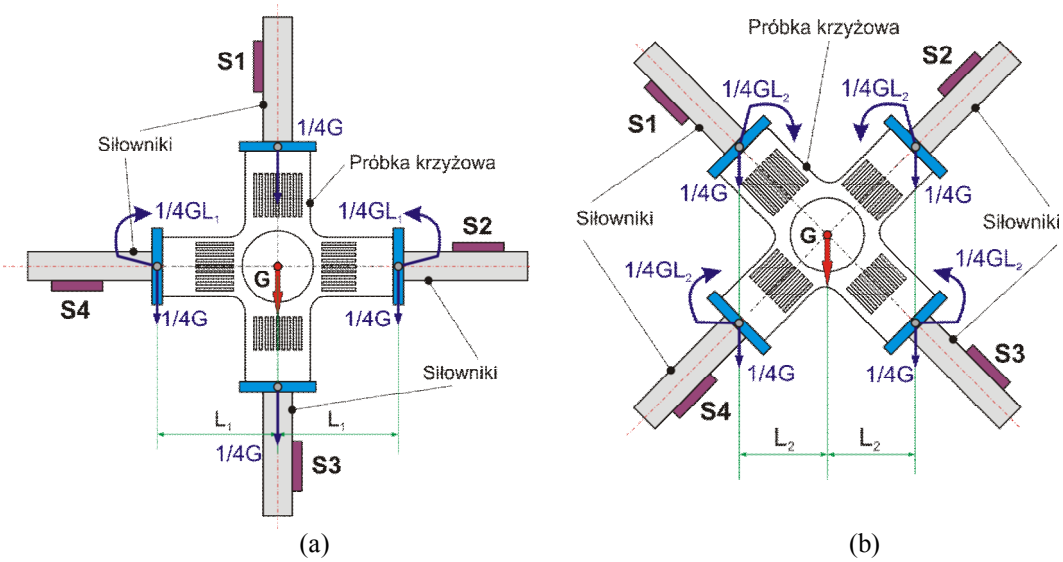
Określanie właściwości mechanicznych materiałów odbywa się w większości przypadków przy użyciu serwohydraulicznych maszyn wytrzymałościowych. Pracują one w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego i są sterowane przy pomocy komputera i generatora sygnałów cyfrowych. Istota ich działania polega na porównywaniu sygnału wzorcowego kontrolera z rzeczywistym przebiegiem uzyskiwanym w badaniu. W zależności od konstrukcji wyróżnia się jedno- i dwuosiowe maszyny wytrzymałościowe, przy czym pierwsze z nich są przeznaczone do badań w warunkach rozciągania i ściskania, drugie z kolei do testów w warunkach jednoczesnego działania siły osiowej i momentu skręcającego. W wielu przypadkach są one wyposażane w komory korozyjne, temperaturowe, ciśnieniowe. Stosowanie tego typu urządzeń jest związane z potrzebą określania właściwości mechanicznych materiałów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. W laboratoriach badań mechanicznych istotne znaczenie mają tzw. urządzenia peryferyjne, np. ekstensometry. Służą one do określania składowych stanu odkształcenia/naprężenia w badaniach statycznych i zmęczeniowych, często w różnych warunkach środowiskowych. Powszechnie stosowane są ekstensometry do pomiaru odkształcenia w próbach jednoosiowych i realizowanych przy kombinacji obciążenia. Pierwsze z nich zapewniają prowadzenie badań z możliwością wyboru zakresu bazy pomiarowej i używa się ich do pomiaru jednej składowej stanu odkształcenia, na przykład: odkształcenia wzdłużnego. Drugie natomiast, mają wprawdzie stały rozstaw nóżek pomiarowych odpowiadający ustalonej bazie, ale mogą za to mierzyć dwie składowe stanu odkształcenia, na przykład odkształcenie wzdłużne i kąt odkształcenia postaciowego.

Pomimo, że jednoosiowe, jak i dwuosiowe maszyny wytrzymałościowe oraz stosunkowo bogate wyposażenie, w postaci na przykład komór środowiskowych i różnego rodzaju ekstensometrów są szeroko stosowane i umożliwiają określanie wielu parametrów materiałowych, to jednak stale wprowadzane są nowe stanowiska i urządzenia dające dodatkowe możliwości badawcze oraz zapewniające coraz wyższą precyzję pomiarów. Przegląd wybranych rozwiązań w tym względzie stanowi tematykę prezentowanej pracy.

2. Maszyny wytrzymałościowe

2.1. Maszyna do badań na próbkach krzyżowych

W maszynach do badań na próbkach krzyżowych (Cruciform Tesing Machine - CTM) stosuje się dwa układy siłowników tj.: pionowo-poziomy (tzw. klasyczny) (rys. 1a) oraz obrócony o 45 stopni (rys. 1b). Pierwszy z nich daje niejednakowy wpływ zamocowania próbki na kierunki obciążenia, tj. w kierunku pionowym występuje działanie jej masy, natomiast w poziomym, dodatkowo występuje moment zginający. W przypadku drugiego układu siłowników obserwuje się jednakowe oddziaływanie masy próbki, przejawiające się siłą i momentem zginającym na każdy z siłowników (rys. 1b).



Rys. 1. Schemat usytuowania siłowników w maszynie krzyżowej i rozkład obciążenia wynikający z masy próbki, tj.: (a) klasyczny, (b) obrócony

Fig. 1. Scheme of force cell location in a cruciform testing machine and loading distribution due to specimen weight, i.e.: (a) typical, (b) rotated

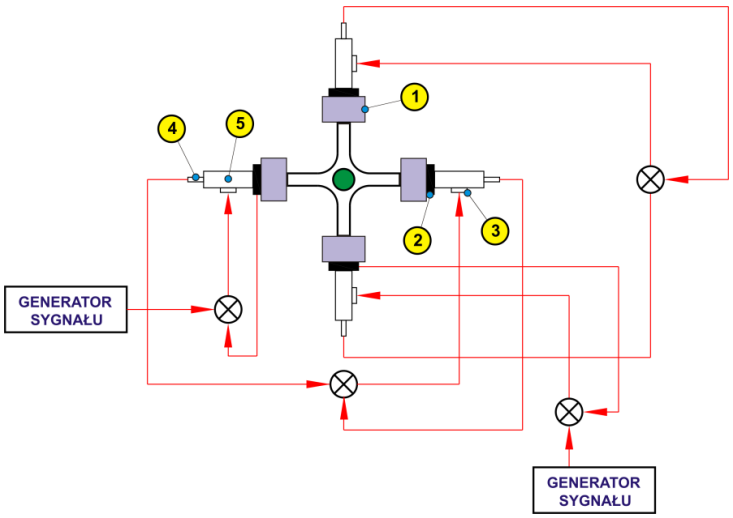
Na rys. 2 zaprezentowano schemat pracy maszyny krzyżowej. Jej działanie odbywa się w oparciu o dwa sygnały sterujące, wysyłane z cyfrowego generatora oraz cztery pętle sprzężenia zwrotnego. Kontrola pracy dwóch współosiowych siłowników jest realizowana przez dwie pętle sprzężenia zwrotnego, tj. wewnętrzną i zewnętrzną. Pętla wewnętrzna analizuje różnice między cyfrowym sygnałem z generatora a jego odpowiedzią na zadane wymuszenie. Natomiast pętla zewnętrzna różnicuje sygnały z siłownika zasadniczego i bliźniaczego siłownika przeciwległego.

W badaniach na tego rodzaju maszynach stosuje się próbki krzyżowe. Mają one strefę badawczą w części środkowej i cztery wzajemnie prostopadłe części chwytowe (rys. 3).

Główne zalety próbek krzyżowych, to:

a) możliwość zmiany wartości proporcji składowych stanu naprężenia dla określonej orientacji kierunków naprężeń głównych,
b) brak występowania zmiany położenia kierunków naprężeń głównych.

Jednym z istotniejszych zadań przy projektowaniu próbki krzyżowej, podobnie jak i innych próbek, jest zapewnienie jednorodnego stanu naprężenia i odkształcenia w strefie pomiarowej próbki oraz osłabienie więzów wynikających z samego jej kształtu. W przypadku większości próbek krzyżowych osiąga się to przez osłabienie przekroju poprzecznego w środkowej części próbki, względnie w jej częściach chwytowych. Taką technikę można stosować jedynie w przypadku blach dostatecznie grubych [10]. Przykładowy sposób osłabienia części chwytowych przedstawiono na rys. 3 i 4. Efekt ten uzyskano przez odpowiednie wyfrezowanie rowków równoległych do kierunków obciążenia.



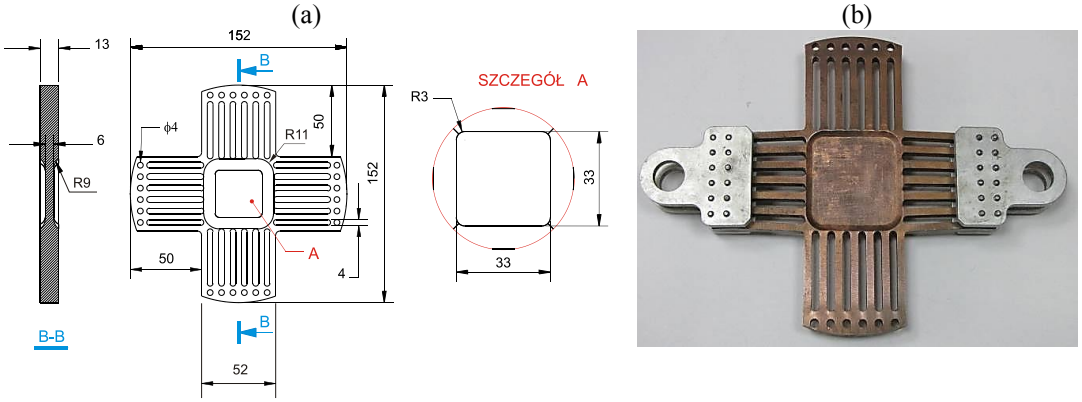
Rys. 2. Schemat maszyny krzyżowej: 1 – uchwyt, 2 – czujnik siły, 3 – serwozawór, 4 – LVDT, 5 – siłownik [20]
Fig. 2. Scheme of testing machine: 1 – grip, 2 – force cell, 3 – servo valve, 4 – transducer (LVDT), 5 – actuator [20]

Ważnym zagadnieniem przy projektowaniu próbek krzyżowych jest optymalizacja ich strefy pomiarowej [8]. Przykładowe wyniki z tego rodzaju badań przeprowadzonych na próbce pokazanej na rys. 3 wykazały wyraźną poprawę jednorodności rozkładów składowych stanu naprężenia, dając 70% jednorodność tych pól w obszarze bazy pomiarowej próbki. W efekcie zaproponowano kryterium kształtowania części pomiarowej próbek pod względem jednorodności pól stanu naprężenia i odkształcenia. Główne założenia przyjętej metody, to:

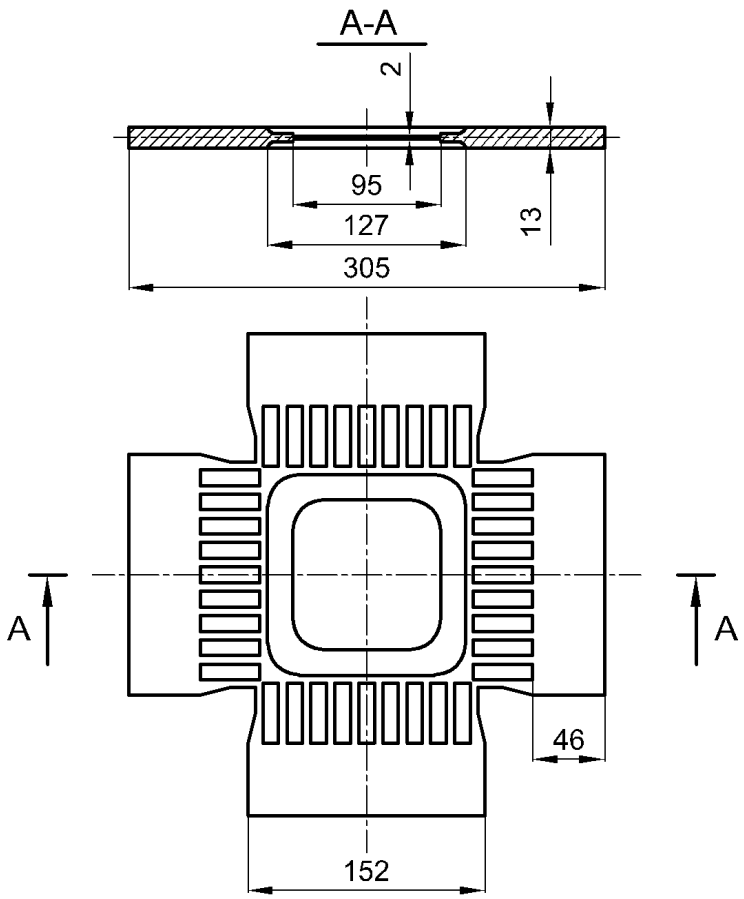
a) zachowanie jednorodności składowych stanu naprężenia i odkształcenia w środkowym obszarze strefy pomiarowej próbki,
b) zachowanie zgodności wartości składowych stanu naprężenia w strefie pomiarowej próbki z wartościami nominalnymi wyznaczonymi z ilorazu siły i pola powierzchni przekroju prostopadłego do kierunku obciążenia,
c) obserwacja stref uplastycznienia, które wynikają ze stosowanego poziomu naprężenia, a nie z oddziaływania karbu między strefą pomiarową i częścią roboczą próbki.

Obliczenia numeryczne [10] wykonane z użyciem metody elementów skończonych pokazały, że efekt osłabienia więzów można także uzyskać przez wzmocnienie części chwytowych próbki, co osiągnięto dzięki wykonaniu próbki z trzech, odpowiednio ukształtowanych warstw tego samego materiału, połączonych ze sobą za pomocą klejenia i nitowania (rys. 5). Wyniki z badań potwierdziły jednorodność stanu odkształcenia w dużej części bazy pomiarowej i brak efektu rozwarstwienia części klejonych w zakresie deformacji do kilku procent. Ponadto, wskazały na przydatność tego rodzaju próbki do wyznaczania granicy plastyczności przy monotonicznym obciążaniu.

Podsumowując warto zwrócić uwagę na najistotniejsze zalety, ograniczenia i typowe zastosowania systemów do badań materiałów w postaci próbek krzyżowych, zamieszczone w tab. 1.

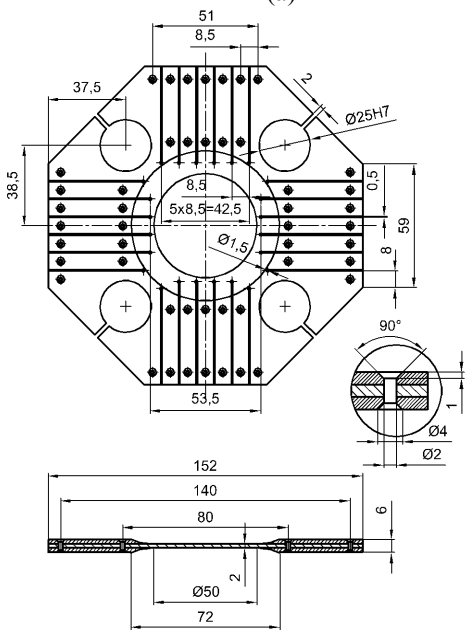


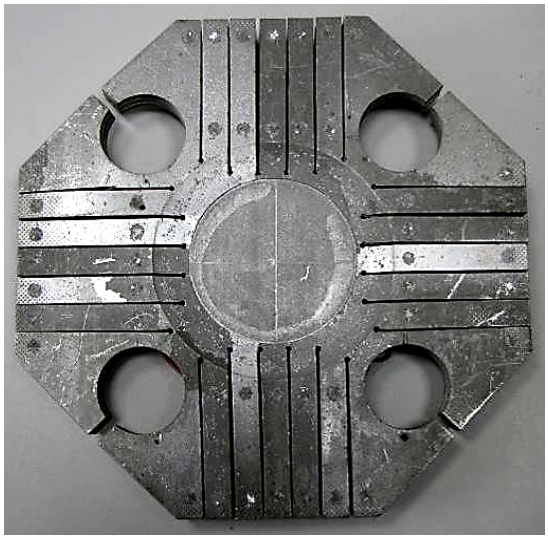
Rys. 3. Próbka krzyżowa Kelly'ego do badania pełzania:
wymiary (a), próbka wraz z uchwytami do mocowania w maszynie wytrzymałościowej (b) [16]
Fig. 3. Kelly's cruciform specimen for creep: dimensions (a), specimen and gripping system to fit it at testing machine (b) [16]



Rys. 4. Próbka krzyżowa z osłabieniem w częściach chwytowych [2]
Fig. 4. Cruciform specimen with softened griping part [2]

(a) (b)





Rys. 5. Próbka krzyżowa warstwowa ze wzmocnionymi częściami chwytowymi: wymiary próbki (a), próbka wytworzona (b) [10]

Fig. 5. Sandwich type cruciform specimen of strengthened griping part: dimensions (a), manufactured specimen (b) [10]

Tabela 1

Zasadnicze cechy maszyn wytrzymałościowych do badań na próbkach krzyżowych

Table 1

Fundamental features of cruciform testing machines

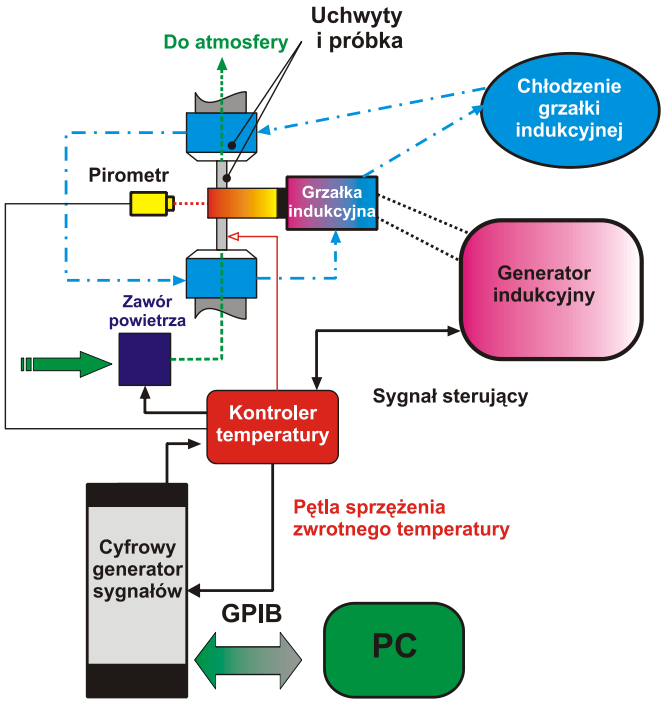
Zalety	Ograniczenia	Typowe zastosowania
Wyposażona w cztery niezależnie sterowalne siłowniki	Skomplikowane procesy technologiczne wykonania próbek	Różne rodzaje materiałów
Badania w warunkach obciążenia dwuosiowego i środowisku temperaturowym	Występowanie gradientu naprężenia w przekroju poprzecznym próbki	Badanie materiałów stosowanych na poszycia samolotów i karoserie samochodów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych
Brak rotacji kierunków naprężeń głównych	Niezbędny precyzyjny sposób pozycjonowania środka próbki względem punktu określonego przez przecinające się kierunki sił maszyny	Badanie materiałów w warunkach obciążeń proporcjonalnych i nieproporcjonalnych, statycznych i zmęczeniowych
Łatwe obserwowanie i rejestrowanie propagacji pęknięć	Wymagany sposób dwustronnego nagrzewania próbki w celu wyeliminowania gradientu temperatury na przekroju poprzecznym	
Wykorzystywanie urządzeń do bezkontaktowych		

pomiarów odkształcenia

2.2. Maszyna do badań termiczno-mechanicznych (TMF)

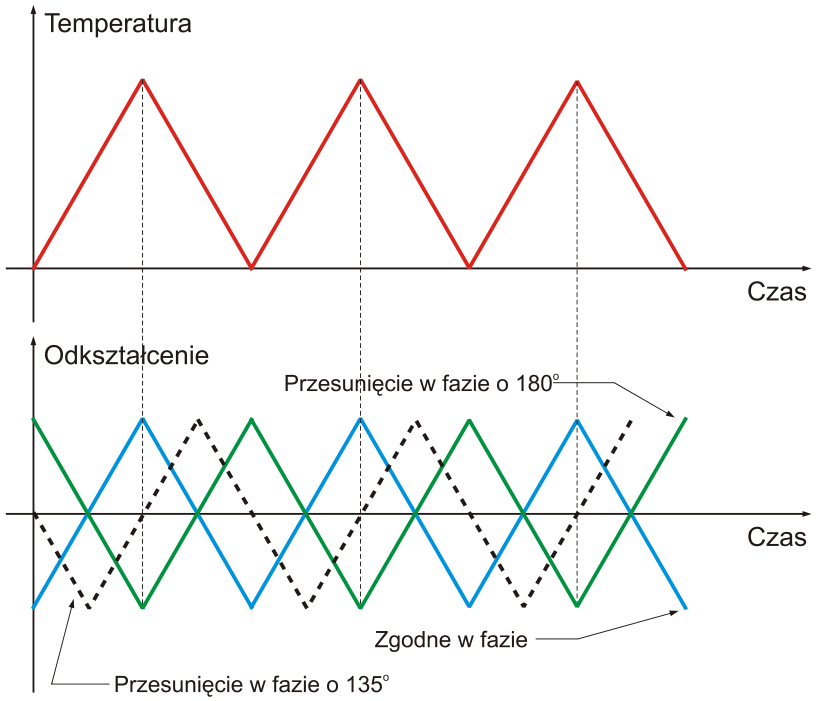
Złożona natura obciążeń eksploatacyjnych wymusza stosowanie bardziej zaawansowanych maszyn wytrzymałościowych niż powszechnie wykorzystywane. Przykładem takiego urządzenia jest system TMF (Thermo-Mechanical Fatigue Testing) (rys. 6). Maszyny tego rodzaju zapewniają programowanie obciążenia o charakterze termiczno-mechanicznym [25]. Oprócz cyfrowego generatora sygnałów wyposażane są w generator indukcyjny wymuszający zmiany temperatury dzięki działaniu zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, co pozwala na projektowanie dowolnych przebiegów temperatury (rys. 7). W porównaniu do standardowych maszyn wytrzymałościowych z komorą bądź piecem, systemy TMF charakteryzują się możliwością grzania i chłodzenia z szybkością do 50°C/s. Pomiary składowych stanu odkształcenia są możliwe dzięki użyciu ekstensometrów wyposażonych w trzpienie ceramiczne.

System zapewnia sterowanie obciążeniem i temperaturą przez odpowiedni dobór parametrów. Do sterowania temperaturą stosuje się sygnał trapezowy, trójkątny (rys. 7) bądź dowolnie zaprojektowany. Obciążenie mechaniczne może być realizowane przez wymuszenie jednym z następujących sygnałów: przemieszczenie, odkształcenie lub naprężenie, które mogą przyjmować kształt funkcji trójkątnej, trapezowej lub sinusoidalnej. W ten sposób uzyskuje się zgodne bądź przesunięte względem siebie sygnały wymuszenia. W następnej kolejności są one zestawiane ze sobą i w efekcie otrzymuje się ścieżkę obciążenia zadanego typu. Przykładowa została pokazana na rys. 8. Może ona mieć kształt linii prostej – w przypadku zgodnych i przesuniętych o 180º sygnałów temperatury i odkształcenia lub określonej figury geometrycznej – gdy kąt przesunięcia fazowego przyjmuje wartość większą od 0º, ale mniejszą niż 180°.



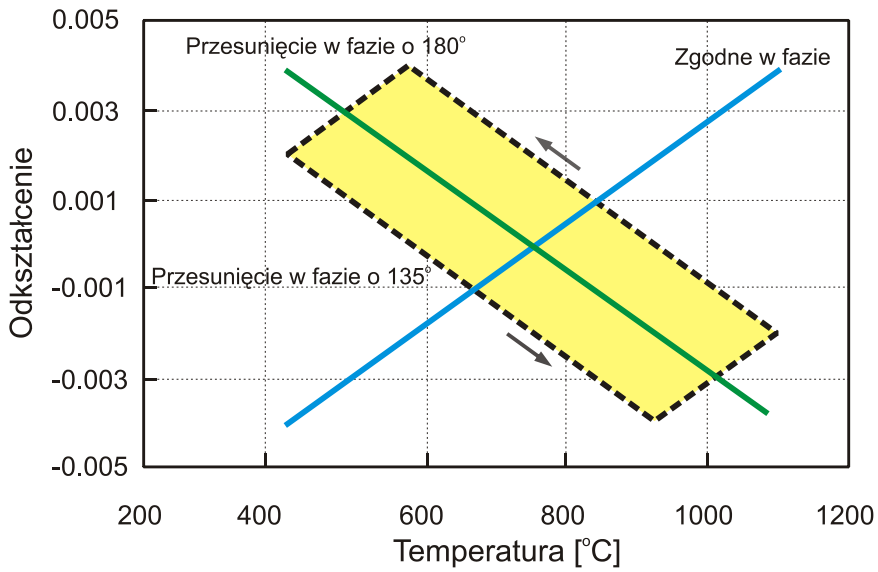
Rys. 6. Schemat systemu do zadawania programowalnych obciążeń termiczno-mechanicznych TMF [25]

Fig. 6. Scheme of system for applying of programmed thermo-mechanical loadings TMF [25]



Rys. 7. Sygnały temperatury i odkształcenia w funkcji czasu [23]

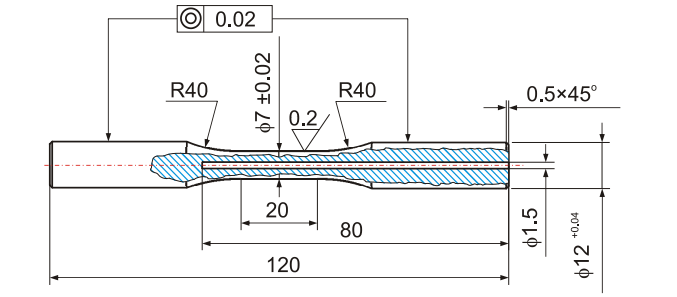
Fig. 7. Temperature and strain signals as a function of time [23]



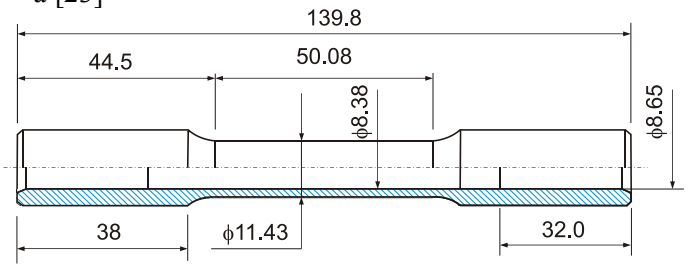
Rys. 8. Ścieżki deformacji w układzie odkształcenie-temperatura dla trzech wartości przesunięcia fazowego: 0°, 135°, 180° [23]

Fig. 8. Deformation paths at strain-temperature coordinates for three values of phase shift, i.e. 0°, 135°, 180° *[23]*

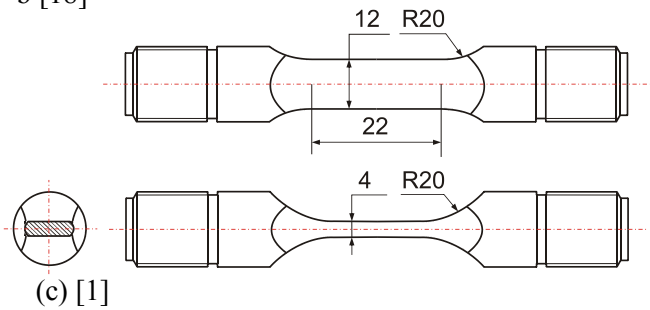
Podobnie jak w przypadku testów materiałowych na powszechnie dostępnych maszynach wytrzymałościowych, tak i w badaniach na systemach TMF istotne znaczenie odgrywa rodzaj próbki (rys. 9). Stosunkowo najczęściej stosowane są próbki rurkowe (rys. 9a), cienkościenne rurkowe (rys. 9b) lub płaskie (rys. 9c). W celu precyzyjnego kontrolowania temperatury w niektórych rodzajach próbki rurkowej (rys. 9a) otwór pokrywający się z jej główną osią wykorzystywany jest do wprowadzenia termopary. Na prawidłowy przebieg badań z użyciem systemów TMF istotny wpływ ma utrzymywanie zaprogramowanych zmian temperatury w całej objętości strefy badawczej próbki. Jednak uzyskanie małych wahań temperatury, w stosunku do przebiegu zaprogramowanego jest stosunkowo trudne (rys. 10). Mogą one osiągać nawet 100°C (krzywa w kolorze niebieskim), w przypadku utrzymywania stałej temperatury równej 300°C bądź nawet 150°C (krzywa w kolorze czerwonym), gdy próbka jest nagrzewana do 680°C. Przyczyna tego efektu związana jest z kierunkową konwekcją ciepła do otoczenia i niesymetryczną konstrukcją grzałki indukcyjnej. Skutkiem braku jednorodnej temperatury mogą być różnice w zachowaniu materiału (rys. 11), wyrażające się zniekształconym przebiegiem pętli histerezy określanymi w dolnym i środkowym punkcie strefy pomiarowej próbki, przekładające się jednocześnie na jakość wyników badań.



a [23]

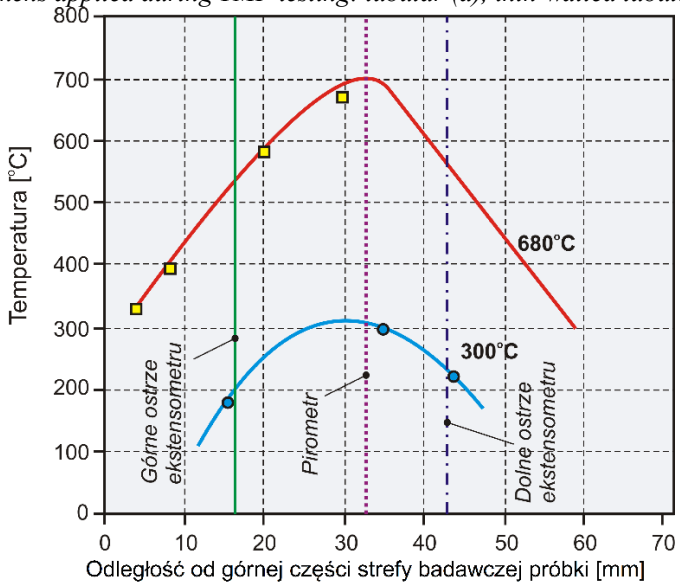


b [18]

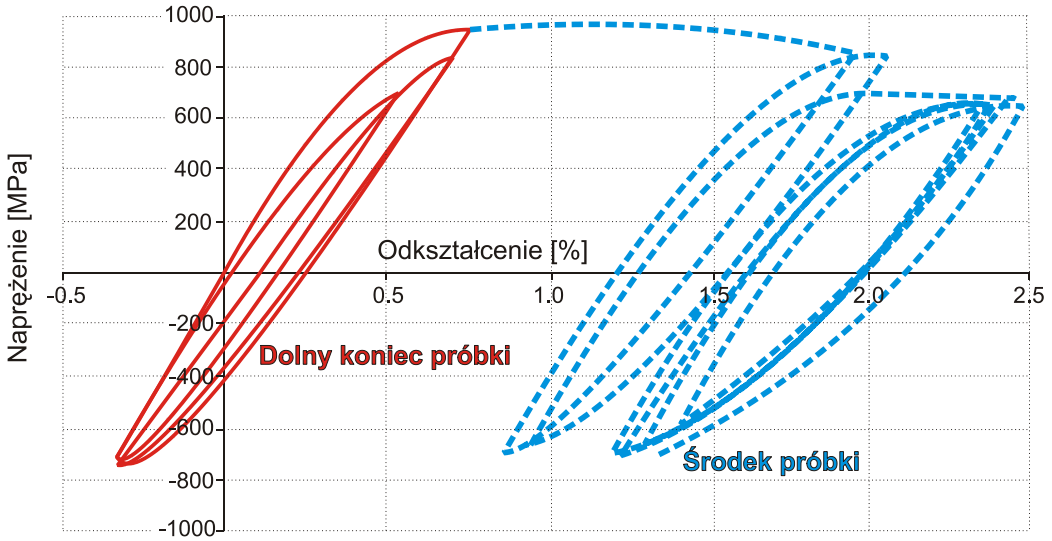


(c) [1]

Rys. 9. Próbki stosowane w badaniach TMF: rurkowa (a), rurkowa (b), płaska (c)
Fig. 9. Specimens applied during TMF testing: tubular (a), thin-walled tubular (b), flat (c)



Rys. 10. Rozkład temperatury w strefie pomiarowej próbki [11]
Fig. 10. Temperature distribution on a measurement section of a specimen [11]



Rys. 11. Pętle histerezy w dolnym i środkowym punkcie 25 mm strefy pomiarowej próbki [11]
Fig. 11. Hysteresis loops in the lower and mid-point of 25mm specimen measurement zone [11]

System TMF ma wiele zalet, ale także i ograniczenia. Najważniejsze z nich zostały wyszczególnione w tab. 2. Tabela zawiera również dane związane z typowymi zastosowaniami systemu.

Tabela 2

Zasadnicze cechy systemów TMF

Table 2

Fundamental features of TMF testing system

Zalety	Ograniczenia	Typowe zastosowania
Badania w warunkach płaskiego stanu naprężenia i programowalnym środowisku temperaturowym	Przeznaczony zazwyczaj do jednego typu próbki	Różne rodzaje materiałów
Wybór różnych przebiegów temperatury, np.: trójkątnych, prostokątnych, trapezowych	Trudności w niwelowaniu gradientu temperatury przy cyklach temperaturowych	Określanie właściwości mechanicznych materiałów w testach statycznych, zmęczeniowych i przy jednoczesnym oddziaływaniu środowiska temperaturowego

3. Przyrządy pomiarowe do określania składowych stanu odkształcenia

W celu rejestracji składowych stanu odkształcenia/naprężenia zarówno w obszarze lokalnym, jak i na określonej powierzchni, stosuje się różne rodzaje czujników i przyrządów pomiarowych. W przypadku tych pierwszych, jednym z najprostszych jest elektrooporowy układ tensometryczny. Jego stosunkowo częste wykorzystanie wynika z możliwości dopasowania tensometrów do rozmiarów powierzchni badanej oraz możliwości ich używania w różnych warunkach środowiskowych.

W przypadku przyrządów pomiarowych są to ekstensometry, w tym standardowe i laserowe (rys. 12). Występują one w różnych rozmiarach i w zależności od konstrukcji dedykowane są do badań statycznych, zmęczeniowych, temperaturowych czy korozyjnych.

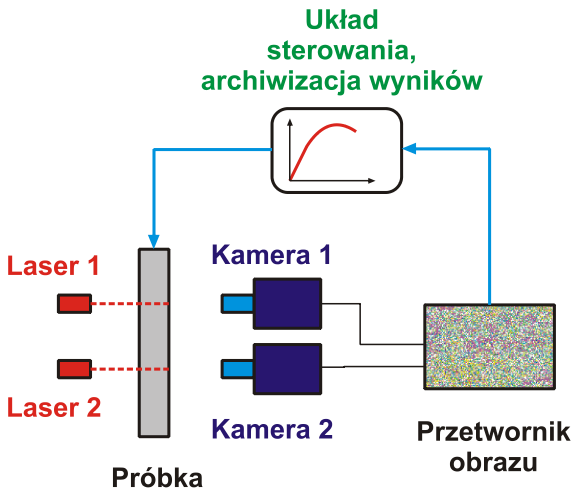
W przypadku badań, których głównym celem jest określanie polowych rozkładów składowych stanu odkształcenia, wykorzystuje się bezkontaktowe systemy pomiarowe. Spośród już stosowanych wymienić należy: system cyfrowej korelacji obrazu (Digital Image Correlation – DIC) [4, 24] oraz system elektronicznej interferometrii plamkowej (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI) [24].

3.1. Ekstensometr laserowy

Na rys. 12 zamieszczono schemat działania ekstensometru laserowego. Wykorzystuje on dwa źródła światła spolaryzowanego skierowane na strefę badawczą próbki, wyznaczające w ten sposób bazę pomiarową. Układu dwóch kamer przyporządkowanych do każdego z czujników, sprzęgniętych z przetwornikiem obrazu, używa się do rejestrowania w czasie rzeczywistym przemieszczenia znaczników laserowych w postaci obrazu spektralnego. Zarejestrowany w ten sposób obraz służy do określenia składowych stanu przemieszczenia. Jego analiza odbywa się w kolejnych chwilach czasu i jest możliwa przy użyciu algorytmu zaimplementowanego do oprogramowania [26]. W przypadku sygnałów odkształcenia zapisywanych w postaci cyfrowej przeprowadza się ich przekonwertowanie do postaci analogowej. Z kolei wartości siły w postaci sygnałów analogowych wykorzystuje się do skorelowania ich ze składowymi stanu przemieszczenia. W efekcie powstaje zależność naprężenie-odkształcenie [26]. W porównaniu do kamer

liniowych, zastosowanie ich odpowiedników pełnoobrazowych zmniejszyło o połowę użycie tego typu urządzeń w ekstensometrach laserowych, zachowując jednocześnie możliwość prowadzenia pomiarów składowych stanu odkształcenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, tj. wzdłużnym i poprzecznym [26].

Zalety, ograniczenia i typowe zastosowanie ekstensometru laserowego zamieszczono w tab. 3.



Rys. 12. Schemat działania ekstensometru laserowego LSE (Laser Speckle Extensometer) [26]
Fig. 12. Scheme of laser extensometer LSE (Laser Speckle Extensometer) [26]

Tabela 3

Zasadnicze cechy ekstensometru laserowego [26]

Table 3

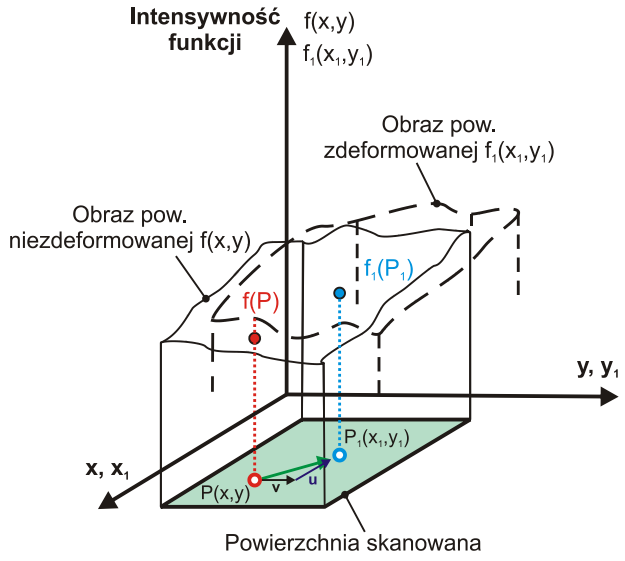
Fundamental features of laser speckle extensometer [26]

Zalety	Ograniczenia	Typowe zastosowania
Łatwy w użyciu	Używanie większej liczby kamer w przypadku badania elementów wielkogabarytowych	Różne rodzaje materiałów
Pomiar bezkontaktowy	Liniowy pomiar odkształcenia	Zginanie konstrukcji belkowych
Pomiar odkształceń w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach		Skręcanie profili pełnych i cienkościennych
Nie wymaga nanoszenia znaczników na powierzchnię próbki		Badania w temperaturze do 1500ºC wytworzonej metodą konwekcyjną i indukcyjną
		Testowanie mikropróbek o wymiarze zasadniczym ok. 3 mm

3.2. System cyfrowej korelacji obrazu (DIC)

Zasada działania systemu cyfrowej korelacji obrazu [5] (rys. 13) polega na oświetleniu i analizie: intensywności światła odbitego od powierzchni w stanie początkowym f(x, y)

(niezdeformowanym) i zdeformowanym $f_1(x_1, y_1)$. W ten sposób przeprowadza się pomiar odkształcenia w obszarze stref o niewielkich powierzchniach, aby następnie uzyskać deformacje rzeczywistej powierzchni obiektu.



Rys. 13. Schemat analizy niezdeformowanego i zdeformowanego obrazu powierzchni [5]
Fig. 13. Analysis scheme of undeformed and deformed surface image [5]

Idea metody cyfrowej korelacji obrazu bazuje na zasadach mechaniki ośrodka ciągłego [12, 19]. Rozpatrywane są zmiany zachodzące w wymiarach i położeniu niewielkich linowych odcinków określanych między dwoma punktami w stanie przed (P, Q) i po deformacji (P_1, Q_1), rys. 14, opisywanych następującymi równaniami w trójwymiarowym układzie współrzędnych kartezjańskich:

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1) = [x + u(P), y + v(P), z + w(P)], \tag{1}$$

$$Q_1 = (x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, z_1 + dz_1) = \begin{bmatrix} x + u(P) + u(Q) - u(P) + dx, y + v(P) + v(Q) - \\ + v(P) + dy, z + w(P) + w(Q) - w(P) + dz \end{bmatrix}, \tag{2}$$

gdzie: u, v, w - reprezentują odpowiednio przemieszczenia w kierunku osi x, y, z.

Długość odcinków PQ i P_1Q_1 wyrażana jest następującymi równaniami:

$$|PQ|^2 = (ds)^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2; \tag{3}$$

$$|P_1Q_1|^2 = (ds_1)^2 = dx_1^2 + dy_1^2 + dz_1^2. \tag{4}$$

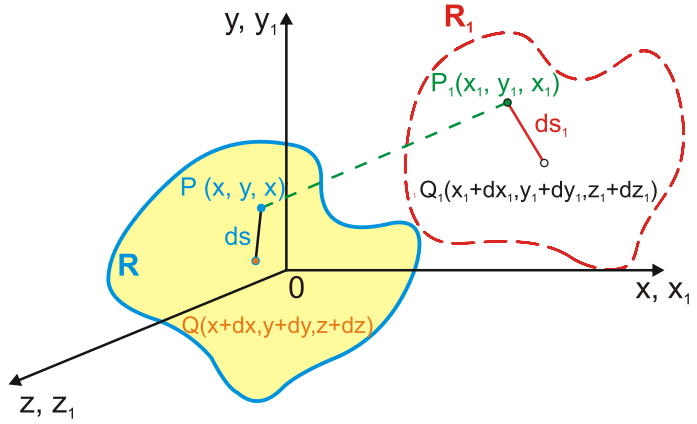
Efektem wykorzystania wzorów od (1) do (4) i przekształceń matematycznych, są zależności na składowe stanu odkształcenia:

$$\varepsilon_{xx} \cong \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2\right]; \tag{5}$$

$$\varepsilon_{yy} \cong \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]; \tag{6}$$

$$\varepsilon_{xy} \cong \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{1}{2}\left[\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial y}\right]. \tag{7}$$

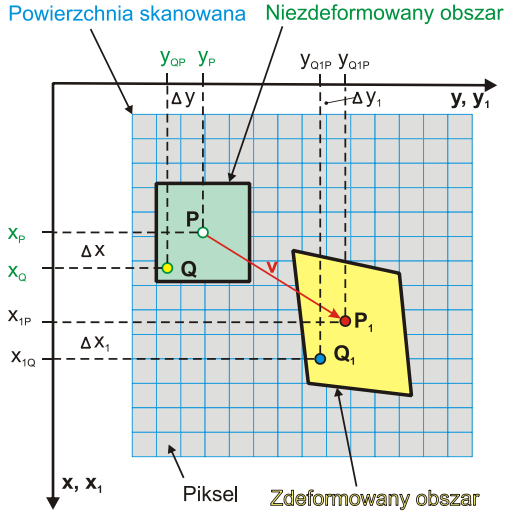
W numerycznej procedurze systemu DIC, obszar niezdeformowany (rys. 13, 15) poddaje się analizie polegającej na przyporządkowaniu poszczególnym, niewielkim i zdefiniowanym obszarom (pikselom) współrzędnych ich położenia. Następnie wydzielany jest niezdeformowany obszar referencyjny, a zmiany jego kształtu i położenia są analizowane i rejestrowane w układzie współrzędnych 0xy i $0x_1y_1$ w trakcie trwania obciążania (rys. 15).



Rys. 14. Charakterystyczne wielkości powierzchni przed (R) i po (R_1) deformacji [5]
Fig. 14. Characteristic magnitudes of surface before (R) and after (R_1) deformation [5]

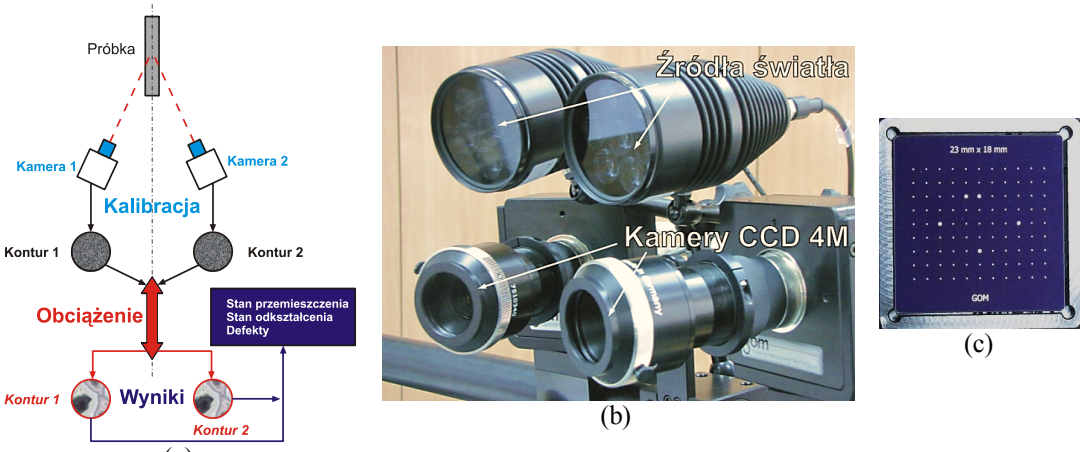
W większości praktycznych przypadków system jest wyposażany w układ dwóch kamer cyfrowych (rys. 16a, b). Przed przystąpieniem do zasadniczego testu przeprowadzana jest ich kalibracja na obiekcie nieobciążonym. Polega ona na zdefiniowaniu obszaru (konturu) do analizy oraz zarejestrowaniu jego kształtu. Cały proces odbywa się w oparciu o zasadę korelacji oraz metody poszukiwania punktów o jednakowych współrzędnych. Kolejny etap to proces obciążania, podczas którego wyznacza się składowe stanu przemieszczenia w przestrzeni dwu- bądź trójwymiarowej. Określone wartości przemieszczeń wykorzystywane są następnie do obliczania składowych stanu odkształcenia/naprężenia w postaci obrazu polowego (rys. 17, 18). System ten można z powodzeniem stosować do wyznaczania modułu Younga, współczynnika Poissona, identyfikowania procesu umacniania bądź osłabiania materiału w szerokim zakresie odkształcenia plastycznego. Znajduje on również zastosowanie w badaniach materiałów o dużej ciągliwości przekraczającej 100% oraz w wyznaczaniu

parametrów mechaniki pękania. Trudności, które można napotkać podczas stosowania DIC, są związane z przygotowywaniem próbki z punktami charakterystycznymi (rys. 17a) oraz sposobem pozycjonowania kamer (rys. 16b) przy użyciu płyty kalibracyjnej (rys. 16c). Na rys. 17 i 18 zamieszczono wyniki z badania materiału w teście rozciągania i przy użyciu systemu DIC.



Rys. 15. Graficzny opis deformacji wytypowanego obszaru powierzchni skanowanej w dwuwymiarowym układzie współrzędnych [5]

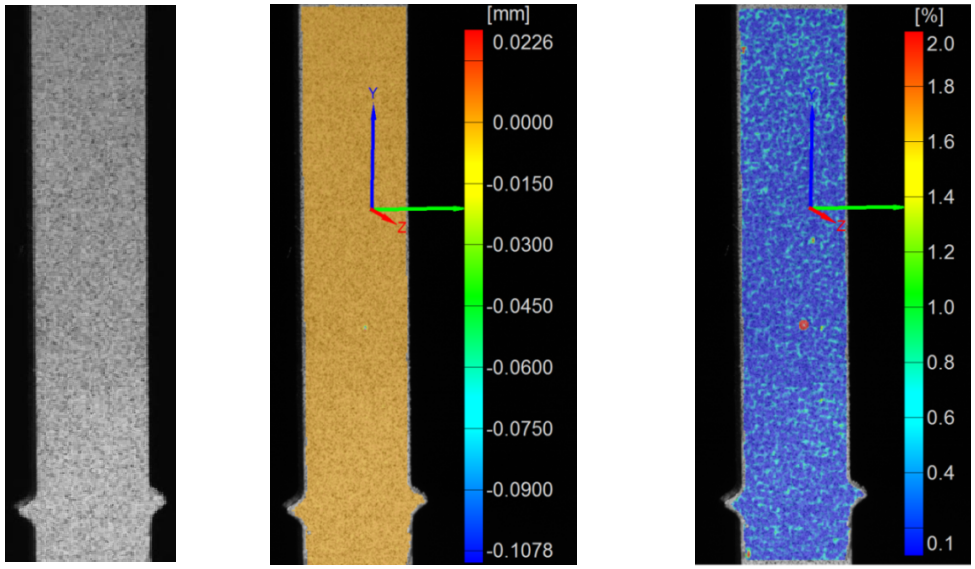
Fig. 15. Graphical illustration of deformation of a selected region of a scanned surface at two-dimensional coordinates system [5]



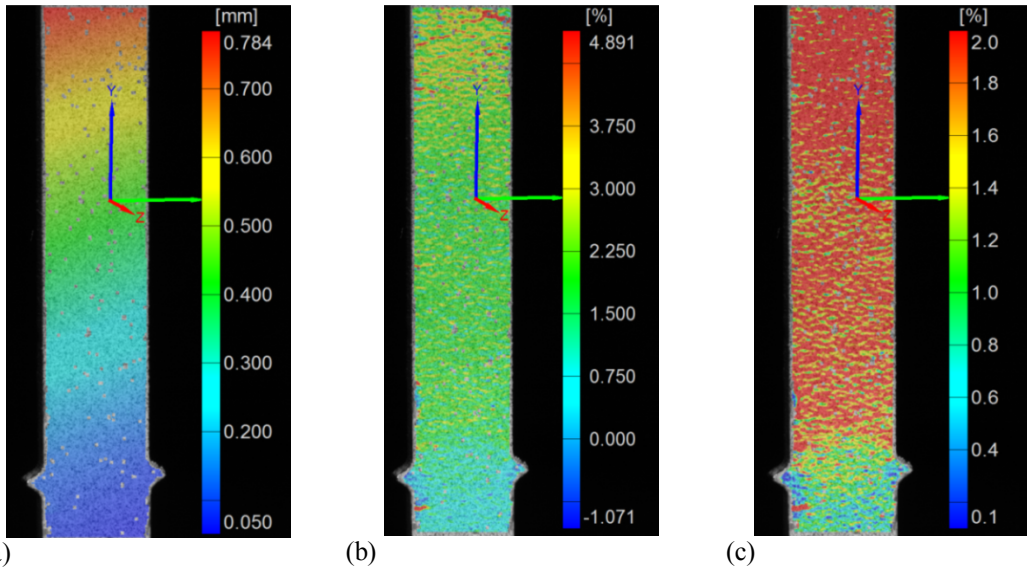
(a) (b) (c)

Rys. 16. System ARAMIS i jego zasadnicze elementy: schemat działania (a) [24], główny moduł pomiarowy (b), płyta kalibracyjna (c)

Fig. 16. Aramis system and its fundamental elements: scheme (a) [24], major measuring module(b), calibration plate (c)



Rys. 17. Etapy analizy próbki płaskiej w stanie nieobciążonym: punkty charakterystyczne (a), przemieszczenie w kierunku osi y (b), odkształcenie w kierunku osi y (c)
Fig. 17. Stages of flat specimen analysis under unloaded state: characteristic points (a), displacement at y axis direction (b), strain at y axis direction (c)



Rys. 18. Rozkłady polowe w układzie dwuwymiarowym dla kierunku głównej osi próbki w stanie obciążonym: przemieszczenia (a), odkształcenia (b), maksymalnego odkształcenia głównego (c)
Fig. 18. Distribution of: displacement (a), strain (b), major strain (c) in two dimensional coordinates system for major axis of specimen under loading

Pokazują one, jaki jest rozkład przemieszczenia i odkształcenia w kierunku głównej osi próbki, gdy jest ona stanie nieobciążonym (rys. 17b, c) i obciążonym (rys. 18).

W przypadku mapy przemieszczenia zauważalne jest występowanie niewielkiej pasmowości (rys. 18a). Z kolei rozkład odkształcenia w kierunku „y" (rys. 18b) charakteryzuje się wyraźną jednorodnością, podobnie jak mapa odkształcenia głównego (rys. 18c).

Prowadzone są również badania porównawcze mające na celu wyznaczenie w tym samym obszarze pomiarowym wartości składowych stanu odkształcenia przy użyciu DIC, techniki tensometrycznej i metody elementów skończonych, w zależności od poziomu obciążenia (tab. 4, rys. 19) [14]. Uzyskiwane w tym zakresie rezultaty (rys. 19) nie wykazały istotnych różnic między określonymi wielkościami, wskazując jednocześnie na poprawność działania systemu DIC i możliwą wymienność zastosowanych metod pomiarowych.

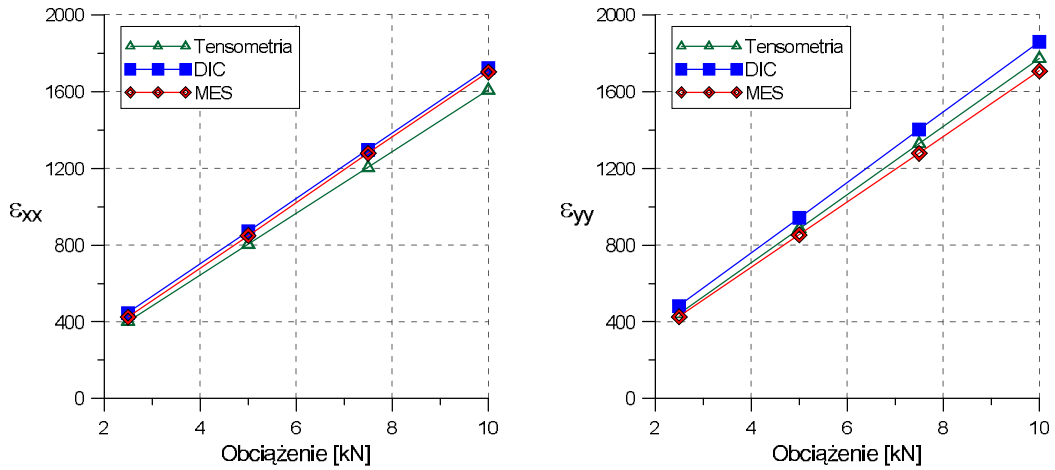
Tabela 4

Porównanie składowych stanu odkształcenia wyznaczonych przy użyciu różnych technik pomiarowych, gdzie: ε_{xx} – odkształcenie w kierunku osi x, ε_{yy} – odkształcenie w kierunku osi y, [14]

Table 4

Comparison of strain state components determined using various measurement techniques, where: ε_{xx} – strain at x axis direction x, ε_{yy} – strain at y axis direction, *[14]*

Obciążenie [kN]	$\varepsilon_{xx} \times 10^{-6}$			$\varepsilon_{yy} \times 10^{-6}$		
	Technika tensometryczna	DIC	MES	Technika tensometryczna	DIC	MES
2.5	403	447	426	442	484	427
5.0	804	872	850	886	943	854
7.5	1206	1298	1280	1330	1402	1280
10.0	1608	1723	1703	1774	1860	1709



Rys. 19. Przebiegi odkształcenia ε_{xx} i ε_{yy} w funkcji obciążenia uzyskane różnymi metodami pomiarowymi [14]

Fig. 19. Strain courses i.e. ε_{xx} i ε_{yy} as loading function, determined by a use of various measurement techniques [14]

Formalna ocena systemu DIC dokonana została w tab. 5, w której podano podstawowe jego zalety i wady oraz typowe zastosowania.

Tabela 5

Zasadnicze cechy systemu DIC [17]

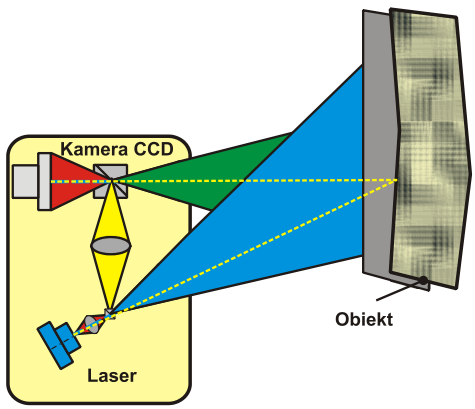
Table 5

Fundamental features of DIC system [17]

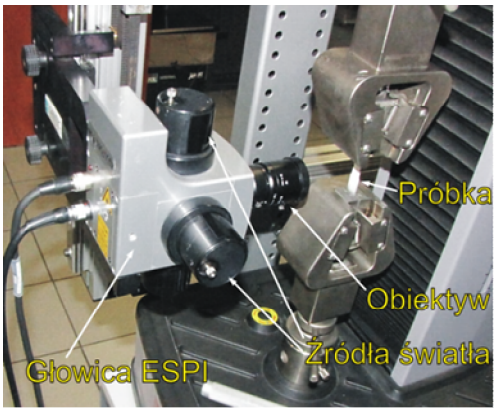
Zalety	Ograniczenia	Typowe zastosowania
Bezkontaktowy pomiar	Niska rozdzielczość pomiarowa w porównaniu z techniką interferometryczną	Różne rodzaje materiałów
Powierzchniowe obrazy przemieszczeń i odkształceń	Przygotowanie powierzchni próbki techniką natryskiwania	Polowa analiza rozkładów składowych przemieszczenia i odkształcenia
Zakres zastosowania rozpoczynający się od skali nano do większych	Wysoka intensywność obliczeń	Wykrywanie pęknięć
		Wibracje/analiza modalna
		Pomiary kształtu
		Walidacja modeli metody elementów skończonych

3.3. System elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI)

System elektronicznej interferometrii plamkowej (rys. 20, 21), podobnie jak DIC, jest bezkontaktową techniką optyczną do pomiaru składowych przemieszczenia. Zasada jego działania polega na porównywaniu obrazu plamkowego dla materiału niezdeformowanego (rys. 20, 22a) oraz po deformacji (rys. 20, 22b). Następnie tworzona jest mapa prążków interferencyjnych (rys. 22c), mapa przesunięć fazowych (rys. 22d) i w efekcie mapa składowych przemieszczenia (rys. 22e). Tę ostatnią wykorzystuje się do dalszych obliczeń, w tym do określania składowych stanu odkształcenia/naprężenia w przestrzeni dwu lub trójwymiarowej.



Rys. 20. System ESPI [24]
Fig. 20. ESPI system [24]



Rys. 21. Układ pomiarowy systemu ESPI
Fig. 21. Measurement module of ESPI system

Wzory od (8) do (11) stosujemy, gdy w materiale występuje płaski stan odkształcenia (PSO):

$$\varepsilon_n = 0; \tag{8}$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\frac{\left(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}\right)^2}{2} + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}; \tag{9}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1-2\nu)\cdot(1+\nu)} \cdot \left(\varepsilon_{xx} + \frac{\nu}{(1-\nu)}\varepsilon_{yy}\right); \tag{10}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1-2\nu)\cdot(1+\nu)} \cdot \left(\varepsilon_{yy} + \frac{\nu}{(1-\nu)}\varepsilon_{xx}\right). \tag{11}$$

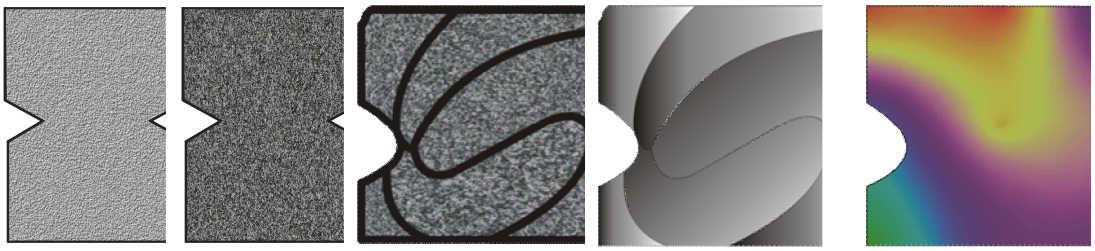
W przypadku płaskiego stanu naprężenia (PSN) wykorzystuje się równania od (12) do (15)

$$\sigma_n = 0; \tag{12}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_{xx} + \nu \cdot \varepsilon_{yy}); \tag{13}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_{yy} + \nu \cdot \varepsilon_{xx}); \tag{14}$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2}{2} + (\tau_{xy})^2}. \tag{15}$$



(a) (b) (c) (d) (e)

Rys. 22. Schemat powstawania mapy składowych przemieszczenia przy użyciu techniki ESPI, gdzie: (a) - obraz referencyjny, (b) - obraz materiału odkształconego, (c) - prążki interferencyjne, (d) - mapa przesunięć fazowych, (e) - mapa przemieszczeń [24]

Fig. 22. Schemes of displacement map created by ESPI technique, where: (a) – referential image, (b) material deformed image, (c) – referential patterns, (d) – phase shift map, (e) – displacement map [24]

Wynikiem końcowym z badań przy użyciu systemu ESPI są mapy składowych odkształcenia, podobne do rezultatów uzyskiwanych z obliczeń przy pomocy metody elementów skończonych. Zasadniczą niedogodnością wynikającą ze stosowania tego urządzenia jest niestabilność układu pomiarowego, występująca przy prowadzeniu badań na maszynach generujących znaczące dla pomiaru drgania rzutujące na wyniki pomiarów.

System ESPI można z powodzeniem stosować do określania parametrów mechanicznych, w tym modułu Younga (tab. 6) [22]. Uzyskiwane w tym zakresie wyniki badań i ich porównanie z rezultatami prób, w których stosowano ekstensometr, wskazują na różnice nieprzekraczające średnio 10%.

Ponadto, system elektronicznej interferometrii plamkowej wykorzystuje się do określania składowych stanu naprężenia w pobliżu osobliwości geometrycznych jak otwory: (rys. 23 i 24). Przy czym, jak pokazano na rys. 24, istnieje graniczna wartość deformacji, po przekroczeniu której może występować niestabilność w odczytach wielkości mierzonych. W omawianym przypadku jest to wartość 1.4mm – zaznaczona pionową linią kropkowaną.

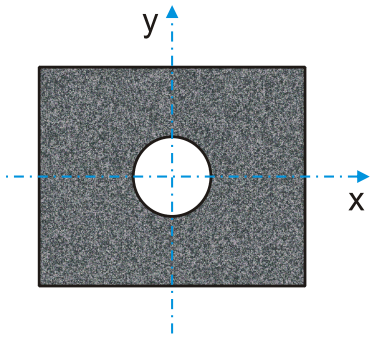
Tabela 6

Moduł Younga blachy miedzianej w zależności od kierunku pobierania próbek i rodzaju metody użytej do jego określenia [22]

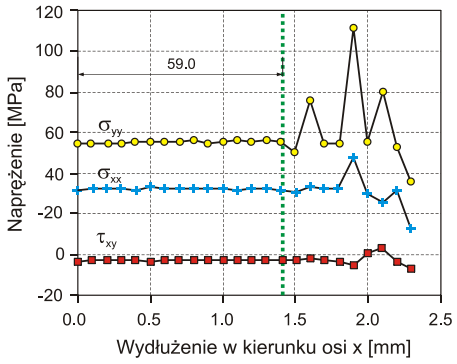
Table 6

Young's modulus of copper sheet for different direction of specimen cutting and type of method used for determination [22]

Kierunek pobierania próbki [°]	Moduł Younga [MPa] określony przy wykorzystaniu	
	Ekstensometru	ESPI
0	98.4	102.5
45	113.2	132.9
90	112.0	112.2



Rys. 23. Próbka z otworem [3]
Fig. 23. A specimen with a hole [3]

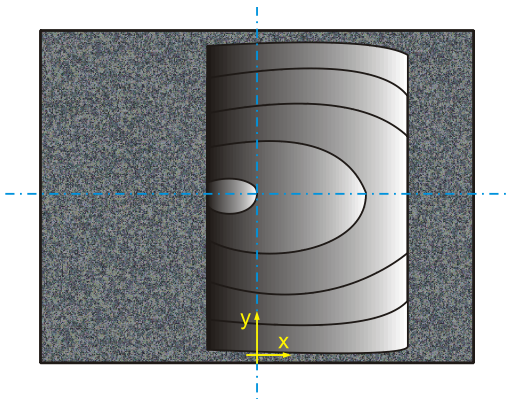


Rys. 24. Przebiegi składowych stanu naprężenia: σ_{xx}, σ_{yy} i τ_{xy} w zależności od wydłużenia próbki w kierunku osi x pokazanej na rys. 23 [3]

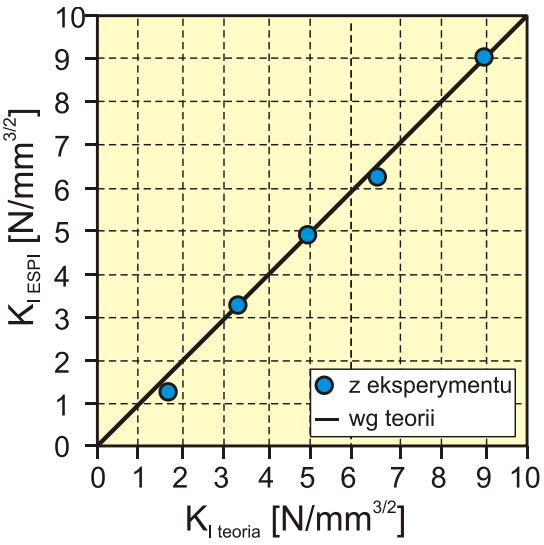
Fig. 24. Courses of stress state components i.e. σ_{xx}, σ_{yy} and τ_{xy} depending on a specimen elongation in x axis direction, shown in Fig. 23 [3]

Prowadzone są również badania ukierunkowane na wykorzystanie zasady działania systemu ESPI do wyznaczania współczynnika intensywności naprężenia K_I (rys. 25 i 26) [7]. Problem, który pojawia się w początkowym etapie tego rodzaju eksperymentów, to wysoki poziom szumu zakłócający pomiary. Jednak przy użyciu „filtra" w postaci zaawansowanych obliczeń matematycznych możliwe jest jego znaczne zredukowanie [13]. W efekcie doświadczalne wartości współczynnika intensywności naprężenia ($K_{I\ ESPI}$)

nieznacznie różnią się od wartości analitycznych ($K_{I\ teoria}$, [6]) (rys. 26) a maksymalna różnica procentowa między nimi wynosi 18.8% [7].

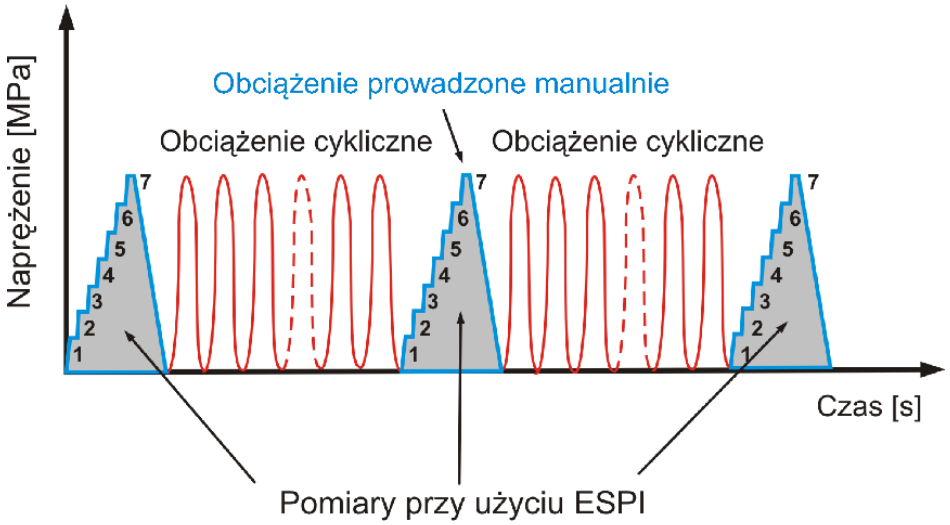


Rys. 25. Prążki interferencyjne w otoczeniu wierzchołka szczeliny zmęczeniowej po zastosowaniu filtra analitycznego [7]
Fig. 25. Referential patterns at a tip of the fatigue pre-cracking after analytical filter use [7]



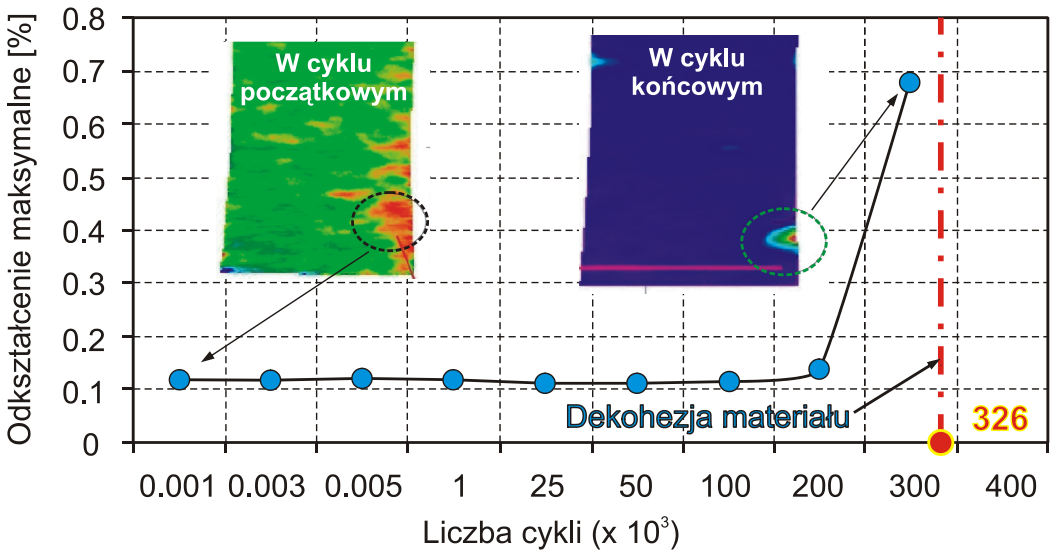
Rys. 26. Porównanie wartości współczynnika intensywności naprężenia K_I określonych teoretycznie ($K_{I\ teoria}$) i eksperymentalnie ($K_{I\ ESPI}$) [7]
Fig. 26. Comparison of stress intensity factor K_I determined theoretically ($K_{I\ teoria}$) and experimentally ($K_{I\ ESPI}$) [7]

Kolejnym przykładem zastosowania systemu ESPI jest badanie lokalizacji uszkodzeń zmęczeniowych [9]. Próbki poddawano rozciągającemu naprężeniu cyklicznemu o wartości 100 MPa przy użyciu serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej, co stanowiło 64% granicy plastyczności badanego materiału. Po uzyskaniu określonej liczby cykli (tj.: 1, 2, 3, 5, 1000, 25 000, 100 000, 200 000 i 300 000) obciążenie zmęczeniowe było przerywane i przeprowadzano badania polowych rozkładów deformacji przy użyciu ESPI. W badaniach użyto zaprojektowanego w IPPT PAN hydraulicznego układu do statycznego obciążania. Charakteryzuje się on brakiem pulsacji ciśnienia oleju, mogących zakłócać wyniki pomiarów badań, jak ma to miejsce w maszynach wyposażonych w serwozawór. Postępowanie takie wynikało z braku możliwości zapisania obrazów składowych przemieszczenia w trakcie wykonywania cyklicznie zmiennego obciążenia, z uwagi na generowane drgania układu przewyższające nawet dziesięciokrotnie dokładność pomiarową metody ESPI. Dlatego też określenie przemieszczenia przeprowadzono w warunkach narastającego obciążenia rozciągającego w wybranym cyklu według schematu pokazanego na rys. 27. Ze względu na duże wartości deformacji, konieczne było wykonanie pomiarów w siedmiu krokach, począwszy od 1.2 kN aż do wartości 7.2 kN - wprowadzającej naprężenie o wartości 100 MPa.



Rys. 27. Etapy programu badawczego zawierającego pomiary przy użyciu ESPI i przebieg obciążenia cyklicznego [9]

Fig. 27. Stages of experimental procedure containing measurements using ESPI and course of cyclic loading [9]



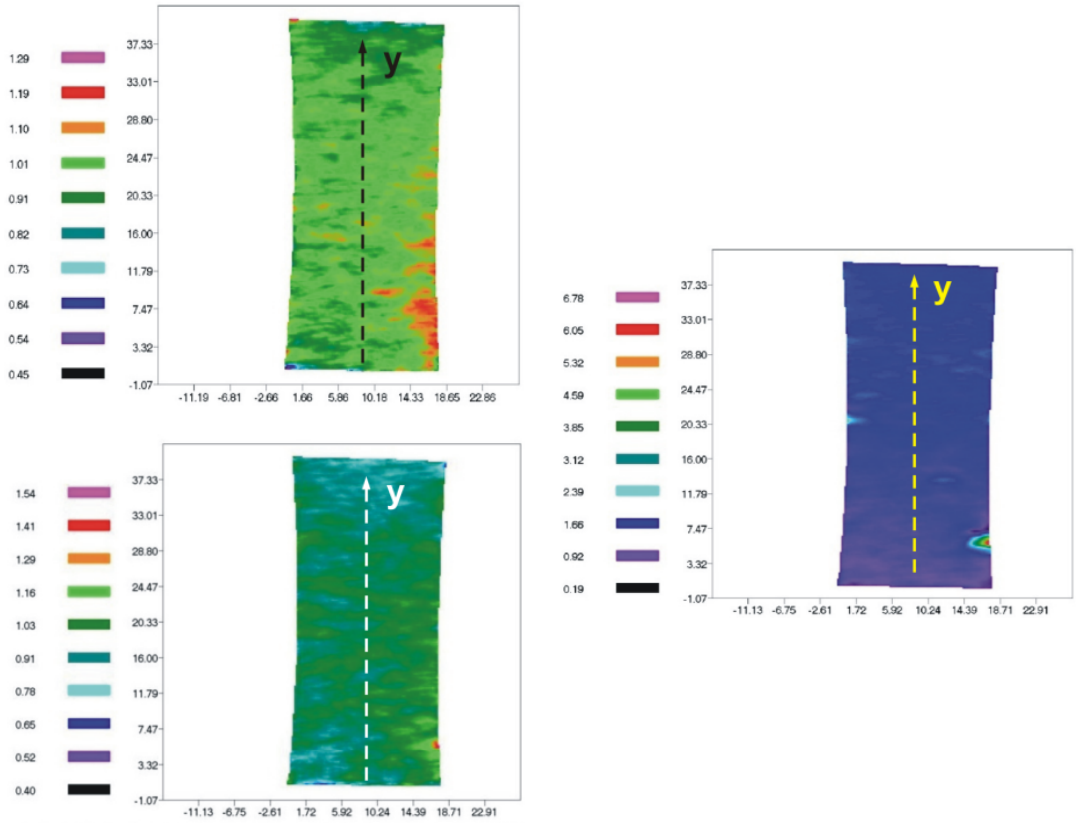
Rys. 28. Analiza rozwoju deformacji materiału w kolejnych cyklach obciążenia oraz miejsc jej lokalizacji [9]

Fig. 28. Analysis of deformation of materials at subsequent cycles of loading and places of its localisation [9]

Obserwacje jednej z powierzchni próbki (rys. 28) wykazały efekt lokalizacji przemieszczeń już w pierwszych cyklach obciążenia, co widoczne jest najlepiej na mapach odkształcenia w kierunku działania siły osiowej – kierunek nazwany „y". Proces ten rozwijał się w tym miejscu aż do 325 642 cyklu, przy którym nastąpiło pęknięcie próbki. Na rys. 29 pokazano obrazy odkształcenia po osiągnięciu pierwszego, 200 000 oraz

300 000 cyklu. Dla wszystkich pomiarów w kierunku „y" wyznaczono rozkład odkształcenia w kierunku prostopadłym do głównej osi próbki, w miejscu lokalizacji deformacji. Na tej podstawie określono ilościowy przyrost odkształcenia rejestrowanego w kolejnych etapach obciążenia rozciągającego. Wynik zilustrowano wykresem pokazanym na rys. 28, na którym przedstawiono zmianę wartości maksymalnego odkształcenia w funkcji liczby cykli. Z obserwacji tych zmian wynika, że lokalny przyrost odkształcenia z pierwszego cyklu obciążenia pozostawał niezmienny przez kolejne 200 000 cykli, a następnie dynamika jego rozwoju gwałtownie i nieliniowo wzrastała powodując dekohezję materiału przy 325 642 cyklu.

Zasadnicze cechy systemu ESPI zaprezentowano w tab. 7.



Rys. 29. Wyniki pomiarów: mapy odkształcenia w kierunku osi y, (wymiary próbki w [mm]) [9]
Rys. 29. Experimental results – strain maps for y axis direction. Dimensions in mm [9]

Tabela 7

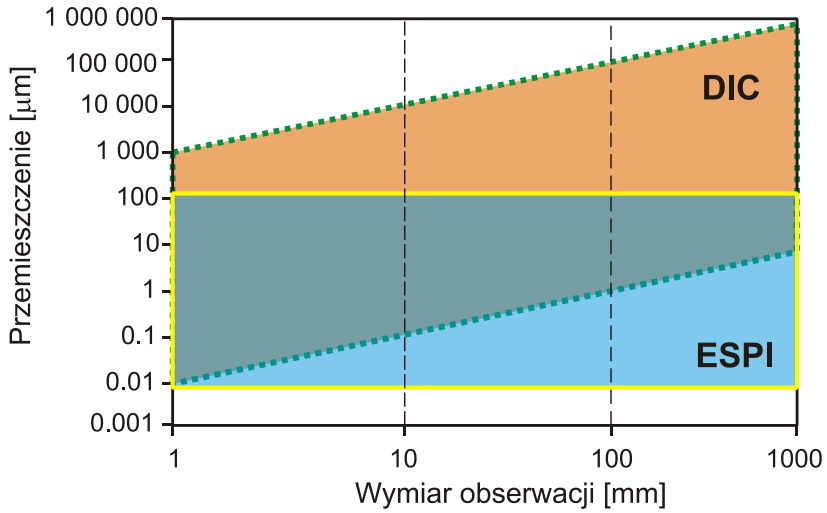
Zasadnicze cechy systemu ESPI [15], [21]

Table 7

Fundamental features of ESPI system [15], [21]

Zalety	Ograniczenia	Typowe zastosowania
Bezkontaktowy pomiar	Wrażliwość na warunki, w których prowadzone są badania (sprzęt laboratoryjny)	Wszystkie rodzaje materiałów
Powierzchniowe obrazy składowych przemieszczenia i odkształcenia	Wymaga powierzchni dyfuzyjnych	Pomiary gradientu odkształcenia
Wysoka czułość	Podatny na niewielkie przemieszczenia uchwytu mocującego	Mechanika pękania
Wysoka rozdzielczość	Nieprzystosowany do dużych odkształceń	Mechanika kompozytów
Wysoka dokładność	Wymaga dużego doświadczenia i wysokich umiejętności	Termo-mechaniczne odkształcanie się elektronicznych podzespołów
Pomiary w trzech kierunkach (3D)		

Dokonując porównania zakresu przemieszczenia mierzonego przy użyciu systemów DIC i ESPI (rys. 30) zauważalne są istotne różnice w uzyskiwanych wartościach. Pierwsze z tych urządzeń zapewnia pomiary w zakresie od 0.01µm do 1 000 000 µm. Z kolei parametry drugiego umożliwiają prowadzenie pomiarów począwszy od 0.01µm, ale do wartości nieprzekraczającej 100µm.



Rys. 30. Zakresy przemieszczenia rejestrowane przy użyciu technik pomiarowych DIC i ESPI [24]

Fig. 30. Displacement ranges recognized by the use of DIC and ESPI measurement techniques [24]

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono nowoczesne stanowiska badawcze do zadawania różnych rodzajów obciążenia oraz przyrządy pomiarowe do wyznaczania składowych stanu odkształcenia/naprężenia. Wśród maszyn wytrzymałościowych wyróżniono maszynę do badań na próbkach krzyżowych (CTM) oraz urządzenie do zadawania obciążeń termiczno-mechanicznych (TMF). Spośród przyrządów pomiarowych syntetycznie omówiono ekstensometr laserowy (LSE), system cyfrowej korelacji obrazu (DIC) i interferometrii plamkowej (ESPI).

Zaprezentowane maszyny wytrzymałościowe istotnie uzupełniają dotychczasowe możliwości badań materiałowych przez rozszerzenie różnych złożonych stanów naprężenia w warunkach zmiennych cykli temperaturowych.

Analiza działania nowoczesnych przyrządów pomiarowych przeznaczonych do określania przemieszczenia, odkształcenia lub naprężenia i zakresy ich potencjalnego zastosowania pokazały, że wybór właściwego urządzenia jest determinowany kilkoma czynnikami, spośród których najważniejsze to:

a) typ obciążenia: statyczne, zmęczeniowe, jednoosiowe, wieloosiowe,
b) wartość oczekiwanego odkształcenia, w tym zakres stanu badanego materiału: sprężysty, sprężysto-plastyczny,
c) rodzaj warunków środowiskowych, parametry i ich zmienność.

LITERATURA:

[1] Affeldt E.E., Thermomechanical Fatigue Testing (TMF) of single-crystalline nickel-based superalloys for turbine engine application, MTU Aero Engines, Munich, Germany.

[2] Bartolotta P.A., Kantzos P., Krause A.L., In-plane biaxial yield surface study of cast titanium aluminide (TiAl), 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture Cracow'97 Poland, 1997, 389-402.

[3] Bingleman L.W., Schajer G.S., DIC-Based Surface Motion Correction for ESPI Measurements, Experimental Mechanics, 51, 2001, 1207-1216.

[4] Chrysochoos A., Huon V., Jourdan F., Muracciole J.M., Peyroux R. and Wattrisse B., Use of Full-Field Digital Image Correlation and Infrared Thermography Measurements for the Thermomechanical Analysis of Material Behaviour Strain, 46, 2010, 117-130.

[5] Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A, Peters W.H., Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, Experimental Mechanics, 25(3), 1985, 232-244.

[6] Cirello A., Pasta A. crack growth in bimaterial joints with crack perpendicular to interface, FCP 2003 Fatigue Crack Paths 2003 Parma, Italy, 18-20 September 2003, 249-258.

[7] Cirello A., Pasta A., Determination of the stress intensity factor by means of the ESPI technique in: Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures; Edit. Gdoutos E.E., Springer, 2007, 395-396.

[8] Demmerle S., Boehler J.P., Optimal design of biaxial tensile cruciform specimens, J. Mech. Phys . Solids, 41, 1993, 143-181.

[9] Dietrich L., Grzywna P., Kukla D., Wykorzystanie metod optycznych do lokalizacji uszkodzeń zmęczeniowych, Przegląd Spawalnictwa, 13, 2012, 16-18.

[10] Dietrich L., Turski K., Waniewski M., Dziankowski Z., Kiryk R., Technika badań właściwości mechanicznych materiałów w złożonym stanie naprężenia, Prace IPPT, 1994, 11-104.

[11] Evans W.J., Screech J.E., Williams S.J., Thermo-mechanical fatigue and fracture of INCO718, Int. J. Fatigue, 30, 2008, 257-267.

[12] Fung Y.C., Foundations of solid mechanics, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ 1965.

[13] Ghiglia C. D., Pritt, D. M., Two dimensional phase unwrapping theory algorithms and software, Wiley Interscience 1998.
[14] Gower M.R., Shaw R.M., Towards a planar cruciform specimen for biaxial characterization of polymer matrix composites, Applied Mechanics and Materials, 24-25, 2010, 115-120.
[15] Gungor S., Moire Interferometry, Modern stress and strain analysis. A state of the art guide to measurement techniques, BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J.M. Dulie-Barton, R.L. Burguete, 2009, 8-9.
[16] Kelly D.A., Problems in creep testing under biaxial stress systems, J. Strain Analysis, 11, 1976, 1-6.
[17] Lord J.D., Digital Image Correlation (DIC), Modern stress and strain analysis. A state of the art guide to measurement techniques, BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J.M. Dulie-Barton, R.L. Burguete, 2009, 14-15.
[18] Nagesha A., Valsan M., Kannan R., Bhanu Sankara Rao K., Bauer V., Christ H-J, Singh V., Thermomecanical fatigue evaluation and life prediction of 316L(N) stainless steel, Int. J. Fatigue, 31, 2009, 636-643.
[19] Novozhilov V.V., Theory of elasticity, U.S. Department of commerce translation, 1861.
[20] Ogata T., Takahashi Y., Development of high-temperature biaxial fatigue testing machine using a cruciform specimen, 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture Cracow'97, Poland, 1997, 257-272.
[21] Pierron S., Digital Speckle Pattern Interferometry, Modern stress and strain analysis. A state of the art guide to measurement techniques, BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J.M. Dulie-Barton, R.L. Burguete, 2009, 14-15.
[22] Vial-Edwards C., Lira I., Martinez A., Monzenmayer M., Electronic speckle pattern interferometry analysis of tensile tests of semihard copper sheets, Experimental Mechanics, 41(1), 2001, 58-61.
[23] Winter G., Riedler M., Minichmayr R., Eichlseder W., Discussion of temperature distributions at TMF-testing, TMF Conference 2005, Berlin, 22 September 2005.
[24] www.dantecdynamics.com.
[25] www.instron.com.
[26] www.messphysic.com.