

IX Międzynarodowa Konferencja
„Laboratoria Badawcze - Systemy Jakości
w Unii Europejskiej”
„Polsko - Niemieckie Forum Badań Materiałowych
- Prezentacja Doświadczeń”
DREZNO, SAKSONIA – ZAMEK KLICZKÓW, 09.06. - 11.06.2016

Komitet Programowy

Ryszard Bartz, SIMP O/Gorzów, POLLAB SBM – Przewodniczący
Jacek Słania, Instytut Spawalnictwa w Gliwicach
Piotr Kukuła, TÜV SÜD Polska Sp. z o.o.
Aleksandra Krawczyk, POLLAB SBM
Tomasz Babul, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa
Wojciech Manaj, Instytut Lotnictwa, Warszawa

Komitet Organizacyjny

Włodzimierz Fleischer O/SIMP Gorzów Wlkp. – Przewodniczący
Tomasz Waławczyk, POLLAB SBM
Artur Donath, TÜV SÜD Polska Sp. z o.o.
Rolf Banisch, ZukunftsAgentur Brandenburg GmbH

Adres Komitetu Organizacyjnego:

STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW MECHANIKÓW POLSKICH
ODDZIAŁ W GORZOWIE WIELKOPOLSKIM, ul. Chyża 1, 66-400 Gorzów Wlkp.
tel./fax +48 95 720 21 61, e-mail: gorzow@simp.pl, www.gorzow.simp.pl

Ocena zachowania materiałów i elementów konstrukcyjnych w międzylaboratoryjnych próbach statycznych i zmęczeniowych z użyciem nowoczesnych technik pomiarowych

1. Wprowadzenie

Zachowanie materiałów i elementów konstrukcyjnych jest określane w próbach statycznych oraz dynamicznych.

W przypadku testów statycznych, obiekt badań poddawany jest oddziaływaniu obciążenia monotonicznie narastającego do określonej wartości lub uzyskania założonej deformacji bądź zniszczenia. W trakcie próby rejestrowane są zmiany siły, momentu oraz przemieszczenia w czasie. Wykorzystując wymienione wielkości oraz uwzględniając wymiary geometryczne próbki można określić wartości naprężenia i odkształcenia. Jeżeli obiektem badań jest próbka pobrana z gotowego elementu, wówczas można wyznaczyć charakterystykę naprężenie-odkształcenie jej materiału oraz na jej podstawie określić takie parametry mechaniczne materiału, jak: moduł Younga, granica plastyczności, wytrzymałość doraźna oraz wydłużenie.

Z kolei badania dynamiczne przeprowadzane są na obiektach, dla których istotna jest ocena ich właściwości w warunkach zmienności obciążenia w czasie, reprezentowanej przez kształt sygnału, amplitudę i częstotliwość. Dobór tych parametrów ma wpływ na czas trwania testu, a zatem i na wynik końcowy. Przy wysokich wartościach amplitudy i częstotliwości dochodzi do zniszczenia elementu przy stosunkowo niewielkiej liczbie cykli. Obniżanie wartości tych parametrów skutkuje wydłużaniem czasu próby, a przy odpowiednim ich doborze, osiągnięciem liczby cykli znacznie przewyższającej zalecenia normowe. Należy zaznaczyć, że zarówno wyniki próby do zniszczenia, jak i testu zmęczeniowego, ale bez uzyskania utraty spójności, dają podstawy do oceny zachowania obiektu badań, przy czym w pierwszym przypadku możliwe jest wnioskowanie na temat zachowania obiektu badań przy obciążeniu ekstremalnym, natomiast w drugim przy obciążeniu zbliżonym do stosowanego w eksploatacji.

W ocenie zachowania materiałów i elementów konstrukcyjnych przy różnych rodzajach obciążenia dużą rolę odgrywa jakość wykorzystywanych czujników oraz systemów pomiarowych. Wśród powszechnie stosowanych w badaniach mechanicznych czujników można wymienić na przykład tensometry oraz ekstensometry, których użycie wymaga odpowiedniego ich przymocowania do strefy pomiarowej próbki. Wynik otrzymywany w takiej sytuacji należy traktować jako jednowymiarowy. W przypadku optycznych systemów pomiarowych należy wyróżnić urządzenia cyfrowej korelacji obrazu (DIC – Digital Image Correlation), np. systemy Aramis 4M oraz PONTOS 5M, które umożliwiają bezkontaktowe pomiary polowych rozkładów przemieszczenia/odkształcenia i parametrów kinematycznych w postaci prędkości oraz przyspieszenia w trójwymiarowych układach współrzędnych.

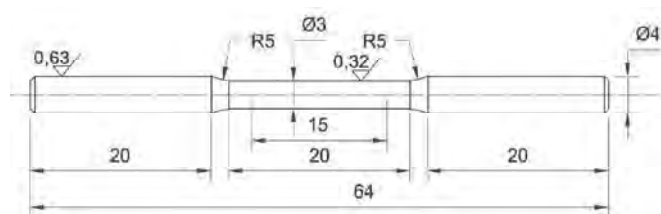
W międzylaboratoryjnych badaniach materiałów i elementów konstrukcyjnych do pomiarów odkształcenia i wielkości kinematycznych najczęściej wykorzystuje się ekstensometry mechaniczne lub innego rodzaju czujniki. Pomiary polowych rozkładów odkształcenia przy użyciu systemów optycznych nie są na chwilę obecną tak szeroko rozpowszechnione, jak wspomniane ekstensometry oraz dodatkowo, procedury ich stosowania nie są ujęte w konkretnych normach. Przyczyna takiej

sytuacji związana jest ze stosunkowo krótkim czasem ich wykorzystywania w badaniach w porównaniu do ekstensometrów. Dlatego też, celem pracy jest przedstawienie wybranych wyników badań, w tym międzylaboratoryjnych, pochodzących z testów, w których wykorzystywano zarówno standardowe czujniki, jak i nowoczesne systemy pomiarowe. Zaprezentowano rezultaty z prób rozciągania materiału w postaci próbek oraz wyniki testów stanowiskowych, w których badaniom poddawano zaczepek kulowy stosowany w pojazdach osobowych.

2. Szczegóły technik badawczych

2.1. Określanie parametrów mechanicznych materiału śrub w teście rozciągania

Badania na próbkach prowadzono przy użyciu dwuosiowej elektrodynamicznej maszyny wytrzymałościowej ElectroPuls E10000 Instron. Do pomiaru odkształcenia wykorzystywano ekstensometr statyczny serii 2620 Instron o bazie pomiarowej 12.5 mm. Przygotowano próbki w skali mini o kształcie i wymiarach pokazanych na rys. 1. Długość strefy roboczej próbki wynosiła 15 mm, a jej średnica była równa 3 mm, natomiast długość całkowita miała wartość 64 mm. Próbki wytworzono ze śrub o gwincie metrycznym M5×140, rys. 2. Zamocowaną próbkę w układzie obciążającym maszyny wytrzymałościowej zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 1. Mini-próbka do testu rozciągania



Rys. 2. Zdjęcie dwóch połówek śruby M5×140 po obróbce mechanicznej, oraz wytworzonej z niej próbki do rozciągania

Zakres badań obejmował przeprowadzenie próby rozciągania, wyznaczenie charakterystyki rozciągania oraz następujących parametrów mechanicznych: modułu Younga, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie. Próbę rozciągania zrealizowano zgodnie w wytycznymi zawartymi w normie PN-EN ISO 6892-1:2010 pt.: „Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej” [3], metoda B. Rozciąganie prowadzono przy sterowaniu sygnałem naprężenia przy prędkości wynoszącej 10 MPa/s.

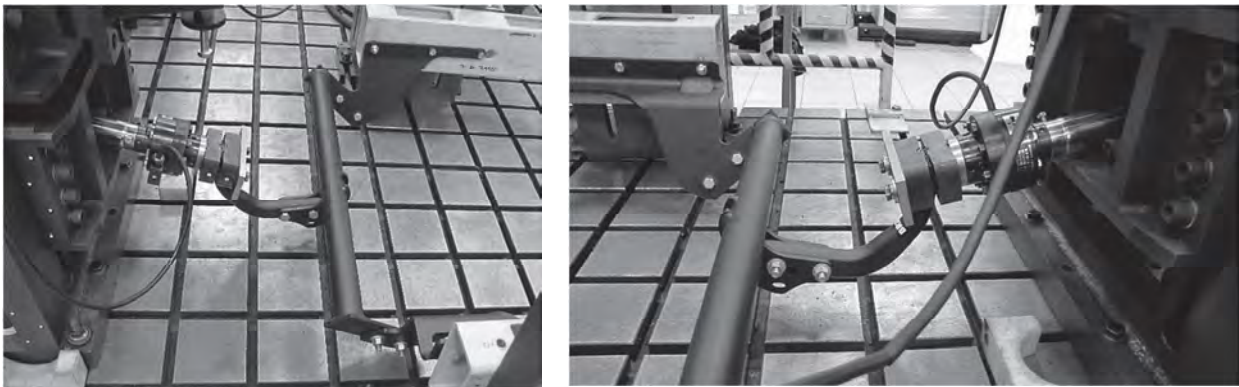


Rys. 3. Mini-próbka zamocowana w maszynie wytrzymałościowej wraz z ekstensometrem

2.2. Badanie trwałości zmęczeniowej zaczepek kulowych w teście stanowiskowym

W celu przeprowadzenia badań trwałościowych elementu konstrukcyjnego wytypowano zaczepek kulowy Brink typu 5921, klasa A50-X (nieznormalizowane zaczepek kulowe o średnicy 50 mm i haki), rys. 4. Jest on przeznaczony do samochodu osobowego marki Toyota Yaris. Charakteryzował się on następującymi parametrami użytkowymi: $D = 6.5$ kN (dopuszczalna siła eksploatacyjna), $S = 50$ kg (masa). Zaczepek montowano na stanowisku badawczym zgodnie z instrukcją montażową, która jest dostarczana do każdego rodzaju mechanicznego elementu sprzęgającego.

Testy prowadzono na stanowisku hydropulsacyjnym wyposażonym w wielokanałowy cyfrowy kontroler sygnałów IST, zestaw siłowników mobilnych, wielkogabarytową i wibroizolowaną płytę rowkowaną T. Przedmiot badań mocowano przy użyciu zestawu stojanów oraz systemu montażowego, rys. 4.

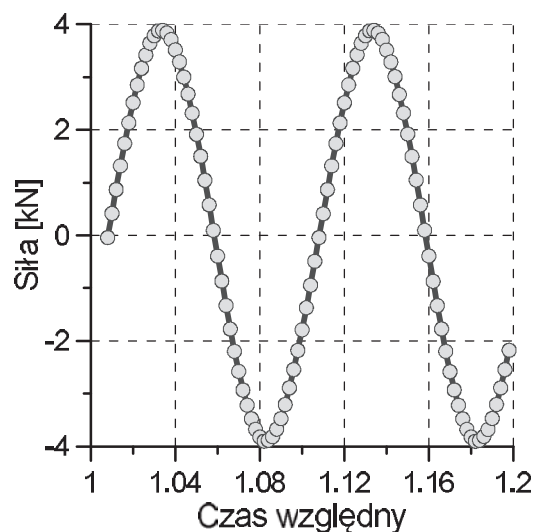


(a)

(b)

Rys. 4. Zaczepek kulowy Brink typ 5921: (a) widok ogólny; (b) strefa połączenia siłownika z kulą zaczepek

Zakres badań obejmował testowanie mechanicznego elementu sprzęgającego w warunkach obciążenia cyklicznie zmiennego (rys. 5), zgodnie z warunkami Regulaminu 55 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – „*Jednolite przepisy dotyczące homologacji mechanicznych elementów sprzęgających zespołów pojazdów*” [5].



Rys. 5. Wycinek programu obciążania elementu badanego

Obciążenie było przykładane do kuli zaczepu za pośrednictwem dwudzielnego uchwyty kulowego. Kąt nachylenia siłownika $15^{\circ} \pm 1^{\circ}$ wynikał z położenia kuli zaczepu względem linii odniesienia (wymagania Regulaminu 55). Parametry przebiegu siły były następujące: amplituda ± 3.9 kN, częstotliwość 8 Hz.

3. Wyniki badań i ich dyskusja

Wyniki badań z testów na próbkach oraz elemencie konstrukcyjnym opracowano podając odpowiednie dane liczbowe i zależności występujące między nimi oraz dokumentację zdjęciową.

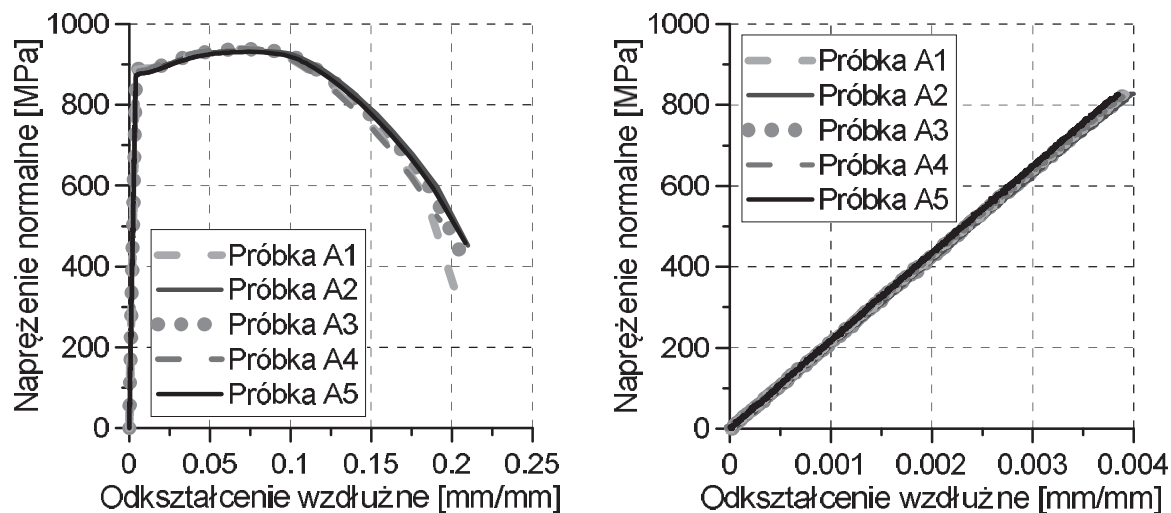
3.1. Wyniki prób rozciągania materiału śrub

Przed przystąpieniem do prób rozciągania przeprowadzono pomiary średnicy w strefie pomiarowej każdej z testowanych próbek, określono maksymalny rozrzut tych pomiarów oraz pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki, tab. 1.

Tab. 1. Dane z pomiarów gabarytów badanych próbek

Nr próbki	Średnica d_0 [mm]	Rozrzut pomiaru \varnothing [mm]	S_0 [mm ²]	Nr próbki	Średnica d_0 [mm]	Rozrzut pomiaru \varnothing [mm]	S_0 [mm ²]
A1	2.990	0.008	7.02	A2	2.985	0.005	6.98
	2.987				2.980		
	2.995				2.982		
	śr.: 2.991				śr.: 2.982		
A3	2.990	0.005	7.02	A4	2.993	0.004	7.04
	2.988				2.992		
	2.993				2.996		
	śr.: 2.990				śr.: 2.994		

Przebiegi krzywych rozciągania określone na pięciu próbkach zamieszczono na rys. 6. Uzyskany przebieg krzywej rozciągania świadczy o wysokiej ciągliwości badanej stali. Porównanie charakterystyk rozciągania dla wszystkich badanych próbek pokazuje ich duże podobieństwo, zwłaszcza w zakresie do osiągnięcia granicy wytrzymałości doraźnej testowanego materiału, rys. 6a, b.



Rys. 6. Wyniki prób rozciągania: (a) pełne krzywe rozciągania; (b) zakres sprężysty charakterystyk pokazanych na rys. a wykorzystany do określenia modułu Younga

Na podstawie krzywych rozciągania pokazanych na rys.6 obliczono moduł Younga (E), umowną granicę plastyczności ($R_{0.2}$) oraz wytrzymałość na rozciąganie (R_m), tab. 2. W przypadku każdego z wyznaczonych parametrów występował stosunkowo niewielki rozrzut otrzymywanych wartości. Różnica między największą a najmniejszą wartością modułu Younga wyniosła około 6 GPa. W przypadku granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej uzyskano różnice wynoszące odpowiednio: 10 i 20 MPa.

Tab. 2. Parametry mechaniczne materiału śruby M5×140

Numer próbki	E	$R_{0.2}$	R_m
	[GPa]	[MPa]	[MPa]
A1	212	888	938
A2	210	882	935
A3	211	886	939
A4	211	883	924
A5	216	878	918

Przełomy wszystkich próbek były zlokalizowane w środku strefy pomiarowej, tab. 3.

Tab. 3. Fotografie wybranych próbek po teście rozciągania



Zestawienie wybranych wyników badań z porównania międzylaboratoryjnego zamieszczono w tab. 4. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie uzyskane przez laboratorium instytutu naukowego zawierały się w przedziale 918÷939 MPa, natomiast określone przez laboratorium przemysłowe w zakresie od 931 do 937 MPa. Opracowanie statystyczne tych rezultatów zamieszczono w poniższym podpunkcie pracy.

Tab. 4. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie materiału śruby M5×140

Numer próbki	Laboratorium instytutu naukowego	R _m	Laboratorium przemysłowe	R _m
		[MPa]		[MPa]
A1		938		937
A2		935		933
A3		939		930
A4		924		931
A5		918		933

3.1.1. Statystyczna analiza wyników próby rozciągania

Analiza rezultatów z prób rozciągania była prowadzona z wykorzystaniem wielkości statystycznych w postaci: średniej arytmetycznej, odchylenia standardowego, granice przedziału ufności, precyzji względnej. Oprócz nich użyto resztę standaryzowaną oraz kryterium jakości wyniku – wyszczególnione w normie PN-EN ISO/IEC 17043 pt. „Ocena zgodności. Ogólne wymagania dotyczące badania biegłości” [4], tab. 4.

Odchylenie standardowe obliczano stosując następujący wzór:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

gdzie: n – liczba pomiarów, x_i – wartość mierzona, \bar{x} – średnia arytmetyczna n -tych pomiarów, i – numer pomiaru.

Granice przedziału ufności określano przy użyciu poniższych równań:

a) dolna granica przedziału ufności $\bar{x} - \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n-1}}, \quad (2)$

b) górna granica przedziału ufności $\bar{x} + \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n-1}}. \quad (3)$

Precyzję względną wyniku oznaczano następującym wyrażeniem

$$\frac{(t \cdot s_x)}{[\bar{x} \cdot \sqrt{(n-1)}]}. \quad (4)$$

Resztę standaryzowaną z obliczano wykorzystując równanie

$$z = |(x_i - \bar{x}) / s_x|. \quad (5)$$

Wybrane wyniki z oceny statystycznej wytrzymałości na rozciąganie zawarto w tab. 5. W początkowym etapie obliczeń określono średnią arytmetyczną. Następnie, przy zachowaniu liczności pomiarów wynoszącej 5, i przy uwzględnieniu $n-1$ stopni swobody oraz przy przyjęciu współczynnika ufności na poziomie 0.95, wartość t odczytana z tablic t-Studenta wyniosła 2.776. Wykorzystano ją do określenia granic przedziału ufności, które posłużyły do wytypowania wartości, znajdujących się lub wykraczających poza ten obszar.

Tab. 5. Opracowanie statystyczne wyników badań

Laboratorium instytut naukowego								
Parametr mechaniczny	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Lewa strona przedziału ufności	Prawa strona przedziału ufności	Precyzja względna	Reszta standaryzowana „z”		Kategoria jakości wyniku wg kryterium $ z \leq 1$
						Kolejne wartości	Wartość uśredniona	
Wyniki analizy rezultatów próby rozciągania materiału śruby M5×140								
R _m	5.96 MPa	933 MPa	925.7 MPa	945.6 MPa	1.172 %	0.671/0.168/ 0.985/0.816	0.660	zadowolający
Liczba wyników w granicach przedziału ufności: 4/5								
Laboratorium zakładu przemysłowego								
Parametr mechaniczny	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Lewa strona przedziału ufności	Prawa strona przedziału ufności	Precyzja względna	Reszta standaryzowana „z”		Kategoria jakości wyniku wg kryterium $ z \leq 1$
						Kolejne wartości	Wartość uśredniona	
Wyniki z analizy rezultatów z próby rozciągania materiału śruby M5×140								
R _m	1.30	932 MPa	929.4 MPa	934.1 MPa	0.256 %	0.962/1.347/ 0.577/0.962	0.962	zadowolający
Liczba wyników w granicach przedziału ufności: 4/5								

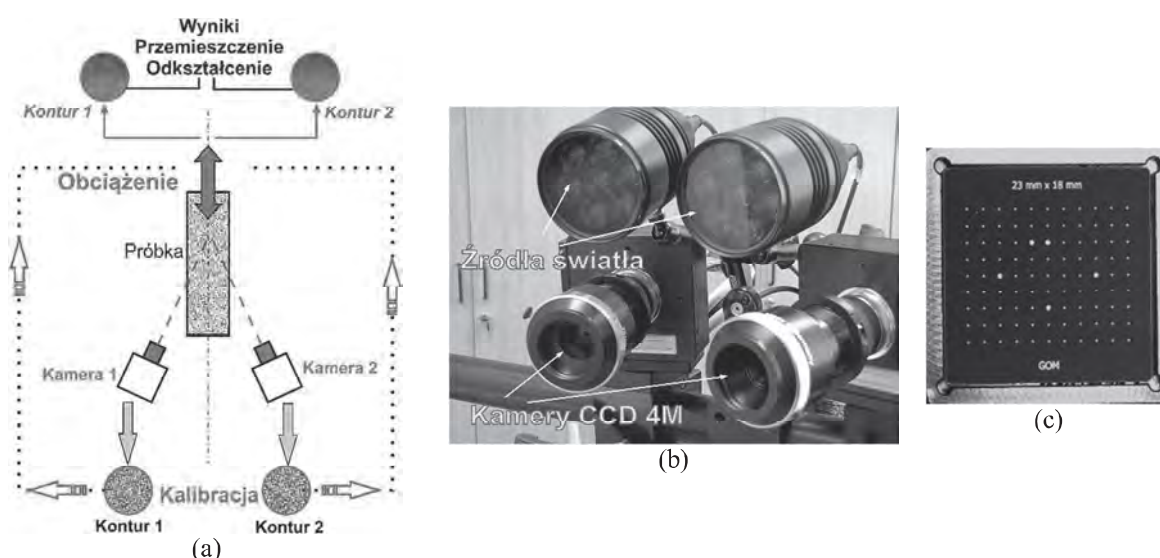
W przypadku obu laboratoriów jedna z wartości wytrzymałości na rozciąganie wykraczała poza strefę ufności. Wartość tą usunięto ze zbioru danych ważnych z punktu widzenia analizy statystycznej i przeprowadzono ponowne obliczenia przy liczności pomiarów 4 i wartości t wynoszącej 3.182. Uzyskane wyniki mieściły się w granicach przedziału ufności, co umożliwiło obliczenie precyzji względnej i reszty standaryzowanej. Laboratorium instytutu naukowego w wyznaczeniu wytrzymałości na rozciąganie uzyskało precyzję względną na poziomie ok. 1%, natomiast przemysłowe ok. 0.3%. W przypadku obu laboratoriów reszta standaryzowana „z” przyjmowała wartość poniżej jedności, co dało podstawę do zastosowania kryterium zaostrego normy PN-EN ISO/IEC 17043 w postaci $|z| \leq 1$, wskazując jednocześnie na uzyskanie wysokiej jakości wyników przez każdego z uczestników badań.

3.2. Badania materiału poddawane rozciąganiu metodą techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC)

W większości praktycznych przypadków, system cyfrowej korelacji obrazu jest wyposażony w dwie kamery cyfrowe CCD (rys. 7 a, b). Taki układ umożliwia prowadzenie pomiarów w trójwymiarowym, prostokątnym układzie współrzędnych (3D).

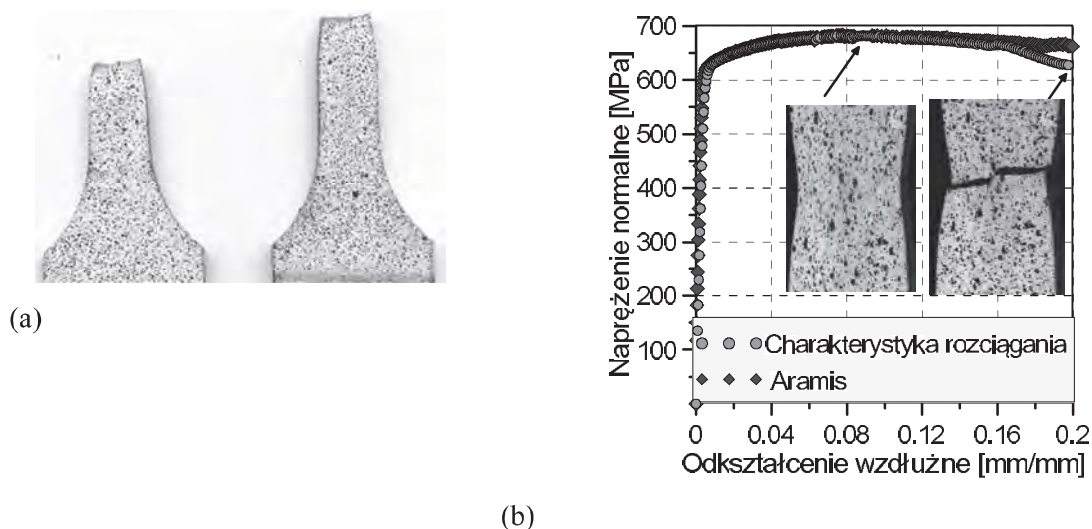
Otrzymywanie wyników dwuwymiarowych (2D) jest możliwe przy wykorzystaniu jednej kamery. Dla tego rodzaju konfiguracji czas potrzebny do uzyskania rezultatu końcowego jest znacznie krótszy niż w przypadku układu dwukamerowego. Przykładem urządzenia pracującego przy wykorzystaniu metody DIC jest system ARAMIS 4M, rys. 7. Wymiary obszaru pomiarowego, który można analizować przy użyciu systemu tego urządzenia zawierają się w zakresie od 10×7 [mm] do 4000×2900 [mm]

Niezależnie od rodzaju systemu DIC, jedno- czy dwukamerowego, kalibracja urządzenia odbywa się przy wykorzystaniu płyty kalibracyjnej, rys. 7c, z naniesionymi charakterystycznymi punktami referencyjnymi, oraz obiektu w stanie nieobciążonym. Płyta kalibracyjna powinna być dopasowana do obszaru badanego. W celu zapewnienia ważności kalibracji konieczne jest nadanie punktom uwidocznionych w środkowym obszarze płyty kalibracyjnej współrzędnych położenia. Cały proces bazuje na zasadzie korelacji oraz metodzie poszukiwania punktów o jednakowych współrzędnych. Polega to na zdefiniowaniu obszaru (konturu) do analizy oraz zarejestrowaniu jego kształtu, rys. 7a, [1].



Rys. 7. System ARAMIS i jego zasadnicze elementy: schemat działania (a) [1], główny moduł pomiarowy (b), płyta kalibracyjna (c)

Na rys. 8 zamieszczono przykładowe wyniki testu walidacyjnego metody cyfrowej korelacji obrazu, w którym oprócz urządzenia ARAMIS 4M użyto ekstensometru serii 2620 Instron. Badaniom monotonicznego rozciągania poddano stal 40H, z której wytworzono próbki płaskie. Przed testami rozciągania próbki pokryto warstwą specjalnej farby tworzącej deseń w postaci szarego tła z czarnymi punktami rozmieszczonymi losowo, rys. 8a.



Rys. 8. Wyniki próby monotonicznego rozciągania stali 40H przeprowadzonej przy jednoczesnym użyciu systemu Aramis 4M i ekstensometru: (a) próbka płaska po badaniu z naniesioną warstwą; (b) porównanie charakterystyki rozciągania określonej z wykorzystaniem ekstensometru i systemu Aramis 4M

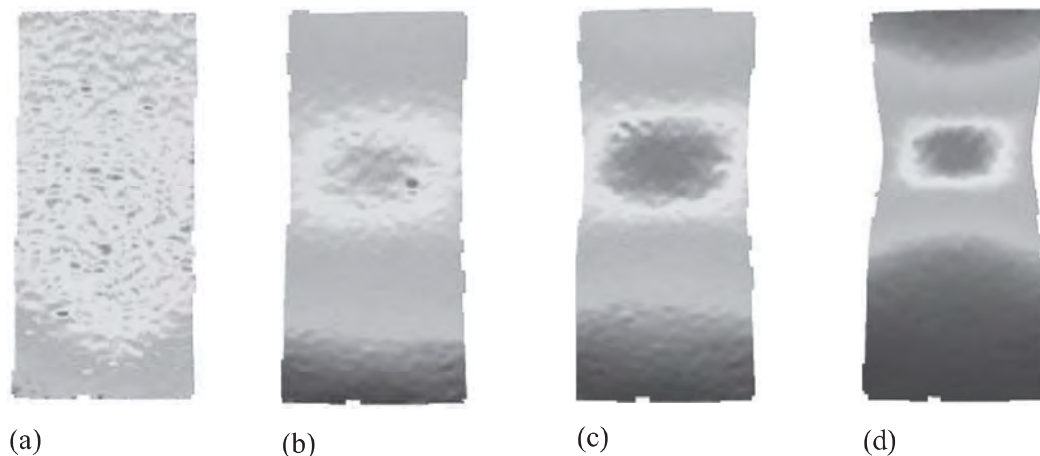
Wyniki próby rozciągania przedstawiono na rys. 8b. Rysunek ten ilustruje porównanie charakterystyk rozciągania określonych z pomiarów systemem Aramis 4M oraz ekstensometrem typu 2620 Instron. Jak łatwo zauważyć, obie charakterystyki mają podobny przebieg i praktycznie do momentu utworzenia na próbce przewężenia (rys. 8b) brak jest istotnych różnic między nimi. Po osiągnięciu przez napężenie wartości granicy wytrzymałości doraźnej krzywa rozciągania otrzymana na podstawie wskazań ekstensometru ulega obniżeniu, czego nie uwzględnia charakterystyka wyznaczona techniką DIC. Należy jednak podkreślić, że różnice te nie mają wpływu na wartości istotnych z inżynierskiego punktu widzenia parametrów mechanicznych takich, jak: moduł Younga, granica plastyczności czy wytrzymałość na rozciąganie, tab. 5.

Typowy przykład opracowanych wyników z systemu Aramis 4M został zaprezentowany na rys. 9. Zamieszczono na nim cztery wybrane połowe rozkłady odkształcenia efektywnego obliczone z kryterium plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH) dla różnych etapów rozciągania próbki płaskiej. Rysunek 9a ilustruje rozkład odkształcenia efektywnego obliczonego na podstawie kryterium HMH dla materiału w stanie sprężystym, natomiast rys. 9b taki sam rozkład po przejściu w stan plastyczny.

Tab. 6. Parametry mechaniczne stali 40H określone w próbie rozciągania na podstawie wskazań ekstensometru i systemu DIC Aramis 4M

Sposób pomiaru	E [GPa]	R _{0,2} [MPa]	R _m [MPa]
Ekstensometr	≈ 180	610	677
System DIC Aramis 4M		616	684

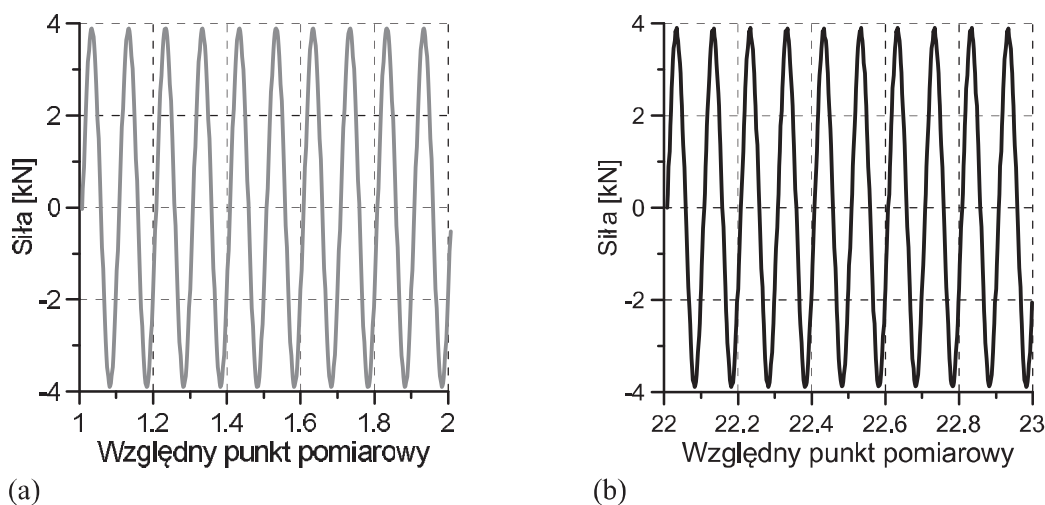
Z kolei rys. 9c pokazuje taki rozkład dla materiału odkształconego plastycznie do wartości odpowiadającej granicy wytrzymałości doraźnej. Ostatni z obliczonych rozkładów dotyczy niestatecznej części charakterystyki rozciągania bezpośrednio przed pęknięciem próbki, rys. 9d. Przedstawione rozkłady odkształcenia dobrze odzwierciedlają przebieg próby rozciągania i jednocześnie bardzo wyraźnie wskazują obszar kumulacji odkształcenia prowadzącego do ostatecznego rozdzielenia próbki.



Rys. 9. Powierzchniowe rozkłady odkształcenia efektywnego według kryterium HMH w próbce płaskiej dla różnych stopni zaawansowania testu rozciągania; materiał stal 40H

3.3. Wyniki testów trwałościowych zaczepu kulowego

Przebiegi sygnału wymuszenia w funkcji numeru punktu pomiarowego z badania zaczepu kulowego BRINK (typ 5921, klasa zaczepu A50-X) zamieszczono na rys. 10. Prezentują one sinusoidalne zmiany siły w początkowym etapie obciążania (rys. 10a) oraz końcowym tj. po uzyskaniu 2×10^6 cykli (rys. 10b). Analiza zmian amplitudy sygnału wymuszenia przeprowadzona na różnych etapach obciążania wykazała utrzymywanie jej wartości na poziomie od 3.80 do 3.92 kN, co wskazuje na wysoką dokładność wysterowania stanowiska badawczego.



Rys. 10. Sygnał wymuszenia w funkcji względnego punktu pomiarowego: (a) w początkowym etapie obciążania; (b) pod koniec procesu zmęczenia dla liczby cykli bliskiej 2×10^6

Przeprowadzone badania stanowiskowe wykazały:

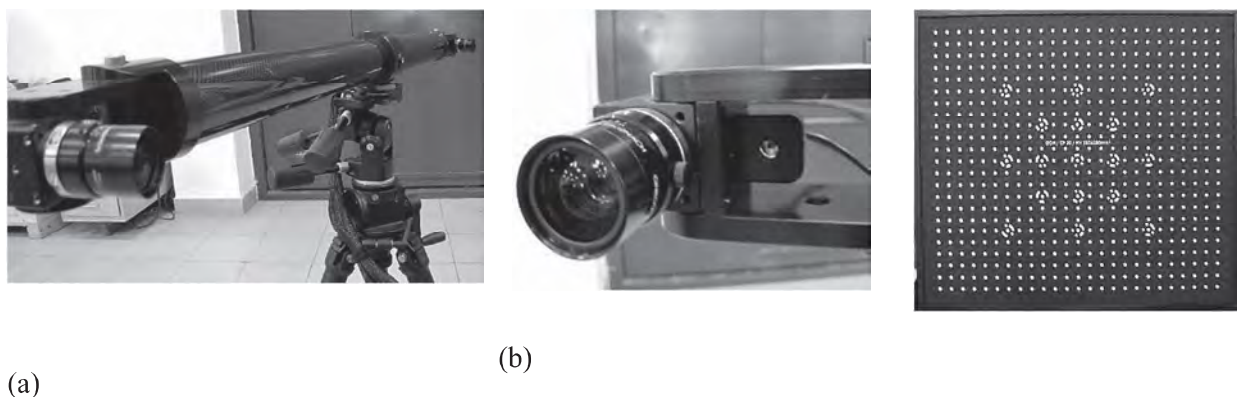
- utrzymywanie różnicy między amplitudami sygnału sterującego i sygnału odpowiedzi poniżej 5%, tab. 6;
- potwierdzenie uzyskania 2×10^6 cykli (liczba zgodna z Regulaminem 55), tab. 6;
- brak występowania pęknięć oraz trwałych deformacji, tab. 6.

Tab. 7. Wyniki testów stanowiskowych mechanicznego elementu sprzęgającego BRINK typu 5921

Uczestnik	Oznaczenie obiektu badań	Rodzaj sygnału wymuszenia	Amplituda sygnału siły [kN]	Wartość średnia sygnału siły [kN]	Częstotliwość	Liczba cykli	Uwagi
Laboratorium instytutu naukowego	BRINK 5921	Siła cykliczna zmienna sinusoidalnie	± 3.85	0	8	2×10^6	Nie uległ uszkodzeniu
Laboratorium instytutu przemysłowego			± 3.9	0	8	2×10^6	Nie uległ uszkodzeniu

3.4. Ocena cech trwałościowych elementu konstrukcyjnego przy użyciu systemu PONTOS 5M

System PONTOS jest urządzeniem przeznaczonym do bezkontaktowych pomiarów składowych przemieszczenia/prędkości i przyspieszenia, rys. 11. Niezależnie od typu wyposażony jest on w dwie kamery. Ich rozdzielczość jest dobierana na podstawie rodzaju badania. I tak, w przypadku standardowych badań statycznych oraz dynamicznych korzystnie jest stosować wersję PONTOS 4M lub 5M. Pierwsza z nich umożliwia prowadzenie testów przy rozdzielczości w zakresie od 2352×1728 px, druga natomiast przy wartości tego parametru od 2448 do 2050 px [2].



Rys. 11. System PONTOS 5M: (a) głowica pomiarowa z dwiema kamerami na statywie, (b) kamera, (c) płyta kalibracyjna

W testach wymagających zachowania wysokiej precyzji pomiarów należy stosować kamery mające rozdzielczość 4096×3072 px. Taka sytuacja jest zapewniona w systemie PONTOS 12M. Badania przy dużych prędkościach deformacji, w których szczególnie istotnym parametrem jest krótki czas zapisywania danych, wymagają użycia kamer do procesów szybkozmiennych (HS – High Speed). W

porównaniu do klasycznych wersji zestawów 4M, 5M i 12M zastosowanie w nich szybkich kamer powoduje obniżenie rozdzielczości, która wynosi wtedy 1280×1024 px. Mają one jednak kilkukrotnie wyższą częstotliwość zapisu danych, zawierającą się w przedziale od 500 do 4000 Hz [2].

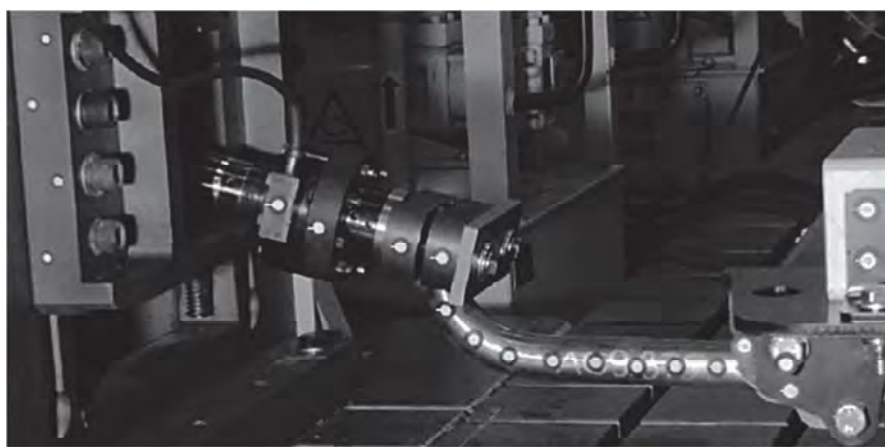
Prowadzenie badań przy użyciu systemu Pontos składa się z dwóch zasadniczych etapów. Pierwszy z nich polega na kalibracji urządzenia, drugi natomiast stanowi właściwe badania. W zależności od wymiarów obiektu badanego do kalibracji urządzenia stosuje się różnego rodzaju płyty kalibracyjne, rys. 11c. Mają one różne wymiary począwszy od 10×8 [mm] do 2000×1600 [mm]. Umieszcza się je w środku przestrzeni pomiarowej i postępując zgodnie z procedurą kalibracji zaprogramowaną w urządzeniu w postaci komend poddaje się je określonym przestrzennym przemieszczeniom/obrotom oraz pochyleniom. W badaniach przy użyciu systemu PONTOS znaczącą rolę odgrywają znaczniki. Stanowią one punkty referencyjne (rys. 12), dla których w oprogramowaniu urządzenia przyporządkowywane są współrzędne (x, y, z) wykorzystywane w badaniu zasadniczym do uzyskania wyniku końcowego. Znaczniki naklejane są na obiekt badany w strefach, które zostały wytypowane do pomiarów. Ich rozmiar mieści się w stosunkowo szerokim przedziale wartości, a mianowicie od 0.4 mm w przypadku obiektów o niewielkich rozmiarach, do 25 mm - gdy obiekt badany jest wielkogabarytowy. Dużą zaletą systemu PONTOS jest możliwość stosowania własnych znaczników. Ich rozmiar należy określać na podstawie iloczynu wymiaru przestrzeni pomiarowej w kierunku osi 0x oraz współczynnika 0.004 (dla systemu PONTOS 4 oraz 5M), 0.002 (gdy wykorzystywany jest system PONTOS 12M) lub 0.008 (w przypadku badań z użyciem kamery do pomiarów szybkozmiennych) [2].

Przeznaczenie systemu PONTOS jest stosunkowo szerokie. Znajduje on zastosowanie w następujących rodzajach badań [2]:

- a) weryfikacja zaprojektowanego podzespołu/elementu i prowadzenie obliczeń symulacyjnych w celu oceny zmian położenia punktów charakterystycznych w aspekcie aplikacyjnym;
- b) określanie zachowania konstrukcji inżynierskich w warunkach oddziaływania obciążenia statycznego lub cyklicznie zmiennego;
- c) oznaczanie kinematyki elementów/mechanizmów;
- d) ocena zachowania konstrukcji/pojazdu na skutek wibracji;
- e) określanie zmian podatności obiektu badań z powodu wystąpienia uszkodzeń lub trwałej deformacji.



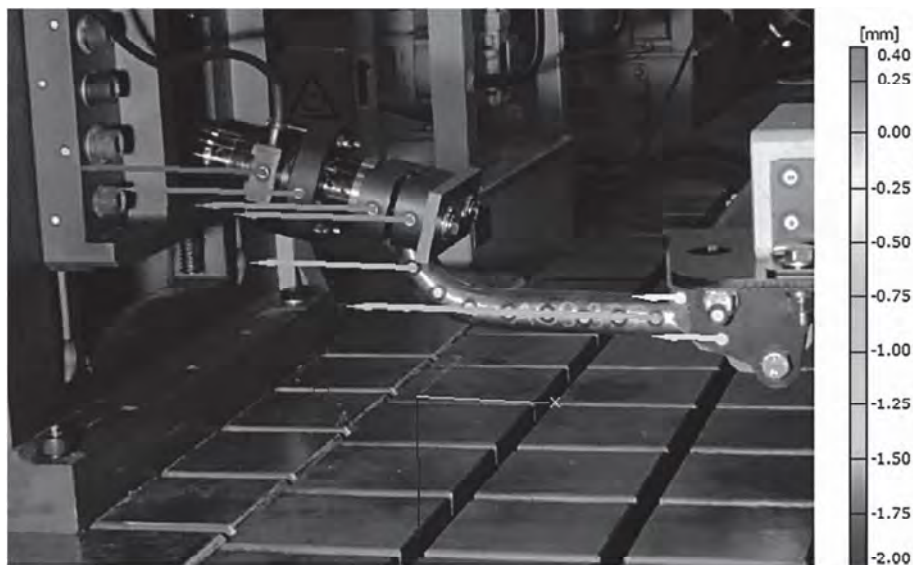
(a)



(b)

Rys. 12. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na obiekcie badań: (a) przestrzennej konstrukcji prętowej; (b) mechanicznego zaczeput sprężającego

Obiekty badań z naklejonymi znacznikami pokazane na rys. 12 reprezentują dwie różne koncepcje wykorzystywania markerów, które zależne są od cech przedmiotu poddawanego badaniu. W przypadku konstrukcji o przestrzennym rozmieszczeniu jej elementów korzystnie jest umieszczać znaczniki na powierzchniach, z których wyniki badań umożliwią uzyskanie obrazu przestrzennego, rys. 12a. Jeżeli obiekt badań charakteryzuje się wyraźnymi osiami geometrycznymi, wtedy wygodnie jest umieszczać markery zgodnie z ich przebiegiem, rys. 12b.



Rys. 13. Usytuowanie wektorów przemieszczenia w kierunku osi Ox w przestrzeni pomiarowej w teście stanowiskowym mechanicznego elementu sprzęgającego

Przykładowe wyniki badań uzyskane przy użyciu systemu PONTOS 5M zamieszczono na rys. 13. Przedstawiają one wartości przemieszczenia reprezentatywnych punktów elementu sprzęgającego w kierunku osi odciętych Ox wywołane działaniem obciążenia cyklicznie zmiennego. Ich analiza pozwala w dowolnej chwili czasu wskazywać minimalne i maksymalne wartości przemieszczenia obiektu badanego. Ponadto, wykorzystując procedury obliczeniowe oprogramowania urządzenia można otrzymać zmiany prędkości i przyspieszenia wybranych punktów badanego elementu w funkcji czasu.

4. Podsumowanie

Zachowanie wysokiej jakości wytwarzanych próbek, odpowiednie wykalibrowanie maszyn wytrzymałościowych oraz wykorzystywanie ekstensometrów o jednakowej klasie dokładności stanowi platformę badawczą gwarantującą uzyskiwanie porównywalnych wyników testów niezależnie od laboratorium, w którym prowadzone są próby.

Powszechnie stosowane ekstensometry umożliwiają uzyskiwanie wyników o charakterze jednowymiarowym, co stanowi wprawdzie podstawę do prowadzenia typowych obliczeń inżynierskich, ale nie daje jednak możliwości przeprowadzenia szerszej analizy zachowania materiału, jaką można uzyskać dzięki wykorzystaniu systemu cyfrowej korelacji obrazu.

Ocena zachowania obiektu badań w testach stanowiskowych powinna być prowadzona nie tylko na podstawie globalnej analizy deformacji lub osiągniętego zniszczenia, lecz również ze zwróceniem uwagi na lokalne zmiany przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w zdefiniowanych punktach pomiarowych. Analiza taka może być współcześnie prowadzona przez wykorzystanie w badaniach systemu PONTOS 5M.

Literatura

- [1] Materiały firmy GOM.
- [2] PONTOS, Podręcznik użytkownika, 2011.
- [3] PN-EN ISO 6892-1:2010 pt.: „Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej”.
- [4] PN-EN ISO/IEC 17043 pt. „Ocena zgodności. Ogólne wymagania dotyczące badania biegłości” stanowi kryterium jakości”.
- [5] Regulaminu 55 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – „Jednolite przepisy dotyczące homologacji mechanicznych elementów sprzęgających zespołów pojazdów”.