

# Analiza doświadczalna odkształcenia elementów klejonych w próbie statycznego oddzierania

Władysław Zielecki, Andrzej Kubit, Łukasz Święch

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano dwie eksperymentalne metody pomiaru przemieszczeń wykorzystane do określenia względnego przemieszczenia elementów klejonych w próbie wytrzymałościowej złącza. Przedmiotem badań było złącze klejowe poddane statycznej próbie oddzierania. Pierwszą z przedstawionych metod jest trójwymiarowa cyfrowa korelacja obrazu – 3D DIC (ang. 3D Digital Image Correlation). Zaprezentowano możliwości systemu pomiarowego ARAMIS opierającego się na tej metodzie. Proces pomiaru polega na rejestracji zjawiska przy użyciu dwóch kamer oraz obróbce numerycznej rejestrowanych obrazów. W efekcie możliwe jest uzyskanie pól przemieszczeń, jak i odkształceń. Druga z metod polega na rejestracji obrazu fragmentu obiektu, poprzez mikroskop optyczny wyposażony w kamerę cyfrową. Obraz poddany jest analizie przy użyciu programu MATLAB (Image Acquisition Toolbox). W tym przypadku uzyskuje się jedynie informację o przemieszczeniu poddanego rejestracji obszaru. W podsumowaniu porównano wyniki obydwu metod oraz wykazano zalety i wady.

**Słowa kluczowe:** pomiar odkształcenia, skanowanie konstrukcji, połączenie klejowe, system wizyjny

## 1. Wstęp

Połączenia klejowe, jako połączenia konstrukcyjne, zyskują coraz większe zastosowanie ze względu na szereg swoich zalet i rozwój samych substancji klejących. Cechą decydującą o rosnącym zainteresowaniu takimi złączami jest przede wszystkim ich mała masa. Dlatego prowadzone są

intensywne badania nad mocnymi substancjami klejącymi pozwalającymi uzyskać dużą wartość adhezji.

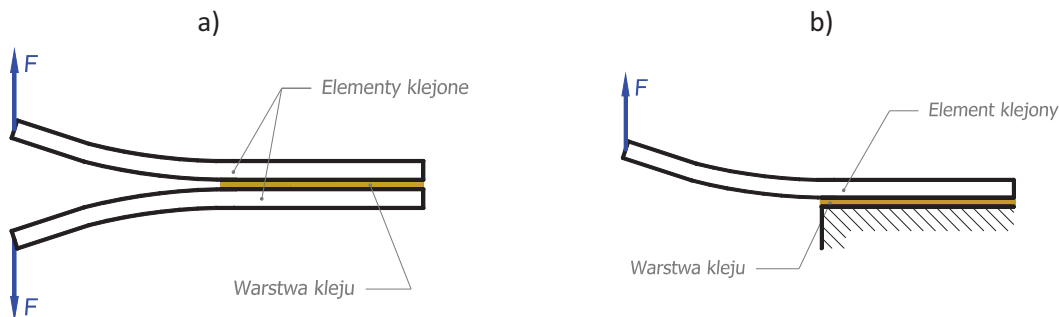
Znaczącą zaletą tej formy łączenia elementów jest możliwość spajania ze sobą materiałów różnego typu, dlatego klejenie jest procesem szeroko stosowanym w technologii konstrukcji kompozytowych. W odniesieniu do innych metod łączenia, połączenia adhezyjne cechują się równomiernym rozkładem naprężeń w złączu. Brak konieczności wykonania otworów do utworzenia połączenia to również przewaga wobec połączeń śrubowych, czy nitowych.

Klejenie w wielu sytuacjach jest niezawodną metodą służącą spajaniu elementów w przypadku napraw, remontów maszyn i urządzeń. Jest to często stosowana forma dozażnego wzmocnienia uszkodzonych konstrukcji. [3–5, 11].

Technologia klejenia nie jest jednak pozbawiona wad. Istotnym mankamentem spoin klejowych jest (porównując z metalami konstrukcyjnymi) szybkie starzenie się kleju oraz mała odporność na warunki atmosferyczne [2]. Wytrzymałość spoiny klejowej zależy od wielu czynników, co również zniechęca konstruktorów do sięgania po ten typ złączy.

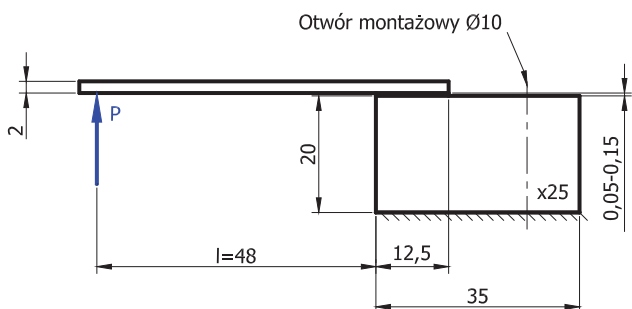
Dominującą formą badań wytrzymałości połączeń klejowych jest statyczna próba ścinania określona przez normę PN-69/C-89300 *Kleje do metali. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie*. Połączenia klejowe powinny być projektowane w taki sposób, by skleina pracowała na ścinanie. Jest to najkorzystniejsza forma obciążenia tego typu złączy, która zapewnia dostateczną nośność [6, 7].

Oddzieranie jest z kolei niekorzystną formą obciążenia spoiny klejowej ze względu na występujące tu spiętrzenie naprężeń przy krawędzi złącza. Mimo zaleceń unikania tego typu obciążeń [10] w praktyce, naprężenia nor-



**Rys. 1.** Modele wykorzystywane do badań wytrzymałości na oddzieranie pakietów klejonych; układ dwóch belek a); układ pojedynczej belki na sztywnym podłożu b)

**Fig. 1.** Typical glue joint models subjected to peel used to strength tests; a) double cantilever beam; b) cantilever beam



**Rys. 2.** Wymiary próbki klejowej używanej w próbie oddzierania  
**Fig. 2.** Dimensions of sample used to strength tests

malne do warstwy kleju są często przyczyną destrukcji konstrukcji klejonych. Zniszczenia połączeń powstałe na skutek sił oddzierających są typowe dla kompozytów warstwowych oraz klejonych łat naprawczych wzmacniających konstrukcje [8, 15]. W wymienionych przypadkach niszczenie konstrukcji następuje zazwyczaj na skutek cyklicznych obciążeń wywołujących zmęczenie połączenia klejowego.

W badaniach eksperymentalnych podejmujących tematykę rozwarstwiania układów klejonych, wykorzystuje się model dwóch belek sklejonych na określonej długości (rys. 1a) – tzw. DCB (ang. *Double Cantilever Beam*) [12–15]. W opisywanych rozważaniach przyjęto układ pojedynczej belki przyklejonej do sztywnego podłoża (rys. 1b).

## 2. Badania własne

W artykule opisano przeprowadzone badania mające na celu analizę odkształcenia warstwy kleju w złączu poddanym obciążeniu oddzierania. Zwrócono szczególną uwagę na analizę odkształceń czołowej części złącza, gdzie następuje

inicjacja zniszczenia. Pomiary przeprowadzono przy statycznej próbie oddzierania.

Główny nacisk położono na pomiar odkształcenia bezwzględnego warstwy kleju w strefie czoła spoiny, w kierunku działania siły obciążającej, zatem w kierunku normalnym do powierzchni warstwy kleju.

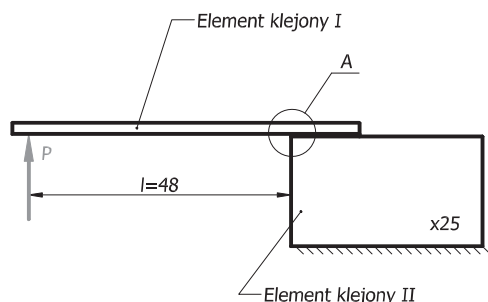
Do badań przyjęto próbkę o wymiarach, kształcie oraz sposobie obciążenia zgodnych z rys. 2. Elementy klejone wykonano ze stali S235JT, do ich łączenia zastosowano dwuskładnikowy klej epoksydowy – BISON EPOXY METAL.

Ze względu na znacząco mniejszy moduł sprężystości utwardzonej masy klejowej w stosunku do modułu elementów klejonych założono, iż odkształcenie bezwzględne warstwy kleju w danym punkcie jest tożsame z przemieszczeniem elementu klejonego I względem elementu klejonego II (rys. 3). Skupiono się więc na pomiarze wartości przemieszczenia względnego elementów klejonych w obszarze spoiny.

Ideę pomiaru przedstawiono na rys. 3. Rosnąca siła obciążająca  $P(t)$ , od zera do wartości niszczącej wywołuje przemieszczenie elementu klejonego I, które w zakresie  $x = (0-12,5)$  mm jest tożsame (według założenia) z odkształceniem bezwzględnym warstwy kleju. Zaprezentowano tu także teoretyczny przebieg naprężeń normalnych do warstwy kleju według przyjętego modelu matematycznego [6]. Spodzielając się maksymalnej wartości odkształcenia warstwy kleju w płaszczyźnie czołowej złącza, szczególną uwagę zwrócono na pomiar właśnie tej wielkości, która według rysunku przyjmuje wartość  $d_y$ . Dla czytelności rysunku grubość warstwy kleju  $\delta_k$  zaznaczono przesadnie grubą kreską, w rzeczywistości dla tego typu złączy wielkość ta przyjmuje wartość  $\delta_k = (0,05-0,15)$  mm [1, 9].

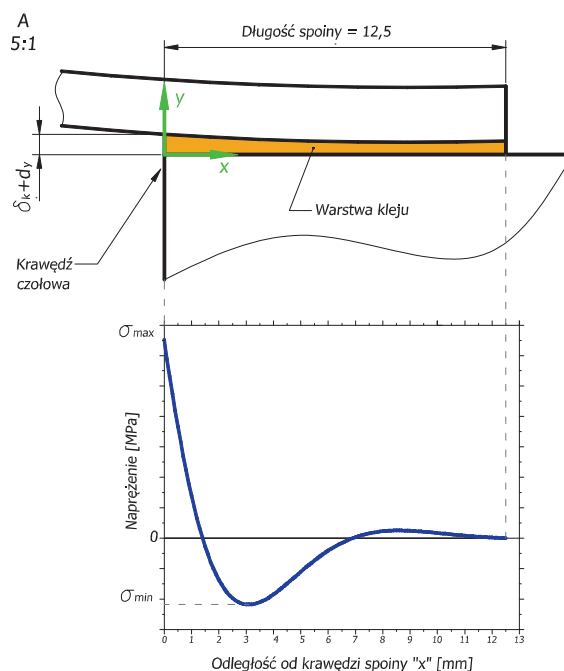
W pierwszej kolejności przeprowadzono kompleksową analizę względnego przemieszczenia elementów klejonych przy zastosowaniu metody trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu.

Następnie, stosując inną metodę, dokonano pomiaru jedynie wielkości przemieszczenia względnego w obranym punkcie pomiarowym w czasie próby wytrzymałościowej. Przy wybo-



**Rys. 3.** Próbkę klejową z wykazaniem wielkości mierzonych oraz teoretycznym rozkładem naprężenia

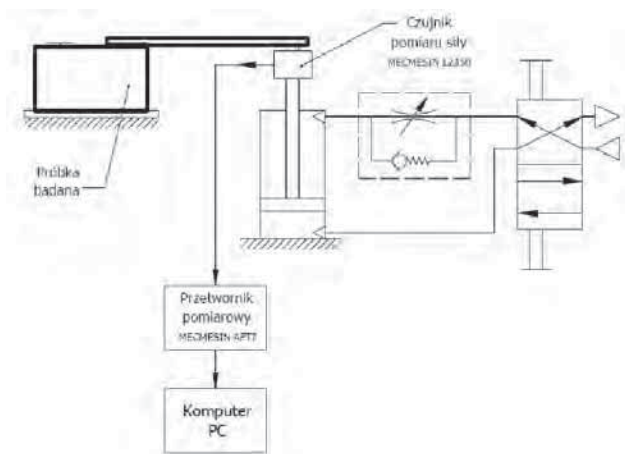
**Fig. 3.** Diagram of sample with measured quantity and theoretical stress-distance curve for this case



rze punktu pomiarowego kierowano się miejscem spodziewanego spiętrzenia naprężeń, oczekując maksymalnej wartości przemieszczeń w tym punkcie (w obszarze spoiny). Pomiar ten polegał na rejestracji obrazu przez mikroskop optyczny obszaru zawierającego punkt pomiarowy w czasie próby oddzierania. Na podstawie nagrania wyznaczony został przebieg przemieszczenia w czasie próby.

Celem stosowania drugiej metody pomiarowej było sprawdzenie efektywności relatywnie prostej metody służącej pomiarom maksymalnej wartości odkształcenia bezwzględnej warstwy kleju w próbie oddzierania. Potrzeba określenia dokładności tej metody uzasadniona jest faktem, iż wobec metody trójwymiarowej korelacji obrazu, cechuje się brakiem wymogu stosowania zaawansowanego sprzętu/systemu pomiarowego oraz czasochłonnego procesu przygotowania próbek.

W celu uzyskania obciążenia próbki wywołującego stan oddzierania w spoinie, zastosowano układ pneumatyczny (rys. 4). Układ wyposażony jest w czujnik siły, tak więc równolegle z pomiarem szukanego przemieszczenia w czasie, mierzona jest wywołująca je siła.



**Rys. 4.** Schemat układu obciążania próbek klejowych  
**Fig. 4.** Schematic diagram of loading system of adhesive joint

Zasada działania stanowiska obciążającego polega na wymuszeniu siły prostopadłej do płaszczyzny spoiny. Liniowy ruch tłoczyska stykającego się z wolnym końcem elementu klejonego I, wymusza stan oddzierania w spoinie. Posuw wywołujący obciążenie próbki, realizowany jest przez siłownik pneumatyczny. Szybkość posuwu, równoznaczna z szybkością zmiany obciążenia, może być płynnie regulowana za pomocą zaworu dławiącego przed wejściem zasilającym siłownika. Układ zasilany jest stałym ciśnieniem o wartości 0,4 MPa. Zastosowano siłownik o średnicy cylindra 50 mm i skoku 70 mm.

### 3. Metoda trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu 3D DIC

Trójwymiarowa cyfrowa korelacja obrazu jest eksperymentalną techniką optyczno-numeryczną pozwalającą na wyznaczenie pól deformacji badanych konstrukcji. Do niewątpliwych zalet tej metody należy zaliczyć wysoką dokładność pomiarów, umożliwiającą wyznaczanie zarówno pól przemieszczeń, jak i odkształceń, jak również uniezależnienie przeprowadza-

nych badań od materiału obiektu. W odróżnieniu od wielu innych metod doświadczalnych (np. elastooptyka), nie istnieje tutaj wymóg stosowania materiału modelowego o specjalnych właściwościach fizycznych, dzięki czemu pomiary są możliwe do wykonania nawet na rzeczywistych konstrukcjach w czasie ich eksploatacji.

System pomiarowy zawiera dwa zasadnicze komponenty. Pierwszym z nich jest urządzenie nazywane skanerem, składające się z dwóch kamer cyfrowych o wysokiej rozdzielczości usytuowanych względem siebie w taki sposób, aby możliwe było zbudowanie obrazu przestrzennego. System umożliwia wykonywanie zdjęć z maksymalną szybkością 25 klatek na sekundę. Kolejnym elementem zestawu jest komputer ze specjalnym oprogramowaniem do numerycznej obróbki zdjęć wykonywanych w takcie badań.



**Rys. 5.** Skaner ARAMIS [GOM mbH]  
**Fig. 5.** ARAMIS scanner [GOM mbH]

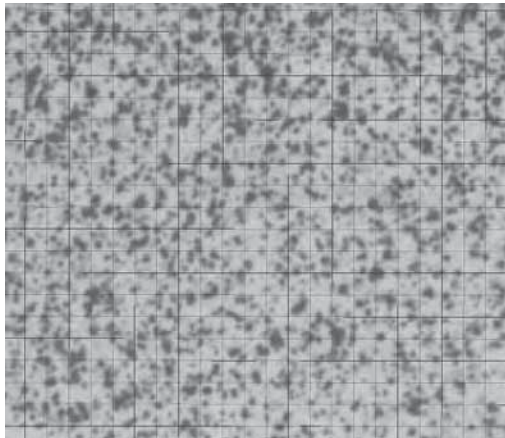
#### 3.1. Zasada pomiaru

Pomiar odbywa się na uprzednio przygotowanym obiekcie. Czynności przygotowawcze polegają na pokryciu powierzchni elementu białą farbą, na której następnie należy nanieść stochastyczny wzór czarnych plamek (rys. 6). Dobór wielkości plamek uzależniony jest od wielkości badanego obiektu oraz właściwości optycznej części aparatury pomiarowej.



**Rys. 6.** Próbką przygotowana do badań  
**Fig. 6.** Sample prepared to measurements

Pomiary polegają na wykonaniu serii zdjęć obiektu w kolejnych fazach obciążania. Zdjęcia przesyłane są do oprogramowania komputerowego, gdzie w pierwszym kroku, korelacja obrazów z obu kamer umożliwia określenie pozycji każdego piksela przez nadanie im współrzędnych w trójwymiarowym układzie odniesienia. Następnie obrazy dzielone są na tak zwane siatki odkształceniowe (rys. 7), z których każda zawiera unikalny układ plamek. Konfiguracja początkowa staje się etapem referencyjnym. W czasie obciążania elemen-



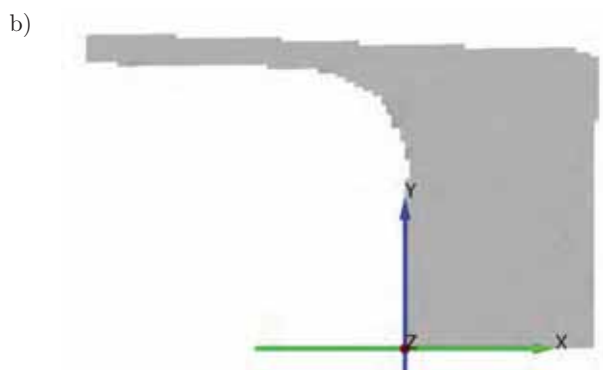
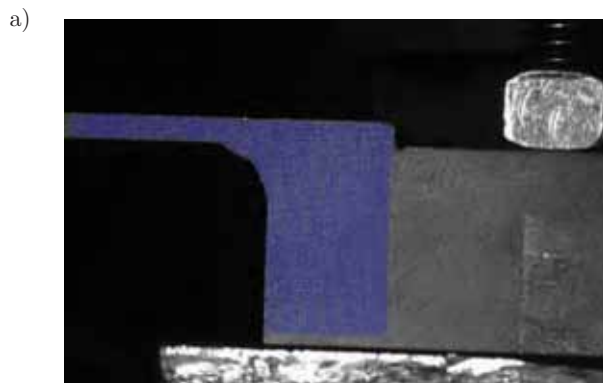
Rys. 7. Siatka odkształceniowa

Fig. 7. Mesh of strain

tu, na skutek odkształceń jego powierzchni plamki, w każdym elemencie siatki zmieniają swoją pozycję względem siebie, co jest podstawą do obliczenia deformacji układu w stosunku do pozycji referencyjnej.

### 3.2. Wyniki pomiarów

Przyjęty obszar obliczeniowy przedstawiono na rys. 8a. Siatka odkształceniowa składa się z kwadratów o boku około 0,28 mm, co zapewnia wysoką dokładność wyników i możliwość obserwowania efektów lokalnych. Pozostałą część próbki uznano za nieistotną z punktu widzenia spodziewanych



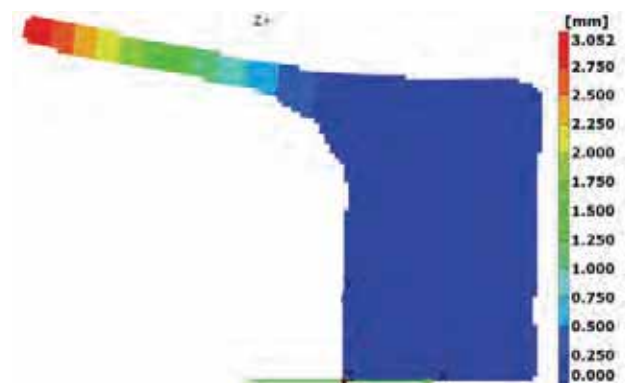
Rys. 8. a) Zdjęcie próbki z zaznaczonym polem pomiarowym; b) Przyjęty układ współrzędnych na tle cyfrowej reprezentacji próbki

Fig. 8. a) Marking of measurement area on sample; b) Assumed coordinate system for digital representation of sample

wyników badań. Na rys. 8b umieszczono usytuowanie układu współrzędnych względem otrzymanego obrazu próbki.

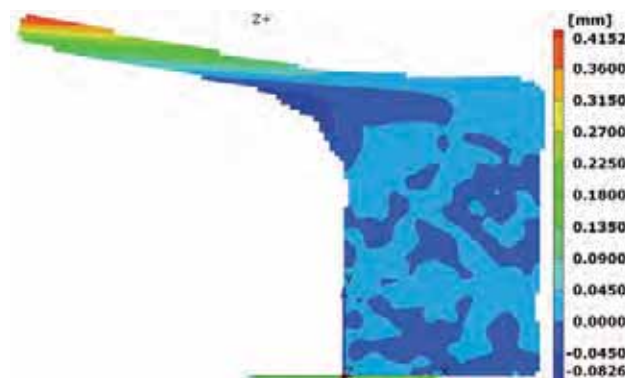
Oś Y pokrywa się z krawędzią czołową. Początek układu nie znajduje się dokładnie w lewym dolnym narożu, ze względu na ograniczenie obszaru przeliczeniowego (patrz rys. 8a). Jednak ze względu na sposób zamocowania próbki eliminujący wszelkie deformacje w całym obszarze sąsiadującym z dolną krawędzią, tym samym nie wpływa na otrzymywane wyniki. Fakt ten ma natomiast wpływ na definicję położenia przekrojów, omówionych w dalszej części artykułu.

Przedstawione składowe przemieszczenia (rys. 9–11) i składowe odkształcenia (rys. 12 i 13), zarejestrowano w chwili bezpośrednio poprzedzającej zniszczenie badanego elementu, co odpowiada maksymalnej sile obciążającej.



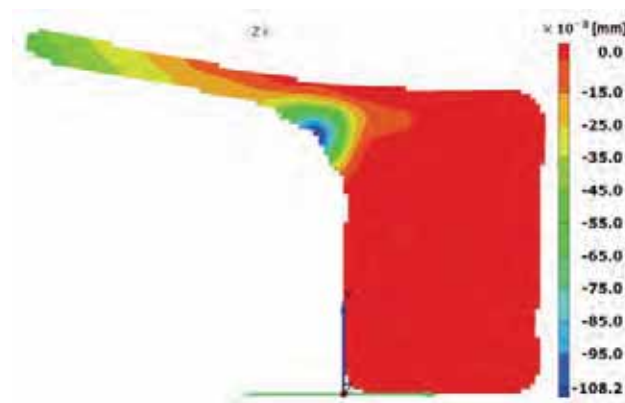
Rys. 9. Składowa przemieszczenia  $v$  – siła maksymalna

Fig. 9. Displacement  $v$  – maximal force



Rys. 10. Składowa przemieszczenia  $u$  – siła maksymalna

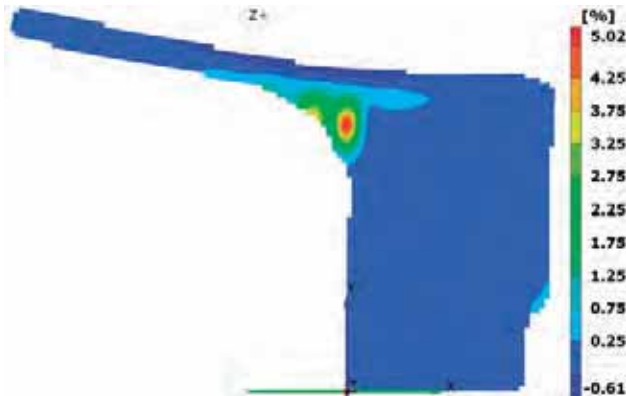
Fig. 10. Displacement  $u$  – maximal force



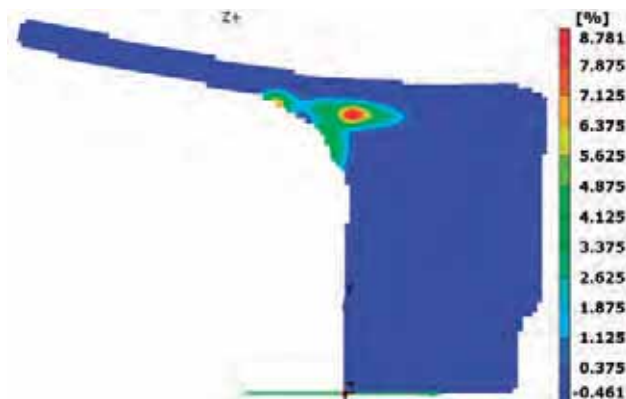
Rys. 11. Składowa przemieszczenia  $w$  – siła maksymalna

Fig. 11. Displacement  $w$  – maximal force

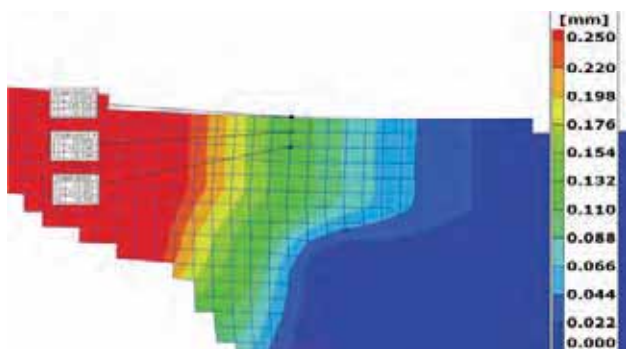
Punkty opisane na rys. 14 znajdują się w pobliżu górnej krawędzi próbki, na przedłużeniu prostopadłej krawędzi czołowej. Wybrano trzy punkty, ponieważ najwyżej położony punkt nie pokrywa się dokładnie z krawędzią próbki. Barwna legenda przedstawia przemieszczenia względem osi Y, które udowadniają, że różnice poziomu przemieszczeń tych punktów są pomijalnie małe i można przyjąć, iż przemieszczenia punktu 0 mogą być utożsamiane z deformacją górnej krawędzi próbki.



Rys.12. Składowa odkształcenia  $e_x$   
Fig. 12. Component  $e_x$  of strain



Rys.13. Składowa odkształcenia  $e_y$   
Fig. 13. Component  $e_y$  of strain

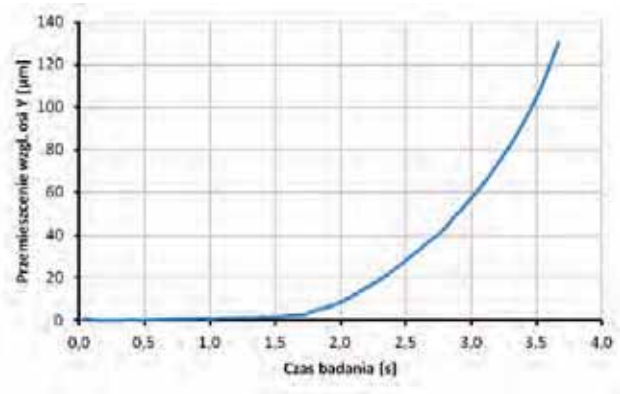


Rys. 14. Współrzędne punktów użytych do wyznaczenia przemieszczeń

Fig. 14. Coordinates of measurement points

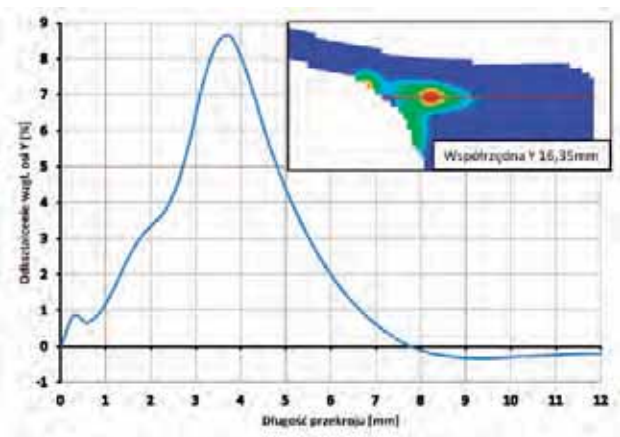
Na rys. 15 przedstawiona jest zależność przemieszczenia punktu 0 w funkcji czasu badania.

Na kolejnych wykresach zobrazowano rozkład składowej  $e_y$  odkształcenia wzdłuż przekroju poprowadzonego na wy-



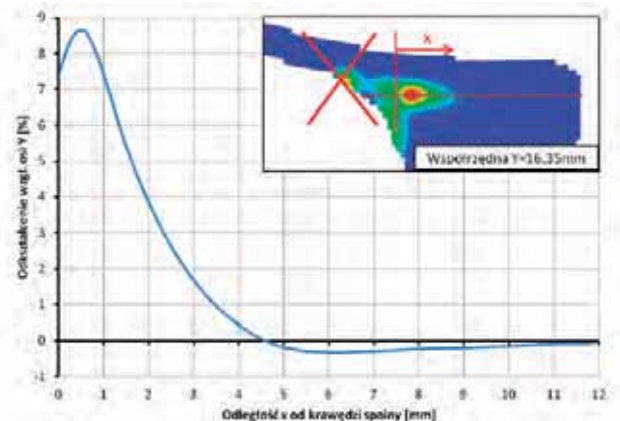
Rys.15. Zależności przemieszczenia punktu 0 w funkcji czasu badania

Fig. 15. Displacement-time curve of point "0"



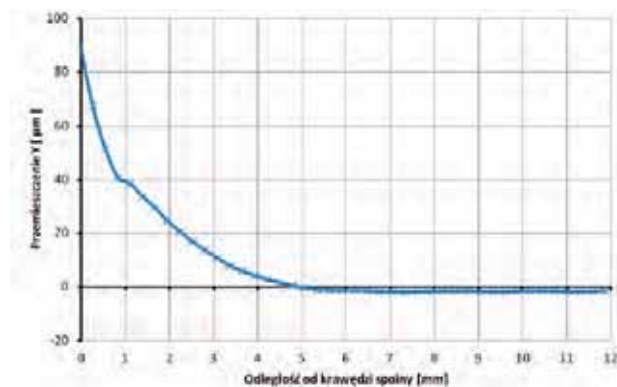
Rys. 16. Rozkład składowej  $e_y$  odkształcenia wzdłuż obszaru spoiny

Fig. 16. Distribution  $e_y$  strain along joint edge



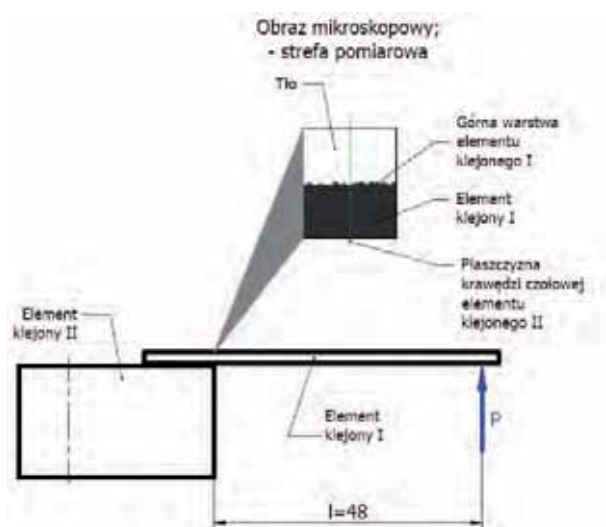
Rys. 17. Rozkład składowej Y odkształcenia wzdłuż obszaru spoiny z pominięciem wypływu kleju

Fig. 17. Distribution of strain of Y-direction along joint edge without fash of glue



**Rys. 18.** Rozkład składowej Y przemieszczenia wzdłuż obszaru spoiny

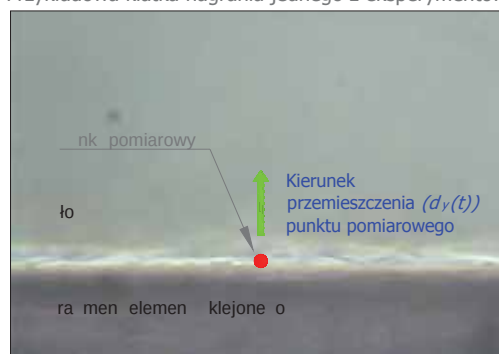
**Fig. 18.** Distribution of displacement of Y-direction along joint edge



**Rys. 19.** Schemat ilustrujący koncepcję pomiaru przemieszczenia poprzez obserwację obszaru pomiarowego

**Fig. 19.** Demonstrate of displacement measurement idea by image analysis

Przykładowa klatka nagrania jednego z eksperymentów



**Rys. 20.** Przykładowa klatka nagrania próby ukazująca sposób analizy obrazu

**Fig. 20.** Exemplary image from experiment movie showing idea of analysis of image

sokości 16,35 mm od krawędzi dolnej próbki, przecinając obszar zawierający skleinę.

Teoretyczne rozważania dotyczące rozkładu odkształceń wzdłuż szczeliny nie uwzględniają wpływu wypływki kleju. Na kolejnym wykresie (rys. 17) zobrazowano rozkład odkształcenia z pominięciem obszaru szczeliny.

Dalej przedstawiono rozkład składowej Y przemieszczenia, wzdłuż przekroju (definiowanego jw.). Maksymalne przemieszczenie wystąpiło w pobliżu krawędzi skleiny i wyniosło 91,64 µm.

#### 4. Pomiar na podstawie analizy obrazu mikroskopowego

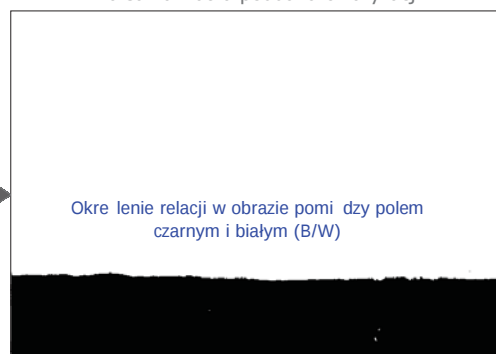
Druga z przedstawionych metod umożliwia pomiar przemieszczenia fragmentu elementu klejonego w kierunku siły obciążającej złącze. Koncepcja pomiaru polega na poddaniu obserwacji za pomocą mikroskopu optycznego obszaru wokół punktu znajdującego się na skrzyżowaniu górnej krawędzi elementu klejonego I z przedłużeniem krawędzi czołowej próbki (rys. 19).

Uzyskany obraz mikroskopowy strefy pomiarowej składa się z dwóch obszarów: ciemnego – fragmentu elementu klejonego I oraz jasnego – tła. Przykład rzeczywistego obrazu wraz z odpowiadającym mu obrazem binarnym przedstawiono na rys. 20. Rzeczywiste stanowisko pomiarowe zaprezentowano na rys. 21.

Przedstawiony układ wyposażono w mechanizm umożliwiający precyzyjne ustawienie obserwowanego pola. Siłownik obciążający zamontowano na tym samym sztywnym profilu, na którym przymocowano próbkę, co ma zapewnić odpowiednią sztywność układu, a tym samym ustrzec od znaczących błędów wynikłych z przemieszczenia układu, które nakładałyby się na odkształcenie mierzone.

System wizyjny, wyznaczający szukane przemieszczenie, działa dwuetapowo. Pierwszy etap to akwizycja obrazów mikroskopowych z czasu trwania eksperymentu. Drugim etapem jest analiza zarejestrowanych danych, celem uzyskania przebiegu przemieszczenia w czasie.

Ta sama klatka poddana binaryzacji



Wyznaczenie wartości szukanego przemieszczenia na podstawie stosunku B/W

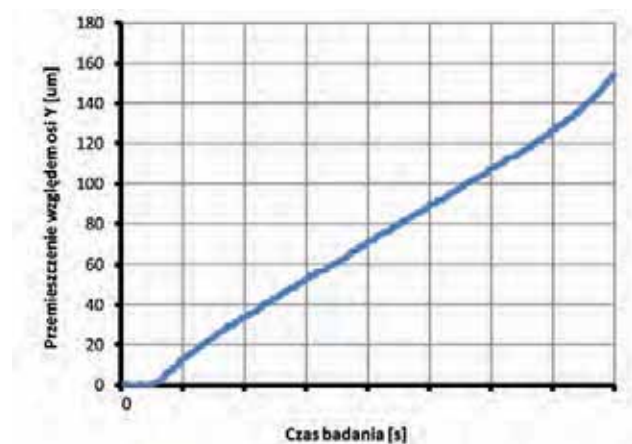


**Rys. 21.** Stanowisko pomiarowe służące wyznaczaniu przemieszczenia względnego elementów klejonych

**Fig. 21.** Measurement site used to obtain adhesive joint curve of displacement

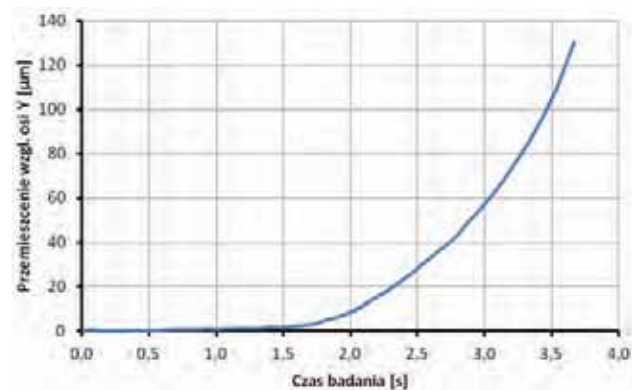
Zastosowana kamera cyfrowa, sprzężona z mikroskopem, pozwala na pobieranie obrazów RGB o rozdzielczości  $640 \times 480$  pikseli z szybkością 30 kl./s. Skorzystano tu z darmowego narzędzia AMCap [16], którego funkcją jest m.in. rejestracja nieskompresowanego materiału filmowego w pliku AVI.

Poddany obserwacji fragment elementu klejonego I pod wpływem obciążenia ulega odkształceniu oraz przemieszczeniu



**Rys. 22.** Przemieszczenie punktu pomiarowego w kierunku Y w czasie badania

**Fig. 22.** Displacement-time curve of measured point



**Rys. 23.** Zależności przemieszczenia punktu 0 w funkcji czasu badania

**Fig. 23.** Displacement-time curve of point "0"

niu względem elementu II, a co za tym idzie obserwowany przez kamerę fragment przemieszcza się w czasie. Dobrano tak ustawienia toru wizyjnego, że przemieszczenie fragmentu badanej próbki jest obserwowane od górnej (0, 0) w stronę dolnej (640, 480) części rejestrowanego obrazu. Próbką w trakcie przemieszczania wypełnia cały obszar pola obserwacji, tj. od górnej krawędzi do aktualnego położenia. Zapewniono odpowiednie warunki oświetleniowe, tak aby tło było wyraźnie kontrastowe (zbliżone do koloru białego) w stosunku do próbki (kolor szary). Najistotniejszym było zarejestrowanie ostrej i kontrastowej krawędzi próbki.

Określenie szukanej wielkości przemieszczenia dokonane jest na podstawie obliczenia pola widocznego obszaru próbki na podstawie wyznaczonej dolnej krawędzi. Pole wyrażone jest w  $\mu\text{m}^2$ , dlatego też należało dokonać przeliczenia jednostek obrazu (pikseli) na jednostki długości ( $\mu\text{m}$ ). W tym celu dokonano skalowania, obserwując przez mikroskop element znajdujący się na stole z posuwem poprzez śrubę mikrometryczną i wykonując zdjęcia z położenia śruby: 0  $\mu\text{m}$  (startowe), 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ . Następnie w programie graficznym odczytano różnice między prawymi krawędziami elementu obserwowanego w poszczególnych pozycjach.

Wynikiem pomiaru jest przebieg przemieszczenia obranego fragmentu w czasie próby wytrzymałościowej. Na rys. 22 zaprezentowano tę charakterystykę, natomiast na rys. 23 przywołano w celach porównawczych analogiczny wykres uzyskany w metodzie pierwszej.

Czynniki mogące mieć wpływ na różnice porównywanych przebiegów są wynikiem stosowania różnych metod pomiarowych, ale również same próbki, mimo zachowania danego ich charakteru, wykazują różnice. Pomimo zapewnienia możliwie stałych warunków i zastosowaniu jednej metodyki przygotowania próbek, trudna jest do uzyskania pełna powtarzalność ich ostatecznego kształtu. Znaczący wpływ ma tu wielkość wypływki czołowej kleju.

Czynnikiem, który wpłynął w nieznanym stopniu na cechy spoiny dla próbki użytej w pierwszym pomiarze, jest oddziaływanie podwyższonej temperatury, będące efektem procesu przygotowawczego (operacja szlifowania profilu próbki).

Jeżeli chodzi o różnice wyniki ze specyfiki poszczególnych metod pomiarowych, zwraca uwagę fakt, iż metoda trójwymiarowej korelacji obrazu objęła swym zasięgiem makroskopowo całą próbkę. W takim ujęciu uchwycone są odkształcenia – przemieszczenia we wszystkich kierunkach. Na podstawie zbioru tych danych system pomiarowy umożliwił wyodrębnienie jedynie pożądanego wielkości. Natomiast w metodzie pomiaru mikroskopowego, przez wzgląd na konstrukcję układu, uchwycone jest przemieszczenie w żądanym kierunku, jednakże na szukaną wielkość nakładają się tu inne wielkości, przede wszystkim przemieszczenie wynikające z ograniczonej sztywności układu pomiarowego.

## 5. Podsumowanie

Metoda trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu, będąca efektywnym narzędziem do analizy odkształceń obciążonego układu, umożliwia wyznaczenie wartości przemieszczeń (odkształceń) z dużą dokładnością w strefie klejenia. Co istotne, metoda bazuje na systemie wizyjnym, toteż nie wprowadza zakłóceń do obiektu badanego.

Mankamentem metody, dla przypadku opisanego pomiaru, jest konieczność przygotowania powierzchni bocznej próbek

do pomiaru. Próbkę podczas szlifowania ulegały nagrzanemu do relatywnie wysokich (dla kleju) temperatur. To oddziaływanie temperaturowe w nieznanym stopniu mogło wpłynąć na właściwości wytrzymałościowe, które były przedmiotem badań.

Jak zostało wykazane, gdy nie jest wymagana szczególna dokładność pomiaru przemieszczeń, z powodzeniem można użyć bardziej przystępnych metod pomiarowych, jak druga z opisanych metod. Metoda pomiaru mikroskopowego cechuje się prostotą i zastosowaniem ogólnodostępnych, uniwersalnych narzędzi, jakimi są mikroskop optyczny wyposażony w kamerę cyfrową oraz program MATLAB. Niewątpliwą wadą metody jest brak możliwości wyodrębnienia jedynie wielkości szukanej w pomiarze.

## Bibliografia

- Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W., *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
- Mirski Z., Piwowarczyk T., *Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości*, „Przegląd Spawalnictwa”, 8/2008, 12–24.
- Baker A.A., Jones R., *Bonded repair of aircraft structures*, Martinus Nijhoff Publ, Dordrecht – Boston – Lancaster 1988.
- Baker A.A., *Bonded composite repair of fatigue – cracked primary aircraft structure*, „Composite Structures”, Vol. 47, 1997.
- Chester R.J., Walker K., Chalkley P., *Adhesively bonded repairs to primary aircraft structure*, „International Journal of Adhesion and Adhesives”, Vol. 19, 1/1999, 1–8.
- Godzimirski J., *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- Skoć A., Spalek J., *Podstawy konstrukcji maszyn*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- Andre A., Haghani R., Biel A., *Application of fracture mechanics to predict the failure load of adhesive joints used to bond CFRP laminates to steel members*, „Construction and Building Materials”, 27, 2012, 331–340.
- Cisek Z., Zielecki W., *Wyznaczanie maksymalnych naprężeń w połączeniach klejowych w warunkach oddziaływania*, „Technologia i automatyzacja montażu”, 2/1994.
- Prospekt informacyjny firmy LOCTITE, Der LOCTITE, Monachium 1988.
- Sikora R., *Tworzywa epoksydowe w naprawach maszyn*, WNT, Warszawa 1971.
- Blackman B.R.K., Kinloch A.J., Rodriguez Sanchez F.S., Teo W.S., Williams J.G., *The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing*, „Engineering Fracture Mechanics”, 76, 2009, 2868–2889.
- Makoto Imanaka M., Takeuchi Y., Nakamura Y., Nishimura A., Iida T., *Fracture toughness of spherical sili-filled epoxy adhesives*, „International Journal of Adhesion & Adhesives”, 21, 2001, 389–396.
- Azari S., Papini M., Schroeder J.A., Spelt J.K., *The effect of mode ratio and bond interface on the fatigue behavior of a highly-toughened epoxy*, „Engineering Fracture Mechanics”, 77, 2010, 395–414.
- Shokrieh M.M., Heidari-Rarani M., Ayatollahi M.R., *Delamination R-curve as a material property of uni-directional glass/epoxy composites*, „Materials and Design”, 34, 2012, 211–218.
- [<http://noeld.com/programs.asp?cat=video>] – Videoconferencing and Video Capture Tools.

## Experimental analysis of strain field of adherent in adhesive joint subjected to peel

**Abstract:** This paper describes results of investigation which main aim was to prepare methodology of measurement of deformation of adherent element in adhesive joint. Two different methodology of measurement were considered. Both of them are based on vision system. Research were conduct on adhesive joint specimen subjected to peel. In first paragraph was presented 3D Digital Image Correlation methodology. Potential of ARAMIS system was presented that based on this method. In this case measurement system is equipped with two digital cameras which records specimen during strength test and then upon analysis on personal computer we can obtain displacement or strain field in require area of specimen. Second method of measurement presented in article based on microscope. Optical microscope equipped with digital camera was used to register displacement of particular field of specimen during strength test. Registered movie was processed using Image Acquisition Toolbox MATLAB to obtain binary image of these area. It enables to retrieve displacement in time. In summary both of method were compared.

**Keywords:** strain measurement, construction scanning, adhesive joint, vision system

### dr hab. inż. Władysław Zielecki

Profesor w Katedrze Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej. Jest autorem kilkudziesięciu publikacji naukowych z zakresu konstrukcji i technologii połączeń montażowych oraz obróbki umacniającej części maszyn.

e-mail: [wziel@vp.pl](mailto:wziel@vp.pl)



### mgr inż. Andrzej Kubit

Doktorant w Katedrze Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej. Zainteresowania naukowe: analiza doświadczalna oraz numeryczna dotycząca wytrzymałości statycznej i zmęczenia połączeń adhezyjnych; badania wpływu nanonapełniaczy na właściwości kompozycji klejowych.

e-mail: [kubit.andrzej@gmail.com](mailto:kubit.andrzej@gmail.com)



### mgr inż. Łukasz Świąch

Asystent w Katedrze Samolotów i Silników Lotniczych Politechniki Rzeszowskiej. Zainteresowania naukowe: eksperymentalne oraz numeryczne badania cienkościennych struktur nośnych w stanach deformacji pokrywicznych.

e-mail: [lukasz.swiech@gmail.com](mailto:lukasz.swiech@gmail.com)

