

# Zastosowanie techniki wizyjnej w pomiarze odkształcenia bezwzględnej warstwy kleju w spoinie

Andrzej Kubit, Tomasz Mączka

Politechnika Rzeszowska

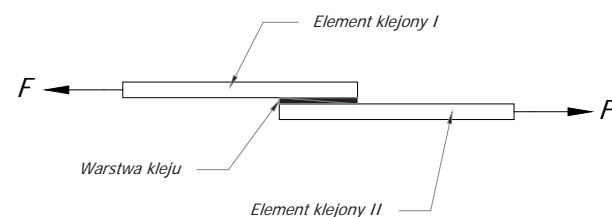
**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano metodę pomiaru odkształcenia bezwzględnej warstwy kleju w złączeniu klejowym poddanym oddzieraniu. Zasadniczym celem opisanego doświadczenia było uzyskanie charakterystyki rozpatrywanego złącza. Ze względu na charakter obciążenia (wywołujący stan oddzierania w warstwie kleju) rozpatrywana wartość odkształcenia jest na tyle mała, że słuszny jest tu pomiar z rozdzielczością  $1 \mu\text{m}$ . W związku z powyższym za odpowiednią do tego celu metodę pomiarową uznano technikę wizyjną. Do pomiaru wykorzystano mikroskop optyczny wyposażony w kamerę cyfrową, która rejestrowała przemieszczenie danego fragmentu próbki (odpowiadające szukanemu odkształceniu warstwy kleju) pod wpływem wzrastającej siły obciążającej od zera do wartości niszczącej. Zarejestrowane nagranie, zawierające przebieg procesu, składa się z ciemnego fragmentu próbki oraz jasnego tła. Obraz ten został poddany binaryzacji z użyciem Image Acquisition Toolbox MATLAB. W rezultacie zrealizowano pomiar przemieszczenia w czasie. Równolegle w trakcie doświadczenia przeprowadzony został pomiar siły wywołującej stan oddzierania. Dzięki sprzężeniu wymienionych wielkości mierzonych uzyskano charakterystykę siły w funkcji przemieszczenia, osiągając zamierzony cel badania. Jednak przed podjęciem właściwego pomiaru zmierzono wartość przemieszczenia dla jednej wartości siły statycznej, by określić słuszność przyjętej metody pomiarowej. Otrzymany wynik porównano z analogiczną wielkością modelu numerycznego, przygotowanego przy użyciu Metody Elementów Skończonych (MES). W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe, algorytm pomiaru oraz uzyskane charakterystyki złącza dla trzech wariantów próbki.

**Słowa kluczowe:** połączenia klejowe, mikroskop optyczny, pomiar mikrometryczny, system wizyjny, MATLAB

**P**ołączenia klejowe, ze względu na szereg zalet oraz rozwój technologii produkcji samych substancji klejących, zyskują coraz większe zastosowanie jako połączenia konstrukcyjne. Często ta forma połączeń okazuje się być niezastąpiona, m.in. w przypadku budowy wszelkiego rodzaju statków powietrznych. Znaczącą cechą tej formy łączenia jest brak ingerencji w strukturę elementów, w odróżnieniu od innych połączeń, np. spawanych bądź śrubowych. W przypadku tych pierwszych następuje nagrzewanie elementów do wysokich temperatur, co zmienia ich właściwości. Stosowanie połączeń śrubowych wiąże się z koniecznością wykonania otworów śrubowych. Osłabiają one konstrukcję, tworząc też karby spiętrzające naprężenia przy obciążeniach cyklicznych. Tego typu zjawiska nie występują w połączeniach klejowych.

Lekkość złącza klejonego oraz jego zdolność do łączenia ze sobą materiałów różnego typu to cechy decydujące o szerokim zastosowaniu klejów w przemyśle lotniczym. Ta forma łączenia również nie jest pozbawiona wad, jak choćby relatywnie (porównując z metalami konstrukcyjnymi) szybkie starzenie kleju oraz mała odporność na warunki atmosferyczne. Wytrzymałość spoiny klejowej zależy od wielu czynników, co często zniechęca konstruktorów do sięgania po nią. Jednakże wymienione zalety tego typu łączenia skłaniają do ciągłego rozwijania technologii klejenia.

Omawiany typ połączeń teoretycznie powinien być tak projektowany, aby spoina przenosiła obciążenia wyłącznie styczne do powierzchni elementów klejonych [1] i wywoływała stan tzw. czystego ścinania. Takie obciążenie wymuszałoby równomierny rozkład naprężenia w złączu, zapewniając tym samym jego maksymalną nośność. Jednak w rzeczywistości nie osiąga się stanu czystego ścinania, gdyż obciążeniu towarzyszą składowe prostopadłe do powierzchni powleczonych klejem, wywołujące stan oddzierania. Uzasadnia to prowadzenie badań nad poprawą nośności złączy klejowych poddanych oddzieraniu. Dla zobrazowania złożoności stanu naprężenia w obciążonej spoinie zaprezentowano klasyczny model zakładkowego złącza klejonego (rys. 1) oraz symulację

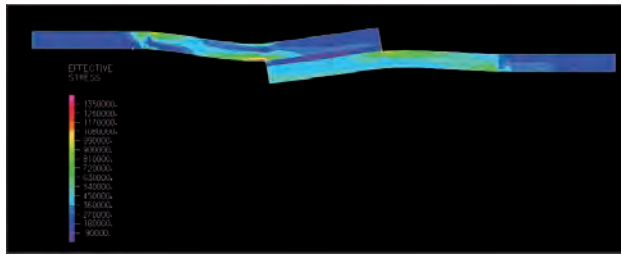


Rys. 1. Schemat zakładkowego złącza klejowego

Fig. 1. Typical single lap joint

jego obciążenia zrealizowaną przy zastosowaniu *Metody Elementów Skończonych (MES)*, wykazującej złożoność stanu naprężenia w spoinie. Wynika ona z istnienia dodatkowych naprężeń poza tymi stycznymi do warstwy kleju (rys. 2).

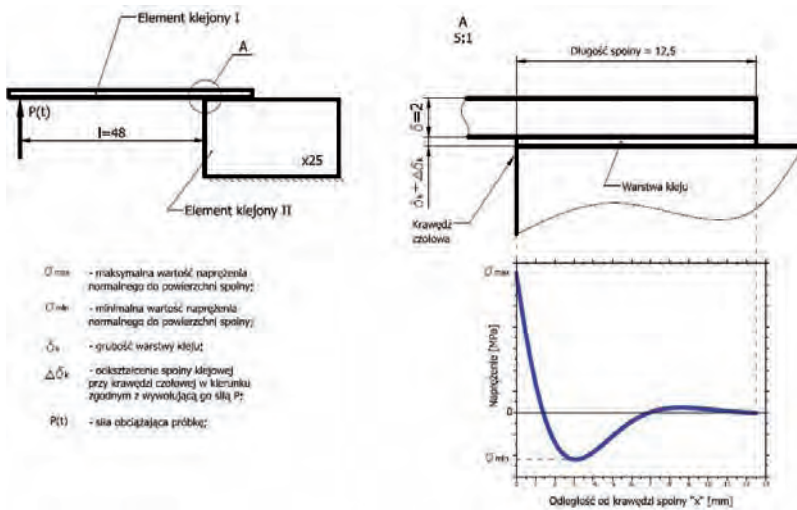
Grubość spoiny klejowej w przypadku połączeń metalowych przyjmuje zazwyczaj wartość rzędu  $0,05\text{--}0,1 \text{ mm}$  [2]. Odkształcenie masy klejowej złącza obciążonego w kierunku *normalnym* do powierzchni klejonych jest zatem tak małe, że trudno precyzyjnie uchwycić je tradycyjnymi przyrządami przeznaczonymi do pomiarów długości (suwmiarka, mikrometr, zegarowy czujnik przemieszczenia). Poza brakiem możliwości precyzyjnego pomiaru dochodzi jeszcze kwestia błędów pomiarowych. Wszelkie czujniki, głowice pomiarowe itp. elementy przy pomiarach tak niewielkich wielkości



Rys. 2. Symulacja MES wykazująca brak czystego ścinania w spoinie złącza zakładkowego

Fig. 2. FEM simulation that confirms existing both shear and peel stress

wpływałyby znacząco na dokładność pomiaru. Stąd szerokie rozpowszechnienie metod wizyjnych w pomiarach wielkości rzędu nano- i mikrometrów [3], których znaczącą cechą jest „bierna” obserwacja zjawiska. Innymi słowy, metody te polegają na bezinwazyjnym pobraniu obrazu, który analizowany jest technikami informatycznymi, w konsekwencji generującymi wartości wielkości szukanych. Taką technikę, służącą pomiarom odkształcenia spoiny klejowej, poddanej oddziaływaniu, wykorzystano w badaniach wytrzymałościowych opisanych w artykule.



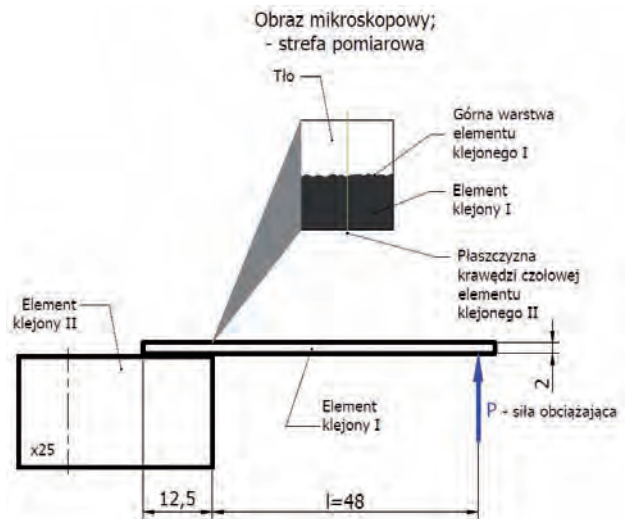
Rys. 3. Schemat obciążenia próbki klejowej w warunkach oddziaływania z teoretycznym rozkładem naprężenia normalnego do powierzchni spoiny

Fig. 3. Diagram of loading sample subjected to peel and theoretical stress-distance curve for this case

Oddziaływanie to niekorzystna forma obciążenia spoiny klejowej z powodu znaczącego spiętrzenia naprężeń przy krawędzi czołowej złącza. Teoretyczny rozkład naprężeń wzdłuż spoiny klejowej [4], ukazujący owo spiętrzenie, zaprezentowano na rys. 3 (dla jego większej czytelności warstwę kleju zaznaczono przesadnie grubą linią).

Jeśli chodzi o wytrzymałość złącza, czołowa krawędź spoiny jest więc miejscem newralgicznym. Postanowiono zatem przeprowadzić pomiar przemieszczenia elementu klejonego I względem elementu klejonego II w płaszczyźnie pokrywającej się z czołową częścią złącza. Szukane przemieszczenie wywołane jest odkształceniem bezwzględnym warstwy kleju  $\Delta\delta$  w kierunku zgodnym z kierunkiem siły wywołującej stan naprężenia (odkształcenia). Chcąc uchwycić to nie-

wielkie przemieszczenie, poddano obserwacji mikroskopowej górną krawędź elementu klejonego I w miejscu przedłużenia płaszczyzny czołowej elementu klejonego II, co obrazowo przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Ukazanie koncepcji pomiaru odkształcenia

Fig. 4. Demonstration of deformation measurement idea

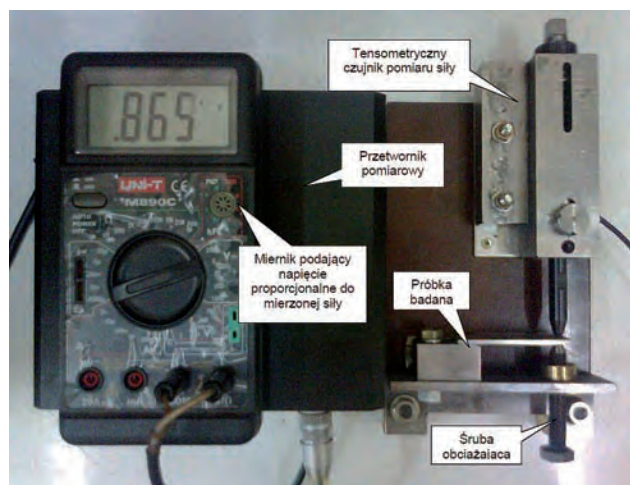
Docelowo podjęto próbę przeprowadzenia ciągłego pomiaru przemieszczenia przy quasi-liniowo narastającej sile  $P$  w zakresie od 0 do wartości niszczącej, uzyskując w rezultacie dla każdej z badanych próbek charakterystykę  $P = f(\Delta\delta)$ . Zgodnie z założeniem, charakterystyka taka winna pełnić rolę porównawczego wykresu wytrzymałościowego próbek wykonanych w różnych wariantach. Jednak pierwszym krokiem w doświadczeniu był pomiar szukanego przemieszczenia przy jednej wartości siły obciążającej  $P = 50$  N, co opisano dalej.

### Pomiar odkształcenia bezwzględnego warstwy kleju przy obciążeniu siłą $P = 50$ N

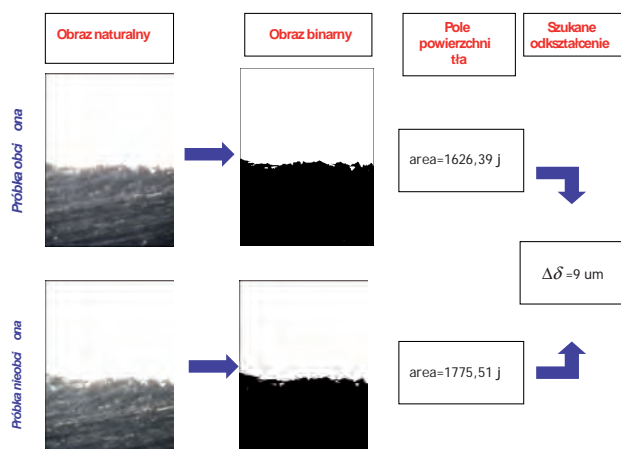
Dla przeprowadzenia pomiaru przygotowano układ obciążający (rys. 5), strefę pomiarową poddano obserwacji mikroskopowej (rys. 4).

Obserwacjom mikroskopowym poddano obszar w obrębie skrzyżowania górnej krawędzi elementu klejonego I oraz przedłużenia krawędzi czołowej (elementu klejonego II – rys. 2).

Próbkę przed pomiarem przygotowano, szlifując jej powierzchnię boczną poddaną obserwacji. Kilkustopniowe szlifowanie rozpoczęto szlifierką taśmową o ziarnistości 80, następnie kontynuowano obróbkę papierem ściernym o kolejnych stopniach ziarnistości: 120, 180, 240. Wykorzystując stół krzyżowy z posuwem wymuszonym przez śrubę mikrometryczną, wyskalowano układ, oznaczając odcinek 50  $\mu$ m w obserwowanym polu. Do pomiaru zastoso-

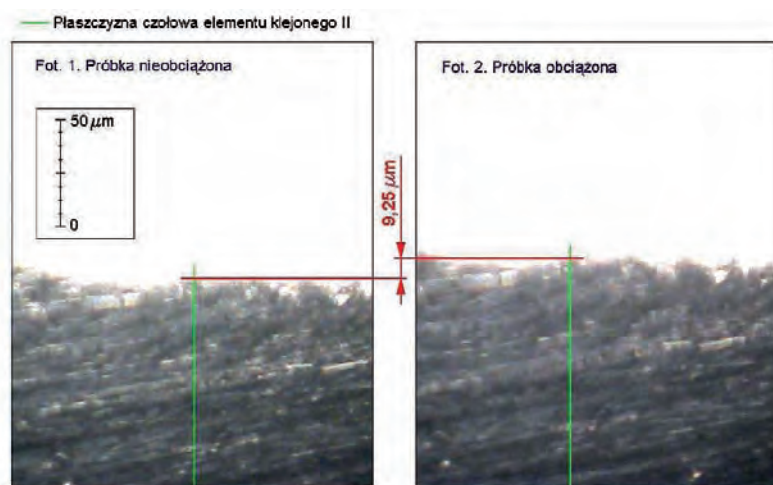


**Rys. 5.** Układ obciążający próbkę klejoną statyczną siłą P  
**Fig. 5.** Measurement system for loading sample by static force



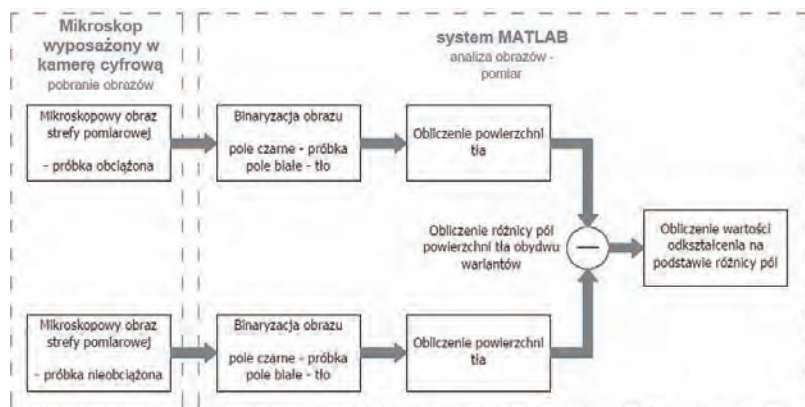
**Rys. 8.** Przedstawienie pomiaru odkształcenia poprzez analizę obrazu

**Fig. 8.** Method of image conversion for obtaining displacement value



**Rys. 6.** Wynik pomiaru manualnego wartości odkształcenia przy obciążeniu próbki siłą P=50 N

**Fig. 6.** Result of manual displacement measurement for sample loaded by 50 N static force



**Rys. 7.** Schemat wyjaśniający algorytm pomiaru odkształcenia metodą wizyjną

**Fig. 7.** Schematic diagram with algorithm of displacement measurement using vision system

wano mikroskop biologiczny firmy Bresser, model Biolux NV o zakresie powiększeń 20–1280 razy. Mikroskop wyposażono w kamerę cyfrową rejestrującą obraz z rozdzielczością 640 × 480, dzięki czemu uzyskano możliwość pobierania zdjęć obserwowanej próbki.

Na rys. 6 przedstawiono zdjęcia obserwowanej strefy próbki obciążonej siłą  $P = 50 \text{ N}$  oraz bez obciążenia. Zwymiarowano tu przemieszczenie w interesującym punkcie, wynoszące około 9,25  $\mu\text{m}$ .

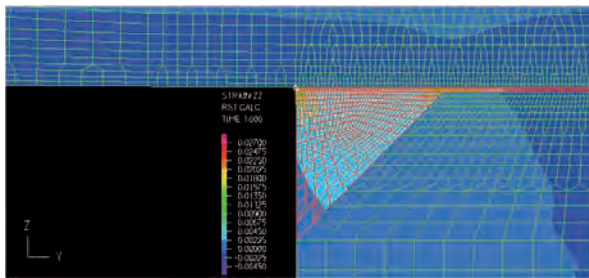
Opisany pomiar – przeprowadzony w sposób manualny – postanowiono w pewnym stopniu zautomatyzować, wykorzystując przyborek Image Processing Toolbox pakietu MATLAB. Udostępnia on funkcje do przetwarzania i analizy obrazów, m.in. związane ze zmianą formatu obrazu, operacjami morfologicznymi i wykrywaniem krawędzi [6, 7].

Koncepcja pomiaru polega na pobraniu w pierwszej kolejności porównywalnych obrazów (fotografii próbki obciążonej i nieobciążonej), następnie obrazy te poddane zostają binaryzacji, w efekcie czego uzyskuje się obraz dwukolorowy, gdzie fragment próbki jest czarny, a tło białe. Warunkiem poprawności pomiaru jest uzyskanie wyraźnego kontrastu pomiędzy fragmentem próbki a tłem. W związku z tym z porównania dwóch rozpatrywanych obrazów binarnych uzyskuje się różnicę w proporcjach pól czarnych i białych. Zdjęcie próbki obciążonej ma mniejsze pole białego tła niż obraz próbki nieobciążonej, dokonuje się więc pomiaru tych pól, a różnica jest proporcjonalna do szukanego odkształcenia.

Na schemacie z rys. 7 zobrazowano opisany wyżej algorytm pomiaru na podstawie zdjęć, natomiast na rys. 8 – ideę pomiaru dla konkretnego przypadku, rozpatrzonego przy pomiarze manualnym.

### Porównanie wartości mierzonych doświadczalnie z wynikami uzyskanymi poprzez wykorzystanie MES

Dla konfrontacji wyników zmierzonych na opisanym stanowisku przeprowadzono symulację badania z wykorzystaniem MES. Jako oprogramowanie zastosowano system Adina w wersji 8.7.3.



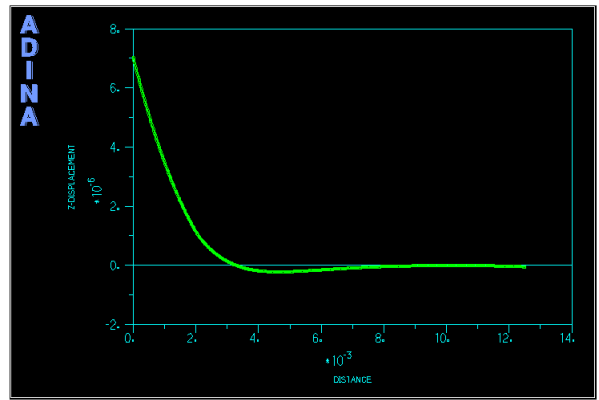
Rys. 9. Wizualizacja MES odkształcenia względnego spoiny w kierunku działania siły obciążającej

Fig. 9. Visualization of strain in adhesive using FEM

Analizę MES przeprowadzono dla modelu próbki z fazą czołową o wymiarach  $2 \times 2$  (jak w doświadczeniu) poza fazą – na pozostałej długości przyjęto stałą grubość spoiny równą  $\Delta = 0,05$  mm. Tak przygotowany model numeryczny próbki złącza klejonego został poddany symulacji w warunkach przytwierdzenia i obciążenia zgodnych z układem rzeczywistym. Zastosowano 8-węzłowe elementy typu 3-D Solid. Na rys. 9 zaprezentowano badany obszar próbki klejowej objęty siatką elementów skończonych, z wizualizacją wartości odkształcenia względnego w kierunku Z. Siatka masy klejowej została oznaczona kolorem czerwonym, natomiast elementów klejonych – zielonym. Na rys. 10 pokazano przebieg przemieszczenia górnej warstwy kleju w kierunku osi Z wzdłuż całej jej długości (na odcinku 12,5 mm; wartości na wykresie podano w jednostkach [m]). Wartość przemieszczenia jest tu tożsama z odkształceniem bezwzględnym spoiny w kierunku Z, przy czym w doświadczeniu zmierzono jedynie jego wartość maksymalną, tj. przy czole złącza.

Wartość szukanego odkształcenia wyniosła  $\Delta\delta = 7,38$  m. Porównując wynik z doświadczeniem, jest on o 18 % mniejszy. Różnicę może tłumaczyć m.in.:

- założenie w modelu stałej grubości warstwy klejowej równej 0,05 mm (poza fazą) – w rzeczywistości wielkość ta nie jest stała z powodu chropowatości powierzchni elementów łączonych, jak również niekoniecznie ma grubość założoną w modelu (grubość spoiny ma istotne znaczenie przy jej odkształceniu),
- rzeczywista próbka przy czole ma wy-



Rys. 10. Przebieg przemieszczenia górnej warstwy kleju wzdłuż długości spoiny wg symulacji MES

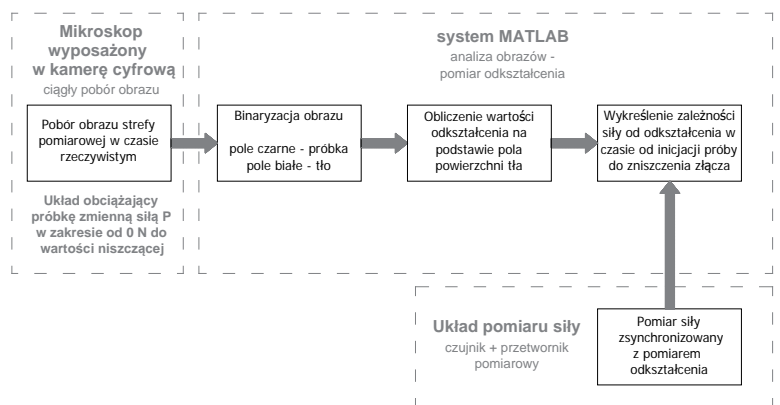
Fig. 10. Displacement-distance curve obtained using FEM

- wpływkę kleju, która wpływa na stan naprężenia (odkształcenia) kleju – w modelu MES pominięto wpływkę,
- uproszczenie modelu MES, m.in. założenie idealnie gładkich powierzchni elementów łączonych,
- błąd układu pomiarowego, wynikający z jego ograniczonej sztywności, przez co na uzyskiwane w obrazie mikroskopowym przemieszczenie nakłada się także przemieszczenie elementów układu – wykazano, że przy sile  $P = 50$  N jest to maksymalnie około 5 % zmierzonego przemieszczenia.

Ponieważ wynik dla siły  $P = 50$  N udało się uchwycić z zadowalającą rozdzielczością, a jest to przeciętnie 35 % wartości siły niszczącej, uzyskano potwierdzenie słuszności pomiaru dla siły stale narastającej w zakresie od 0 do wartości niszczącej.

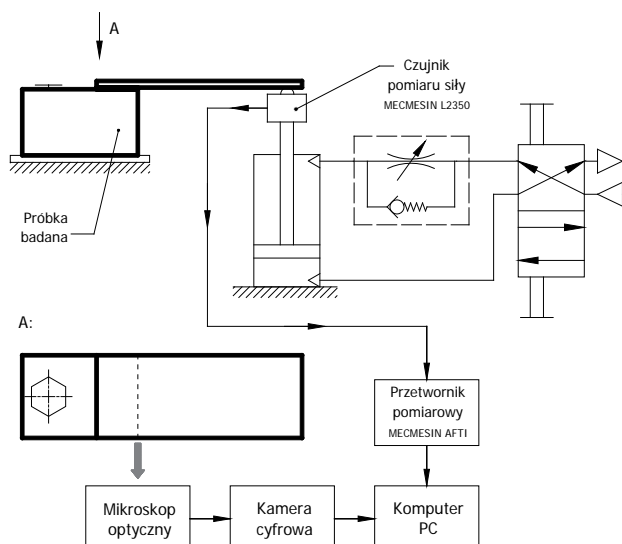
### Ciągły pomiar odkształcenia bezwzględnego spoiny klejowej

Kolejny etap prowadzonych badań to pomiar ciągły, którego celem jest uzyskanie charakterystyki siły obciążającej od przemieszczenia elementu klejonego I względem elementu II w rozpatrywanym punkcie (odkształcenia bezwzględnego warstwy kleju).



Rys. 11. Schemat objaśniający zasadę generowania zależności siły od odkształcenia

Fig. 11. Schematic diagram of force-displacement measurement methodology

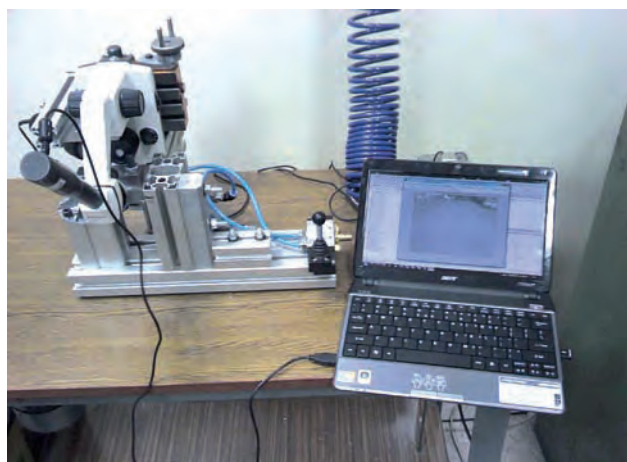


**Rys. 12.** Schemat stanowiska pomiarowego dla wyznaczania charakterystyki złącza klejowego

**Fig. 12.** Schematic diagram of measurement system used to obtain adhesive joint curves

Schemat blokowy, prezentujący ideę takiego pomiaru, przedstawiono na rys. 11. Zasadniczą część koncepcji, polegającą na pobraniu obrazu mikroskopowego i jego konwersji na obraz binarny w celu określenia zmiany pola powierzchni tła w różnych stanach obciążenia, pozostała niezmienną w stosunku do opisanego doświadczenia pomiaru przy jednej wartości siły obciążającej. Dla uzyskania płynnego pomiaru szukanego odkształcenia bezwzględnego kleju, przy sukcesywnie wzrastającej sile, zastosowano obciążający układ pneumatyczny oraz kamerę cyfrową dla ciągłego pobierania obrazu. Schemat tak wyposażonego stanowiska przedstawiono na rys. 12, natomiast kolejny obiekt graficzny (rys. 13) to fotografia tego stanowiska.

Przedstawiony układ wyposażono w mechanizm umożliwiający precyzyjne ustawienie pola obserwowanego. Siłownik obciążający zamontowano na tym samym sztywnym profilu, na którym przymocowano próbkę. Odpowiednia sztywność układu pomaga utrzymać się z wynikających z przemieszczenia



**Rys. 13.** Stanowisko pomiarowe służące wyznaczeniu charakterystyki złącza klejowego

**Fig. 13.** Measurement site used to obtain adhesive joint curves

czenia znaczących błędów, które mogłyby nałożyć się na odkształcenie mierzone.

System wizyjny, wyznaczający szukane odkształcenie próbki, działa dwuetapowo. Pierwszy etap to akwizycja obrazów mikroskopowych zarejestrowanych w czasie trwania eksperymentu. Drugim etapem jest analiza tych danych dla uzyskania przebiegu odkształcenia badanej próbki w czasie. Wykorzystywana kamera cyfrowa, sprzężona z mikroskopem, pozwala na pobieranie obrazów RGB o rozdzielczości  $640 \times 480$  z prędkością 30 klatek na sekundę. Początkowo do akwizycji obrazów zastosowano pakiet Image Acquisition Toolbox MATLAB [6, 7], zapisując kolejne pobierane z kamery klatki do plików bmp. Takie rozwiązanie okazało się jednak zbyt mało wydajne. W praktyce rejestrowanych było około 10 klatek na sekundę, nie wykorzystywa-



**Rys. 14.** Przykładowa klatka filmu z jednego z eksperymentów

**Fig. 14.** Exemplary image from experiment movie

no w pełni możliwości kamery. W konsekwencji zdecydowano, aby zamiast „ręcznego” zapisywania poszczególnych klatek, rejestrować film z przebiegu eksperymentu. Skorzystano z darmowego oprogramowania AMCap [5], które umożliwia m.in. rejestrację nieskompresowanego materiału filmowego w pliku avi. Badana próbka, pod wpływem oddziaływania przemieszczającego się siłownika pneumatycznego, odkształca się, a co za tym idzie – obserwowany przez kamerę fragment próbki przemieszcza się w czasie. Ustawienia toru wizyjnego dobrano tak, że przemieszczenie fragmentu badanej próbki jest obserwowane od górnej (0, 0) w stronę dolnej (640, 480) części rejestrowanego obrazu. Próbkę w trakcie przemieszczania wypełnia ciągle obszar pola obserwacji, tj. od górnej krawędzi do aktualnego położenia. Zapewniono odpowiednie warunki oświetleniowe, tak aby tło było wyraźnie skontrastowane (zbliżone do koloru białego) z próbką (kolor szary). Najistotniejsze było zarejestrowanie ostrej krawędzi próbki. Przykładową klatkę obrazu z eksperymentu zaprezentowano na rys. 14.

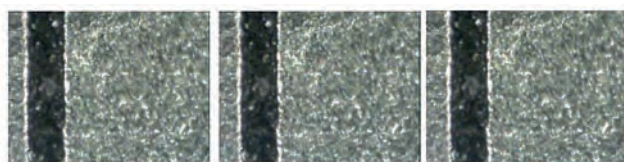
Drugi etap działania systemu wizyjnego to analiza zapisów eksperymentów w celu wyznaczenia odkształcenia próbki poddanej eksperymentowi w funkcji czasu. Zadanie to realizuje skrypt pakietu MATLAB 2010 R2 [6], korzystający m.in. z funkcji do analizy obrazu z Image Processing Toolbox. Skrypt ten przetwarza kolejne klatki materiału filmowego, wyznaczając dla każdej z nich pole widocznego fragmentu próbki obserwowanego przez kamerę. Stosunek tej wielko-

ści do pola całego obszaru obserwacji odzwierciedla stopień odkształcenia badanej próbki. Wykonanie obliczeń do poszczególnych klatek materiału umożliwia wykreślenie stopnia odkształcenia próbki w funkcji czasu. W celu obliczenia ww. pola dla pojedynczej klatki, konieczne jest wyznaczenie współrzędnych dolnej krawędzi próbki. Kolejne operacje realizowane w tym celu przez skrypt są następujące:

1. Odczyt klatki w formacie RGB i konwersja do skali odcieni szarości. Obraz po skonwertowaniu jest prezentowany w postaci macierzy o wymiarach  $640 \times 480$ , element  $(i, j)$  tej macierzy zawiera liczbę z przedziału  $[0, 255]$  oznaczającą odcień piksela  $(i, j)$ : 0 – czarny, 255 – biały,  $(0, 255)$  – odcienie szarości.
2. Wyodrębnienie z obrazu w skali szarości użytecznego fragmentu, tj. tego, w którym znajduje się próbka, w celu uproszczenia i przyspieszenia analizy. Wykorzystany jest wyraźny kontrast między krawędzią próbki a tłem. Funkcja realizująca to zadanie wyszukuje numer wiersza w macierzy obrazu, poniżej którego znajduje się tylko tło. Analizuje w tym celu poszczególne wiersze, zliczając, ile pikseli ma kolor zbliżony do koloru tła (tj. większy od ustalonego progu, próg dobrany eksperymentalnie do warunków oświetleniowych). Jeżeli co najmniej  $M$  pikseli w wierszu ( $M$  dobrane eksperymentalnie, jw.) spełnia ten warunek, funkcja traktuje wiersze poniżej jako tło i są one ignorowane w trakcie dalszej analizy.
3. Przekształcenie wyznaczonego w punkcie 2 obrazu w skali odcieni szarości do obrazu dwukolorowego, czarno-białego, z doświadczalnie dobranym progiem. Obszar próbki na obrazie binarnym jest koloru czarnego, zaś tło białe. Umożliwia to dalszą analizę w celu obliczenia współrzędnych krawędzi. Przykładowy fragment

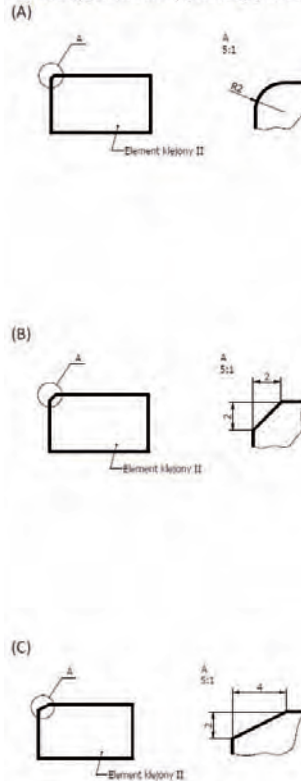


Rys. 15. Wyodrębniony fragment klatki po procesie binaryzacji  
Fig. 15. Exemplary fragment of frame after binarization process

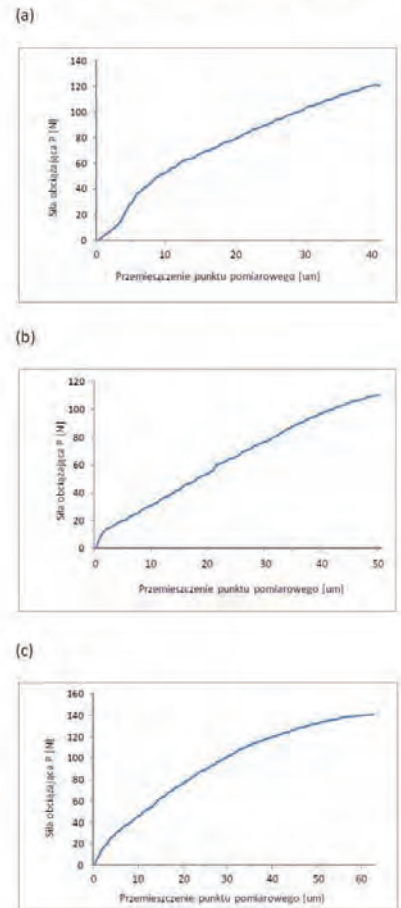


Rys. 16. Przemieszczenia śruby mikrometrycznej: 0 m, 10 m, 20 m  
Fig. 16. Displacement of micrometric screw: 0 m, 10 m, 20 m

Ukształtowanie elementu klejonego II wymuszające określony przebieg grubości spoiny



Wynik pomiaru dla każdego z wariantów



Rys. 17. Przedstawienie przykładowych wyników pomiarów dla poszczególnych wariantów rozkładu grubości spoiny

Fig. 17. Results of measurements, force-displacement curve for three variants of specimen

poddanej binaryzacji klatki z eksperymentu przedstawiono na rys. 15.

4. Wyodrębnienie dolnej krawędzi próbki i pola (w pikselach) od  $(0, 0)$  do dolnej krawędzi.
5. Obliczenie pola widocznego obszaru próbki na podstawie wyznaczonej dolnej krawędzi. Pole wyrażone jest w  $m^2$ , dlatego też należało dokonać przeliczenia jednostek obrazu (pikseli) na jednostki długości ( $m$ ). W tym celu dokonano skalowania, obserwując przez mikroskop śrubę mikrometryczną i wykonując zdjęcia z położenia śruby: 0 m (startowe), 10 m, 20 m, 30 m, 40 m (rys. 16). Następnie w programie graficznym odczytano różnice między prawymi krawędziami śruby w poszczególnych pozycjach. Potwierdzono, że dla powiększenia  $10 \times$ , z którego korzystano w trakcie eksperymentów, 1 px na obrazie odpowiada 1  $\mu m$ .

Po wykonaniu obliczeń dla wszystkich klatek filmu, tworzony jest wykres odkształcenia (widocznego pola) próbki w zależności od czasu. Następnie nakładany jest wykres przebiegu siły, otrzymany w równoległym pomiarze. Wykresy są synchronizowane przez wykrycie momentu rozpoczęcia odkształcenia próbki.

Przeprowadzono próby dla trzech wariantów złącza, które charakteryzują się różnym rozkładem grubości kleju w stre-

fie przykrawędziowej. Rysunek przedstawia wyniki pomiarów dla każdego z wariantów. Wynikiem jest tu zależność siły obciążającej  $P$  od przemieszczenia punktu elementu klejonego  $I$ , znajdującego się na przedłużeniu krawędzi czołowej złącza, w kierunku zgodnym z kierunkiem działania siły  $P$ .

## Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary potwierdzają słusność zastosowania systemów wizyjnych do precyzyjnego mierzenia wielkości rzędu mikrometrów, ukazując także ich uniwersalność. Z kolei narzędzia systemu MATLAB dostarczają niemal gotowe algorytmy analizy danych na podstawie obrazów, co stwarza szerokie możliwości dla wszelkich bezinwazyjnych pomiarów dokonywanych tą metodą. Układ pomiarowy wykazał znaczącą negatywną cechę, mianowicie konsekwencją wymuszenia rosnącego obciążenia próbki przez siłownik pneumatyczny jest zależność prędkości posuwu od wartości ciśnienia zasilającego. Utrudnia to otrzymanie powtarzalnych szybkości zmiany obciążenia, co jest pożądane, gdy chce się uzyskiwać porównawcze charakterystyki złączy. Ta niekorzystna właściwość doprowadziła do wyciągnięcia wniosku o konieczności zastąpienia napędu pneumatycznego napędem śrubowym napędzanym motoreduktorem.

## Bibliografia

1. Skoć A., Spałek J.: *Podstawy konstrukcji maszyn*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
2. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
3. Lewandowska M., Roźniatowski K., [w:] *Nanomateriały inżynierskie: konstrukcyjne i funkcjonalne*, Kurzydłowski K., Lewandowska M. (red.), PWN, Warszawa 2010.
4. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
5. [www.noeld.com/programs.asp?cat=video].
6. [www.mathworks.com/products/matlab] – MATLAB – The Language Of Technical Computing.
7. [www.mathworks.com/help/toolbox/images] – MATLAB R2011b Documentation, Image Processing Toolbox. ■

Program MATLAB wykorzystany do przeprowadzenia badań został zakupiony w ramach realizacji Projektu Nr UDA-RPPK.01.03.00-18-003/10-00 „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007–2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3. Regionalny system innowacji.

## Vision system applied to measurement deformation of glue layer in adhesive joint

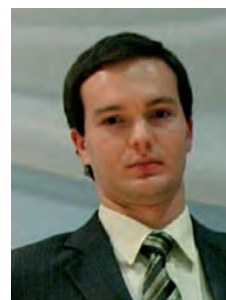
**Abstract:** This paper describes results of investigations which main aim was to prepare methodology of measurement deformation of glue layer in adhesive joint. Principal purpose of these investigations was to achieve characteristic of glue joint which is subjected to peel. Because of this type of loading, causing peel stress in adhesive layer, deformation is small and it is necessary to obtain measurement with 1 micrometer precision. Due to that requirement vision system was used to measure deformation. Optical microscope equipped in digital camera was used to register displacement of particular field of specimen (what is equivalent to searching strain of glue) which is loaded by increasing force from zero to value that causes failure of sample. Registered movie which include dark fragment of specimen and bright background was processed using Image Acquisition Toolbox MATLAB to obtain binary image of these area. It enables to retrieve displacement in time. In parallel to image processing, value of loading force was measured. In consequence, force-displacement curve for specimen was designated. Primary goal of investigations was to measure displacement for static force to estimate advisability of methodology. Results achieved using vision system measurement was compared with numerical model prepared by Finite Element Method (FEM). Article presents measurement procedure and describes algorithm of investigation. Force-displacement curve for three variants of specimen is shown.

**Keywords:** adhesive joint, optical microscope, micro-value measurement, vision system, MATLAB

### mgr inż. Andrzej Kubit

Asystent w Katedrze Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z wytrzymałością statyczną oraz zmęczeniową połączeń klejowych. Jego działalność naukowa skupia się głównie na metodyce pomiarowej dotyczącej badań wytrzymałościowych połączeń adhezyjnych oraz na badaniach wpływu wypełniaczy na jakość spoin klejowych. Interesuje się również symulacją wytrzymałościową z użyciem Metody Elementów Skończonych.

e-mail: kubit.andrzej@gmail.com



### mgr inż. Tomasz Mączka

Asystent w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Uczestniczy w projekcie systemu monitorowania i sterowania produkcją, realizowanym w Katedrze. Obecnie jego działalność naukowa dotyczy zastosowania metod sztucznej inteligencji do analizy danych rejestrowanych przez system monitorowania produkcji. Interesuje się projektowaniem i implementacją oprogramowania dla systemów wbudowanych, inżynierią oprogramowania oraz przetwarzaniem obrazów.

e-mail: tmaczka@kia.prz.edu.pl

