I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary
Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015

Organizatorzy:
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ
CNT CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE
KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA RAPIDROM

Zastosowanie systemu Aramis do trójwymiarowego pomiaru lokalnych odkształceń kompozytów

Aramis application for measuring of three-dimensional local strain of composites

RAFAŁ OLIWA*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.576

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania tzw. metod badań nieniszczących do charakterystyki kompozytów polimerowych. W tym celu zastosowano system Aramis umożliwiający trójwymiarowy pomiar odkształceń na powierzchni próbki w trakcie oznaczania naprężenia ścinającego laminatów podczas rozciągania pod kątem 45° w stosunku do ułożenia włókien.

SŁOWA KLUCZOWE: Aramis, laminaty, naprężenie ścinające, stała materiałowa

The study presents the possibilities of using the nondestructive testing methods (NDT) to characterize the polymeric composites. For this purpose the Aramis system is useful tool allows to measure the three-dimensional strain on the sample surface during the tensile test at 45° relative to the fibers.

KEYWORDS: Aramis, composites, sheare strength, material constant

Kompozyty polimerowe są najnowocześniejszą i bardzo prężenie rozwijającą się grupą materiałów stosowanych głównie jako elementy konstrukcyjne w wielu gałęziach przemysłu. Kompozyty polimerowe zbudowane są z co najmniej dwóch faz: fazy ciągłej zwanej matrycą (osnową) oraz fazy rozproszonej zwanej zbrojeniem lub wzmocnieniem. W zależności od zastosowanego wzmocnienia rozróżnia się wiele rodzajów kompozytów, wśród których największy udział mają polimerowe kompozyty wzmocnione włóknami ciągłymi tzw. laminaty. Dzięki doskonałym właściwościom takim jak: duża wytrzymałość właściwa oraz moduł sprężystości przy niewielkim ciężarze właściwym, materiały te wypierają tradycyjne kompozyty metalowe [1-3]. Ze względu na złożony charakter budowy laminatów stosuje się wiele metod służących do oceny ich właściwości użytkowych, jak również charakteryzowania oddziaływań międzyfazowych na granicy włókno–polimer. Spośród wielu typowych badań właściwości wytrzymałościowych, takich jak: rozciąganie, zginanie trzy- lub czteropunktowe oraz udarność, których wynikiem są m.in.: moduł sprężystości, odkształcenie oraz naprężenia: maksymalne i niszczące, odrębną grupę metod stosowanych do oceny właściwości użytkowych laminatów stanowią badania nieniszczące (NDT). Umożliwiają one bowiem uzyskanie informacji na temat stanu materiału i występowania ewentualnych wad produkcyjnych (pęcherzy, dziur, rys, karbów itp.) oraz eksploatacyjnych, związanych z delaminacją, pękaniem, jakością granicy międzyfazowej czy degradacją. Spośród licznych technik NDT stosowanych w diagnostyce laminatów największe zastosowanie mają metody ultradźwiękowe, rezonansowe, elektromagnetyczne, emisji akustycznej, termograficzne i optyczne. Wymienione metody różnią się nie tylko rodzajem wykorzystywanych w nich zjawisk, ale także szybkością pomiaru oraz czułością i rodzajem wykrywanych wad [4, 5].

Niewątpliwe do wyżej wymienionych metod zalicza się system Aramis służący do optycznej analizy odkształceń i naprężeń na powierzchni próbki w trzech różnych kierunkach podczas jej obciążania [6]. Najczęściej stosowany jest do analizy pęknięć kompozytów betonowych [7, 8]. W tym celu system wykorzystuje serię cyfrowych zdjęć, które wykonywane są podczas pomiarów w równych odstępach czasu przez dwie kamery ustawione w odpowiedniej odległości od badanego przedmiotu. Charakteryzuje się wysoką rozdzielczością i dużą dokładnością pomiarów. Niewątpliwie kolejnymi zaletami systemu Aramis jest możliwość analizy powierzchni małych próbek w skali laboratoryjnej jak również większych elementów niezależnie od geometrii i temperatury badanego przedmiotu.

Materiały konstrukcyjne o strukturze warstwowej ulegają zniszczeniu wskutek wystąpienia rozwarstwienia. Powoduje to znaczne zmniejszenie sztywności i wytrzymałości na zginanie, dlatego kolejnym badaniem stosowanym do oceny właściwości użytkowych laminatów jest oznaczanie odporności na ścinanie międzywarstwowe. W literaturze jest ono oznaczane symbolem ILSS (Interlaminar Shear Strength). Do wyznaczania ILSS najczęściej stosuje się próbę trój-

* dr inż. Rafał Oliwa (oliwa@prz.edu.pl)

punktowego zginania krótkiej belki (Short Beam Test) przy niewielkim stosunku odległości pomiędzy podporami do wysokości próbki (l/h = 5), albo rozciąganie próbek pod kątem 45° w stosunku do ułożenia włókien w kompozycie [9-12]. W pracy przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu zastosowanego wzmocnienia w postaci włókien szklanych, węglowych lub aramidowych na wytrzymałość na ścinanie laminatów epoksydowych wraz z analizą lokalnych odkształceń oraz wyznaczeniem podstawowych stałych materiałowych za pomocą systemu Aramis.

Część doświadczalna

W pracy przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu zastosowanego wzmocnienia w postaci włókien szklanych, węglowych lub aramidowych na wytrzymałość na ścinanie laminatów epoksydowych wraz z analizą lokalnych odkształceń oraz wyznaczeniem podstawowych stałych materiałowych za pomocą systemu Aramis.

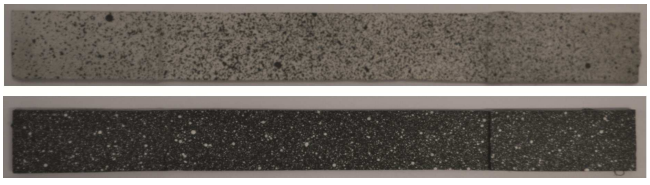
■ Materiały stosowane w badaniach

a) małocząsteczkowa żywica epoksydowa Epidian 6 (EP6). Wyprodukowana przez Zakłady Chemiczne „Organika-Sarzyna" w Nowej Sarzynie (η = 10000-15000 mPas, ρ = 1,17 g/cm3).
b) utwardzacz Z-1 (Z-1) (trietylenotetramina o czystości technicznej) dostarczony przez Zakłady Chemiczne „Organika-Sarzyna-Ciech" w Nowej Sarzynie.
c) dwukierunkowe tkaniny o splocie skośnym 2/2 i gramaturze: 200g/m2 (szklane), 200 g/m2 (węglowe) i 120 g/m2 (aramidowe) produkcji Havel Composites.

■ Przygotowanie próbek do badań

Wykonano dwuwarstwowe laminaty stosując kontaktową metodę formowania, przesycając kolejno układane warstwy tkaniny żywicą epoksydową z dodatkiem 13% mas. utwardzacza przy użyciu ryflowanego wałka. Warstwy te umieszczano na folii politetrafluoroetylenowej (PTFE), stanowiącej środek oddzielający od płyty stalowej o wymiarach 200x300 mm, będącej dolną częścią formy przyszłego laminatu. Po dokładnym przesyceniu warstw tkaniny i usunięciu nadmiaru żywicy, wierzchnią warstwę laminatu przykrywano drugą formatką folii PTFE i kolejną płytą stalową oraz ściskano, zapewniając nacisk około 10 MPa. Tak otrzymane laminaty utwardzano wstępnie przez 24 godz. w temperaturze pokojowej, a następnie dotwardzano w suszarce z wymuszonym obiegiem powietrza w temperaturze 100°C przez 6 godz. Z tak wykonanych laminatów, w których zawartość tkaniny szklanej sięgała 43% mas., tkaniny węglowej 35% mas. I tkaniny aramidowej 38% mas. wycinano próbki do badań pod kątem 45° w stosunku do ułożenia włókien za pomocą elektronarzędzia z oscylującą tarczą tnącą.

Otrzymane próbki laminatów o wymiarach 200x20x1 mm, zmatowiono po czym naniesiono na nie za pomocą spray'a odpowiedni deseń w postaci białych lub czarnych kropek o zróżnicowanych kształcie i wielkości (rys. 1.).

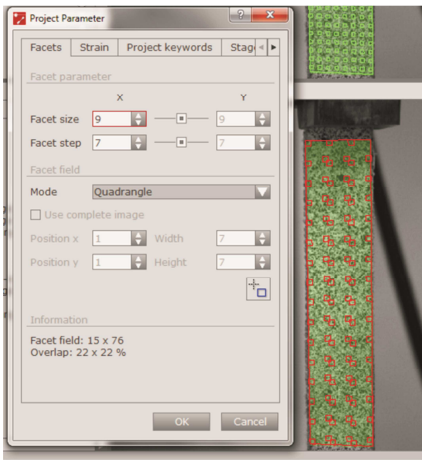


Rys. 1. Widok przygotowanych próbek laminatów szklanych (a) i węglowych (b) z naniesionym deseniem

■ Oznaczanie naprężenia ścinającego laminatów

Naprężenie ścinające laminatów oznaczono zgodnie z normą PN-EN ISO 14129 podczas rozciągania laminatów pod kątem 45° do ułożenia włókien za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron 5967 sprzężonej z systemem Aramis co umożliwiło zebranie danych w postaci graficznej oraz analizę stanów odkształceń. Pomiary wykonano dla 5 próbek z każdego rodzaju laminatu.

Po przygotowaniu próbki i odpowiednim ustawieniu statywu z kamerami przeprowadzono kalibrację systemu za pomocą wzornika z naniesionymi punktami referencyjnymi. Po przeprowadzeniu kalibracji wykonano pomiary kształtek kompozytów podczas statycznego rozciągania stosując obiektywy o stałej ogniskowania 35 mm. W tym celu wykonano w trybie Simple with AD pierwsze zdjęcie próbki, które stanowiło stan zerowego obciążenia i odniesienia, względem którego wykonywane były wszystkie obliczenia dla kolejnych zdjęć, które rejestrowano w trybie Start/Mid/Stop Trigger z szybkością zapisu 29 (Frame rate) do momentu zniszczenia próbki. Po zakończeniu pomiaru, w celu rozpoczęcia analizy zapisanych zdjęć określono pole powierzchni na jakim będą prowadzone obliczenia (tzw. maska obliczeniowa) wraz z wielkością fasetek (9x9 pixele) i zakładek (2 pixele) (rys. 2.). Każda fasetka ma przypisaną jedną i niepowtarzalną strukturę oraz współrzędne, dzięki czemu w trakcie obciążania próbki są one rozpoznawane na kolejnych zdjęciach. W ostatnim kroku przed rozpoczęciem analizy wybrano ręcznie punkt początkowy, od którego proces obliczeniowy się rozpoczął.



Rys. 2. Widok fasetek na zaznaczonym obszarze pomiarowym

Za pomocą systemu Aramis obliczono również moduł przy ścinaniu, współczynnik Poissona oraz umowną granicę plastyczności. W tym celu po wcześniejszym zaznaczeniu obszaru próbki wykorzystano opcję Macro➔Script➔tensile test evaluation i metodę Area (large) (rys. 3.).

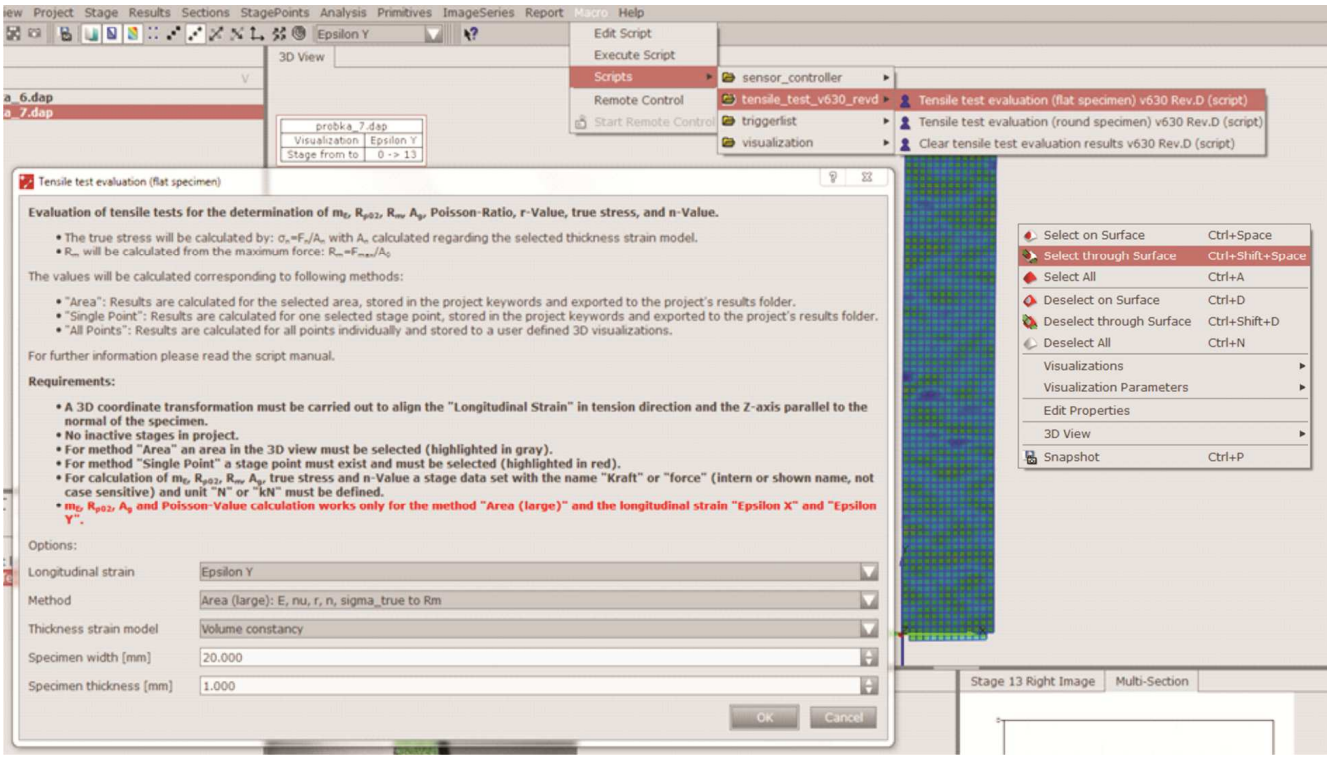
Moduł ścinania obliczono według następujących wzorów:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'} \quad (1)$$

w którym: τ_{12}'' – naprężenie ścinające przy odkształceniu przy ścinaniu γ_{12}'', τ_{12}' – naprężenie ścinające przy odkształceniu przy ścinaniu γ_{12}', γ_{12} – odkształcenie przy ścinaniu obliczone na podstawie następującego wzoru:

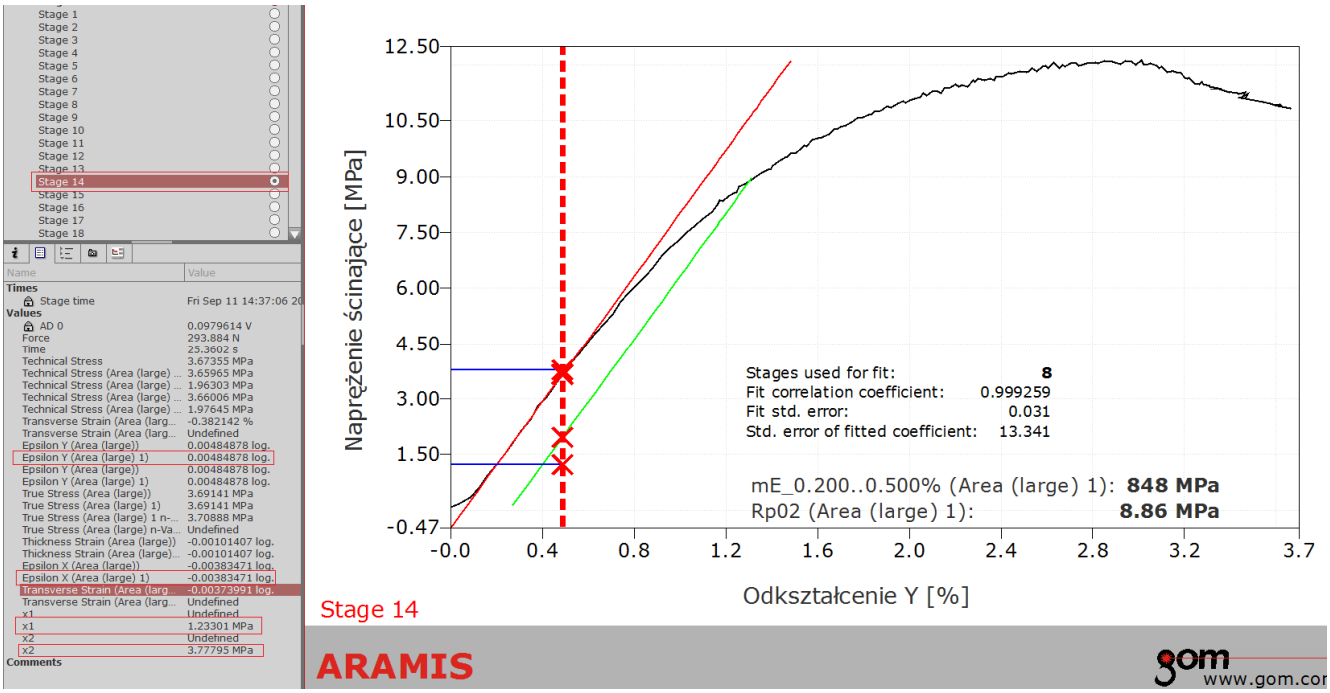
$$\gamma_{12} = \varepsilon_y - \varepsilon_x \text{ [mm/mm]} \quad (2)$$

w którym: ε_y – odkształcenie w kierunku równoległym do osi próbki, ε_x – odkształcenie w kierunku prostopadłym do osi próbki



Rys. 3. Widok menu oprogramowania do obliczenia stałych materiałowych

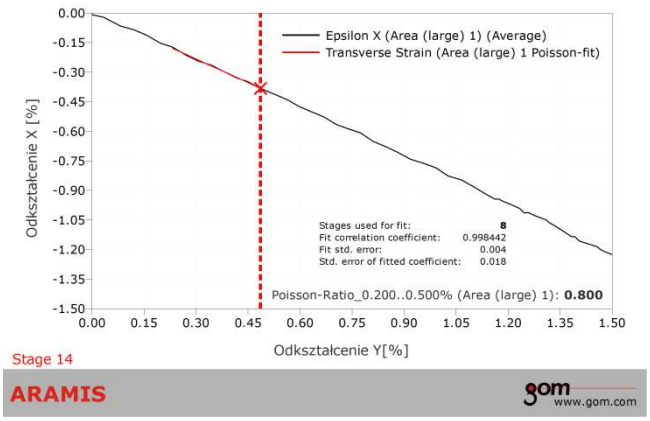
Dla wszystkich laminatów przyjęto odkształcenia sprężyste w kierunku osi Y w zakresie 0,2-0,5%, w wyniku czego ε_{y1}=0,2% natomiast ε_{y2}=0,5%. Następnie na podstawie tych wartości brzegowych wyznaczono pozostałe wielkości potrzebne do obliczenia modułu ścinania korzystając z wykresu i danych wygenerowanych przez system Aramis (rys. 4.).



Rys. 4. Wykres naprężenie ścinające – odkształcenie Y dla laminatu wzmocnionego włóknem aramidowym oraz wyznaczenie wielkości ε_{x1}, ε_{x2}, τ_{12}'' i τ_{12}'

Analiza wyników

W wyniku przeprowadzonego pomiaru otrzymano wartości naprężenia ścinającego (τ_{12}) i wartości stałych materiałowych, które zestawiono w tabeli 1. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe wykresy wygenerowane podczas analizy, na podstawie których wyznaczono między innymi: odkształcenie przy ścinaniu (γ_{12}) umowną granicę plastyczności (Rp_{02}), współczynnik Poissona (v) i moduł ścinania (cięciwa) (G_{12}).



Rys. 5. Stosunek odkształcenia wzdłużnego i poprzecznego oraz wyznaczenie współczynnika Poissona za pomocą systemu Aramis laminatu wzmocnionego włóknem aramidowym

■ Wyznaczanie naprężenia ścinającego i stałych materiałowych laminatów

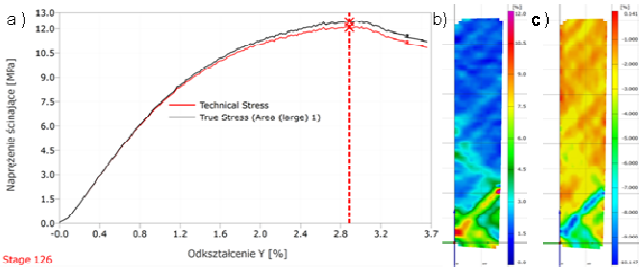
Tab. 1. Średnie wartości parametrów wyznaczonych za pomocą systemu Aramis

Symbol próbki	τ_{12} [MPa]	Rp_{02} [MPa]	G_{12} [MPa]	γ_{12} [%]	Współczynnik Poissona,v
EP6/tkanina węglowa	23,9	17,8	1040	4,5	0,700
EP6/tkanina szklana	19,0	10,3	670	8,3	0,592
EP6/tkanina aramidowa	12,0	8,9	460	5,5	0,776

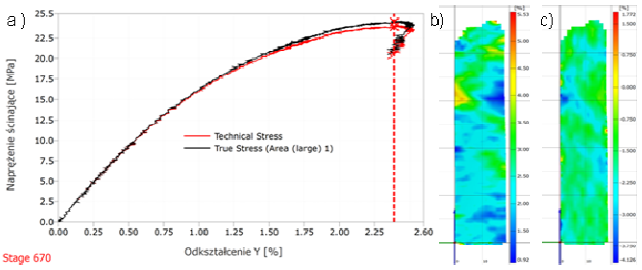
Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że największą wytrzymałością na ścinanie odznaczają się laminaty wzmocnione włóknem węglowym, gdyż średnia wartość naprężenia ścinającego dla tych materiałów była większa w stosunku do laminatów szklanych i aramidowych o odpowiednio 25 i 100% (tab. 1.). Laminaty węglowe charakteryzowały się również największą, wynoszącą 1040 MPa, wartością modułu ścinania i najmniejszym odkształceniem przy ścinaniu równym 4,5%. Co ciekawe, pomimo iż laminaty szklane, które odznaczały się większą wytrzymałością na ścinanie i modułem w stosunku do laminatów aramidowych, charakteryzowały się największą wartością odkształcenia przy ścinaniu sięgającą 8,3%. W przypadku laminatów aramidowych było to o 33% mniejsze odkształcenie. Z kolei wartość współczynnika Poissona układa się według następującej kolejności: laminat aramidowy>laminat węglowy>laminat szklany (tab. 1.).

■ Analiza stanów odkształceń laminatów

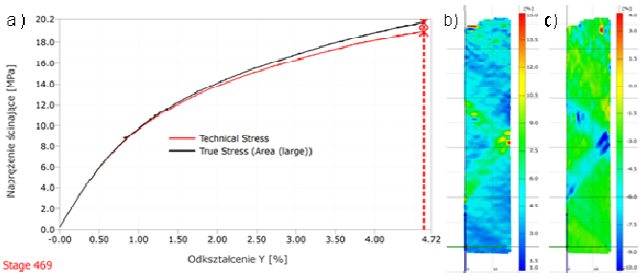
Na rysunkach 6-8 przedstawiono przykładowe wykresy oraz dane obliczeniowe uzyskane w wyniku analizy zarejestrowanych zdjęć.



Rys. 6. Wykres naprężenie–odkształcenie (a) oraz rozkład odkształceń w kierunku osi Y (b) i X (c) przy maksymalnym naprężeniu ścinającym próbki laminatu aramidowego (τ_{12} = 86,8 MPa, ε_y= 2,85%, ε_x=-2,68%)



Rys. 7. Wykres naprężenie–odkształcenie (a) oraz rozkład odkształceń w kierunku osi Y (b) i X (c) przy maksymalnym naprężeniu ścinającym próbki laminatu węglowego (τ_{12} = 23,9 MPa, ε_y = 2,36%, ε_x=-1,85%)



Rys. 8. Wykres naprężenie–odkształcenie (a) oraz rozkład odkształceń w kierunku osi Y (b) i X (c) przy maksymalnym naprężeniu ścinającym próbki laminatu szklanego (τ_{12} = 19,0 MPa, ε_y = 4,52%, ε_x=-3,74%)

Analiza lokalnych odkształceń na powierzchniach próbek laminatów potwierdza wyniki zestawione w tabeli 1. Zarejestrowane obrazy wraz z wykresami zmian naprężenia w funkcji odkształcenia świadczą o występowaniu największych lokalnych odkształceń wzdłużnych (Y) i poprzecznych (X) w przypadku laminatów szklanych, gdyż ich wartość w punkcie o największej wartości naprężenia ścinającego mieści się w zakresie odpowiednio 0,38-15,0% i -10,0-4%. Podobne duże wartości lokalnych odkształceń zarejestrowano dla laminatów aramidowych, gdyż w przypadku osi Y było to 0-12% a dla osi X -10=0,14%. Ponadto uzyskane diagramy odkształceń wyraźnie wskazują na kierunek działania sił ścinających i orientację odkształceń, które pokrywają się z ułożeniem włókien pod kątem 45°.

Podsumowanie

W pracy do scharakteryzowania laminatów epoksydowych wzmocnionych różnym rodzajem tkanin wykorzystano pomiar wytrzymałości na ścinanie wraz z równoczesną analizą lokalnych odkształceń za pomocą systemu Aramis. Pozwolił on ocenić charakter powstałych odkształceń. Ponadto dzięki dodatkowej analizie z dużą dokładnością wy-

znaczono podstawowe wielkości charakteryzujące materiały kompozytowe.

LITERATURA

1. Yokozeki Tomohiro., Aoki Yuichiro, Ogasawara Toshio. „Experimental characterization of strength and damage resistance properties of thin-ply carbon fiber/toughened epoxy laminates". *Compos. Struct.* (2008)82, s. 382-389.
2. Aktas Levent, Altan Cengiz M. "Characterization of nanocomposite laminates fabricated from aqueous dispersion of nanoclay", *Polym. Compos*. (2010)31, s. 620-629.
3. Oczoś K.E. „Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa". *Mechanik*. (2008)7, s. 579-592.
4. Rojek Maciej. „Nieniszczące metody badań polimerów, Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej". *Open Access Library*. (2011)2, s. 32-37.
5. Rojek M., Stabik J., Sokół S. "Fatigue and ultrasonic testing of epoxy-glass composites". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. (2007)20, s. 183-186.
6. Pickerd Vanessa. "Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events, Maritime Division DSTO Defence". *Science and Technology Organisation*. 2013.
7. Smarzewski Piotr. „Stany zarysowania i odkształcenia belek żelbetonowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien". *Biuletyn WAT*. (2014)3, s. 135-145.
8. Golewski Grzegorz L. „Zastosowanie systemu Aramis w badanich odporności na pękanie kompozytów betonowych modyfikowanych dodatkiem popiołów lotnych". *Kompozyty*. (2011)11, s. 3-8.
9. Perret B., Schartel B. i inni. "Novel DOPO-based flame retardants in high-performance carbon fibre epoxy composites for aviation". *Eur. Polym. J.* (2011)47, s. 1081-1089.
10. Avila A.F.A., Morais D.T.S. "Modeling nanoclay effects into laminates failure strength and porosity". *Composite Structures*. (2009)87, s. 55-62.
11. Subramaniyan A.K., Sun C.T. "Interlaminar Fracture Behavior of Nanoclay Reinforced Glass Fiber Composites". *J. Compos. Mater*. (2008)42, s. 2111-2122.
12. Bozkurt E., Kaya E., Tanoglu M. "Mechanical and thermal behavior of non-crimp glass fiber reinforced layered clay/epoxy nanocomposites". *Compos. Sci. Technol*. (2007)67, s. 3394-3406.

Badania realizowane w ramach projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany prze Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.