https://doi.org/10.62753/ctp.2002.03.4.4

Eulalia Klata[1], Izabella Krucińska[3]
Politechnika Łódzka, Katedra Metrologii Włókienniczej, ul. Żeromskiego 116, 90-543 Łódź

Małgorzata Kujawińska[2]
Politechnika Warszawska, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. Chodkiewicza 8, 02-525 Warszawa

Grzegorz Dymny[4]
Fundacja Wdrażania, Wspierania i Rozwoju Technik Optycznych, ul. Chodkiewicza 8, 02-525 Warszawa

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW HYBRYDOWYCH Z UŻYCIEM TECHNIKI INTERFEROMETRII SIATKOWEJ

Interferometria siatkowa jako metoda analizy stosowana w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej umożliwia wykazanie różnic przemieszczeń i odkształceń na powierzchni kompozytów hybrydowych szkło/PA6, zachodzących w procesie rozciągania. Różnice te wynikające z odmiennych właściwości i struktury półproduktu kompozytowego, jakim jest przędza hybrydowa, pozwalają zobrazować wpływ rodzaju użytej przędzy na właściwości mechaniczne kompozytu z niej otrzymanego.

ANALYSIS OF HYBRID COMPOSITE PROPERTIES BY GRATING INTERFEROMETRY METHOD

In this research work the application of grating interferometry method to determination of hybrid composite properties has been presented. The thermoplastic composites have been manufactured from hybrid glass/PA6 yarns used in the form of the knitted fabrics. The hybrid yarns were obtained using four various spinning processes. Each of the manufacturing techniques of hybrid yarns gives a yarn of different appearance and structure:

- **friction spinned (DREF) yarn - a core yarn, a braid from staple thermoplastic multifilaments and a core from glass multifilament (Fig. 1),**
- **twisted yarn - one glass multifilament twisted uniform with two polyamide multifilaments (Fig. 2),**
- **air interlaced yarn - yarn with point joints by fibres shifting againts one another under the influence of compressed air (Fig. 3),**
- **textured yarn - connectedin the length by shifting of filament fibres of both components and forming loop structure on the yarn surface (Fig. 4).**

The mechanical properties of produced hybrid yarns are presented in Table 1.

Each of these spinning methods give the different mechanical properties of yarn, the different blending of fibres in yarn and different adhesion conditions between polyamide 6 and glass surfaces. The thermal pressing of the layer arrangement of knitted fabrics was performed on a hydraulic press in optimal conditions. The tensile, shear and bending tests for these composites were carried out by means of an Instron tester. The mechanical properties of composites are dependent on using yarn.

By grating (moire) interferometry system we can determine the functions $u(x, y)$ and $v(x, y)$ describing the in-plane displacement in x and y direction respectively for composites in tensile test. Grating interferometry requires specimen preparation by replication on its surface a high-frequency diffraction grating (25x25 mm). The setup of grating interferometry system is shown in Figures 5. The maxima of fringes are formed when $u(x, y) = Nd/2$, where $N = 0, 1, 2, ...$ is the fringe number, d is grating period. It means that the interferogram is the displacement map with basic sensitivity equal to half of the specimen grating period. In this work is applied grating with frequency 1200 lines/mm, which gives basic sensitivity 417 nm per fringe.

Figures 6 and 9 show the u and v displacement maps and Figures 7 and 10 show the strains ε_x and ε_y within the 4 x 6 mm obtained for the tensile force 50 N.

For the composite manufactured from the air-interlaced yarn the strains are uniform on all measurement field. This yarn has the highest degree of fibre blending. The highest values of strains are for the composite manufactured from the textured yarn. The mean value of the strains (with the exception of composite manufactured from air-interlaced yarn) in the tensile direction of specimen is higher than perpendicular to the tensile direction of specimen.

WPROWADZENIE

Wytwarzanie kompozytów polimerowych z przędz hybrydowych stanowi modyfikację kompozytów w kierunku polepszenia ich właściwości mechanicznych. Półprodukty otrzymane z przędz hybrydowych charakteryzujące się znacznie niższą sztywnością zginania w stosunku do wyrobów wytworzonych z samych włókien wzmacniających stwarzają ponadto możliwość formowania gotowych elementów trójwymiarowych o skomplikowanych kształtach, bez konieczności wprowadzania dodatkowych połączeń, z użyciem technik dziewiarskich czy tkackich.

[1] mgr inż., [2] prof. dr hab. inż., [3] dr hab. inż., [4] mgr inż

W kompozytach termoplastycznych o wzmocnieniu z włókien ciągłych właściwości wytrzymałościowe są kontrolowane głównie przez właściwości mechaniczne włókien wzmacniających. Przędze hybrydowe w układzie włókna wzmacniające/włókna termoplastyczne, o zbliżonej masie liniowej i zbliżonym procentowym udziale masowym włókien 50/50 otrzymane różnymi systemami przędzalniczymi, wykazują różną strukturę, różny stopień wymieszania włókien. Stworzone są zatem różnorodne warunki zwilżalności włókien wzmacniających przez roztopione włókna termoplastyczne w procesie prasowania. Efektem tego jest różna adhezja osnowy do wzmocnienia kształtująca warstwę graniczną tzw. interfazę, która również decyduje o właściwościach mechanicznych kompozytów. Testy rozciągania, zginania, ścinania przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron wykazały zależność wartości wskaźników wytrzymałościowych kompozytów od rodzaju zastosowanej przędzy [1].

Porównanie właściwości kompozytów wykonanych z przędz różniących się strukturą możliwe jest również dzięki zastosowaniu metody optycznej, tj. interferometrii siatkowej ze sprzężonymi rzędami dyfrakcyjnymi, zwanej historycznie interferencyjną metodą mory [2]. Metoda ta jest od początku lat osiemdziesiątych jedną z nowocześniejszych metod analizy w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej. Szerokie zastosowanie znalazła m.in. do badań stałych materiałowych, niejednorodnych właściwości sprężystych, efektów brzegowych, zjawiska pękania, detekcji defektów, zjawisk termicznych oraz naprężeń resztkowych w materiałach kompozytowych [3, 4]. Technika interferometrii siatkowej umożliwia pomiar przemieszczeń w płaszczyźnie z submikronową czułością, wysokim kontrastem i dużym stosunkiem sygnału do szumu. Ze względu na duży zakres pomiarowy oraz możliwość prowadzenia badania w małym polu rzędu 1 mm^2 metoda ta pozwala na zaobserwowanie dużych koncentracji naprężeń w najniebezpieczniejszych miejscach próbki pod dużym powiększeniem przy zachowaniu dobrego kontrastu prążków. Wykorzystując w badaniach interferometr wyposażony w automatyczny analizator obrazów prążkowych bazujący na metodzie dyskretnej zmiany fazy, można określić różnice przemieszczeń i odkształceń występujących bezpośrednio podczas rozciągania na powierzchni próbek kompozytów poprzez pomiar składowych przemieszczeń u i v oraz wyznaczenie map odkształceń ε_x i ε_y.

Celem badań było określenie techniką interferometrii siatkowej wpływu struktury wyrobu włókienniczego, jakim jest przędza hybrydowa, na właściwości mechaniczne kompozytu z niej otrzymanego, wyznaczone w teście rozciągania. Wyznaczenie w procesie rozciągania różnic przemieszczeń i odkształceń na powierzchni próbek kompozytowych szkło/PA6 wytworzonych w jednakowych warunkach temperaturowo-czasowo-ciśnieniowych pozwoli określić znaczenie budowy strukturalnej przędzy w projektowaniu kompozytów o określonych właściwościach.

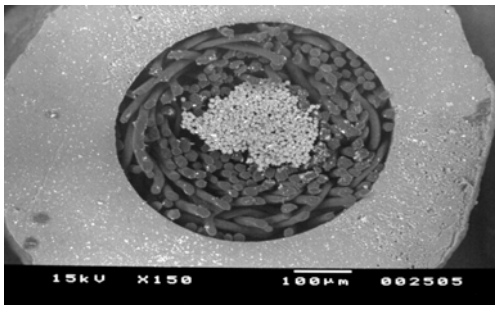
MATERIAŁ BADAŃ

Badaniom poddano próbki kompozytów szkło/PA6 wytworzonych z przędz hybrydowych użytych w postaci dzianin.

Przędze hybrydowe o masie liniowej ok. 120 tex złożone z multifilamentów szklanych pokrytych preparacją proadhezyjną do poliamidu 6, tj. aminosilanową z dodatkiem dyspersji żywicy poliuretanowej (produkcji Krośnieńskich Hut Szkła) i multifilamentów z poliamidu 6 (produkcji Zakładów Włókien Chemicznych Gorzów Wlkp.), zostały wytworzone czterema różnymi systemami przędzalniczymi. Wybrane techniki przędzalnicze zapewniły otrzymanie przędz o różnej strukturze, o różnym stopniu wymieszania włókien szklanych i termoplastycznych oraz różnej wytrzymałości na zerwanie. Wymieszanie włókien odgrywa istotną rolę w procesie zwilżania włókien szklanych stopionym polimerem podczas tworzenia kompozytu, co wpływa na adhezję między składnikami, a zatem na właściwości mechaniczne kompozytu.

Przędze hybrydowe wytworzono następującymi technikami:

- przędzenia frykcyjnego - rdzeń przędzy z multifilamentu szklanego oraz oplot z włókien ciętych poliamidowych (rys. 1),



Rys. 1. Widok poprzeczny przędzy DREF

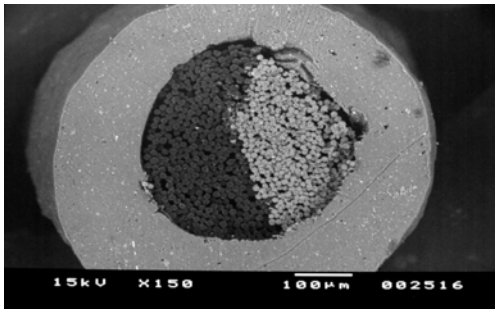
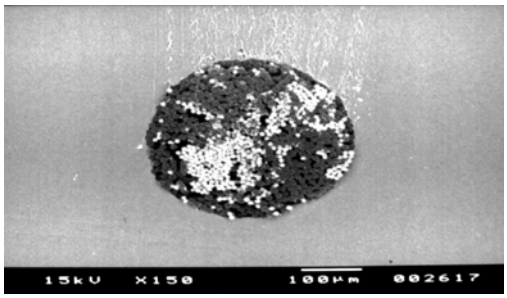


Fig. 1. A view of the cross-section of DREF yarn

Rys. 2. Widok poprzeczny przędzy skręcanej

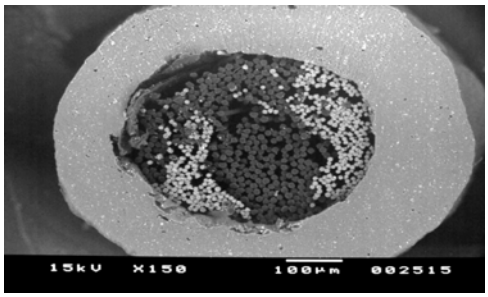
Fig. 2. A view of the cross-section of twisted yarn

- skręcania - multifilament szklany równomiernie skręcony z dwoma multifilamentami poliamidowymi (rys. 2),
- sczepiania pneumatycznego - punktowo przeplecone poszczególne dwa rodzaje multifilamentów (rys. 3),
- teksturowania pneumatycznego - za pomocą strumienia sprężonego powietrza działającego na przesuwające się multifilamenty następuje przemieszczenie włókien oraz tworzy się rozbudowana powierzchnia zewnętrzna przędzy (rys. 4).



Rys. 3. Widok poprzeczny przędzy sczepianej pneumatycznie

Fig. 3. A view of the cross-section of air-interlaced yarn



Rys. 4. Widok poprzeczny przędzy teksturowanej pneumatycznie

Fig. 4. A view of the cross-section of textured yarn

Charakterystykę właściwości mechanicznych wytworzonych przędz hybrydowych przedstawia tabela 1.

Kompozyty wytworzono z pakietu płaskich wyrobów włókienniczych, tj. dzianin otrzymanych z wyżej przedstawionych przędz hybrydowych, na prasie hydraulicznej w optymalnych warunkach [5]. Do interferometrycznych badań przemieszczeń i odkształceń na powierzchni kompozytów w procesie rozciągania użyto próbek o wymiarach 250x25x2 mm, do których przyklejono uchwyty służące do zamocowania w maszynie wytrzymałościowej. Próbki wycięte były wzdłuż kolumienek dzianin. Na próbkach naklejono w centralnej części siatkę dyfrakcyjną 1200 linii/mm o wymiarach 25x50 mm, z której wybrano pole pomiarowe 4x6 mm w pobliżu osi rozciągania próbki.

METODYKA BADAŃ

Do pomiaru przemieszczeń/odkształceń zastosowano metodę interferometrii siatkowej. Pomiary przeprowadzono na interferometrze wyposażonym w automatyczny analizator obrazów prążkowych bazujący na metodzie dyskretnej zmiany fazy DZF [6, 7].

Czterowiązkowy interferometr siatkowy z głowicą trójzwierciadlaną (rys. 5) umożliwia pomiar przemieszczeń na powierzchni badanej próbki w obu kierunkach, w maksymalnym polu pomiarowym 25x25 mm z dokładnością do $\lambda/40$. Interferometr jest przystosowany do pracy z siatkami o częstości 1200 l/mm, których kąt ugięcia +1, –1 rzędu dyfrakcyjnego wynosi 49,24° przy oświetleniu wiązką lasera He-Ne o długości fali λ = 632,8 nm. Interferometr jest umieszczony na stole antywibracyjnym podpartym czteropunktowo, tylko laser He-Ne, głównie ze względu na jego wielkość, został zamocowany na półce znajdującej się pod stołem.

Liniowo spolaryzowana wiązka laserowa poprzez układ zwierciadeł jest kierowana równolegle do po-

TABELA 1. **Wartości wskaźników wytrzymałościowych dla przędz hybrydowych**
TABLE 1. **A values of strength parameters for hybrid yarns**

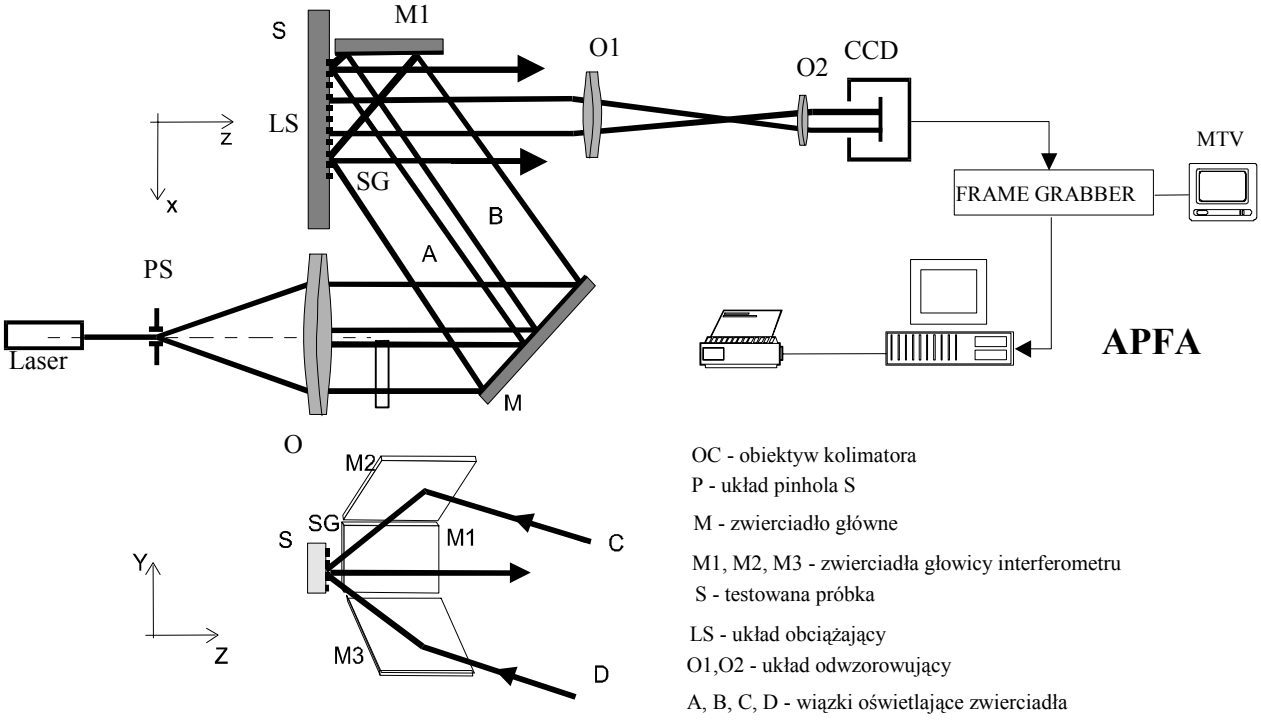
Lp.	Rodzaj przędzy	Masa liniowa tex	Wytrzymałość przędzy na zerwanie, cN/tex	$V_{wytrz.}$ %	Wydłużenie przy zerwaniu, %	$V_{wydł.}$ %
1	Szkło 68 tex x 1 + PA6 26 tex x 2 **Frykcyjna DREF**	135,0	26,1	8,4	2,6	8,2
2	Szkło 68 tex x 1+PA6 26 tex x 2 **Skręcana 90 skr/m**	115,0	I zerwanie 27,0 II zerwanie 17,9	16,7 -	2,0 33,7	20,0 -
3	Szkło 68 tex x 1 + PA6 26 tex x 2 **Sczepiana**	123,8	I zerwanie 19,7 II zerwanie 15,8	10,6 12,2	3,8 7,2	13,9 31,5
4	Szkło 68 tex x 1 + PA6 26 tex x 2 **Teksturowana**	119,0	I zerwanie 16,3 II zerwanie 16,0	17,0 6,5	2,2 26,6	43,8 35,8

* I zerwanie dotyczy włókien szklanych; II zerwanie dotyczy włókien poliamidowych
* $V_{wytrz.}$, $V_{wydł.}$ - współczynniki zmienności

wierzchni stołu, filtrowana i rozszerzana przez zespół pinhola, a także obcinana do odpowiedniej średnicy przysłoną, zapewniając oświetlenie kolimatora wiązką tylko w całej jego średnicy.

Wyznaczenie odkształceń z otrzymanych pól przemieszczeń dokonywane było poprzez numeryczne różniczkowanie: $\varepsilon_x = \partial u/\partial x$, $\varepsilon_y = \partial v/\partial y$.

Z map przemieszczeń wyznaczano mapy i profile od-



Rys. 5. Konfiguracja optomechanicznego, trójzwierciadlanego, laboratoryjnego, systemu interferometru siatkowego

Fig. 5. Principles setup of grating interferometry

WYKONANIE BADAŃ

Pomiary na interferometrze laboratoryjnym były poprzedzone odpowiednim przygotowaniem próbki do badań. Na powierzchnię próbki została przyklejona za pomocą żywicy epoksydowej siatka przedmiotowa tak, aby linie siatki przedmiotowej były prostopadłe i równoległe do krawędzi próbki. Orientacja układu współrzędnych podczas pomiaru była taka, aby kierunek u był prostopadły do wykonanego nacięcia, zaś kierunek v był do niego równoległy. Próbkę mocowano w stanowisku mechaniczno-optycznym. Oś optyczna układu pomiarowego przebiegała mniej więcej w środku zamierzonej przestrzeni pomiarowej.

Następnie dokonywano pomiaru składowych (prostopadłej u i równoległej v do linii rozciągania) przemieszczeń w płaszczyźnie na interferometrze siatkowym. Zewnętrzne obciążenie rozciągające próbkę wynosiło 50 N. Po ustaleniu obciążenia i wzrokowym sprawdzeniu na monitorze układu prążków interferencyjnych rejestrowano interferogramy w postaci szaroodcieniowego pliku typu *.BMP o rozdzielczości 512x512 pikseli i 256 odcieniach szarości (dla kierunku u: pr1_u.bmp oraz dla v pr1_v.bmp). Z interferogramów uzyskiwano mapy przemieszczeń u i v.

kształceń ε_x i ε_y.

Akwizycja i analiza obrazów prążkowych dokonana była za pomocą oprogramowania Fringe Application v.3.12 (opracowanego w IMiF PW). Oprogramowanie to obliczone mapy przemieszczeń i odkształceń zapisuje w postaci charakterystycznych dla tego oprogramowania plików *.PHF.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

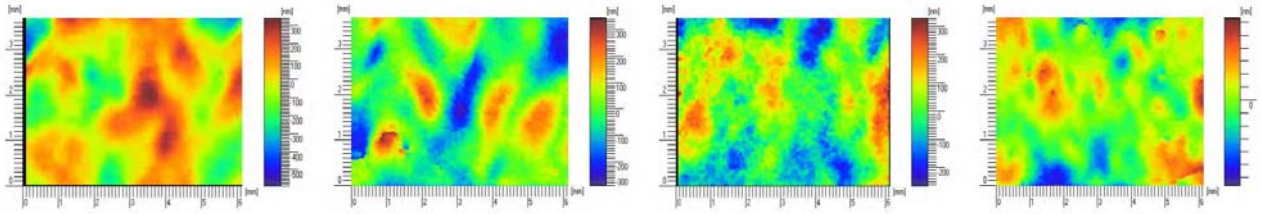
Otrzymane metodą interferometrii siatkowej rozkłady przemieszczeń v w kierunku rozciągania próbki, przemieszczeń u w kierunku prostopadłym do kierunku rozciągania próbki, odkształceń wzdłużnych ε_y i odkształceń poprzecznych ε_x powstały z rozkładu prążków interferometrycznych. Prążki te otrzymuje się dla całego pola pomiarowego.

Dwuwymiarowe barwne mapy przedstawiają rozkłady przemieszczeń i odkształceń w warstwie zewnętrznej próbki kompozytowej podczas procesu rozciągania. Rozmieszczenie barw i ich intensywność umożliwia analizę badanych parametrów. Dla kompozytów wytworzonych z poszczególnych przędz hybrydowych porów-

nano otrzymane mapy. Zauważyć można różnice w zależności od kierunku badania oraz rodzaju kompozytu.

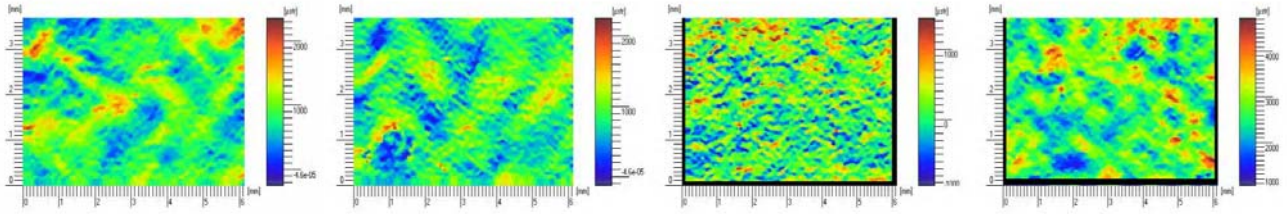
Przemieszczenia w kierunku rozciągania próbki są zazwyczaj większe niż w kierunku przeciwnym (rys. rys. 6 i 9), jedynie w przypadku kompozytu z przędzy teksturowanej różnice te są niewielkie.

kompozyt z przędzy **skręcanej (twisted)** | kompozyt z przędzy **DREF (DREF)** | kompozyt z przędzy **sczepianej (air-interlaced)** | kompozyt z przędzy **teksturowanej (textured)**



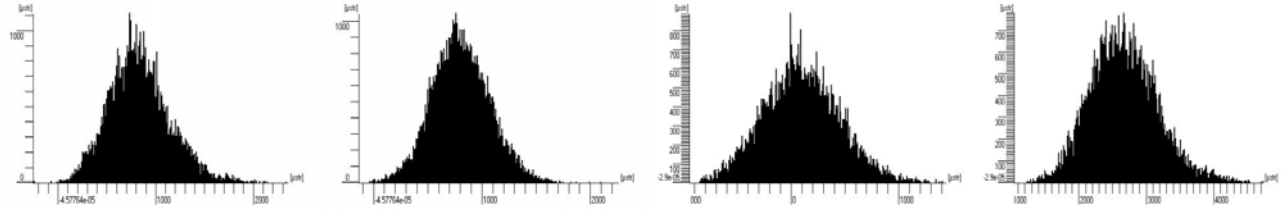
Rys. 6. Przemieszczenia w kierunku rozciągania próbki $v(x,y)$ podczas obciążenia siłą 50 N

Fig. 6. The displacements in the tensile direction of specimen $v(x,y)$ for tensile force 50 N



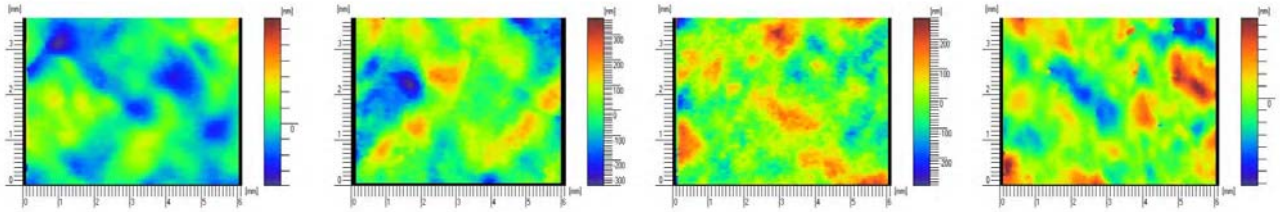
Rys. 7. Odkształcenia w kierunku rozciągania próbki $\varepsilon_y(x,y)$ podczas obciążenia siłą 50 N

Fig. 7. The strains in the tensile direction of specimen $\varepsilon_y(x,y)$ for tensile force 50 N



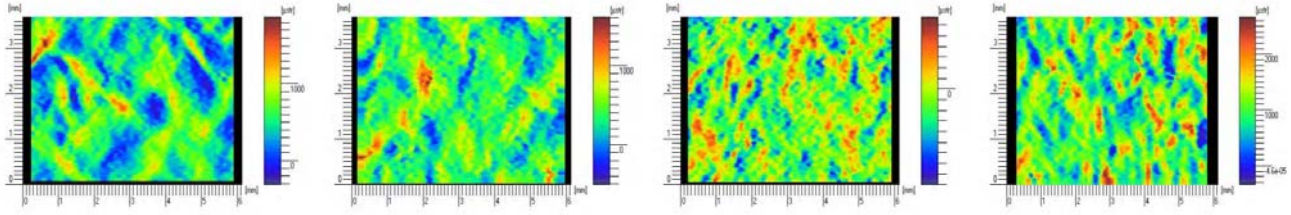
Rys. 8. Histogram składowych odkształceń w kierunku rozciągania próbki $\varepsilon_y(x,y)$ podczas obciążenia siłą 50 N

Fig. 8. The histogram of strain components in the tensile direction of specimen $\varepsilon_y(x,y)$ for tensile force 50 N



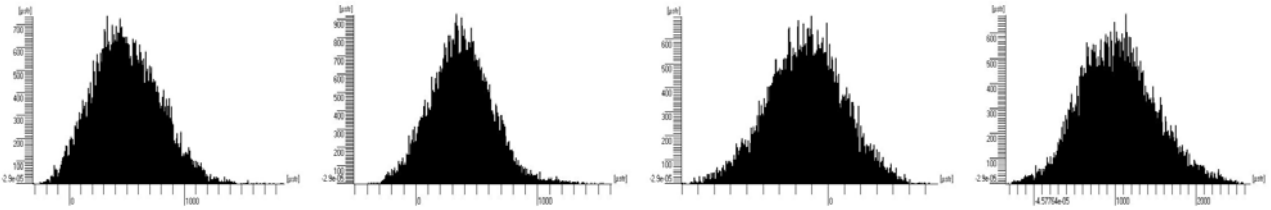
Rys. 9. Przemieszczenia w kierunku prostopadłym do kierunku rozciągania próbki $u(x,y)$ podczas obciążenia siłą 50 N

Fig. 9. The displacements perpendicular to the tensile direction of specimen $u(x,y)$ for tensile force 50 N



Rys. 10. Odkształcenia w kierunku prostopadłym do kierunku rozciągania próbki $\varepsilon_x(x,y)$ podczas obciążenia siłą 50 N

Fig. 10. The strains perpendicular to the tensile direction of specimen $\varepsilon_x(x,y)$ for tensile force 50 N



Rys. 11. Histogram składowych odkształceń w kierunku prostopadłym do kierunku rozciągania próbki $\varepsilon_x(x,y)$ podczas obciążenia siłą 50 N

Fig. 11. The histogram of strain components perpendicular to the tensile direction of specimen $\varepsilon_x(x,y)$ for tensile force 50 N

Poszczególne kompozyty wykazują odmienny charakter odkształceń. Odkształcenia o podobnej wielkości zachodzące na badanej powierzchni próbek są równomiernie rozmieszczone w przypadku kompozytu otrzymanego z przędzy sczepianej, a także, w mniejszym stopniu, kompozytu otrzymanego z przędzy teksturowanej. Przędze te, zbliżone w swojej budowie strukturalnej, odznaczają się wysokim stopniem wymieszania włókien składowych.

Równomierny rozkład włókien w przędzy hybrydowej prowadzi zatem do powstania w kompozycie równomiernie rozmieszczonych odkształceń w bliskich od siebie odległościach. Z kolei podobnej wielkości odkształcenia występujące na dużych obszarach, nierównomiernie rozmieszczonych, obserwuje się przy niskim stopniu wymieszania włókien w przędzy hybrydowej (rys. rys. 7 i 10).

Rozkład wartości odkształceń w polu pomiarowym przedstawiają histogramy (rys. rys. 8 i 11). Dla badanych kompozytów (z wyjątkiem kompozytu z przędzy sczepianej) średnia wartość odkształceń w kierunku rozciągania próbki jest większa niż w kierunku prostopadłym do niego. Największe odkształcenia występują w kompozycie z przędzy teksturowanej pneumatycznie, w obu badanych kierunkach.

LITERATURA

[1] Krucińska I., Klata E., Ankudowicz W., Dopierała H., Influence of the structure of hybrid yarns on the mechanical properties of thermoplastic composites, Fibres and Textiles in Eastern Europe 2001, 9, 2.

[2] Post D., Moire Interferometry, SEM Handbook on Experimental Mechanics, Chapter 7, ed. by Kobayashi, Prentice Hall Inc. 1987.

[3] Kujawińska M., Automated in-plane moiré and grating interferometry, (w:) Optical Methods in Experimental Mechanics, ed. K.H. Laerman, Springer, Vien 2000.

[4] Deason V.A., Epstein J.S., Abdallah M.G., Theory and applications, Opt. and Las. in Eng. 1990, 12.

[5] Krucińska I., Mikołajczyk T., Klata E., Studies on selecting conditions of manufacturing of composites glass/PA6 from hybrid textile products, Fibres and Textiles in Eastern Europe 2000, 8, 4.

[6] Kujawińska M., Zastosowanie zautomatyzowanej interferometrii siatkowej do analizy pól przemieszczeń/odkształceń i lokalnych stałych materiałowych, Przegląd Mechaniczny 1997, 9.

[7] Sałbut L., Patorski K., Kujawińska M., Polarization approach to high-sensitivity moire interferometry, Opt. Eng. 1992, 31, 3.

Recenzent
Józef Koszkul