

dr hab. Tadeusz Szymczak¹, prof. Zbigniew L. Kowalewski²

¹⁾ Zakład Homologacji i Badań Pojazdów
Instytut Transportu Samochodowego
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa
E-mail: tadeusz.szymczak@its.waw.pl

²⁾ Zakład Mechaniki Doświadczalnej
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa
E-mail: zkowalew@ippt.pan.pl

**Badania wytrzymałościowe kompozytu polimerowo-szklanego
w celu oceny jego przydatności eksploatacyjnej
na płyty osłony balistycznej**

Słowa kluczowe: kompozyt, zbrojenie, anizotropia, krzywa rozciągania, właściwości mechaniczne, struktura, degradacja, pękanie, delaminacja

Streszczenie: Praca dotyczy badania zachowania kompozytu polimerowo-szklanego pod obciążeniem rozciągającym w celu wyznaczenia zmian charakterystyki rozciągania, właściwości mechanicznych oraz cech stref uszkodzeń istotnych dla eksploatacji i oceny stanu technicznego wytworzonych z niego komponentów. Zaprezentowano wybrane szczegóły wykorzystanej techniki badawczej. Zamieszczono charakterystyki rozciągania kompozytu polimerowo-szklanego, wyznaczone z użyciem próbek pobranych z różnych kierunków, ze wskazaniem wartości modułu Younga, granicy sprężystości i plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie. Omówiono wpływ liczby warstw zbrojenia, procentowej zawartości włókien szklanych oraz żywicy na wyznaczone parametry mechaniczne.

1. Wprowadzenie

Kompozyty tworzywowe ze zbrojeniem są szczególnym rodzajem materiału zarówno ze względu na ich cechy geometryczne, właściwości, jak i technologię wykorzystywaną do ich wytwarzania [14, 16]. W porównaniu do materiałów metalicznych jak na przykład: stale i stopy, mają one budowę warstwową z określoną konfiguracją zbrojenia względem matrycy i udziałem objętościowym wymienionych składników. Ich rodzaj, ułożenie oraz zawartość w sposób bezpośredni decydują o właściwościach mechanicznych kompozytu, dając produkt do stosowania w określonej gałęzi przemysłu [18]. Do ich zbrojenia wykorzystuje się różnego rodzaju włókna szklane, zawierające w swoim składzie chemicznym głównie: SiO_2 , Al_2O_3 oraz CaO [9, 13]. Ich parametry mechaniczne w postaci modułu Younga (E), wytrzymałości na rozciąganie (R_m) oraz wydłużenia mieszczą się odpowiednio w następujących granicach: $51.7 \div 85.5$ [GPa], $2.415 \div 4.890$ [GPa] oraz $4.4 \div 5.7$ [%]. W połączeniu z matrycą tworzywową (poliestrową, epoksydową, poliamidową [19]) można uzyskać kompozyty o stosunkowo szerokim zakresie wartości parametrów mechanicznych: $E = 80.5 \div 43\,700$ MPa, $R_m = 64 \div 785$ MPa, $A_x = 0.02 \div 20$ % [13]. Kompozyty tworzywowe znajdują głównie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym [14], lotniczym i zbrojeniowym [14] oraz budowlanym [1, 11]. W przypadku dwóch pierwszych, rola tego rodzaju materiałów związana jest głównie z obniżaniem nominalnej masy środków transportu. Przemysł zbrojeniowy wykorzystuje ten

rodzaj materiałów dla podwyższenia odporności balistycznej pojazdów VIP oraz wojskowych [14]. W przemyśle budowlanym, kompozyty znajdują zastosowanie do wytwarzania prętów zbrojeniowych [1, 11] dla zwiększenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji [1].

W zakresie prac doświadczalnych, dotyczących określania właściwości kompozytów, znajdują się próby polegające na wyznaczeniu wpływu rodzaju zbrojenia na parametry mechaniczne w warunkach działania obciążenia rozciągającego oraz udarowego [12]. Realizowane są również badania dla wyznaczenia roli procentowej zawartości zbrojenia na mikrotwardość, granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie, [10]. Wykonywane są także testy określające zmiany właściwości mechanicznych na próbkach pobieranych z różnych kierunków względem osi symetrii płyty [3, 7]. Wyniki wspomnianych badań pokazują jednak jedynie zależność naprężenie-odkształcenie i zmiany wytrzymałości na rozciąganie, bez informacji o module Younga, granicy proporcjonalności, sprężystości i plastyczności [3]. Niektóre laboratoria przeprowadzają testy ścinania na próbkach z karbem V, mocowanych w specjalnie zaprojektowanym przyrządzie (próba Iosipescu) [8]. Charakteryzacja właściwości mechanicznych kompozytów obejmuje często próby zginania, które przykładowo można wykorzystywać do oceny wpływu rodzaju warstwy zbrojenia na wytrzymałość, ugięcie przy sile maksymalnej oraz moduł Younga [4] lub pozyskania danych z zakresu sprężystego do modelowania zachowania kompozytu pod obciążeniem w próbie trójpunktowego zginania [5]. W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania dotyczące odporności kompozytów na uderzenie z różnymi wartościami energii kinetycznej oraz określenia wpływu rodzaju obciążenia na charakterystykę naprężenie-odkształcenie wyznaczaną w próbie trójpunktowego zginania [6]. Analizowane są strefy uszkodzeń kompozytów z różnymi rodzajami zbrojeń z użyciem techniki SEM poddawanych rozciąganiu i zginaniu [2]. Badania te często są wspomagane zastosowaniem techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC) [17]. Prezentacja wyników takich testów zawiera połowe rozkłady odkształcenia i zmiany modułu Younga oraz współczynnika Poissona w funkcji odkształcenia głównego w zależności od kierunku pobierania próbki. Daje to znakomitą podstawę do wskazywania miejsc o najlepszych lub najgorszych właściwościach mechanicznych. W zakresie prób stanowiskowych z użyciem rozpatrywanego materiału wykonywane są testy ostrzału w celu określenia odporności balistycznej zarówno kompozytu tworzywowego, jak również pozostałych komponentów tworzących wspólnie z nim osłonę przed oddziaływaniem pocisku i ładunku wybuchowego [15].

Wprowadzenie kompozytu do użytkowania odbywa się zwykle na podstawie danych znajdujących się w karcie produktu podającej dane o: gęstości, udarności, granicy plastyczności, module Younga, wytrzymałości na ściskanie oraz ścinanie w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, współczynnika rozszerzalności cieplnej i przewodności cieplnej [20]. W praktyce, kompozyty poddawane są nie tylko prostym stanom obciążenia, ale również złożonym z uwzględnieniem obrotu kierunków składowych naprężenia głównego względem kierunku o najkorzystniejszych właściwościach mechanicznych. W efekcie, występujące w materiale wartości naprężenia mogą przekraczać wartości parametrów krytycznych w niektórych kierunkach, co może prowadzić do wcześniejszego, niż wstępnie założono, powstania uszkodzeń, ich rozwoju i ostatecznie pęknięcia. W celu wyeliminowania takiego przypadku, właściwości mechaniczne kompozytu powinny być wyznaczane w minimum trzech kierunkach, dając pełniejszą wiedzę obejmującą charakterystykę naprężenie-odkształcenie oraz właściwości mechaniczne badanego materiału. Dodatkowo, ze względu na specyfikę degradacji kompozytów tworzywowych ze zbrojeniem, należy prowadzić

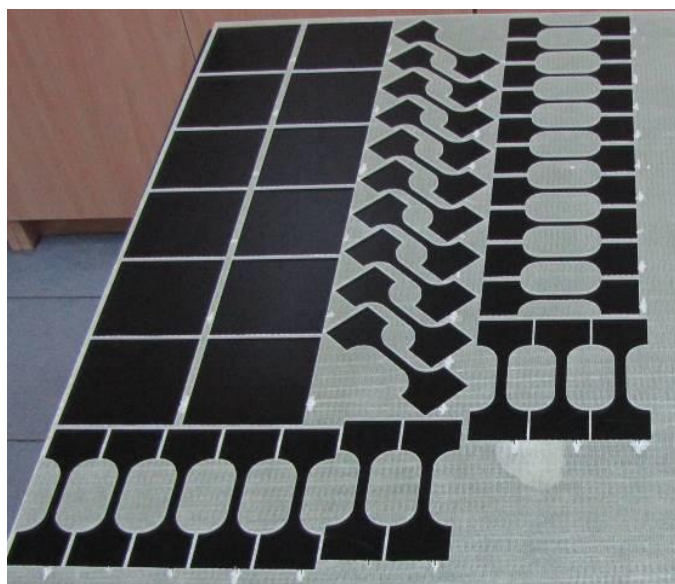
obserwacje mikroskopowe strefy zniszczenia. Dopiero zestawienie wyników badań pochodzących z prób mechanicznych na materiale pobranym z kilku kierunków z rezultatami SEM i makrofotografii umożliwia wnioskowanie o zachowaniu kompozytu przy konkretnym obciążeniu. Dlatego też, za cel pracy przyjęto charakteryzację kompozytu polimerowo-szklanego podczas rozciągania w celu określenia zależności naprężenie-odkształcenie, wartości parametrów mechanicznych i cech zniszczenia.

2. Szczegóły techniki badawczej do określania anizotropii właściwości mechanicznych

Kompozyt poddany badaniu oznaczony był cechą CD600 i miał następującą liczbę warstw zbrojenia: 3, 6 oraz 10. Wraz ze zmianą liczby warstw zmieniała się procentowa zawartość włókien szklanych i żywicy oraz grubość, tab.1. Zmiany w cechach fizykochemicznych badanego materiału można zaobserwować poprzez kolor, refleksyjność i przepuszczalność światła, tab. 2.

Tab. 1. Właściwości fizyczne kompozytu polimerowo-szklanego CD600





Nr próbki	Nazwa kompozytu	Liczba warstw zbrojenia	Masa [kg]	Zawartość włókien szklanych [%]	Zawartość żywicy [%]	Grubość [mm]
2	CD600	3	3.34	53.6	46.4	2.30
3		6	4.3	67	33	3.20
5		10	7	68.6	31.4	4.90



Rys. 1. Rozmieszczenie próbek do badania rozciągania (próbki płaskie) i przebijalności (próbki w kształcie kwadratu) w kompozycie polimerowo-szklanym CD600. Ze względu na założenie możliwości występowania anizotropii właściwości mechanicznych kompozytu, próbki wycinano w trzech kierunkach: 0°, 45° i 90° (rys. 1). Następnie

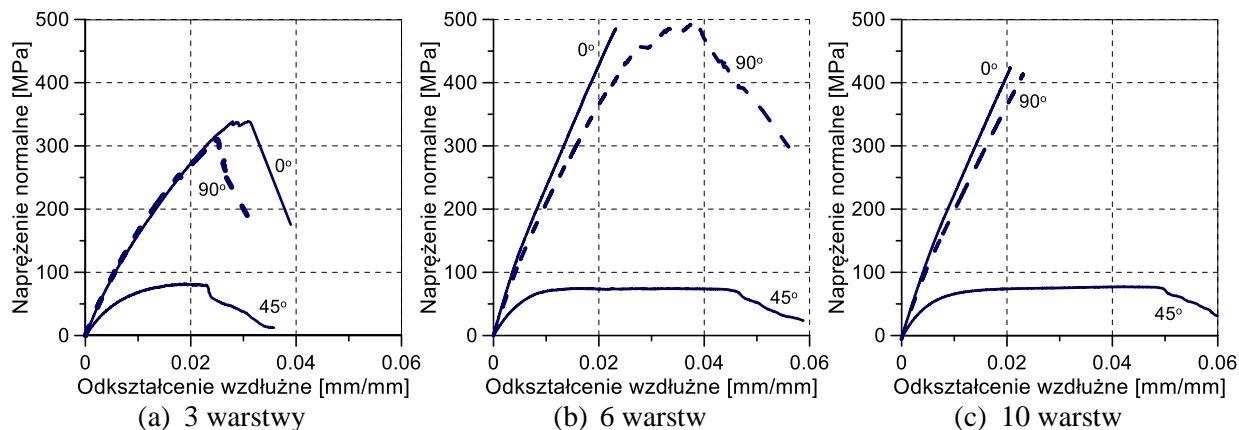
poddawano je rozciąganiu, otrzymując charakterystyki naprężenie-odkształcenie (rys. 2, 3), a na ich podstawie wartości następujących parametrów mechanicznych: moduł Younga, granice sprężystości i plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie (tab. 3). Zmiany wyznaczonych parametrów mechanicznych rozpatrywano w funkcji liczby warstw maty zbrojącej (rys. 4), kierunku, z którego pobierano materiał (rys. 5), procentowej zawartości włókien szklanych (rys. 7) oraz żywicy (rys. 8).

Tab. 2. Widok warstwy zewnętrznej kompozytu CD600 w zależności od liczby warstw zbrojących

Nr próbki	Nazwa kompozytu	Zdjęcie kompozytu	Mata Unifilo M 861-450 będąca zbrojeniem badanego kompozytu
2	CD600 (3 warstwy zbrojenia)		
3	CD600 (6 warstw zbrojenia)		
5	CD600 (10 warstw zbrojenia)		

3. Właściwości mechaniczne i struktura kompozytu poddanego rozciąganiu

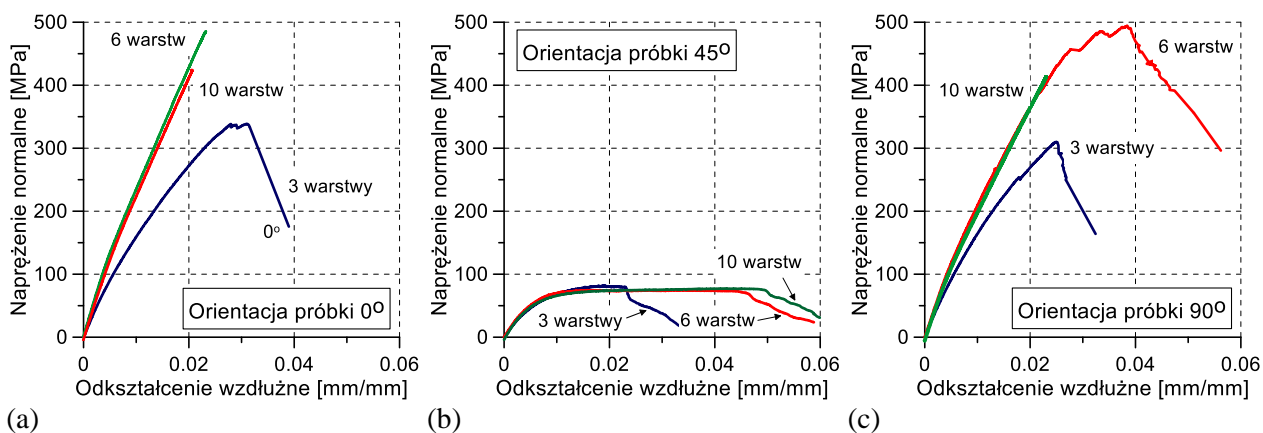
Zachowanie badanego kompozytu w warunkach rozciągania było zależne od liczby warstw zbrojenia, kierunku z którego pobierano próbki i procentowej zawartości tworzących go składników. Przejawiało się różnicami w kształcie charakterystyki rozciągania i wyznaczanych na jej podstawie wartościach właściwości mechanicznych (rys. 2). W przypadku kompozytu z trzema warstwami zbrojenia, każda z wyznaczonych charakterystyk naprężenie-odkształcenie reprezentowała sprężysto-plastyczne zachowanie badanego materiału z odcinkiem niestateczności (rys. 2a), wskazując na zdolność badanego materiału do przenoszenia obciążenia mechanicznego jeszcze po uzyskaniu wytrzymałości na rozciąganie. Dwukrotne zwiększenie liczby warstw zbrojenia skutkowało znacznymi różnicami w zależności naprężenie-odkształcenie dla kierunku 0 i 90°, prezentując odpowiednio quasi liniowo-sprężyste i sprężysto-plastyczne z odcinkiem niestateczności zachowanie kompozytu przy prawie jednakowej wartości wytrzymałości na rozciąganie (rys. 2b).



Rys. 2. Charakterystyki rozciągania kompozytu CD600 o różnej liczbie warstw zbrojących pobranych z trzech kierunków: 0°, 45°, 90°

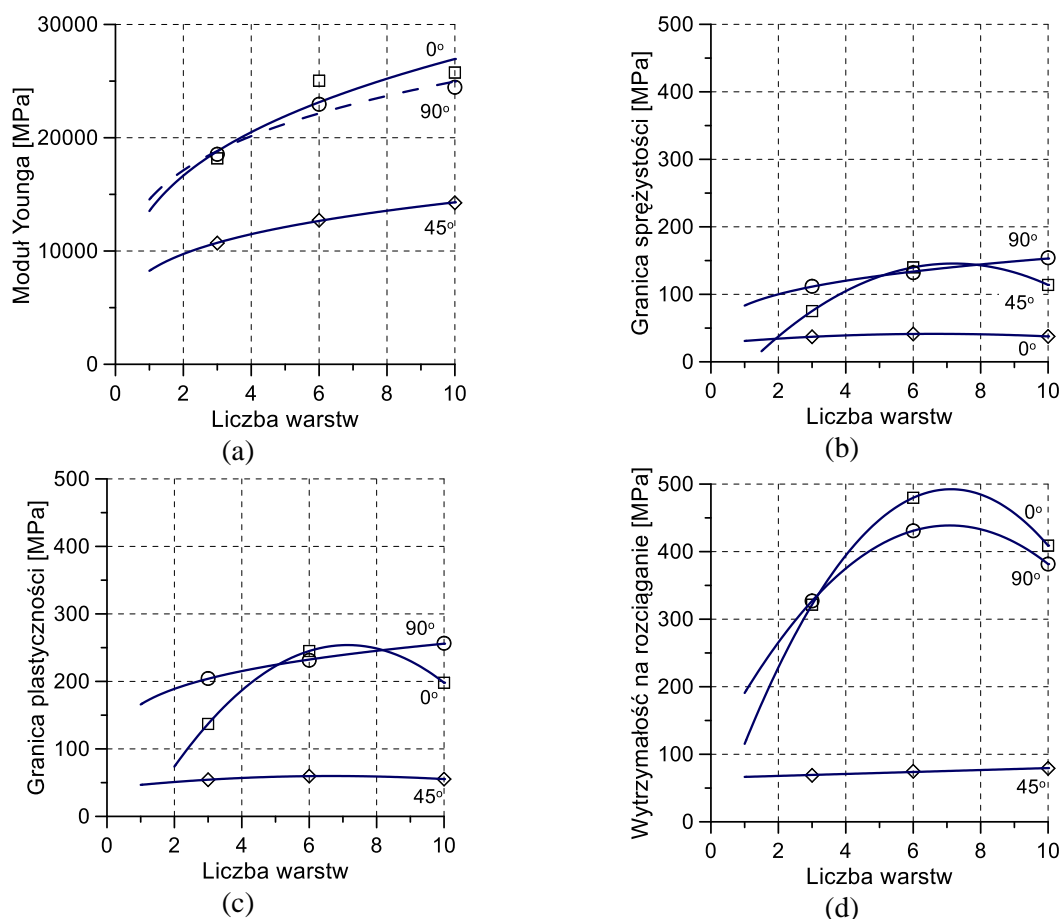
Tab. 3. Parametry mechaniczne kompozytu CD600 w zależności od liczby warstw zbrojenia i kierunku pobierania materiału do badań

Liczba warstw zbrojenia	Kierunek pobierania materiału	Moduł Younga [MPa]	Granica sprężystości [MPa]	Granica plastyczności [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
3	0°	18 179	75	137	322
	45°	10 701	37	54	69
	90°	18 542	112	204	327
6	0°	25 034	140	245	480
	45°	12 719	41	60	75
	90°	22 953	132	231	431
10	0°	25 753	114	198	409
	45°	14 256	38	55	79
	90°	24 455	154	257	382



Rys. 3. Porównanie charakterystyk rozciągania kompozytu CD600 z różną zawartością warstw maty zbrojącej, określonych dla trzech kierunków poboru próbek: 0° (a), 45° (b), 90° (c)

Kompozyt mający 10 warstw zbrojenia (rys. 2c) nie miał istotnych różnic w charakterystyce rozciągania dla kierunku 0 i 90°, wykazując jednocześnie wartości wytrzymałości na rozciąganie niższe niż otrzymane dla kompozytu z 6-oma warstwami (rys. 2b i 3a, c). W przypadku kompozytu testowanego w kierunku 45°, poza zmianą krzywej rozciągania wykazującej sprężysto-plastyczne zachowanie kompozytu z cechami niestateczności na sprężysto-plastyczne z efektem „plateau” dla wytrzymałości na rozciąganie i odcinkiem niestatecznego zachowania, różnice w wartościach wytrzymałości na rozciąganie były niewielkie. Świadczy to o braku wpływu liczby warstw na wspomniany parametr (rys. 2, 3b, tab. 3).



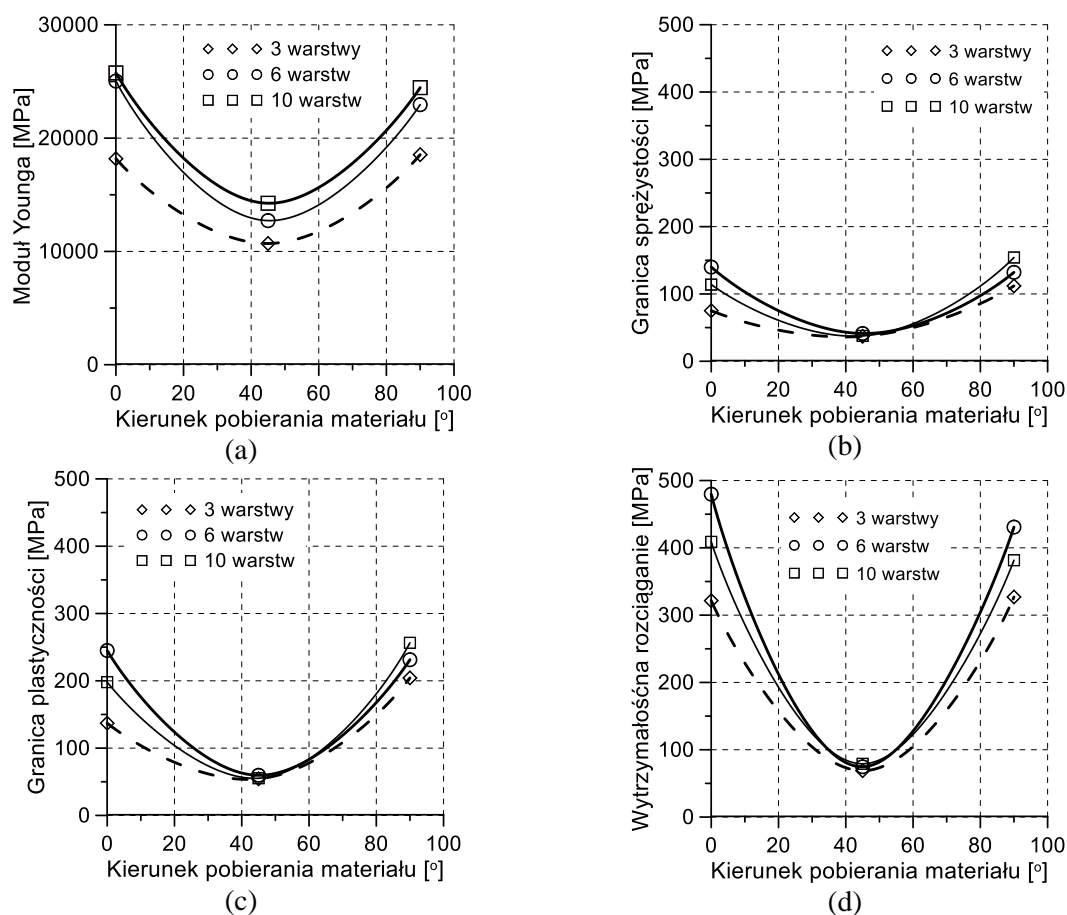
Rys. 4. Parametry mechaniczne kompozytu CD600 w zależności od liczby warstw maty zbrojącej

Porównanie charakterystyk rozciągania kompozytu z różną zawartością warstw zbrojenia wykazuje efekt zanikania cech typowych dla materiału sprężysto-plastycznego dla kierunków wzajemnie prostopadłych wraz ze wzrostem liczby warstw zbrojących (rys. 2, 3a, c). Z przeprowadzonych testów wynika, że krzywe rozciągania w kierunku 90°, wykazują najlepsze właściwości mechaniczne, uzyskiwane dla 6 warstw zbrojenia badanego kompozytu, rys. 3c. Z kolei podobieństwo krzywych rozciągania w kierunku 45° świadczy o braku wpływu liczby warstw zbrojenia, a tym samym procentowej zawartości składników rozpatrywanego kompozytu, na wytrzymałość na rozciąganie (rys. 3b). Analiza zmian wydłużenia wykazała jego wzrost ze zwiększaniem liczby warstw zbrojenia.

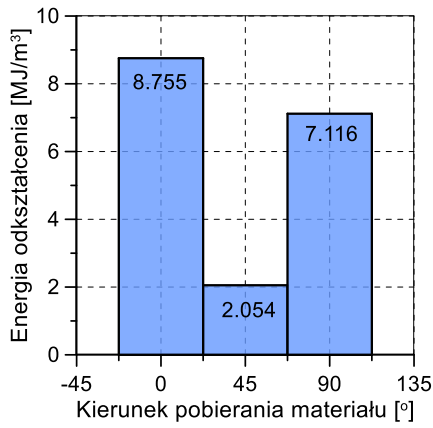
Wpływ liczby warstw zbrojenia na wartości wyznaczonych parametrów mechanicznych został określony na podstawie wyników pokazanych na (rys. 4). W przypadku

modułu Younga, niezależnie od kierunku, z którego pozyskiwano materiał występował wzrost jego wartości wraz ze zwiększaniem liczby warstw zbrojenia. Zmiany wartości granicy sprężystości i plastyczności wykazywały podobieństwo zmian jedynie dla kierunku 90°. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od liczby warstw zbrojenia wykazywała podobny przebieg przy 6 warstwach zbrojenia dla kierunków 0 i 90° (rys. 4d).

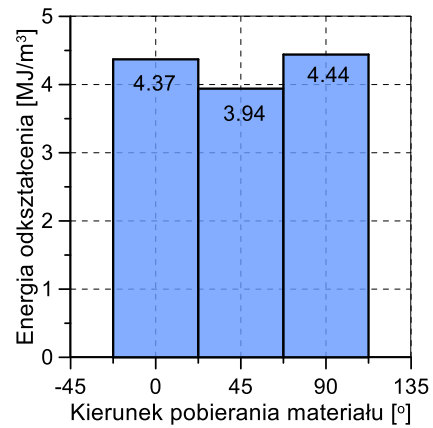
Przedstawienie wyznaczonych wartości parametrów mechanicznych (tab. 3) w zależności od kierunku pobierania próbek materiału umożliwia obserwację tzw. „efektu siodła”, wyrażającego się najniższymi wartościami modułu Younga, granicy sprężystości i granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie w kierunku 45°, rys. 5b. Dodatkowo, można wskazać, który z wyznaczonych parametrów mechanicznych jest najbardziej podatny na liczbę warstw zbrojenia. W przypadku badanego kompozytu był nim moduł Younga, który wraz ze wzrostem zawartości zbrojenia przyjmował wyższe wartości w każdym rozpatrywanym kierunku poboru próbek materiału, rys. 5a. Pozostałe parametry mechaniczne, takie jak: granica sprężystości (rys. 5b), granica plastyczności (rys. 5c) i wytrzymałość na rozciąganie (rys. 5d) nie wykazywały tak wyraźnego wzrostu wartości. Dla kierunku 45° były one stałe, niezależnie od liczby warstw zbrojenia.



Rys. 5. Zmiana parametrów mechanicznych kompozytu CD600 w zależności od liczby warstw zbrojenia w funkcji kierunku pobierania próbek

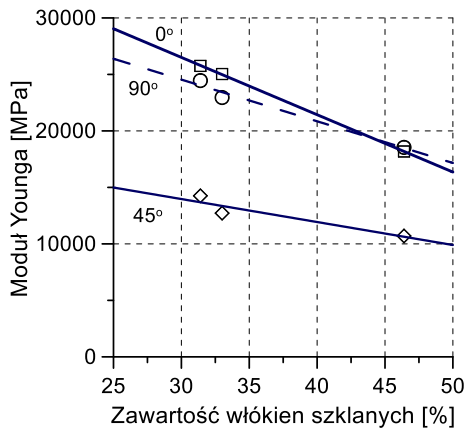


(a) 3 warstwy

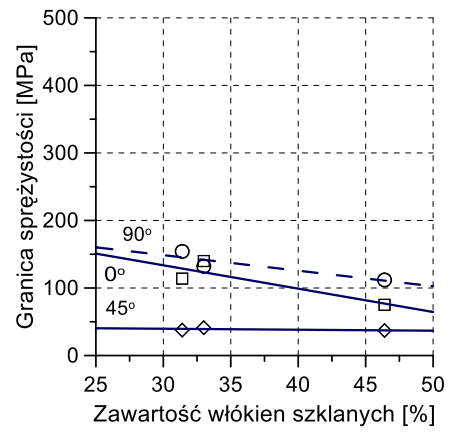


(b) 10 warstw

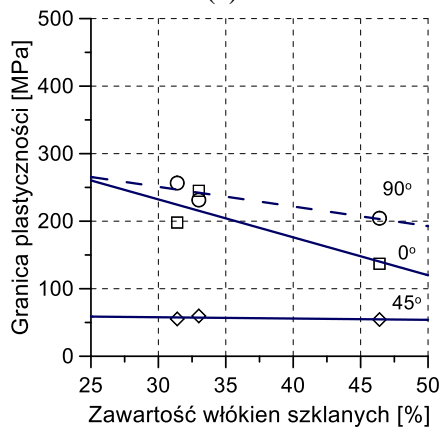
Rys. 6. Energia odkształcenia całkowitego z prób rozciągania kompozytu CD600 z różną liczbą warstw zbrojenia do zniszczenia w zależności od kierunku pobierania próbki



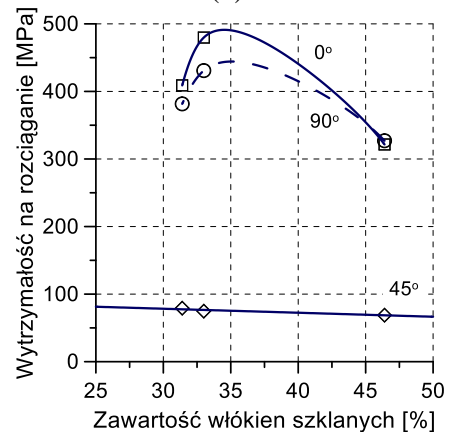
(a)



(b)



(c)



(d)

Rys. 7. Parametry mechaniczne kompozytu CD600 w zależności od zawartości włókien szklanych dla trzech kierunków pobierania próbek

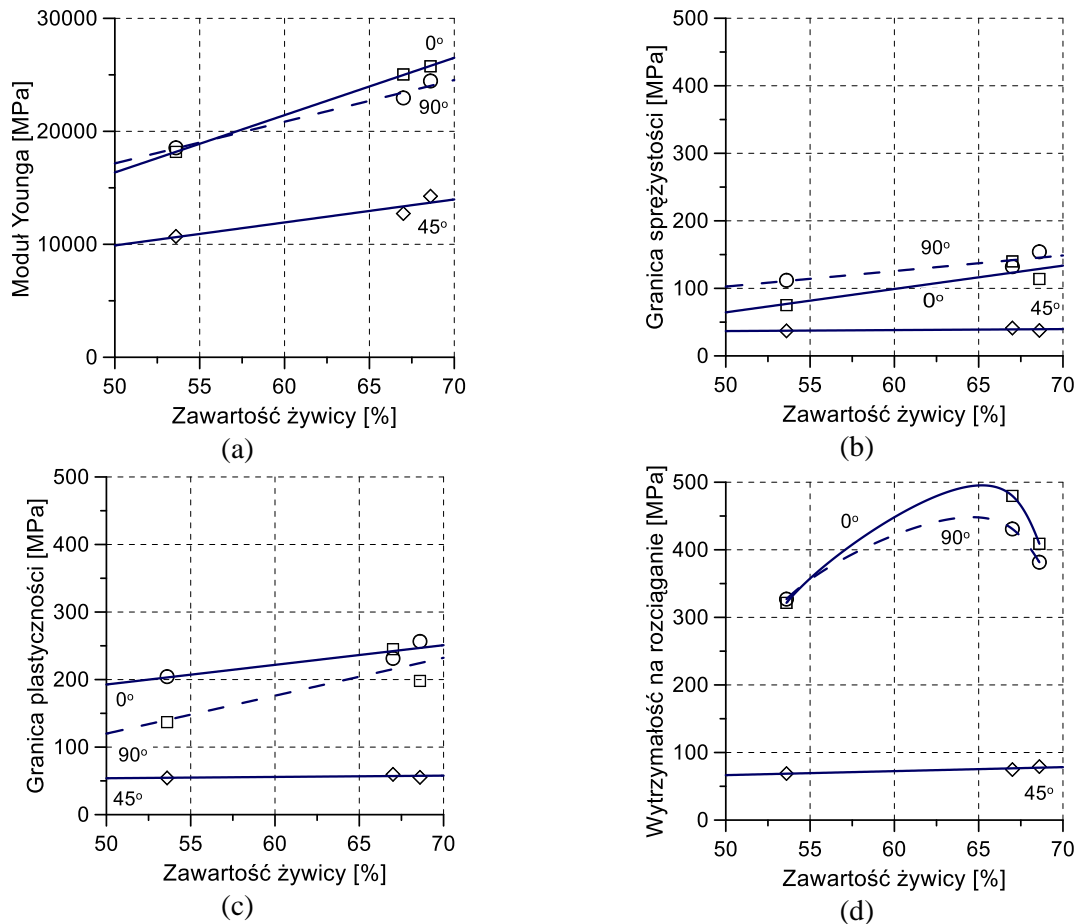
Przeprowadzone badania umożliwiły również ocenę wartości energii odkształcenia w zależności od kierunku pobierania próbek materiału i liczby warstw zbrojących (rys. 6). Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować o zdolności materiału do pochłaniania energii w poszczególnych kierunkach. W przypadku badanego kompozytu zawierającego 10 warstw, wykazującego anizotropię właściwości mechanicznych, uzyskano praktycznie jednakowe wartości energii odkształcenia niezależnie od kierunku, z którego pobierano materiał (rys. 6b). Tego rodzaju efektu nie zaobserwowano jednak dla kompozytu trójwarstwowego, rys. 6a.

Jednym z głównych celów prowadzonych badań było uzyskanie wyników, które dawałyby pewne wytyczne o znaczeniu technologicznym. Z tego względu przeanalizowano wpływ zawartości składników badanego kompozytu na jego parametry mechaniczne. Charakter zmian wartości modułu Younga, granicy sprężystości, granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w zależności od zawartości włókien szklanych zamieszczono na rys.7. W przypadku pierwszych z trzech parametrów mechanicznych uzyskano obniżanie ich wartości ze wzrostem procentowej zawartości włókien we wszystkich rozpatrywanych kierunkach 0° , 45° i 90° (rys. 7a, b, c). Jedynie w przypadku wytrzymałości na rozciąganie charakter tych zmian był inny. A mianowicie, w kierunkach wzajemnie prostopadłych 0° i 90° najpierw obserwowano wzrost wytrzymałości, a następnie jej spadek, przy czym punktem zwrotnym była tutaj zawartość włókien wynosząca 35% (rys. 7d). Co ciekawe, w przypadku orientacji zbrojenia 45° wytrzymałość na rozciąganie miała niewielką tendencję spadkową wraz ze wzrostem procentowym zbrojenia (rys. 7d).

Całkowicie odmienny wpływ na parametry mechaniczne miała zawartość żywicy w badanym kompozycie (rys. 8). W tym przypadku wzrost zawartości żywicy skutkował w większości wzrostem wartości parametrów mechanicznych. Jedynie dla kierunku 45° kompozyt praktycznie nie reagował na zmianę zawartości żywicy. Podobnie, jak przy analizie wpływu zawartości procentowej fazy zbrojącej na podstawowe parametry mechaniczne, także zawartość procentowa żywicy miała odmienny wpływ na poziom wytrzymałości w porównaniu do pozostałych rozpatrywanych parametrów z próby rozciągania. Jak pokazano na rys. 8b, wraz ze wzrostem zawartości żywicy wytrzymałość na rozciąganie początkowo rosła (do zawartości żywicy około 65%), a następnie wyraźnie malała. Takie zachowanie otrzymano dla próbek wycinanych w kierunku 0° i 90° . Uzyskany rezultat daje podstawy do wskazania najbardziej optymalnej proporcji zawartości włókien szklanych i żywicy, a mianowicie dla przeprowadzonych badań wynosiła 0.53.

Wiedza o składzie kompozytu pozwala stosunkowo łatwo śledzić degradację jego struktury na poszczególnych etapach działania obciążenia mechanicznego (rys 9). Jest to możliwe na podstawie oceny zachowania zbrojenia rejestrowanego z kilku kierunków dla oddania specyfiki niszczenia badanego materiału.

Części robocze próbek badanego kompozytu po teście rozciągania wykorzystywano do zbierania danych dotyczących cech stref uszkodzenia (rys. 10). I tak, w przypadku materiału próbek w kierunku 0° degradacja przebiegała wzdłuż głównej osi próbki. Kompozyt pozyskany z kierunku 45° wykazywał uszkodzenie przebiegające w płaszczyźnie maksymalnego naprężenia stycznego. Z kolei, w przypadku trzeciego z rozpatrywanych kierunków (90°) poboru materiału, uszkodzenia rozwijały się wszechstronnie, powodując rozwarstwienie badanego materiału.

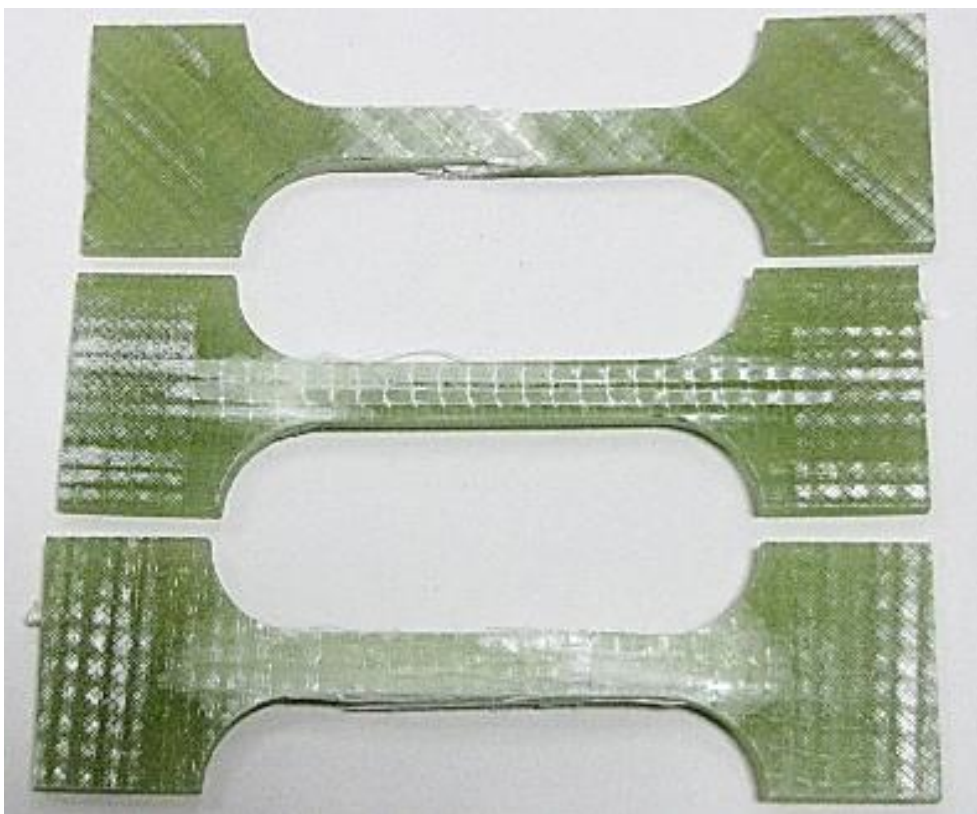


Rys. 8. Parametry mechaniczne kompozytu CD600 w zależności od zawartości żywicy

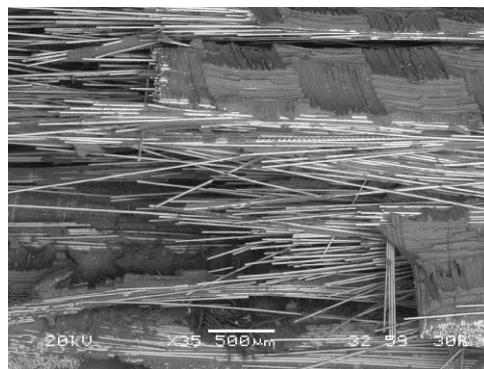
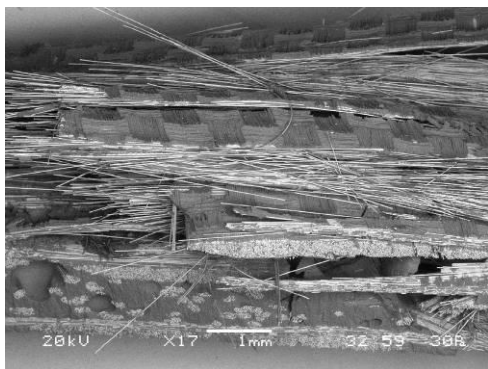
Obserwacje stref występowania uszkodzeń w matrycy, zbrojeniu i strefie ich łączenia z użyciem techniki SEM wykazały charakterystyczne cechy związane z degradacją wymienionych obszarów (rys.11-13). Pękanie rozdzielcze włókien szklanych oraz matrycy z przemieszczaniem się ich przełomu wskutek lokalnego osłabiania zbrojenia było charakterystycznym rodzajem procesu uszkodzenia materiału dla kierunku 0° w przypadku kompozytu zawierającego 3 warstwy zbrojenia (rys 11a). Dla kompozytu pobranego z kierunku 45°, ukośny przełom matrycy i jej rozwarstwienia były dominującymi formami uszkodzeń (rys. 11b). Natomiast dla próbek kompozytu z kierunku 90° pękanie rozdzielcze matrycy i włókien stanowiły o degradacji struktury (rys. 11c). Zniszczenie kompozytu z kierunku 0°, zawierającego dwukrotnie większą liczbę warstw zbrojenia, przebiegało przy znaczącym udziale pęknięcia włókien szklanych, powodującego lokalną utratę nośności (rys. 12a). Struktura materiału z kierunku 45° ulegała degradacji na skutek rozdzielczego pęknięcia matrycy, charakteryzującego się przemieszczaniem przełomu oraz niewielką delaminacją, rys. 12b. W przypadku materiału pobranego z kierunku 90° delaminacja miała przeważający udział w niszczeniu jego struktury (rys. 12c). Degradacja kompozytu mającego 10 warstw zbrojenia z kierunku 0° charakteryzowała się pękaniem rozdzielczym matrycy i delaminacją (rys. 13a). Jedynie delaminacja była przyczyną niszczenia materiału pobranego z kierunku 45°, wykazując dodatkowo przemieszczanie na skutek wcześniejszej utraty trwałości połączenia matryca-zbrojenie (rys. 13b). Również w przypadku materiału pobranego z kierunku 90° delaminacja była odpowiedzialna za degradację jego struktury (rys. 13c).



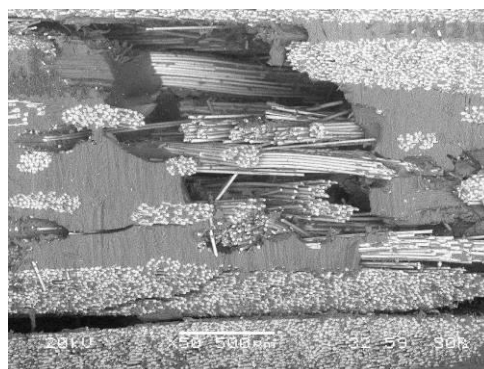
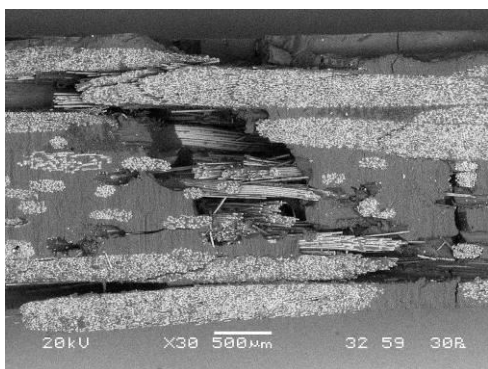
Rys. 9. Próbkę nr 5 (10 warstw zbrojenia) z kompozytu CD600 w końcowym etapie próby rozciągania



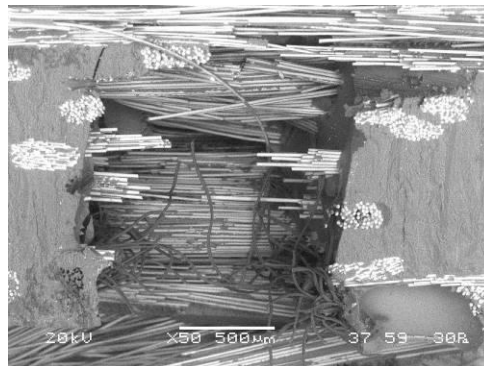
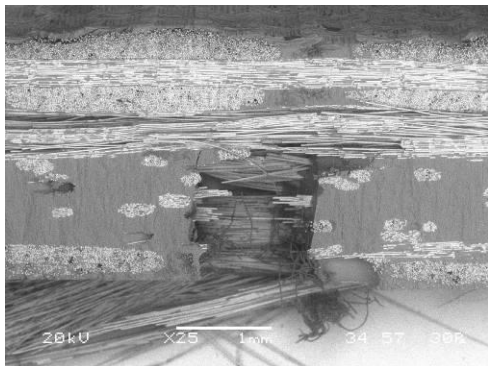
Rys. 10. Próbkę kompozytu (10 warstw zbrojenia) po teście rozciągania pobrane odpowiednio z kierunku: 45°, 0° i 90°



(a) kierunek 0°

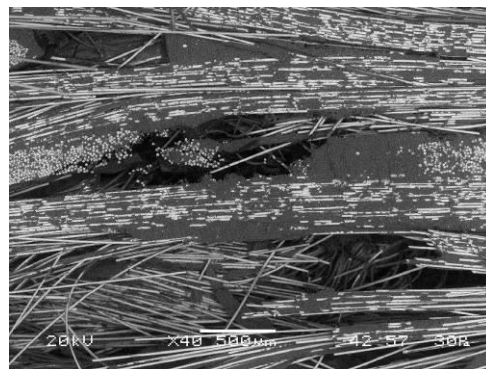
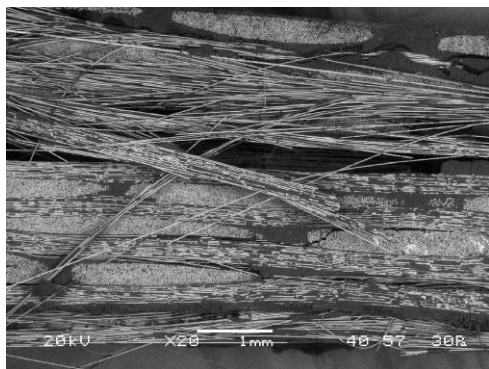


(b) kierunek 45°

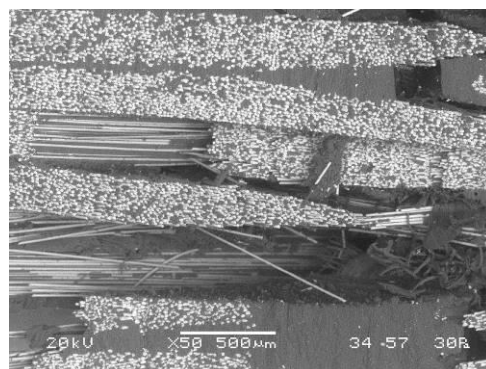
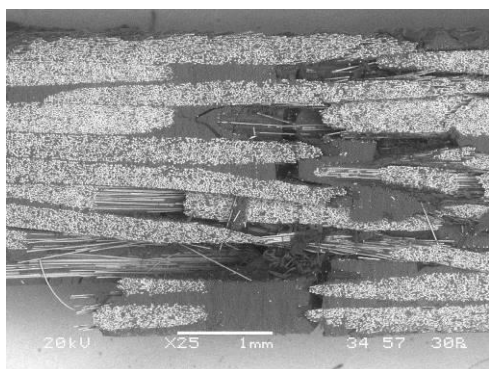


(c) kierunek 90°

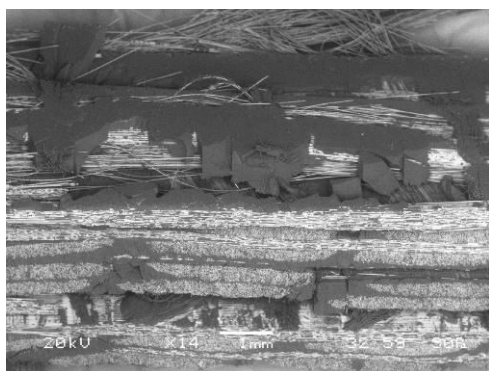
Rys. 11. Strefy uszkodzenia kompozytu CD600 (3 warstwy zbrojenia) uzyskane z badań na SEM po teście rozciągania



(a) kierunek 0°

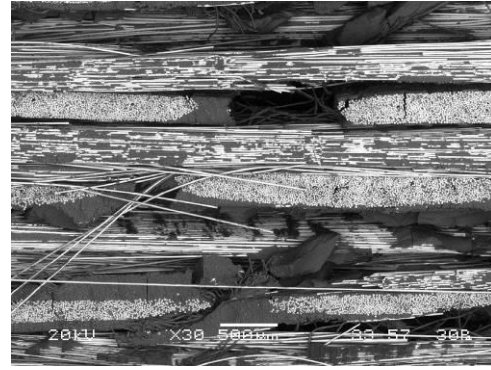
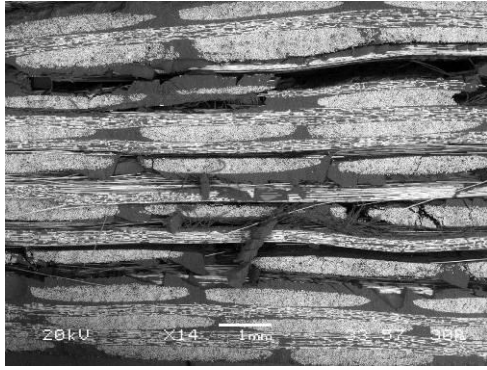


(b) kierunek 45°

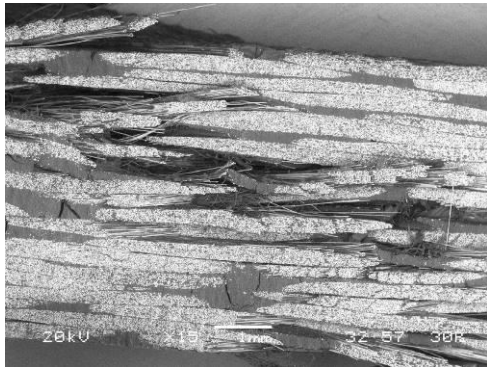


(c) kierunek 90°

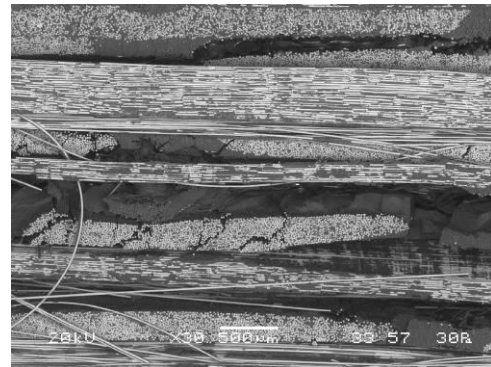
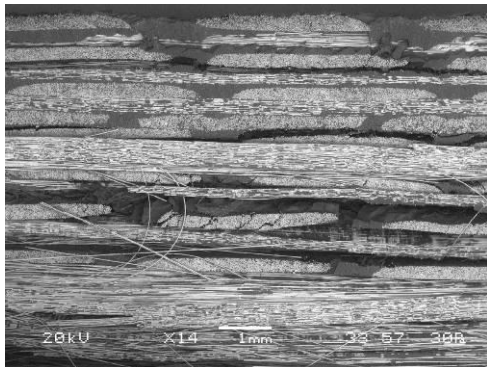
Rys. 12. Strefy uszkodzenia kompozytu CD600 (6 warstw zbrojenia)
z badań na SEM po teście rozciągania



(a) kierunek 0°



(b) kierunek 45°



(c) kierunek 90°

Rys. 13. Strefy uszkodzenia kompozytu CD600 (10 warstw zbrojenia) z badań SEM po teście rozciągania

4. Podsumowanie

Badaniom poddawano kompozyt polimerowo-szklany CDP600, który wykazał zróżnicowane przebiegi charakterystyk rozciągania w zależności od orientacji pobieranych próbek. W efekcie wartości podstawowych parametrów mechanicznych: moduł Younga,

granica sprężystości, granica plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie silnie były uzależnione od kierunku, z którego pobierano materiał.

Parametry mechaniczne kompozytu polimerowo-szklanego z kierunku 45° były w najmniejszym stopniu uzależnione od liczby warstw zbrojenia oraz procentowej zawartości składników tworzących badany materiał.

Ze wzrostem liczby warstw zbrojenia różnice w wartościach całkowitej energii odkształcenia, stowarzyszone z krzywą rozciągania badanego materiału z kierunku 0, 45 i 90°, ulegały zmniejszeniu, uzyskując prawie jednakowe wartości przy 10 warstwach zbrojenia.

Zwiększanie liczby warstw zbrojenia prowadziło do zmiany mechanizmów degradacji kompozytu. Dla mniejszej liczby warstw zniszczenie przyjmowało charakter pęknięcia rozdzielczego, natomiast przy większej, głównie występowała delaminacja.

Wprowadzanie kompozytów do eksploatacji oraz późniejsza ocena ich stanu technicznego powinny odbywać się z wykorzystaniem wyników badań identyfikujących anizotropię właściwości mechanicznych oraz cechy degradacji struktury.

Literatura

1. Alsayed S., Al-Salloum Y., Almusallam T., El-Gamal S., Aqel M. Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperature. *Composites: Part B* 2012; 43: 2265-2271.
2. Arasau P.M., Karthikayan A., Venkatachalam R.: Mechanical and thermal behavior of hybrid glass/jute fiber reinforced composites with epoxy/polyester resin. *Polimery* 2019; 64(7-8): 504-508, DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.7.6](https://doi.org/10.14314/polimery.2019.7.6).
3. Bakir B., Hashem H. Effect of Fiber Orientation for Fiber Glass Reinforced Composite Material on Mechanical Properties. *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering* 2013; 1(5): 341-345.
4. Bienias B., Michalski W., Wagner L. Mechanical strength evaluation of poly(methyl methacrylate) reinforced with long glass, carbon and aramid fibers. *Polimery* 2019; 64(6): 417-421, DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.6.4](https://doi.org/10.14314/polimery.2019.6.4).
5. Buchacz A., Baier A., Herbuś K., Ociepka P., Grabowski Ł., Sobek M. Badania porównawcze wielowarstwowych materiałów kompozytowych na potrzeby weryfikacji modelu paneli kompozytowych stosowanych do renowacji poszycia wagonów towarowych. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2018; 20(1): 137-146, DOI: [10.17531/ein.2018.1.18](https://doi.org/10.17531/ein.2018.1.18).
6. Komorek A, Przybyłek P. Examination of the influence of cross-impact load on bend strength properties of composite materials, used in aviation. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2012; 14 (4): 265-269.
7. Hegde A., Darshan R. S., Mulla F., Shoeb M., Rajanish M. Tensile properties of unidirectional glass/epoxy composites at different orientations of fibres. *Int. Journal of Engineering Research and Applications* 2015; 5(3): 150-153.

8. Herakovich C.T. Mechanics of composites: A historical review. *Mechanics Research Communications* 2012; 41: 1-20.
9. Hulsenberg D., Fehling F., Leutbecher T. Damage tolerant, translucent oxide fiber/glass matrix composites. *Composites: Part B* 2008; 39: 362-373.
10. Jagannatha T.D., Harish G. Mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced epoxy hybrid polymer composites. *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.* 2015; 4(2): 131-137.
11. McDaniel G., Knight C. *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites 2014. Design Training Expo, Composites and Advanced Materials Expo* October 13-16, 2014, Orange County Convention Center Orlando, FL.
12. Ramesh M., Palanikumar K., Reddy K. H. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. *Composites: Part B* 2013; 48: 1-9.
13. Sathishkumar T.P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2014; 33(13): 1258-1275.
14. Stickel J.M., Nagara J.M. *Glass Fiber-Reinforced Composites: From Formulation to Application. International Journal of Applied Glass Science* 2012; 3(2): 122-136. DOI:10.1111/j.2041-1294.2012.00090.x
15. Szudrowicz M. Layered composite increasing the resistance of patrol and intervention vehicles to the impact of improvised explosive devices (IED) from below. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(1): 9-15, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.1.2>.
16. Verpoest I., *Composites Materials Research Challenges, Composites Materials Research Challenges*”, Katholieke Universiteit Leuven Belgium, 2013, 27 pages.
17. Vogel K., Heinrich M., Ulbricht J., Elsner H., Feige H.J., Vogel J., Kroll L. Mechanical characterization of glass fiber-reinforced composites, XIIIth Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, June 29th – July 2nd, Decin, Czech Republic, 2014, 137.
18. *Advanced Composite Materials, Chapter 7, 2.*
19. GTC-4-011-1, *Guide to composites*, Gurit, 73 pages.
20. *Physical Properties of GFRC Stone Wear Information*, 9 pages.