

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 247192 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **436837**

(22) Data zgłoszenia: **2021.02.02**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2022.08.08 BUP 32/2022**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.05.26 WUP 21/2025**

(51) MKP:

B32B 5/28 (2006.01)

B32B 5/26 (2006.01)

B32B 5/24 (2006.01)

B32B 27/38 (2006.01)

B32B 27/34 (2006.01)

B32B 27/02 (2006.01)

D04H 1/4242 (2012.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**POLSKIE ZAKŁADY LOTNICZE SPÓŁKA
Z OGRANICZONĄ ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ,
Mielec, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**ANNA BOCZKOWSKA, Warszawa, PL
KAMIL DYDEK, Skwarne, PL
MAŁGORZATA WILK, Rzeszów, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Damian Krężel, Warszawa, PL

(54) Tytuł:

Warstwowa struktura kompozytowa

PL 247192 B1

Opis wynalazku

Dziedzina techniki

Przedmiotem wynalazku jest warstwowa struktura kompozytowa zawierająca warstwy polimerowego kompozytu wzmacnianego włóknami węglowymi (CFRP) ułożone naprzemiennie z warstwami włókniny polimerowej. Struktury kompozytowe według wynalazku znajdują zastosowanie jako materiał konstrukcyjny w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, morskim, medycznym oraz sportowym.

Stan techniki

Polimerowe kompozyty wzmacniane włóknami węglowymi to grupa materiałów, która jest stale rozwijana od końca XIX wieku. Jest to uzasadnione potrzebą bardzo wysokiej wytrzymałości i sztywności oraz zmniejszeniem ciężaru przez zastosowanie materiałów o niskiej gęstości. Ponadto, właściwości tych polimerów kompozytowych, takie, jak odporność korozyjna czy starzeniowa, pozwalają zastąpić nimi tradycyjne materiały w wielu gałęziach przemysłu, takich, jak przemysł lotniczy, motoryzacyjny, morski, medyczny i sportowy (S. Hamer i wsp., „*Mode I and Mode II fracture energy of MWCNT reinforced nanofibrilmats interleaved carbon/epoxy laminates*,” Compos. Sci. Technol., tom 90, str. 48–56, 2014).

Jednak w czasie użytkowania CFRP są podatne na uszkodzenia spowodowane obciążeniami dynamicznymi o różnej energii. Tego typu uszkodzenia są często spotykane w lotnictwie, gdzie elementy samolotu są narażone na uderzenia (obciążenia dynamiczne) np. przez lecące ptaki (ang. bird strike) lub padający grad. Może to prowadzić do powstania poważnego incydentu lub wypadku lotniczego. Nawet uderzenie o niewielkiej energii może doprowadzić do powstania uszkodzenia wewnątrz struktury laminatu. W wyniku działania obciążeń dynamicznych będących efektem eksploatacji elementu kompozytowego, dochodzi do propagacji rozwarstwień (delaminacji) i zwiększenia obszaru uszkodzeń, co może prowadzić do znacznego zmniejszenia sztywności i wytrzymałości całej struktury lub całkowitego zniszczenia elementu kompozytowego. Uszkodzone w wyniku obciążenia dynamicznego elementy z CFRP stają się bardziej wrażliwe na wchłanianie wilgoci, co w przypadku struktur pracujących w zmiennych warunkach atmosferycznych ($\pm 50^{\circ}\text{C}$), może doprowadzić do cyklicznego zamarzania i rozmarzania wody, które przyspiesza proces niszczenia struktury. Z tego powodu, aby CFRP mogłyby być powszechnie wykorzystywane w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i energetyce wiatrowej, dąży się do poprawy ich odporności na obciążenia dynamiczne przez zastosowanie różnych materiałów dodatkowych.

Jedną z głównych przyczyn występowania delaminacji w strukturze CFRP jest wystawienie materiału na działanie obciążeń dynamicznych. Znanych jest wiele sposobów przeciwdziałania delaminacji. Jednym z takich sposobów jest zastosowanie tkanin zszywanych, tzw. tkanin trójwymiarowych (3D) (J. Brandt, K. Drechsler, i F. J. Arendts, „*Mechanical performance of composites based on various three-dimensional woven-fibre preforms*,” Compos. Sci. Technol., tom 56, nr 3, str. 381–386, 1996). Takie rozwiązanie nie zapobiega jednak powstaniu uszkodzenia, a jedynie zwiększa odporność na propagację pęknięć już po ich powstaniu.

Drugim podejściem stosowanym, aby poprawić odporność kompozytu na delaminację jest wprowadzenie do ciekłej żywicy przed procesem przesycenia różnego rodzaju mikro- lub nanonapełniaczy, takich jak tlenek glinu, sadza, grafen, nanorurki węglowe (G. Ragosta, M. Abbate, P. Musto, G. Scarinzi, i L. Mascia, „*Epoxy-silica particulate nanocomposites: Chemical interactions, reinforcement and fracture toughness*,” Polymer (Guildf.), tom 46, nr 23, str. 10506–10516, 2005 oraz T. Yokozeaki i wsp., „*Fracture toughness improvement of CFRP laminates by dispersion of cup-stacked carbon nanotubes*,” Compos. Sci. Technol., tom 69, nr 14, str. 2268–2273, 2009). Jednak to rozwiązanie ma wady w postaci znaczącego wzrostu lepkości żywicy i nierównomiernego rozkładu napełniacza w laminatach ze względu na efekty filtracyjne tkanin wzmacniających podczas procesów wytwarzania np. infuzji lub RTM (ang. resin transfer moulding). Rozwiązanie to wymaga również przeprowadzenia długotrwałych i kosztownych badań w celu sprawdzenia i certyfikacji nowego typu materiału.

W technice stosowanej w niniejszym wynalazku nie jest konieczne stosowanie szkodliwych, a także drogich napełniaczy, takich jak nanorurki węglowe (ang. carbon nano tubes, CNT) i grafen. Saz-Orozco i wsp. (B. Del Saz-Orozco, D. Ray i W. F. Stanley, „*Effect of Thermoplastic Veils on Interlaminar Fracture Toughness of a Glass Fiber/Vinyl Ester Composite*,” Polym. Compos., tom 38, nr 11, str. 2501–2508, 2015) badali wpływ włókien poliamidowych (PA) i z poli(tereftalanu etylenu) (PET) na odporność na pękanie międzywarstwowe kompozytu włókno szklane/ester winylowy (GF/VE) i wykazali, że włókniny PET nie miały znaczącego wpływu na poprawę odporności kompozytów, podczas, gdy

włókniny PA zwiększyły wartości odporności na pękanie międzywarstwowe. Z kolei Fitzmaurice i wsp. (K. Fitzmaurice, D. Ray, i M. A. McCarthy, "PET interleaving veils for improved fracture toughness of glass fibre/low-styrene-emission unsaturated polyester resin composites," J. Appl. Polym. Sci., tom 133, nr 3, str. 1–8, 2016) wykazali, że włókniny PET nie były skuteczne w poprawianiu odporności na pękanie międzywarstwowe kompozytów z włókna szklanego/żywicy poliestrowej (GF/PE) ze względu na słabszą granicę międzyfazową szkło/żywica, zapewniającą alternatywną ścieżkę propagacji pęknięć. Wykazali również, że zastosowanie włóknin PET pozytywnie wpłynęło na wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe i właściwości tłumiące kompozytów. W swoich badaniach wprowadzili włókniny PET o gramaturze 45 g/m² pomiędzy wszystkimi warstwami wzmocnienia szklanego oraz na powierzchnię kompozytu. Kolejnym przykładem zastosowania termoplastycznych włóknin na bazie PA wprowadzonych między warstwami jest praca Nash i wsp. (N. H. Nash, T. M. Young, i W. F. Stanley, "An investigation of the damage tolerance of carbon/Benzoxazine composites with a thermoplastic toughening interlayer," Compos. Struct., tom 147, str. 25–32, 2016). W pracy tej autorzy opisali wprowadzenie poliamidowych włóknin o gramaturze 34 g/m² (1, 3 oraz 7 warstw) do kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym, dzięki czemu uzyskali odporność na obciążenia dynamiczne na tym samym poziomie, jak dla laminatu referencyjnego (bez dodatków). Należy tu zwrócić uwagę, że włókniny były wprowadzane pomiędzy środkowe warstwy kompozytu.

W kolejnej pracy Ni i wsp. (N. Ni, Y. Wen, D. He, X. Yi, T. Zhang, i Y. Xu, "High damping and high stiffness CFRP composites with aramid non-woven fabric interlayers," Compos. Sci. Technol., tom 117, str. 92–99, 2015) zastosowali między warstwami w CFRP aramidowe włókniny o gramaturze 16 g/m². Rozwiązanie takie pozwoliło na wzrost odporności na obciążenia dynamiczne na poziomie 25% w porównaniu z laminatem referencyjnym, jednakże autorzy wprowadzili 31 warstw włóknin aramidowych, co znacznie wpłynęło na grubość laminatu. Wong i wsp. (D. W. Y. Wong, H. Zhang, E. Bilotti, i T. Peijs, "Interlaminar toughening of woven fabric carbon/epoxy composite laminates using hybrid aramid/phenoxy interleaves," Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., tom 101, str. 151–159, 2017) również badali możliwość zastosowania aramidowych włóknin jako wzmocnienia CFRP celem poprawy odporności na pękanie. Aramidowa włóknina o gramaturze 26 g/m² umieszczona pomiędzy środkowymi warstwami kompozytu pozwoliła na poprawę zarówno odporności na obciążenia dynamiczne, jak i odporności na pękanie. Kolejna praca autorstwa Daelemans i wsp. (L. Daelemans i wsp., "Electrospun nanofibrous interleaves for improved low velocity impact resistance of glass fibre reinforced composite laminates," Mater. Des., tom 141, str. 170–184, 2018) dotyczyła termoplastycznych włóknin na bazie PA6, PA6.9 oraz polikaprolaktonu (PCL) wytwarzanych metodą elektro-przędzenia. W analizowanym przypadku włókniny miały różne gramatury – 6 oraz 12 g/m² – i zostały wprowadzone co każdą warstwę materiału węglowego. Badacze wykazali, że włókna PCL najkorzystniej wpłynęły na poprawę odporności na obciążenia dynamiczne CFRP i pozwoliły na zmniejszenie obszaru uszkodzeń kompozytu o około 50%. Natomiast zastosowanie włóknin na bazie PA6 i PA6.9 było mniej skuteczne niż w przypadku włóknin z PCL ze względu na zaobserwowaną gorszą adhezję włókien poliamidowych do osnowy epoksydowej, która przełożyła się na uzyskanie gorszych właściwości mechanicznych w porównaniu z PCL. W pracy Beylergil i wsp. (B. Beylergil, M. Tanoğlu, i E. Aktaş, "Effect of polyamide-6,6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites," Compos. Struct., tom 194, luty, str. 21–35, 2018), autorzy zastosowali włókniny na bazie PA66 o dwóch różnych gramaturach – 17 oraz 50 g/m² – i wprowadzili je co każdą warstwę CFRP. Rozwiązanie takie przyczyniło się do znaczącego wzrostu grubości laminatu, a w rezultacie do spadku udziału włókien węglowych w kompozycie, co skutkowało pogorszeniem niektórych właściwości mechanicznych kompozytów. Autorzy wykazali, że zastosowanie takich włóknin pogarsza wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na zginanie oraz resztkową odporność na ściskanie po obciążeniu dynamicznym, ale pozwala na poprawę odporności na pękanie międzywarstwowe.

Problem techniczny

Pomimo wielu doniesień literaturowych dotyczących wykorzystania włóknin na bazie różnych tworzyw jako dodatków w celu poprawy odporności CFRP na obciążenia dynamiczne, rozwiązania te nie są pozbawione słabych punktów, takich, jak kruche pękanie czy stosunkowo niska odporność na obciążenia dynamiczne. Z obserwacji wynika, że włókniny zastosowane do poprawy odporności kompozytów epoksydowo-węglowych na obciążenia dynamiczne powinny mieć możliwie niewielką gramaturę oraz małą grubość, a dodatkowo nie powinny być stosowane co każdą warstwę wzmocnienia, aby nie zmniejszać udziału głównego wzmocnienia tj. włókien węglowych w kompozycie.

W analizowanej literaturze badano różne rodzaje włókien. Większość źródeł dotyczyła włókien poliamidowych (PA6, PA66 i PA69) wytwarzanych metodą elektro-przędzenia oraz wprowadzanych co każdą warstwę wzmocnienia kompozytu. Włókna te ze względu na odpowiednią temperaturę topnienia, dobrą kompatybilność z żywicą oraz dobre właściwości mechaniczne pozwalają na wzrost odporności na pękanie. Jednakże proponowane w literaturze rozwiązania dotyczą przeważnie włókien o gramaturze powyżej 10 g/m² oraz wprowadzonych co każdą warstwę kompozytu, co wpływa na wzrost grubości laminatu i jego masy.

Cel wynalazku

Celem wynalazku było poprawienie odporności na obciążenia dynamiczne kompozytów epoksydowo-węglowych przez dobór odpowiednich włókien termoplastycznych, ich gramatury oraz miejsca ich wprowadzenia do struktury kompozytu. Cel ten osiągnięto przez wprowadzenie termoplastycznych włókien o małej gramaturze pomiędzy warstwy laminatów CFRP wyłącznie przy powierzchni górnej, narażonej bezpośrednio na obciążenia dynamiczne.

Stosowane w niniejszym opisie określenie „powierzchnia górna” warstwowej struktury kompozytowej oznacza tę powierzchnię, która w gotowej strukturze znajduje się od strony zewnętrznej wytworu z niej wykonanego i jest pierwszą warstwą, kompozytu mającą kontakt ze źródłami obciążeń dynamicznych. Analogicznie, stosowane w niniejszym opisie określenie „powierzchnia spodnia” warstwowej struktury kompozytowej oznacza powierzchnię tej struktury przeciwległą do powierzchni górnej, tj. znajdującą się po drugiej stronie warstwowej struktury kompozytowej.

W pierwszym aspekcie przedmiotem wynalazku jest warstwowa struktura kompozytowa posiadająca powierzchnię górną i przeciwległą do niej powierzchnię spodnią, oraz złożona z warstw epoksydowego kompozytu wzmocnianego włóknami węglowymi (CFRP) ułożonych naprzemiennie z warstwami włókna polimerowego z kopoliamidu. W strukturze kompozytowej według wynalazku warstwy włókna polimerowego z kopoliamidu znajdują się jedynie w obszarze warstwowej struktury kompozytowej rozciągającym się od jej powierzchni górnej w kierunku powierzchni spodniej na głębokość nie przekraczającą 40% grubości warstwowej struktury kompozytowej, a pozostała część warstwowej struktury kompozytowej składa się wyłącznie z ułożonych na sobie warstw kompozytu epoksydowo-węglowego.

Korzystnie gramatura włókna polimerowego z kopoliamidu wynosi od 1 do 10 g/m², a szczególnie korzystnie 5 g/m².

Korzystnie włókna polimerowa z kopoliamidu jest włókna termoplastyczną, która korzystnie ma losowy układ rozmieszczenia włókien termoplastycznych. W szczególnie korzystnym wariantcie realizacji wynalazku włókna termoplastyczna pochodzi z procesu rozdmuchiwania stopionego polimeru. Korzystnie włókna termoplastyczna jest wytworzona z kopoliamidu PA6/PA66.

Korzystnie struktura kompozytowa według wynalazku zawiera od jednej do sześciu warstw włókna polimerowego z kopoliamidu, a szczególnie – cztery warstwy włókna polimerowego z kopoliamidu. Należy przy tym rozumieć, że stosowana w niniejszym opisie liczba mnoga określenia „warstwy włókna polimerowego” obejmuje także szczególny przypadek pojedynczej warstwy tej włókna.

Korzystnie struktura kompozytowa według wynalazku ma następujący układ warstw: [45/0/-45/90]_{4s}.

Rozwiązanie według wynalazku polegające na wprowadzeniu włókien polimerowych o małej gramaturze pomiędzy warstwy laminatów CFRP wyłącznie przy powierzchni górnej pozwala na uzyskanie wystarczającej odporności na obciążenia dynamiczne oraz dodatkowo ma niewielki wpływ na wzrost masy oraz grubości struktury laminatów kompozytowych. Włókna zastosowano jedynie w obszarze najbardziej narażonym na obciążenie dynamiczne (górna powierzchnia laminatu), co nie wpływało na wydłużenie procesu wytwarzania całej struktury. Nie miało to również znaczącego wpływu na zmianę parametrów wytrzymałościowych kompozytu w jego obszarze bez włókien.

Krótki opis figur rysunku

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania zilustrowano na rysunku, na którym:

fig. 1 przedstawia schemat ułożenia warstw włókien pomiędzy warstwami CFRP w widoku z góry;

fig. 2 przedstawia schemat ułożenia czterech warstw włókien polimerowych pomiędzy warstwami CFRP w widoku w przekroju.

Szczegółowy opis przykładowych wariantów realizacji wynalazku

W niniejszym opisie określenia „struktura kompozytowa” i „laminat” stanowią synonimy i oznaczają strukturę warstwową zawierającą warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego oraz co najmniej jedną warstwę włókna polimerowego.

Niniejszy wynalazek polega na wprowadzaniu termoplastycznych włókien (ang. *veils*) o niewielkiej gramaturze pomiędzy górne warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego w celu poprawy odporności kompozytu na obciążenia dynamiczne.

Zastosowane w wynalazku włókniiny termoplastyczne korzystnie składają się z losowo rozmieszczonych włókien termoplastycznych i są wytworzone techniką rodmuchiwaną stopionego polimeru (ang. *melt-blown*) (P. Latko-Duralek i wsp., „*Nonwoven fabrics with carbon nanotubes used as interleaves in CFRP*”). W porównaniu do metody mieszania żywicy z napełniaczem, techniki te nie zwiększają lepkości żywicy przed procesem przesycania, a tak wytworzona włóknina może być w sposób kontrolowany, równomiernie rozłożona w strukturze laminatu.

Stosowanymi w wynalazku włókninami korzystnie są włókniiny z polimeru termoplastycznego takiego, jak kopoliamid PA6/PA66, na przykład Platamid® M 1657 (z firmy Arkema). Platamid® M 1657 to standardowy termoplastyczny ko-poliamidowy klej topliwy dostępny w postaci granulatu. Ma on bardzo niską lepkość w stanie stopionym i cechuje się szybką rekrystalizacją, przez co jest szczególnie odpowiedni do wytwarzania wstęg, siatek, włókien jedno- i wielowłókiennych. Platamid® M 1657 zapewnia bardzo dobrą przyczepność do różnych podłoży polarnych (tworzywa termoplastyczne, termoutwardzalne, metalowe włókna naturalne itp.). Posiada również bardzo dobrą odporność na czyszczenie chemiczne i zmywanie do 40°C.

W wynalazku korzystnie stosowane są włókniiny o gramaturze 5 g/m², co nie wpływa negatywnie na zwiększenie masy całkowitej wzmacnianej struktury kompozytowej.

Zastosowanie już kilku warstw takiej włókniny poprawia odporność struktury na obciążenie dynamiczne o co najmniej 5% w porównaniu do materiału referencyjnego (bez warstw włókniny).

Stosowanym w wynalazku materiałem wykorzystanym do wytworzenia laminatów korzystnie jest prepeg epoksydowo-węglowy tkany (ang. *plain weave, PW*) z włóknem węglowym takim, jak np. HexTow® IM7 (z firmy Hexcel). Laminat według niniejszego wynalazku został wykonany metodą bezautoklawową z wykorzystaniem worka próżniowego. Zaproponowany panel został skonsolidowany na płycie wykonanej ze szkła hartowanego, która została najpierw oczyszczona przy użyciu acetonu, celem usunięcia zanieczyszczeń. Następnie szklaną powierzchnię przykryto folią rozdzielającą i przymocowano wokół krawędzi taśmą uszczelniającą. Panel kompozytowy po odgazowaniu położono na przygotowanym podkładzie, a następnie nałożono na jego górną powierzchnię warstwę tej samej folii rozdzielającej. W korzystnym wariantcie następnie zastosowano płytę dociskową, na którą nałożono perforowaną folię rozdzielającą w celu uzyskania wyrobu o najlepszej jakości. Następnie laminat został przykryty tkaniną oddychającą i cały układ zamknięto folią elastyczną. Tak przygotowany układ poddano sieciowaniu (sieciowaniu). Trójstopniowy proces sieciowania laminatu został przeprowadzony zgodnie z rekomendacjami producenta prepegu i został zaprezentowany w tabeli 1 poniżej.

Tabela 1. Profil temperatury sieciowania zastosowanego prepegu.

Początkowa prędkość grzania	Początkowa temperatura i czas wygrzewania	Środkowa prędkość grzania	Środkowa temperatura i czas wygrzewania	Końcowa prędkość grzania	Końcowa temperatura i czas wygrzewania
2°C/min	60±3°C, 120 min	2°C/min	121±5°C, 120min	2°C/min	177±5°C, 120min

Przykładowe struktury kompozytowe uzyskane według wynalazku składały się z prepegu oraz 4 warstw termoplastycznych włókien z kopolimeru Platamid® M 1657, o gramaturze 5 g/m² wytwarzanych metodą rodmuchiwaną stopionego polimeru. Struktury te charakteryzowały się następującym układem warstw: [45/0/-45/90]_{4s}.

Przykład wykonania

Materiałem wykorzystanym do wytworzenia laminatów referencyjnych oraz laminatów o podwyższonej odporności na obciążenia dynamiczne był prepeg epoksydowo-węglowy tkany z włóknem węglowym HexTow® IM7. Zastosowane w badaniach laminaty miały rozmiar wynoszący 150x100 mm (wymiar ten był zgodny z wymogami przeprowadzanych dla laminatów badań). Laminaty te wykonano opisaną wcześniej metodą bezautoklawową z wykorzystaniem worka próżniowego. Trójstopniowy proces

sieciovania laminatu został przeprowadzony zgodnie z rekomendacjami producenta prepregu i został zaprezentowany w tabeli 1 powyżej.

Dodatkowo w celu uzyskania laminatów według wynalazku, tj. o podwyższonej odporności na obciążenia dynamiczne wytworzone kompozyty epoksydowo-węglowe wzmocniono włókninami na bazie kopoliamidu (PA6/PA66) (Platamid® M 1657) o gramaturze 5 g/m^2 wytworzonymi w procesie rozdmuchiwania stopionego polimeru. W badaniach wykorzystano cztery umieszczone centralnie (w widoku z góry-por fig. 1) warstwy włóknin termoplastycznych. Warstwową strukturę kompozytową uzyskaną w tym przykładzie pokazano w przekroju na fig. 2, na której widać, że pomiędzy powierzchnią górną 1 i przeciwną do niej powierzchnią spodnią 2 znajdują się warstwy polimerowego kompozytu wzmocnianego włóknami węglowymi (CFRP) 3, a w obszarze rozciągającym się od powierzchni górnej 1 warstwowej struktury kompozytowej w kierunku jej powierzchni spodniej 2 pomiędzy poszczególnymi warstwami kompozytu 3 znajdują się warstwy włókniny polimerowej 4. Łącznie w przedstawionym przykładzie występują cztery warstwy włókniny polimerowej 4, stanowiąc drugą, czwartą, szóstą i ósmą warstwę struktury kompozytowej, licząc od powierzchni górnej. Zastosowane w badaniach laminaty o podwyższonej odporności na obciążenia dynamiczne cechowały się następującym układem warstw: [45/0/-45/90]_{4s}.

W celu sprawdzenia czy zastosowanie włóknin między warstwami kompozytu prowadzi do poprawy odporności na obciążenia dynamiczne przeprowadzono badania porównawcze laminatów referencyjnych i laminatów o podwyższonej odporności na obciążenia dynamiczne według norm ASTM D7136 i ASTM D7137. W pierwszym etapie dokonano uszkodzenia w wyniku obciążenia dynamicznego o określonej energii. W kolejnym etapie przeprowadzono ściskanie uszkodzonych próbek (ang. *compression after impact*, CAI). Następnie porównano wyniki badań dla obu typów laminatów.

Wyniki:

Uzyskany laminat o podwyższonej odporności na obciążenia dynamiczne charakteryzował się grubością tylko o 0,8% większą w porównaniu do laminatu referencyjnego (tj. zawierającego tę samą liczbę warstw prepregu epoksydowo-węglowego tkanego z włóknem węglowym co porównywany z nim laminat wg wynalazku, ale nie zawierającego ani jednej warstwy włókniny polimerowej pomiędzy nimi).

Otrzymane wyniki badań odporności na obciążenia dynamiczne wykazały że, opracowane rozwiązanie pozwoliło na uzyskanie poprawy odporności na obciążenia dynamiczne na poziomie 7% w porównaniu do laminatu referencyjnego, jednocześnie nie pogarszając modułu laminatu.

Wnioski:

Korzystne jest zastosowanie włókniny o możliwie małych gramaturach (5 g/m^2).

Korzystne jest zastosowanie włóknin wytwarzanych metodą rozdmuchiwania stopionego polimeru.

Korzystne jest zastosowanie włóknin z kopolimeru termoplastycznego.

W celu poprawy odporności CFRP na obciążenia dynamiczne korzystne jest wprowadzenie włóknin między górne warstwy kompozytu (tj. jako drugą, czwartą, szóstą i ósmą warstwę).

Włókniny o małej gramaturze tylko nieznacznie wpływają na zwiększenie masy struktury kompozytowej.

Zastosowanie czterech warstw włóknin w niewielkim stopniu wpływa na zwiększenie grubości laminatu.

Zastrzeżenia patentowe

1. Warstwowa struktura kompozytowa posiadająca powierzchnię górną (1) i przeciwną do niej powierzchnię spodnią (2), oraz złożona z warstw epoksydowego kompozytu wzmocnianego włóknami węglowymi (3) ułożonych naprzemiennie z warstwami włókniny polimerowej z kopoliamidu (4), **znamienna tym**, że warstwy włókniny polimerowej z kopoliamidu (4) znajdują się jedynie w obszarze warstwowej struktury kompozytowej rozciągającym się od jej powierzchni górnej (1) w kierunku powierzchni spodniej (2) na głębokość nie przekraczającą 40% grubości warstwowej struktury kompozytowej, a pozostała część warstwowej struktury kompozytowej składa się wyłącznie z ułożonych na sobie warstw kompozytu epoksydowo-węglowego (3).
2. Struktura kompozytowa według zastrzeżenia 1, **znamienna tym**, że gramatura włókniny polimerowej z kopoliamidu wynosi od 1 do 10 g/m^2 .

3. Struktura kompozytowa według zastrzeżenia 2, **znamienna tym**, że gramatura włókniny polimerowej z kopoliamidu wynosi 5 g/m^2 .
4. Struktura kompozytowa według jednego z zastrzeżeń 1–3, **znamienna tym**, że włóknina polimerowa z kopoliamidu (4) jest włókniną termoplastyczną.
5. Struktura kompozytowa według zastrzeżenia 4, **znamienna tym**, że włóknina termoplastyczna ma losowy układ rozmieszczenia włókien termoplastycznych.
6. Struktura kompozytowa według zastrzeżenia 4 albo 5, **znamienna tym**, że włóknina termoplastyczna pochodzi z procesu rodmuchiwanego stopionego polimeru.
7. Struktura kompozytowa według jednego z zastrzeżeń 4–6, **znamienna tym**, że włóknina termoplastyczna jest wytworzona z kopoliamidu PA6/PA66.
8. Struktura kompozytowa według jednego z zastrzeżeń 1–7, **znamienna tym**, że zawiera od jednej do sześciu warstw włókniny polimerowej z kopoliamidu (4).
9. Struktura kompozytowa według zastrzeżenia 8, **znamienna tym**, że zawiera cztery warstwy włókniny polimerowej z kopoliamidu (4).
10. Struktura kompozytowa według jednego z zastrzeżeń 1–9, **znamienna tym**, że ma następujący układ warstw: $[45/0/-45/90]_{4s}$.

Rysunki

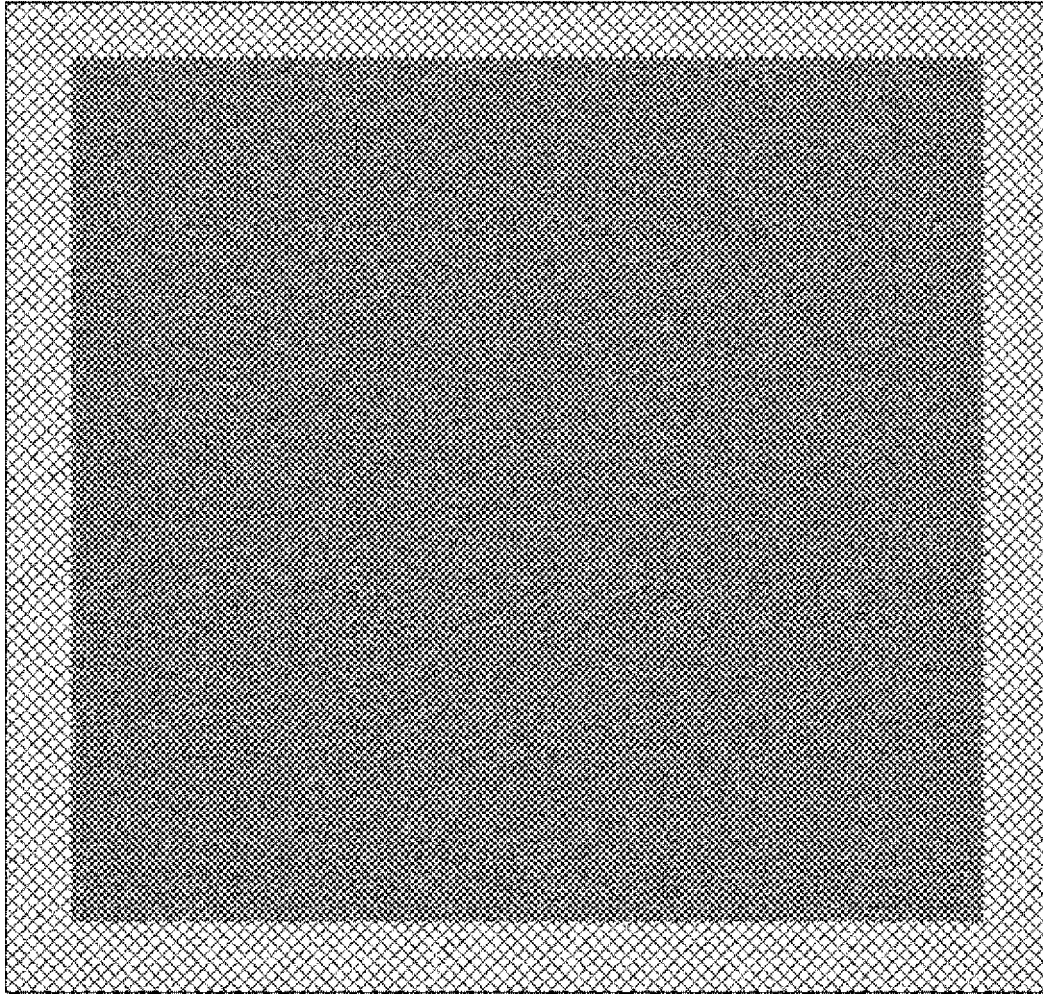


FIG. 1

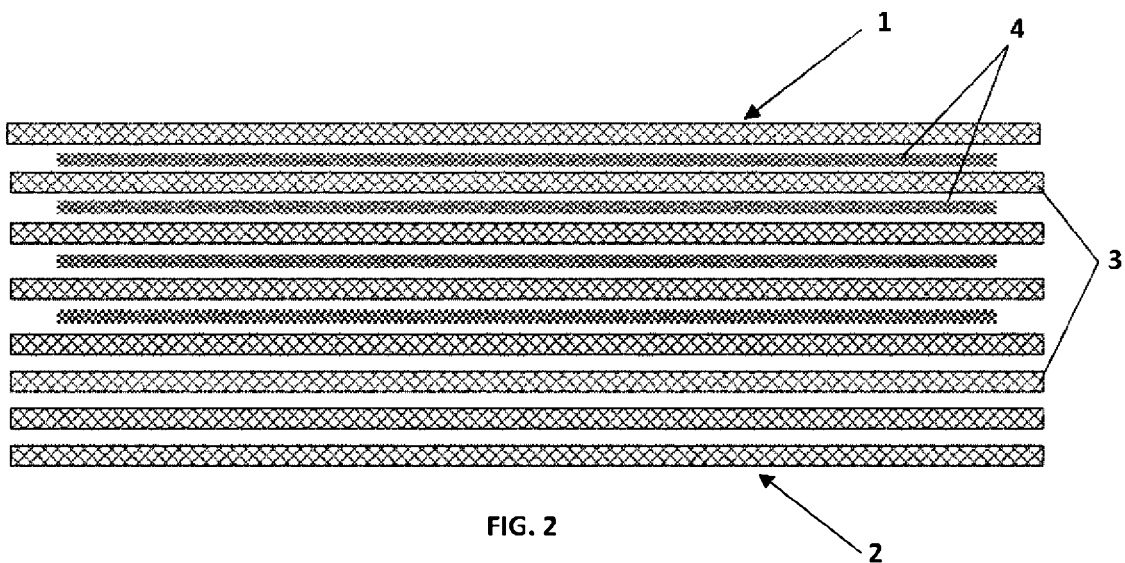


FIG. 2