

Sposób wytwarzania piezoelektrycznego czujnika tensometrycznego i czujnik

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania piezoelektrycznego czujnika tensometrycznego i czujnik przeznaczony do wykrywania i potencjalnego monitorowania odkształceń w laminatach polimerowo-włóknistych lub innych materiałach, bądź konstrukcjach, w szczególności warstwowych.

Czujniki tensometryczne wykorzystuje się do pomiaru odkształceń, wyznaczania naprężenia w oparciu o prawo Hooke'a, a także do pomiaru innych wielkości fizycznych takich jak siła, ciśnienie czy przyspieszenie. Najczęściej stosowanym rodzajem tensometrów są tensometry oporowe. Powstanie naprężenia i zmiana wymiarów czujnika powoduje wówczas zmianę jego rezystancji. Niedogodnością pomiarów przy użyciu tensometrów oporowych jest długi okres przygotowania czujnika do użycia (przygotowanie powierzchni, naklejanie tensometrów, suszenie, zabezpieczanie przed wpływem otoczenia), jednorazowość użycia, konieczność kompensacji zmian temperatury oraz fakt, że często należy wykorzystywać mostki oporowe takie jak mostki Wheatstone'a do pomiaru małych zmian rezystancji tensometru.

Zastosowanie praktyczne znajdują także tensometry piezoelektryczne. Materiały piezoelektryczne (piezoelektryki) są to materiały - zarówno monokryształy jak i polikryształy, których komórki elementarne nie mają środka symetrii. Wśród najczęściej stosowanych piezoelektryków znajdują się: kwarc sodowo-potasowy, diwodorofosforany amonu i potasu, turmaliny, tytanian baru i jego związki. Do grupy piezoelektryków należą także takie substancje jak PZT, tytanian ołowiu czy cyrkonian ołowiu. Włókna wykonane z piezoelektryków charakteryzują się doskonałą elastycznością i wytrzymałością dzięki czemu są wykorzystywane do wytwarzania czujników tensometrycznych.

Znane są z amerykańskich opisów patentowych US7160607 "Laminate damping base material, and damping structure with stack of this base material", EP 2431156 B1 "Multi-ferroic structural health monitoring systems and methods" i US 8250928 B2 "Measurement of strain in an adhesively bonded joint including magnetostrictive material" konstrukcje

czujników wykorzystywanych w kompozytach o strukturze warstwowej. Zasada ich działania jest oparta na odwrotnym zjawisku magnetostrykcji lub efekcie piezoelektrycznym.

W przypadku czujników magnetostrykcyjnych przedstawionych w opisach EP 2431156 i US8250928 cząsteczki magnetyczne rozmieszczone są równomiernie w obszarze międzywarstwowym kompozytu. W wyniku pojawiającego się naprężenia zmienia się rozkład pola magnetycznego rejestrowany przez czujniki umieszczone na zewnętrznej powierzchni kompozytu. Zasada działania czujnika wykorzystującego ceramikę piezoelektryczną opisanego w opisie US7160607 polega na pomiarze ładunku elektrycznego generowanego przez nią na skutek przyłożenia do niej zewnętrznej siły tzw. efekt piezoelektryczny.

Celem wynalazku jest opracowanie nowego sposobu wytwarzania czujników odkształcenia w warstwowych strukturach kompozytowych.

Cel ten osiągnięto poprzez wprowadzenie, w ramach procesu formowania kompozytu, warstwowego tensometrycznego czujnika odkształceń, jako integralnego składnika struktury, w którym wykorzystano nowy materiał łączący w sobie dobre właściwości piezoelektryczne oraz właściwości technologiczne i mechaniczne, pozwalające wprowadzić tenże materiał do struktury laminatu, jako jego integralną część. Wprowadzenie warstwy aktywnej przedmiotowego czujnika nie zmienia właściwości mechanicznych laminatu.

Istota według wynalazku polega na tym, że na wykrój włókna szklanego ciągłego lub ciętego nanosi się warstwę czynnika aktywnego do uzyskania zwilżenia włókien wewnątrz wykroju i jego przesączeniu, po czym utworzoną warstwę umieszcza się pomiędzy dwoma arkuszami włókna szklanego ciągłego lub ciętego z naniesionymi elektrodami, laminuje się je i pozostawia do utwardzenia, a następnie poddaje się ciśnieniowemu nasyceniu żywicą z utwardzaczem.

Korzystnie jako włókna szklane ciągłe lub cięte stosuje się włókna: węglowe, poliaramidowe, polietylenowe, bazaltowe, SiC, SiO₂, naturalne.

Korzystnie warstwę czynnika aktywnego stanowi mieszanina nanokrystalitów wytworzonych z pierwiastków z grupy V, VI i VII układu okresowego zmieszanych z osnową polimerową laminatu i utwardzaczem.

Korzystnie jako osnowę polimerową stosuje się żywice: epoksydowe, poliestrowe, winyloestrowe, poliimidowe, akrylowe, silikonowe.

Korzystnie stosunek masowy nanokrystalitów wytworzonych z pierwiastków z grupy V, VI i VII układu okresowego do osnowy polimerowej laminatu z utwardzaczem wynosi od 1:100 do 2:1, korzystnie 1:4.

Korzystnie grubość warstwy czynnika aktywnego wynosi od 0,01 do 0,70 mm.

Korzystnie czujnik wytwarza się metodą infuzji próżniowej, metodą RTM, metodą lekkiego RTM, metodą prasowania nisko- lub wysokociśnieniowego, na zimno lub na gorąco, metodą kontaktową.

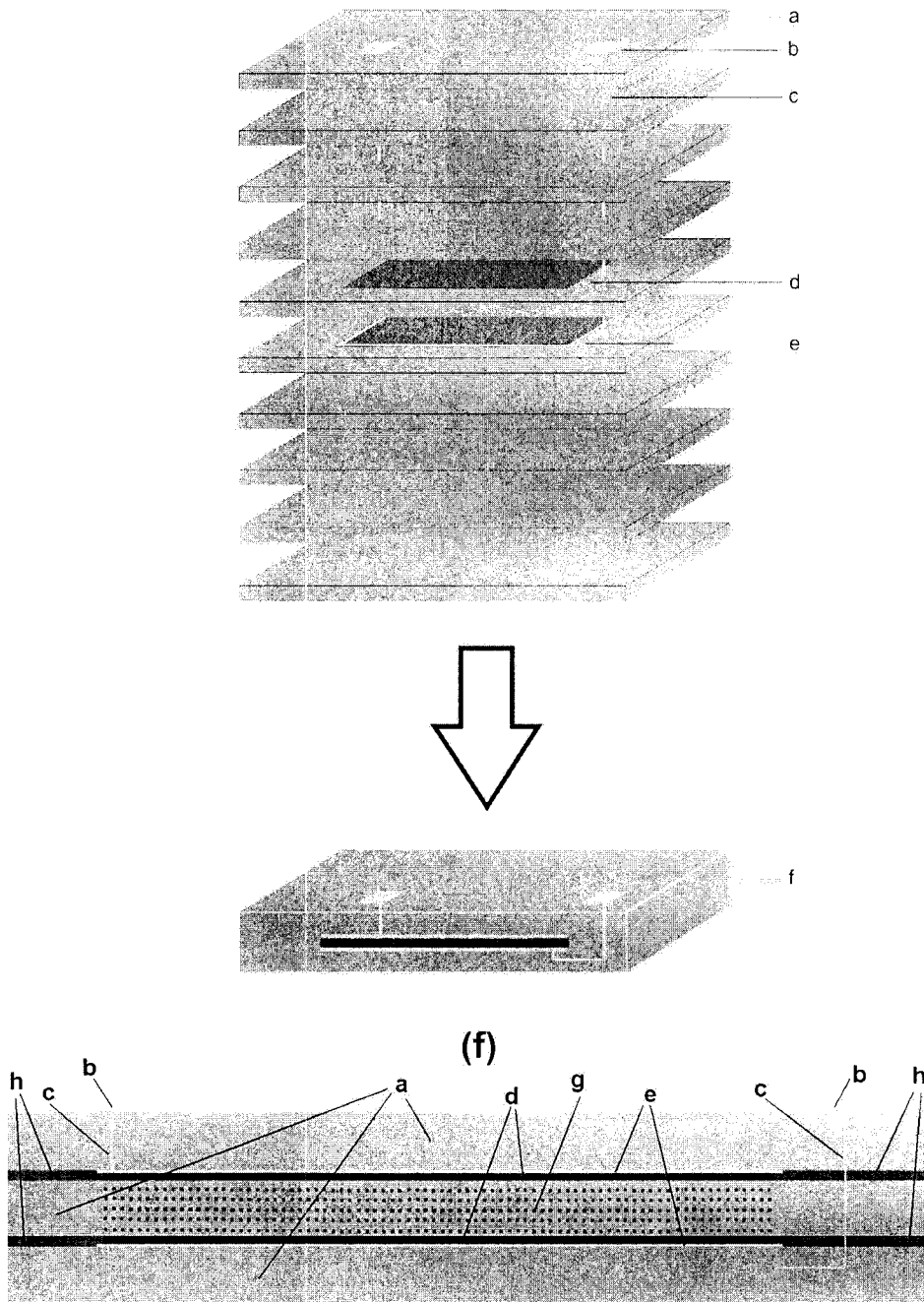
Piezoelektryczny czujnik tensometryczny według wynalazku charakteryzuje się tym, że składa się z materiału aktywnego będącego mieszaniną żywicy wraz z utwardzaczem i nanokrystalitów wytworzonych z pierwiastków z grupy V, VI i VII układu okresowego, przy czym stosunek masowy nanokrystalitów do żywicy z utwardzaczem wynosi od 1:100 do 2:1, korzystnie 1:4.

Korzystnie grubość warstwy czynnika aktywnego wynosi od 0,01 do 0,70 mm.

Zaletą rozwiązania według wynalazku jest fakt, iż bezpośrednio mierzoną wielkością fizyczną jest napięcie elektryczne wytwarzane w czujniku, a nie jego rezystancja; czułość na zmiany odkształcenia przy małej szybkości odkształcania; zależność odpowiedzi czujnika od szybkości odkształcania; wzrost czułości w niskich temperaturach od 213 K do 293 K; brak wpływu obecności czujnika na własności mechaniczne laminatu.

Przykład 1

Piezoelektryczny czujnik tensometryczny według wynalazku (Rys. 1) został wytworzony jako część laminatu formowanego korzystnie metodą RTM (ang. resin transfer moulding, pol. formowanie ciśnieniowo-próżniowe) lub inną metodą formowania. Proces formowania został zmodyfikowany poprzez dodanie kroku technologicznego, który polega na lokalnym ręcznym naniesieniu na dwa wykroje z włókna szklanego w postaci tkaniny (a) warstw pasty srebrnej, stanowiących po utwardzeniu elektrody (e) między którymi następuje zmiana potencjału spowodowana odkształcaniem materiału aktywnego, a następnie pozostawienie ich do utwardzenia. Z naniesionych elektrod wyprowadza się połączenia elektryczne (c) w postaci cienkiego izolowanego drutu miedzianego o średnicy 0,15 mm, przewodzące sygnał elektryczny z czujnika. Na utwardzone elektrody nakłada się warstwy czynnika aktywnego (d) w postaci nanodrutów SbSI zmieszanych z żywicą epoksydową i utwardzaczem. Stosunek masowy nanodrutów do żywicy wraz z utwardzaczem wynosił 1:4. Grubość warstwy aktywnej wynosiła $0,55 \pm 0,05$ mm. Na trzeci wykroj włókna szklanego nanosie się po obydwu jego stronach warstwę materiału aktywnego, składającego się z żywicy epoksydowej wraz z utwardzaczem i nanodrutów SbSI, aż do uzyskania zwilżenia włókien wewnątrz wykroju i jego przesączenia na wskroś. Tak przygotowaną warstwę umieszcza się pomiędzy dwoma arkuszami włókna szklanego z naniesionymi elektrodami pokrytymi warstwami materiału aktywnego. W kolejnym kroku warstwy laminuje się z użyciem pędzla i wałka, a następnie pozostawia do utwardzenia materiału aktywnego.

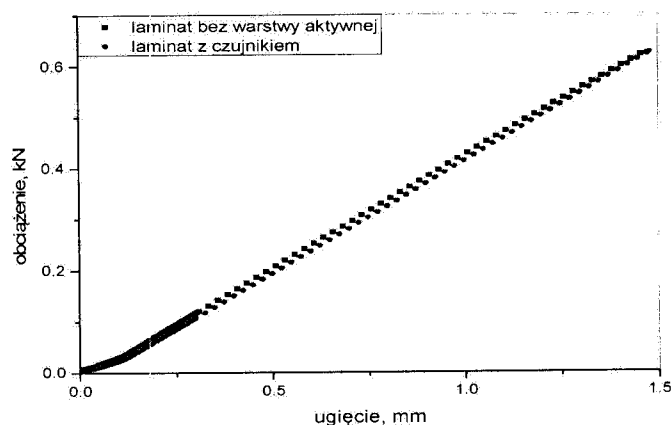


Rys. 1. Budowa warstwowa i przekrój wytworzonego czujnika: a – wykrój z włókna szklanego; b – pole kontaktowe; c – połączenia elektryczne do elektrod wyprowadzone na zewnątrz stosu; d – warstwa aktywna czujnika laminatu składająca się z materiału aktywnego będącego mieszaniną żywicy epoksydowej i nanokrystalicznego jodosiarczku antymonu (SbSI); e – elektroda srebrna; f – przekrój poprzeczny czujnika po ciśnieniowym nasyceniu (proces RTM) z widocznymi elektrodami, warstwą aktywną oraz wyprowadzonymi kontaktami elektrycznymi; g – warstwa włókien przesycona materiałem aktywnym; h – warstewki utwardzonej osnowy laminatu.

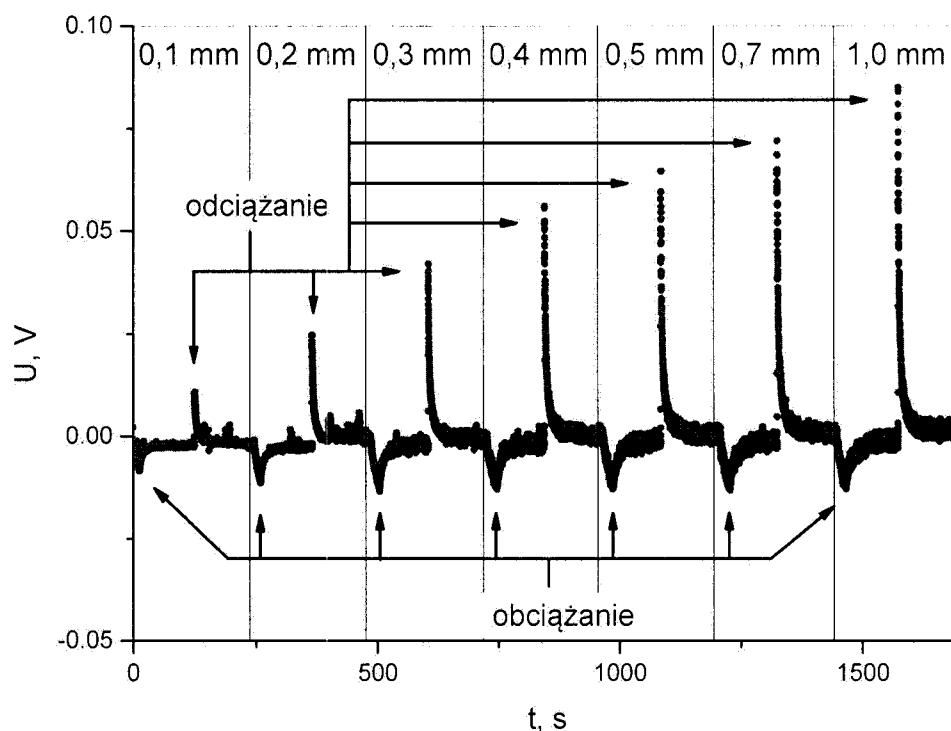
Warstwy lokalnie zalaminowane utwardzonym materiałem aktywnym umieszcza się wewnątrz stosu wzmocnienia złożonego łącznie z 10 wykrojów włókna szklanego. Połączenia elektryczne wyprowadza się na zewnątrz stosu do pól kontaktowych (b) na zewnątrz laminatu. Przygotowany stos warstw wzmacniających zawierający utwardzony obszar aktywny połączony z elektrodami i wyprowadzonymi przewodami poddaje się ciśnieniowemu nasycaniu żywicą epoksydową wraz z utwardzaczem, w zamkniętej formie (proces RTM). Po napełnieniu żywicą stos pozostawia się w formie do utwardzenia. Moment utwardzenia laminatu jest tożsamy z momentem wytworzenia zintegrowanego w nim przedmiotowego czujnika.

SbSI jest półprzewodnikiem i ferroelektrykiem. Wykazuje on silne właściwości piezoelektryczne (moduł piezoelektryczny $d_{33}=650$ pC/N) oraz elektromechaniczne (współczynnik sprzężenia elektromechanicznego $k_{33}=0,9$). W związku z dużymi wartościami tych parametrów wytworzone czujniki będą konkurencyjne w stosunku do tensometrów wytwarzanych z innych materiałów.

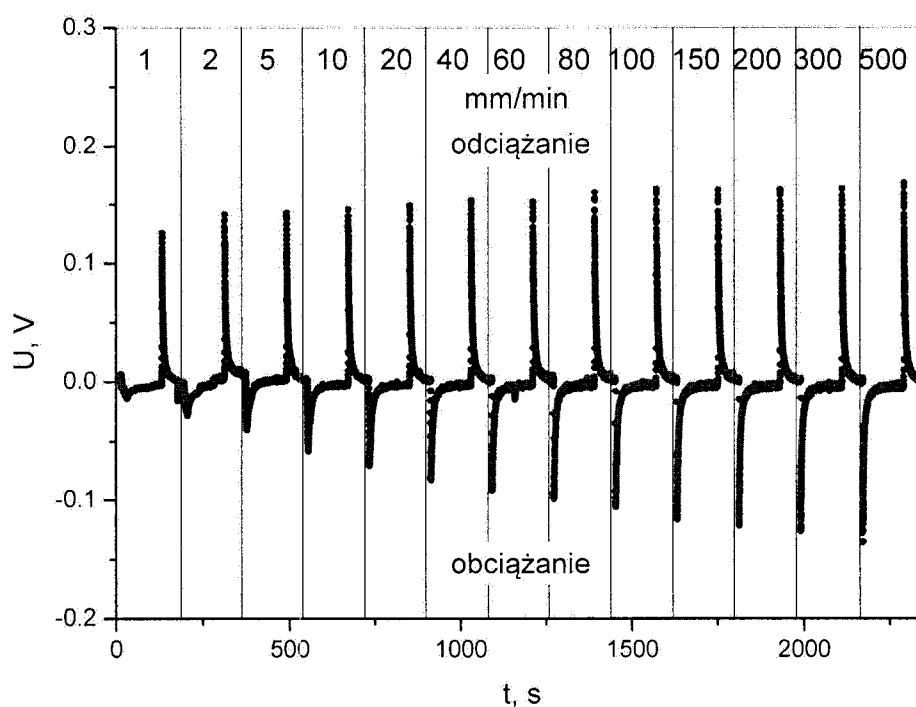
Przedstawiony sposób wytwarzania piezoelektrycznych czujników tensometrycznych powoduje, iż obecność warstwy aktywnej nie zmienia w sposób znaczący, maksymalnie 5 % modułu sprężystości oraz wytrzymałości laminatu (Rys. 2). Zostało to potwierdzone testami obciążania na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4469. Uzyskane krzywe dla laminatu z obszarem aktywnym zawierającym 20% domieszkę SbSI oraz dla laminatu bez obszaru aktywnego pokrywają się. Parametry elektryczne uzyskane w badaniach czujnika wytworzonego według przykładu 1 przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Przedstawione charakterystyki elektryczne pokazują, iż odpowiedź czujnika pozwala określić zarówno szybkość deformacji, jak i wartości ugięcia.



Rys. 2. Krzywe zginania dla laminatu 10-warstwowego z obszarem aktywnym zawierającym 20% domieszkę SbSI oraz dla laminatu bez obszaru aktywnego.



Rys. 3. Odpowiedzi elektryczne czujnika zarejestrowane dla różnych wartości ugięcia przy stałej prędkości obciążania ($v=1$ mm/min). Odciażanie czujnika następowało ze stałą prędkością $v=500$ mm/min.



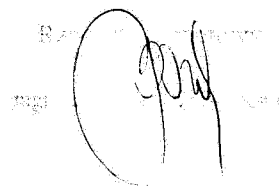
Rys. 4. Odpowiedzi elektryczne czujnika zarejestrowane dla różnych prędkości obciążania przy wartości ugięcia $x=1$ mm. Odciażanie czujnika następowało z taką samą prędkością jak jego obciążanie.

Przykład 2

Piezoelektryczny czujnik tensometryczny na bazie kompozytowego laminatu polimerowo-włóknistego według przykładu 1 charakteryzuje się tym, że warstwa aktywna czujnika laminatu składała się z materiału aktywnego będącego mieszaniną żywicy epoksydowej i nanokrystalicznego jodosiarczku antymonu (SbSI) w stosunku 3:2.

Przykład 3

Piezoelektryczny czujnik tensometryczny na bazie kompozytowego laminatu polimerowo-włóknistego według przykładu 1 charakteryzuje się tym, że warstwa aktywna czujnika laminatu składała się z materiału aktywnego będącego mieszaniną żywicy epoksydowej i nanokrystalicznego jodoselenku antymonu (SbSeI) w stosunku 4:1.

A handwritten signature in black ink is written over a faint, circular stamp. The signature is stylized and appears to be a name. The stamp is mostly illegible but seems to contain some text around the perimeter.