

Laminat samonaprawiający się i sposób jego wytwarzania

Przedmiotem wynalazku jest laminat samonaprawiający się i sposób wytwarzania laminatu samonaprawiającego się.

5 Laminaty metalowo-włókniste stosowane w Airbusie A380 stają się coraz bardziej popularne nie tylko w przemyśle lotniczym, ale również w kolejnictwie i przemyśle samochodowym. Najbardziej pożądanymi laminatami metalowo-włóknistymi pod kątem właściwości są laminaty na bazie aluminium z warstwami epoksydowymi z włóknami szklanymi zwanymi Glare®. Poszukiwane są wciąż
10 nowe rozwiązania technologiczne i materiałowe związane z dążeniem do tego, aby materiały były lepsze, przy zachowaniu podobnych lub korzystniejszych właściwości. W przemyśle lotniczym i kosmicznym, gdzie paliwo generuje duże koszty, ulepszone są wciąż nowe struktury w celu uzyskania większego zasięgu, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów i zachowaniu określonych standardów
15 środowiska.

Znany i stosowany jest z amerykańskiego zgłoszenia patentowego nr US20130209764 A1 laminat kompozytowy z warstwą samonaprawiającą się, w którym struktura kompozytowa zawiera wiele warstw materiału kompozytowego i co najmniej jedną warstwę materiału samonaprawiającego się.

20 Z artykułu pt. „Microcapsules in Fiber Metal Laminates for Self-Healing at the Interface between Magnesium and Carbon Fiber-Reinforced Epoxy”, M. Ostapiuk znany jest laminat metalowo-włóknisty z warstwą magnezu i włókien węglowych oraz zawierający mikrokapsułki w aspekcie właściwości samonaprawiających się na granicy rozdziału faz.

25 W artykule pt. „Recovery of Mode I self-healing interlaminar fracture toughness of fiber metal laminate by modified double cantilever beam test”, L. Shanmugam, M. Naebe, J.K. Russell, J. Varley I J. Yang w Composites Comunnications Volume 16, December 2019, Pages 25-29 przedstawiony został laminat metalowo-włóknisty składający się z cienkich blach metalowych oraz

warstwy polimerowej samonaprawiającej się i warstwy polimerowej zawierającej włókna węglowe.

Z artykułu pt. „The interlaminar resistance of carbon fiber-Al laminate reinforced with hollow and core-shell microcapsules” M.D. Shokrian, K. Shelesh-
5 Nezhad, R. Najjar I E. Bigdeli Theoretical and Applied Fracture Mechanics Volume 110, December 2020, 102778 znane są laminaty metalowo-włókniste na bazie aluminium i kompozytu węglowego zawierającego włókna węglowe, gdzie zastosowana jest warstwa mikrokapsulek jako samonaprawiająca się.

Celem wynalazku jest wytworzenie laminatu samonaprawiającego się
10 odpornego na uderzenia i korozję wykorzystywanego w przemyśle samochodowym i lotniczym.

Istotą laminatu samonaprawiającego się posiadającego od zewnętrznej strony arkusz blachy ze stopu aluminium, który na obu powierzchniach posiada warstwę ceramiczną z nałożoną warstwą zol-żelu, według wynalazku, jest to, że w
15 środkowej części laminatu znajduje się warstwa piany poliuretanowej o grubości od 10 mm do 50 mm, do której obu powierzchni przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze o grubości od 0,4 mm do 2,5 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Do zewnętrznych powierzchni
20 skrajnych warstw samonaprawiających się pierwszych przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego o grubości od 0,2 mm do 1 mm każda. Natomiast do zewnętrznych powierzchni skrajnych warstw kompozytu epoksydowo-węglowego przylega adhezyjnie warstwa samonaprawiająca się druga o grubości od 0,5 mm do 2,5 mm, składająca się
25 z mikrokapsulek o wielkości od 20 μm do 100 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Do warstwy samonaprawiającej się drugiej przylega adhezyjnie warstwa zol-żelu o grubości od 1 μm do 3 μm , która nałożona jest na warstwę ceramiczną o grubości
30 od 6 μm do 12 μm znajdującą się na arkuszu blachy ze stopu aluminium o grubości

od 0,3 mm do 1 mm, który na zewnętrznej powierzchni posiada warstwę ceramiczną o grubości od 6 μm do 12 μm z nałożoną warstwą zol-żelu o grubości od 1 μm do 3 μm .

Istotą sposobu wytwarzania laminatu samonaprawiającego się, według wynalazku, jest to, że na dwa arkusze blachy ze stopu aluminium o grubości od 0,3 mm do 1 mm posiadające na obu powierzchniach warstwę ceramiczną o grubości od 6 μm do 12 μm nakłada się obustronnie warstwę zol-żelu o grubości od 1 μm do 3 μm , po czym pozostawia się na czas 1 h w temperaturze 23°C. Następnie na jeden z arkuszy blachy ze stopu aluminium o grubości od 0,3 mm do 1 mm posiadający na obu powierzchniach warstwę ceramiczną o grubości od 6 μm do 12 μm i warstwę zol-żelu o grubości od 1 μm do 3 μm nakłada się warstwę samonaprawiającą się drugą o grubości od 0,5 mm do 2,5 mm, składającą się z mikrokapsulek o wielkości od 20 μm do 100 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocyanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Na warstwę samonaprawiającą się drugą nakłada się kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o grubości 0,2 mm do 1 mm i otrzymuje się dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego o grubości od 0,2 mm do 1 mm każda. Następnie nakłada się kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu o grubości od 0,25 mm do 2 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminuje się ręcznie żywicą epoksydową i otrzymuje się dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze o grubości od 0,4 mm do 2,5 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Następnie nakłada się arkusz piany poliuretanowej o grubości od 10 mm do 50 mm i otrzymuje się warstwę piany poliuretanowej o grubości od 10 mm do 50 mm. Następnie nakłada się kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu o grubości od 0,25 mm do 2 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminuje się ręcznie żywicą epoksydową i otrzymuje się dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze o grubości

- od 0,4 mm do 2,5 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Następnie nakłada się kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o grubości 0,2 mm do 1 mm i otrzymuje się dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego o grubości od 0,2 mm do 1 mm każda, po czym nakłada się warstwę samonaprawiającą się drugą o grubości od 0,5 mm do 2,5 mm składającą się z mikrokapsulek o wielkości od 20 μm do 100 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo.
- 10 Następnie nakłada się drugi z arkuszy blachy ze stopu aluminium o grubości od 0,3 mm do 1 mm posiadający na obu powierzchniach warstwę ceramiczną o grubości od 6 μm do 12 μm i warstwę zol-żelu o grubości od 1 μm do 3 μm . Następnie wykonuje się pakiet próżniowy i odsysa się powietrze do podciśnienia -0,08 MPa, po czym poddaje się całość procesowi utwardzania w czasie 4 h w temperaturze
- 15 135°C i ciśnieniu 4 barów .

Korzystnie jest, gdy nakłada się kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o splocie skośnym albo o splocie satynowym.

- Korzystnie jest, gdy nakłada się kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu w kierunku ułożenia
- 20 0°/0° albo 0°/90° albo +45°/-45°.

- Korzystnym skutkiem wynalazku jest to, że otrzymuje się laminat samonaprawiający się o wysokich właściwościach odpornościowych i absorpcyjnych na uderzenia o niskiej prędkości. Otrzymany laminat posiada również właściwości antykorozyjne. Zastosowane warstwy zawierające włókna
- 25 szklane wypełnione środkiem samonaprawiającym oraz mikrokapsułki hamują rozwój pęknięć w laminacie, a po 24h uzyskuje się efekt samonaprawy laminatu. Ponadto warstwa piany poliuretanowej dodatkowo działa jako warstwa absorpcyjna przed uderzeniami.

- Wynalazek został przedstawiony w przykładzie wykonania na rysunku,
- 30 który przedstawia przekrój poprzeczny laminatu.

Przykład 1

Sposób wytwarzania laminatu samonaprawiającego się polegał na tym, że powierzchnie arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 w stanie T3 o wymiarach 300 x 400 mm i grubości 0,3 mm oczyszczono i odtłuszczono w przemysłowym

5 roztworze alkalicznym składającym się z krzemianu sodu w ilości wagowej 5% i wody w ilości wagowej 95% roztworu o pH 10, a następnie anodowano w alkalicznym roztworze. Cały proces trwał 10 minut, a gęstość prądu wynosiła 5 A/dm² przy napięciu do 400V, o prądzie impulsowym o wysokiej częstotliwości 1000Hz i wypełnieniu 30% czasu impulsów. Roztworem do anodowania był 5g/

10 NaOH i 10g/l Na₂SiO₃. Następnie wykonano płukanie w wodzie wodociągowej i suszono sprężonym powietrzem. Otrzymano na obu powierzchniach arkusza blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 warstwę ceramiczną 2 o grubości 6 μm. Na arkusze blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 posiadające na obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 6 μm nałożono poprzez laminowanie ręczne warstwę zol-

15 żelu 3 o grubości 1 μm i pozostawiono na czas 1 h w temperaturze 23°C. Następnie na jeden z arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 0,3 mm posiadający na obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 6 μm i warstwę zol-żelu 3 o grubości 1 μm nałożono warstwę samonaprawiającą się drugą 7 o grubości 0,5 mm składającą się z mikrokapsulek o wielkości 20 μm, z których każda składa się z

20 poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Następnie na warstwę samonaprawiającą się drugą 7 nałożono kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o splocie skośnym o grubości 0,2 mm i otrzymano dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o

25 grubości 0,2 mm każda. Następnie nałożono kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu w kierunku ułożenia 0°/0° o grubości 0,25 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminowano ręcznie żywicą epoksydową i otrzymano dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze 5 o grubości 0,4 mm każda, składające się z włókien

30 szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą

epoksydową. Następnie nałożono arkusz piany poliuretanowej o grubości 10 mm i otrzymano warstwę piany poliuretanowej 4 o grubości 10 mm. Następnie nałożono kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu w kierunku ułożenia $0^\circ/0^\circ$ o grubości 0,25 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminowano ręcznie żywicą epoksydową i otrzymano dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze 5 o grubości 0,4 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Następnie nałożono kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o splocie skośnym o 10 grubości 0,2 mm i otrzymano dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o grubości 0,2 mm każda, po czym nałożono warstwę samonaprawiającą się drugą 7 o grubości 0,5 mm, składającą się z mikrokapsulek o wielkości 20 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu 15 diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Następnie nałożono drugi z arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 0,3 mm posiadający na obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 6 μm i warstwę zol-żelu 3 o grubości 1 μm . Następnie wykonano pakiet próżniowy i odessano powietrze do podciśnienia -0,08 MPa, po czym poddano całość procesowi utwardzania w czasie 20 4 h w temperaturze 135°C i ciśnieniu 4 barów. Jednocześnie w sposobie wytwarzania laminatu samonaprawiającego się wykorzystano i zol-żel o nazwie handlowej EC-2333 3M.

W wytworzonym laminacie samonaprawiającym się w środkowej części znajduje się warstwa piany poliuretanowej 4 o grubości 10 mm, do której obu 25 powierzchni przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze 5 o grubości 0,4 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Do zewnętrznych powierzchni skrajnych warstw samonaprawiających się pierwszych 5 przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o grubości 0,2 mm każda. Natomiast do zewnętrznych powierzchni 30

skrajnych warstw kompozytu epoksydowo-węglowego 6 przylega adhezyjnie warstwa samonaprawiająca się druga 7 o grubości 0,5 mm, składająca się z mikrokapsulek o wielkości 20 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Do warstwy samonaprawiającej się drugiej 7 przylega adhezyjnie warstwa zol-żelu 3 o grubości 1 μm , która nałożona jest na warstwę ceramiczną 2 o grubości 6 μm znajdującą się na arkuszu blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 0,3 mm, który na zewnętrznej powierzchni posiada warstwę ceramiczną 2 o grubości 6 μm z nałożoną warstwą zol-żelu 3 o grubości 1 μm .

Otrzymany laminat poddano badaniom na uderzenia o niskiej prędkości, gdzie po upływie 24h uzyskano właściwości samonaprawiające, polegające na przywróceniu integralności struktury. Laminat poddano badaniom na uderzenia o niskiej prędkości poniżej 5 m/s o energii 2,5 J. Laminat charakteryzował się tym, że warstwy samonaprawiające się po uderzeniu zostały zniszczone, natomiast warstwa piany poliuretanowej zatrzymała rozwój pęknięć do spodniej części laminatu. Ponadto laminaty wykazują zwiększenie odporności na działania środowiska, szczególnie na korozję w roztworze NaCl.

Przykład 2

Sposób wytwarzania laminatu samonaprawiającego się polegał na tym, że powierzchnie arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 w stanie T3 o wymiarach 300 x 400 mm i grubości 0,5 mm oczyszczono i odtłuszczono w przemysłowym roztworze alkalicznym składającym się z krzemianu sodu w ilości wagowej 5% i wody w ilości wagowej 95% roztworu o pH 10, a następnie anodowano w alkalicznym roztworze. Cały proces trwał 10 minut, a gęstość prądu wynosiła 5 A/dm² przy napięciu do 400V, o prądzie impulsowym o wysokiej częstotliwości 1000Hz i wypełnieniu 30% czasu impulsów. Roztworem do anodowania był 5g/NaOH i 10g/l Na₂SiO₃. Następnie wykonano płukanie w wodzie wodociągowej i suszono sprężonym powietrzem. Otrzymano na obu powierzchniach arkusza blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 warstwę ceramiczną 2 o grubości 8 μm . Na arkusze

- blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 posiadające na obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 8 μm nałożono poprzez laminowanie ręczne warstwę zol-żelu 3 o grubości 2 μm i pozostawiono na czas 1 h w temperaturze 23°C. Następnie na jeden z arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 0,5 mm posiadający na
- 5 obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 8 μm i warstwę zol-żelu 3 o grubości 2 μm nałożono warstwę samonaprawiającą się drugą 7 o grubości 0,75 mm składającą się z mikrokapsulek o wielkości 50 μm , z których każda składa się z poliiizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo.
- 10 Następnie na warstwę samonaprawiającą się drugą 7 nałożono kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o splocie skośnym o grubości 0,5 mm i otrzymano dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o grubości 0,5 mm każda. Następnie nałożono kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu w kierunku ułożenia
- 15 0/90° o grubości 0,5 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminowano ręcznie żywicą epoksydową i otrzymano dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze 5 o grubości 1 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Następnie nałożono arkusz piany poliuretanowej o grubości 25 mm i
- 20 otrzymano warstwę piany poliuretanowej 4 o grubości 25 mm. Następnie nałożono kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu w kierunku ułożenia 0/90° o grubości 0,5 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminowano ręcznie żywicą epoksydową i otrzymano dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze
- 25 5 o grubości 1 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Następnie nałożono kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o splocie skośnym o grubości 0,5 mm i otrzymano dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o grubości 0,5 mm każda, po czym nałożono warstwę
- 30 samonaprawiającą się drugą 7 o grubości 0,75 mm, składającą się z mikrokapsulek

o wielkości 50 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Następnie nałożono drugi z arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 0,5 mm posiadający na obu
5 powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 8 μm i warstwę zol-żelu 3 o grubości 2 μm . Następnie wykonano pakiet próżniowy i odessano powietrze do podciśnienia -0,08 MPa, po czym poddano całość procesowi utwardzania w czasie 4 h w temperaturze 135°C i ciśnieniu 4 barów. Jednocześnie w sposobie wytwarzania laminatu samonaprawiającego się wykorzystano i zol-żel o nazwie
10 handlowej EC-2333 3M.

W wytworzonym laminacie samonaprawiającym się w środkowej części znajduje się warstwa piany poliuretanowej 4 o grubości 25 mm, do której obu powierzchni przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze 5 o grubości 1 mm każda, składające się z włókien szklanych
15 wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Do zewnętrznych powierzchni skrajnych warstw samonaprawiających się pierwszych 5 przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o grubości 0,5 mm każda. Natomiast do zewnętrznych powierzchni skrajnych warstw kompozytu epoksydowo-węglowego 6 przylega adhezyjnie
20 warstwa samonaprawiająca się druga 7 o grubości 0,75 mm, składająca się z mikrokapsulek o wielkości 50 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Do warstwy samonaprawiającej się drugiej 7 przylega adhezyjnie warstwa zol-żelu 3 o grubości
25 2 μm , która nałożona jest na warstwę ceramiczną 2 o grubości 8 μm znajdującą się na arkuszu blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 0,5 mm, który na zewnętrznej powierzchni posiada warstwę ceramiczną 2 o grubości 8 μm z nałożoną warstwą zol-żelu 3 o grubości 2 μm .

Otrzymany laminat poddano badaniom na uderzenia o niskiej prędkości,
30 gdzie po upływie 24h uzyskano właściwości samonaprawiające, polegające na

przywróceniu integralności struktury. Laminat poddano badaniom na uderzenia o niskiej prędkości poniżej 5 m/s o energii 5 J. Laminat charakteryzował się tym, że warstwy samonaprawiające się po uderzeniu zostały zniszczone, natomiast warstwa piany poliuretanowej zatrzymała rozwój pęknięć do spodniej części laminatu.

- 5 Ponadto laminaty wykazują zwiększenie odporności na działania środowiska, szczególnie na korozję w roztworze NaCl.

Przykład 3

- Sposób wytwarzania laminatu samonaprawiającego się polegał na tym, że powierzchnie arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 w stanie T3 o wymiarach 300 x 400 mm i grubości 1 mm oczyszczono i odtłuszczono w przemysłowym roztworze alkalicznym składającym się z krzemianu sodu w ilości wagowej 5% i wody w ilości wagowej 95% roztworu o pH 10, a następnie anodowano w alkalicznym roztworze. Cały proces trwał 10 minut, a gęstość prądu wynosiła 5 A/dm² przy napięciu do 400V, o prądzie impulsowym o wysokiej częstotliwości 1000Hz i wypełnieniu 30% czasu impulsów. Roztworem do anodowania był 5g/NaOH i 10g/l Na₂SiO₃. Następnie wykonano płukanie w wodzie wodociągowej i suszono sprężonym powietrzem. Otrzymano na obu powierzchniach arkusza blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 warstwę ceramiczną 2 o grubości 12 μm. Na arkusze blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 posiadające na obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 12 μm nałożono poprzez laminowanie ręczne warstwę zol-żelu 3 o grubości 3 μm i pozostawiono na czas 1 h w temperaturze 23°C. Następnie na jeden z arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 1 mm posiadający na obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości 12 μm i warstwę zol-żelu 3 o grubości 3 μm nałożono warstwę samonaprawiającą się drugą 7 o grubości 2,5 mm składającą się z mikrokapsulek o wielkości 100 μm, z których każda składa się z polilizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Następnie na warstwę samonaprawiającą się drugą 7 nałożono kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o splocie satynowym o grubości 1 mm i otrzymano dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o

grubości 1 mm każda. Następnie nałożono kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu w kierunku ułożenia $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ o grubości 2 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminowano ręcznie żywicą epoksydową i otrzymano dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze 5 o grubości 2,5 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Następnie nałożono arkusz piany poliuretanowej o grubości 50 mm i otrzymano warstwę piany poliuretanowej 4 o grubości 50 mm. Następnie nałożono kolejno dwie jednakowe warstwy włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu w kierunku ułożenia $0/90^{\circ}$ o grubości 2 mm każda, przy czym każdą warstwę włókien szklanych laminowano ręcznie żywicą epoksydową i otrzymano dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się pierwsze 5 o grubości 2,5 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Następnie nałożono kolejno dwa arkusze prepregu węglowego w postaci tkaniny o splocie satynowym o grubości 1 mm i otrzymano dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo- węglowego 6 o grubości 1 mm każda, po czym nałożono warstwę samonaprawiającą się drugą 7 o grubości 2,5 mm, składającą się z mikrokapsulek o wielkości $100\text{ }\mu\text{m}$, z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Następnie nałożono drugi z arkuszy blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 1 mm posiadający na obu powierzchniach warstwę ceramiczną 2 o grubości $12\text{ }\mu\text{m}$ i warstwę zol-żelu 3 o grubości $3\text{ }\mu\text{m}$. Następnie wykonano pakiet próżniowy i odessano powietrze do podciśnienia $-0,08\text{ MPa}$, po czym poddano całość procesowi utwardzania w czasie 4 h w temperaturze 135°C i ciśnieniu 4 barów. Jednocześnie w sposobie wytwarzania laminatu samonaprawiającego się wykorzystano i zol-żel o nazwie handlowej EC-2333 3M.

W wytworzonym laminacie samonaprawiającym się w środkowej części znajduje się warstwa piany poliuretanowej 4 o grubości 50 mm, do której obu powierzchni przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy samonaprawiające się

pierwsze 5 o grubości 2,5 mm każda, składające się z włókien szklanych wypełnionych diizocyjanianem izoforonu i połączonych żywicą epoksydową. Do zewnętrznych powierzchni skrajnych warstw samonaprawiających się pierwszych 5 przylegają adhezyjnie dwie jednakowe warstwy kompozytu epoksydowo-węglowego 6 o grubości 1 mm każda. Natomiast do zewnętrznych powierzchni skrajnych warstw kompozytu epoksydowo-węglowego 6 przylega adhezyjnie warstwa samonaprawiająca się druga 7 o grubości 2,5 mm, składająca się z mikrokapsulek o wielkości 100 μm , z których każda składa się z poliizocyjanuranu diizocyjanianu toluenu w octanie etylu w ilości 48,8% wagowo i wypełnienia z izocjanatu diizocyjanianu izoforonu w ilości 51,2% wagowo. Do warstwy samonaprawiającej się drugiej 7 przylega adhezyjnie warstwa zol-żelu 3 o grubości 3 μm , która nałożona jest na warstwę ceramiczną 2 o grubości 12 μm znajdującą się na arkuszu blachy 1 ze stopu AlCu4Mg1 o grubości 1 mm, który na zewnętrznej powierzchni posiada warstwę ceramiczną 2 o grubości 12 μm z nałożoną warstwą zol-żelu 3 o grubości 3 μm .

Otrzymany laminat poddano badaniom na uderzenia o niskiej prędkości, gdzie po upływie 24h uzyskano właściwości samonaprawiające, polegające na przywróceniu integralności struktury. Laminat poddano badaniom na uderzenia o niskiej prędkości poniżej 5 m/s o energii 10 J. Laminat charakteryzował się tym, że warstwy samonaprawiające się po uderzeniu zostały zniszczone, natomiast warstwa piany poliuretanowej zatrzymała rozwój pęknięć do spodniej części laminatu. Ponadto laminaty wykazują zwiększenie odporności na działania środowiska, szczególnie na korozję w roztworze NaCl.

**PODPIS ZAUFANY****PAULINA
PATER**

20.01.2025 12:35:56 [GMT+1]

Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym