

**EWA WITCZAK**

**Instytut Włókiennictwa  
ul. Brzezińska 5/15  
92-103 Łódź**

## **KSZTAŁTOWANIE WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH TKANYCH PREFORM PRZESTRZENNYCH W OPARCIU O ICH PARAMETRY STRUKTURALNE**

Promotor: **prof. dr hab. inż. Marek Snycerski**

Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Marian Szczerek**  
**prof. dr hab. inż. Janusz Szosland**

*Celem pracy było zbadanie mechanizmu kształtowania wytrzymałości i opracowanie sposobu modelowania wytrzymałości na zginanie kompozytu zbrojonego tkaniną przestrzenną o przekroju T za pomocą parametrów strukturalnych tej tkaniny.*

*T-owe tkaniny przeznaczone na zbrojenie wykonane zostały z przędzy PES z włókien ciągłych o wysokiej wytrzymałości i w celu wytworzenia kompozytu, impregnowane żywicą epoksydową z zastosowaniem techniki worka próżniowego. Badania prowadzone były przy użyciu zmodyfikowanej procedury trzypunktowego zginania.*

*Przedstawiono wyniki badań w zakresie T-owej struktury pojedynczej, jak i wzmocnionej. Badania uwzględniały trzy etapy prac doświadczalnych:*

- Pierwszym etapem było zbadanie wpływu parametrów strukturalnych tkanin wzmacniających, takich jak np.: gęstość osnowy i wątku, liczba nitek osnowy w różnych elementach przekroju T, wrobienie nitek, na właściwości wytrzymałościowe kompozytu. Tkanina wzmacniająca była pojedynczą tkaniną w każdym elemencie przekroju T.*
- Drugim etapem pracy było zbadanie wytrzymałości na zginanie kompozytów zbrojonych T-ową tkaniną, przy czym, na podstawie wniosków z pierwszego etapu, tkanina wzmacniająca została wzmocniona laminatem w obszarze połączenia żebra z podstawą.*
- Trzeci etap prac, nawiązujący do drugiego etapu, polegał na zbadaniu wytrzymałości na zginanie kompozytów zbrojonych T-ową tkaniną, w którym obszar połączenia żebra z podstawą został wzmocniony przez monolityczną strukturę wielowarstwową.*

## 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój wielu dziedzin inżynierii materiałowej spowodował wzrost zapotrzebowania na materiały cechujące się nowymi, znacznie lepszymi właściwościami. Najbardziej nowoczesne konstrukcje inżynierskie zawierają w swojej architekturze elementy wykonane z kompozytów, które w ostatnich latach charakteryzują się najbardziej dynamicznym rozwojem, szczególnie pod względem spełnienia wysokich wymagań wytrzymałościowych. Materiały kompozytowe to tworzywa składające się z różnych składników połączonych ze sobą na poziomie makroskopowym w celu uzyskania określonych cech wytrzymałościowych [1].

Właściwości kompozytu nie są sumą właściwości składowych elementów, a najczęściej pod względem wytrzymałościowym znacznie je przewyższają i zależą także od ich ilości w objętości kompozytu, sposobu rozmieszczenia materiału wzmacniającego w osnowie oraz od cech geometrycznych wzmocnienia. Do szeregu zastosowań technicznych wymagane są nie tylko odpowiednie wskaźniki mechaniczne, ale coraz częściej odpasowany kształt przekroju poprzecznego.

Prowadzone prace wykazały, że podstawowym modułem służącym do wytworzenia wielu innych kształtowników jest moduł o kształcie przekroju T.

Specjalnie zaprojektowane tkaniny przestrzenne, wytwarzane na płaskim czółenkowym krośnie pasmanteryjnym, z zastosowaniem zasad konstrukcji tkanin dwuwarstwowych, po „rozłożeniu” mogą tworzyć różne kształty przekroju. Technologia ta wymaga odpowiedniego przewlekania przez płoche, doboru kolejności nitek osnowy i wątku w poszczególnych elementach przekroju. Dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu, tkaniny te nie wymagają dodatkowej obróbki mechanicznej polegającej na łączeniu elementów składowych w celu osiągnięcia wymaganego kształtu. Przewagą proponowanego rozwiązania nad dotychczasowymi jest ciągłość strukturalna nitki wątku w wyrobie i naturalne zamknięcie brzegów tkaniny, zrealizowane bez dodatkowych nitek lub operacji. Uzyskanie założonych właściwości poprzez dobór parametrów strukturalnych tkaniny umożliwia uzyskanie kompozytu o założonych parametrach użytkowych przy minimalnym udziale zbrojenia i jednocześnie niskiej masie jednostkowej wyrobu.

## 2. CEL PRACY

Celem pracy było zbadanie mechanizmu kształtowania wytrzymałości oraz opracowanie sposobu modelowania wytrzymałości na zginanie kompozytu zbrojonego tkaniną przestrzenną o przekroju T (rysunek 1) za pomocą parametrów strukturalnych tkaniny. Ustalenie wpływu poszczególnych parame-

trów strukturalnych tkaniny pozwoli na prognozowanie właściwości wytrzymałościowych kompozytu na etapie jego projektowania, co usprawni ten proces i wyeliminuje metodę „prób i błędów” z praktyki modelowania właściwości kompozytu.

Celem prowadzonych badań było jednocześnie wyeliminowanie „słabego ogniwa” w T-owym kompozycie, jakim jest miejsce połączenia środniczka z podstawą poprzez opracowanie sposobu jego wzmocnienia.

Zakres prac obejmował:

1. Analizę parametrów struktury tkanin przestrzennych w odniesieniu do wytrzymałości kompozytu na zginanie.
2. Modelowanie właściwości tkanych profili przestrzennych.
3. Weryfikację właściwości modeli w funkcji kształtu przekroju poprzecznego i struktury zbrojenia
4. Opracowanie sposobu wzmocnienia miejsca połączenia środniczka z podstawą.
5. Analizę wyników badań, dyskusję i wnioski.



Rys. 1. Przekrój wzdłuż wątku tkaniny przestrzennej (widok w fazie rozkładania) i przykładowa tkanina o T-owym kształcie przekroju

### 3. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Prace były prowadzone w trzech etapach. Etap pierwszy obejmował wytworzenie i badania kompozytów o T-owym kształcie przekroju poprzecznego zbrojonych tkaniną przestrzenną pojedynczą, drugi etap prac obejmował wytworzenie i badania kompozytów wzmocnionych laminatem, trzeci natomiast wytworzenie i badania T-owych kompozytów wzmocnionych monolitycznie. Trzeci etap obejmował także prace przygotowawcze polegające na doborze odpowiedniej do wzmocnienia struktury tkaniny wielowarstwowej. Każdy z etapów obejmował wytworzenie tkanin zbrojeniowych, wytworzenie kompozytów i przeprowadzenie badań wytrzymałości na zginanie.

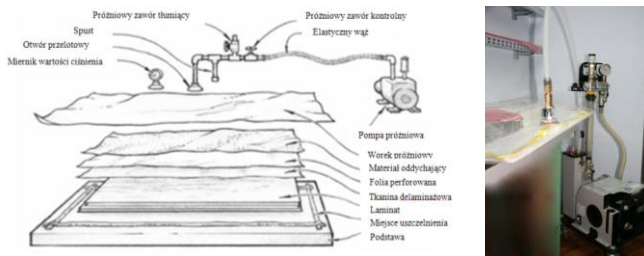
### 3.1. Metodyka badań

Metodyka prowadzonych badań obejmowała prace przygotowawcze w zakresie badań wybranych surowców włókienniczych i doboru żywicy polimerowej do wykończenia kompozytów. Właściwości mechaniczne kompozytów i mechanizm jego niszczenia zależą także od właściwości wytrzymałościowych włókien [1]. Wszystkie tkaniny przestrzenne stanowiące postawę do uzyskania materiału badawczego w postaci kompozytów wykonane zostały z przędzy z włókien ciągłych poliestrowych o podwyższonych właściwościach wytrzymałościowych i zmniejszonym wydłużeniu. Przędza została poddana badaniom wytrzymałości na rozciąganie i właściwości sprężystych.

Na podstawie badania skurczu i adhezji żywicy do włókna przeprowadzono prace obejmujące dobór żywicy. Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów oraz warunki utwardzania stwierdzono, że najodpowiedniejszą żywicą do wytworzenia w warunkach laboratoryjnych kompozytów zbrojonych tkaniną wykonaną z przędzy poliestrowej wysokowytrzymałej PES HT będzie **żywica epoksydowa E53**. Kolejnym etapem było opracowanie i wytworzenie wariantów tkaniny zbrojeniowej. Wielowariantowość rozwiązań strukturalnych opracowano w oparciu o różnicowanie liczności i rozkładu nitek układu osnowowego przy zachowaniu stałej liczby nitek osnowy w przekroju oraz liczności nitek układu wątkowego.

#### 3.1.1. Technologia kompozytów

Ostateczne właściwości kompozytów są funkcją nie tylko indywidualnych właściwości żywicy i włókna, ale w dużej mierze zależą od procesu w jakim zostały wytworzone. Po analizie metod wytwarzania kompozytów i rozpoznaniu możliwości technicznych wykonano laboratoryjne stanowisko do wytwarzania próbek kompozytów oparte na metodzie Vacuum Bagging. Ideę stanowiska prezentuje rysunek 2.



Rys. 2. Schemat i zdjęcie stanowiska do nanoszenia żywicy [2]

W celu uzyskania zamierzonego, T-owego kształtu przekroju poprzecznego kompozytu zastosowano formy wykonane ze stalowych elementów zabezpieczone środkami antyadhezyjnymi.

### 3.1.2. Badanie wytrzymałościowe kompozytów

Analizując rozważania autorów potwierdzających słuszność stosowania testu trójpunktowego statycznego zginania do oceny wytrzymałości na zginanie kompozytu o przekroju T, przeprowadzono badania wytrzymałościowe stosując zaproponowaną metodykę.

Do wyznaczenia wytrzymałości kompozytów na zginanie została wykorzystana typowa aparatura stosowana w miernictwie włókienniczym: maszyna wytrzymałościowa z ruchomą głowicą, poruszającą się ze stałą prędkością i wyposażona w urządzenie rejestrujące obciążenie i odkształcenie. Maszyna wyposażona jest w specjalny zestaw, składający się z trzpienia gnącego i podpór, umożliwiający badanie próbek o złożonym kształcie.

Odległości podpór były dobrane eksperymentalnie, tak aby podczas badania wytrzymałości na zginanie nie następowało zsuwanie się próbek między podpory, co mogło zakłócić prawidłowy przebieg badania.

Trzpień gnący o szerokości większej niż szerokość badanych prób został zamocowany równolegle do podpór w połowie odległości między nimi. Badanie prowadzono do momentu pierwszego objawu uszkodzenia próbki kompozytu przejawiającego się charakterystyczną zmianą przebiegu krzywej.



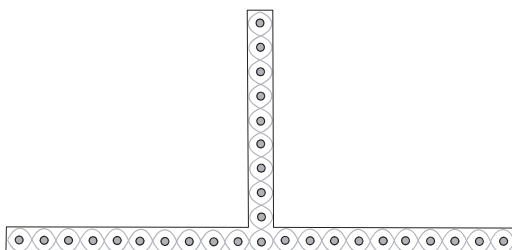
Rys. 3. Badanie wytrzymałości na zginanie kompozytów na maszynie wytrzymałościowej

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie i skręcanie kompozytów zostały zarejestrowane w postaci wykresów, z których odczytano dane potrzebne do analizy, np. maksymalne siły niszczące próbki.

W celu analizy wytrzymałości elementów kompozytów wyznaczono naprężenie, przy którym następuje uszkodzenie próbki – wytrzymałość na zginanie  $R_g$ . Do obliczenia tych parametrów konieczne było wyznaczenie wskaźnika przekroju  $W$ , środków ciężkości, momentów bezwładności. W celu analizy wytrzymałości elementów kompozytów wyznaczono analitycznie naprężenie, przy którym następuje zniszczenie próbki – **wytrzymałość na zginanie  $R_g$** .

### 3.2. Pierwszy etap pracy – Technologia tkanin przestrzennych pojedynczych

Jako zbrojenie przedmiotowych kompozytów zastosowane zostały tkaniny przestrzenne o zmiennych parametrach technologicznych. Wytworzone zostały doświadczalnie tkaniny różniące się licznością nitek osnowy i wątku oraz liczbą nitek osnowy w poszczególnych elementach przekroju. Na podstawie wniosków z prac prowadzonych w tym zakresie oraz wniosków z przeglądu literatury należy stwierdzić, że parametry struktury tkaniny mają znaczący wpływ na właściwości wytrzymałościowe kompozytów zbrojonych przedmiotową tkaniną.



Rys. 4. Schemat tkaniny pojedynczej stanowiącej zbrojenie T-owego kompozytu

Największe znaczenie w strukturze tkanin przyjętych w programie badań ma rozkład nitek osnowy. Wzrost liczby nitek osnowy, czyli nitek w układzie znajdującym się w płaszczyźnie zginania powoduje wzrost wytrzymałości na zginanie kompozytu. Jako stały niezmienny parametr struktury przyjęto zatem liczbę nitek osnowy w całym przekroju tkaniny zbrojeniowej. Przy założeniu stałej liczby nitek osnowy w całej tkaninie przestrzennej, zmiennymi były liczebności i rozkład nitek osnowy w każdym elemencie taśmy. Zmiana szerokości elementu przy zachowaniu stałej liczby nitek osnowy spowodowała zmianę liczebności nitek osnowy.

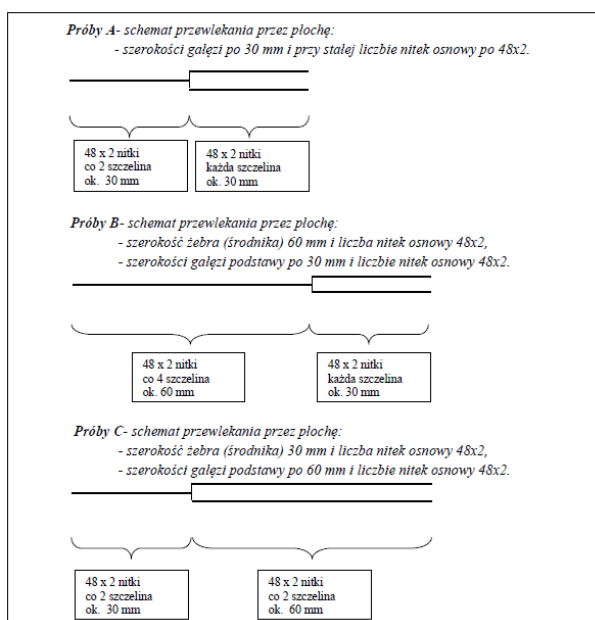
Do wyznaczenia wytrzymałości na zginanie kompozytu o kształcie przekroju T konieczne było uwzględnienie wskaźnika wytrzymałości przekroju  $W$ , który wynika z kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego kompozytu, a także uwzględnia momenty bezwładności figury przekroju. W związku z tym istotne przy projektowaniu było uwzględnienie wymiarów figury stanowiącej przekrój poprzeczny, co w tym przypadku stanowi szerokość każdej gałęzi tkaniny.

Z uwagi na wniosek, iż wzrost liczebności nitek wątku w płaszczyźnie zginania powoduje spadek, a w płaszczyźnie prostopadłej wzrost wytrzymałości na zginanie zostały zaprojektowane warianty zróżnicowane pod względem liczebności nitek wątku w celu znalezienia optymalnej wartości liczebności nitek w tym układzie. Ponieważ stwierdzono, że na właściwości mechaniczne kompozytu nie ma znacznego wpływu splot poszczególnych elementów tkaniny kształtowej

stanowiącej zbrojenie, przy projektowaniu tkanin stanowiących materiał badawczy został zastosowany spłot płócienny w każdym elemencie kształtu.

– Warianty zmiennej liczności nitek osnowy

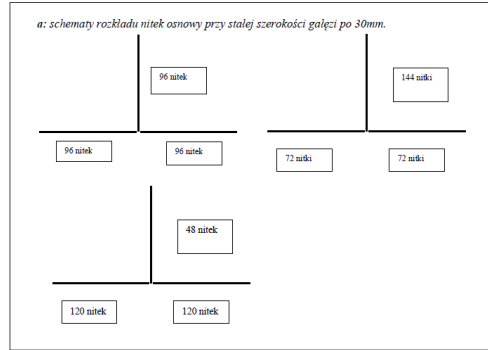
Przy stałej liczbie nitek osnowy, aby zróżnicować liczności nitek osnowy zmienione zostały szerokości poszczególnych gałęzi (warianty zmiany liczności nitek osnowy przy tej samej liczbie nitek). Takie zróżnicowanie uzyskano poprzez zmianę sposobu przewlekania nitek osnowy przez płochę. Przewlekanie takie polegało na dostosowaniu liczby nitek osnowy w każdej szczelinie płochy tak, aby uzyskać odpowiednią szerokość gałęzi (rysunek 5). Otrzymane próby różniły się wymiarami, natomiast liczba nitek pozostała stała. Próby te posłużyły do uzyskania odpowiedzi na pytanie o wpływ wielkości wskaźnika wytrzymałości przekroju  $W$  przy stałej liczbie nitek osnowy na wytrzymałość kompozytu.



Rys. 5. Schematy przewlekania przez płochę

– Warianty zmiennej liczby nitek osnowy przy zachowaniu tej samej szerokości gałęzi

Przy zachowaniu tej samej szerokości gałęzi zmianie ulega rozkład nitek osnowy, a tym samym liczba nitek w poszczególnych gałęziach (rysunek 6). Warianty te dały odpowiedź na pytanie jak wpływa rozkład nitek osnowy przy stałej liczbie nitek w całym przekroju i zachowaniu stałego wskaźnika wytrzymałości przekroju.

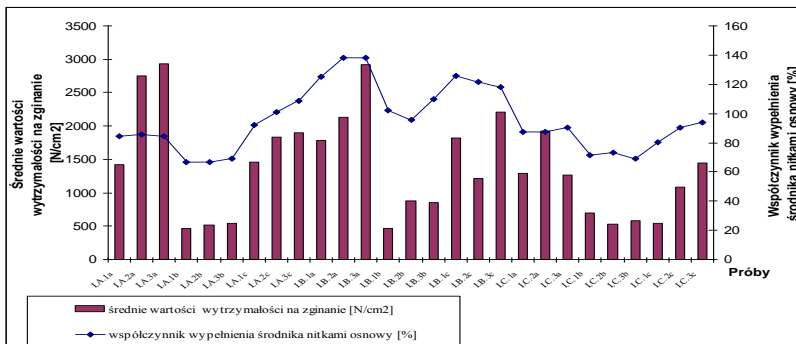


Rys. 6. Schematy rozkładu nitki osnowy

W ramach prowadzonych prac analizie poddano:

- wpływ zmiennej liczności nitki osnowy na wytrzymałość na zginanie,
- wpływ zmiennej liczby nitki osnowy w poszczególnych elementach przekroju przy zachowaniu tej samej szerokości gałęzi,
- wpływ zmiennych licznosci nitki wążku w elementach przekroju T.

Dla wytworzonych prób tkanin przeznaczonych na zbrojenie kompozytu wyznaczono opracowany współczynnik wypełnienia przekroju nitkami wążku i nitkami osnowy. Współczynnik ten jest zależny od licznosci nitki obu układów, wymiarów geometrycznych i średnicy przędzy. Parametr ten odzwierciedla upakowanie nitki obu układów w przekroju tkaniny i odpowiada objętościowej zawartości włókien w kompozycie.

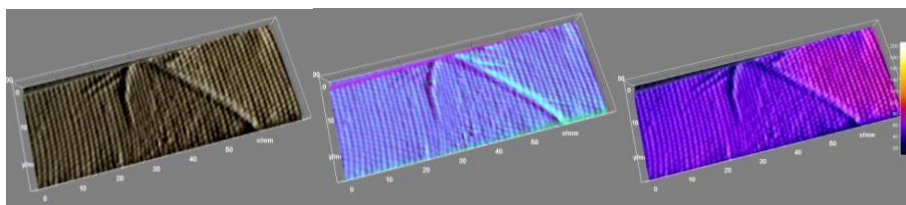


Wykres 1. Wartości współczynnika wypełnienia średnika nitkami osnowy i średnie wartości wytrzymałości kompozytu na zginanie

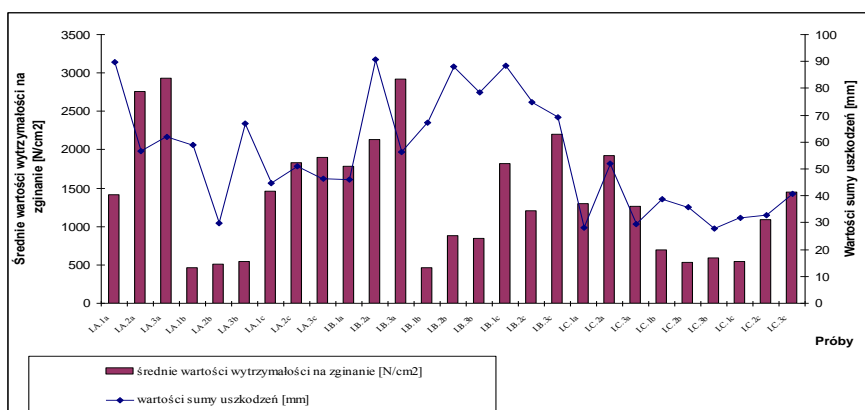
W przypadku kompozytów zbrojonych materiałami włókienniczymi spadek wytrzymałości jest uwarunkowany stopniem delaminacji i uszkodzenia



mikrostruktury preformy. W związku z tym kształtowanie właściwości wytrzymałościowych jest ściśle związane z zachowaniem struktury podczas działania naprężeń. Jednak na podstawie badań wytrzymałościowych stwierdzono, że wytrzymałość na rozciąganie kompozytów zależy prawdopodobnie bardziej od stopnia uszkodzenia struktury zbrojenia niż od wielkości delaminacji w materiale. W celu określenia zależności między wytrzymałością kompozytu na zginanie a stopniem delaminacji wykonano zdjęcia uszkodzonych badaniem preform i określono wielkość uszkodzenia (delaminacji). Obrazy uszkodzonych po badaniu zginania prób kompozytów poddano analizie. Dokonano pomiarów długości uszkodzenia i kąta pod jakim wystąpiło uszkodzenie w elemencie środkowym. Przykładowe obrazy poddane analizie przedstawiono na rysunku 7.

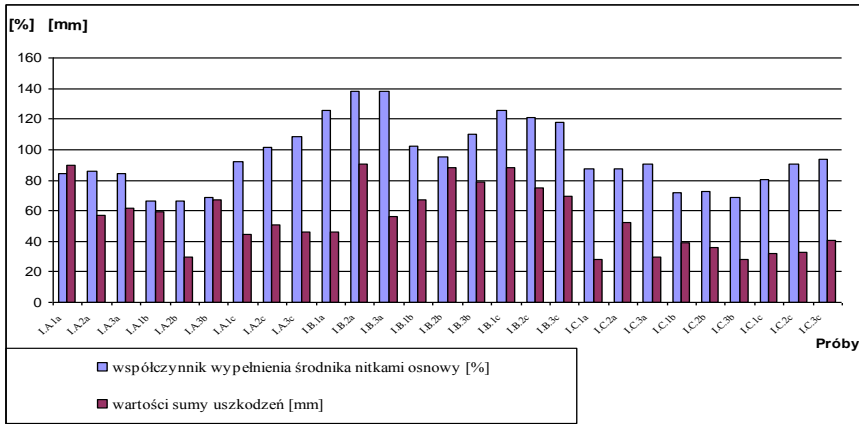


Rys. 7. Zdjęcie Próby II A 2c w świetle rzeczywistym, przekształcenie monochromatyczne i termowizyjne



Wykres 2. Wartości parametru wytrzymałości na zginanie i sumy uszkodzeń po badaniu wytrzymałości na zginanie

Na wykresie 3 przedstawiono zależność sumy uszkodzeń od współczynnika wypełnienia nitkami osnowy elementu przekroju, który uległ uszkodzeniu.



Wykres 3. Wartości współczynnika wypełnienia osnową elementu przekroju uszkodzonego i sumy uszkodzeń po badaniu wytrzymałości na zginanie

Omówione prace pozwalają na sformułowanie następujących stwierdzeń i wniosków:

- przeprowadzona analiza parametrów strukturalnych tkanin potwierdziła, że uzyskane próby przestrzenne są zróżnicowane pod względem parametrów strukturalnych zgodnie z opracowanymi wariantami. Ustalono, że współczynnik wypełnienia przekroju przędzą osnowową jest większy niż współczynnik wypełnienia przekroju przędzą wątkową, co charakteryzuje „upakowanie” nitki każdego z układów w przekroju poszczególnych elementów tkaniny przestrzennej. Analizując natomiast współczynnik wrobienia, należy stwierdzić, że największe jego zróżnicowanie występuje dla nitki osnowy w elemencie średnika, a współczynnik wrobienia nitki wątku jest w każdej próbie niższy niż współczynnik wrobienia nitki osnowy;
- metoda worka próżniowego zastosowana w pracach jest metodą, która umożliwiła uzyskanie kompozytów o kształcie przekroju poprzecznego T zbrojonego tkaniną. Pomimo prowadzenia procesu wytwarzania kompozytów w kontrolowanych warunkach, występują różnice w udziale procentowym żywicy od 57,09% do 78,85%, dlatego też do analizy wartości parametrów wytrzymałościowych wprowadzono współczynnik „k” uwzględniający udział procentowy żywicy w kompozycie;
- największe wartości wytrzymałości na zginanie mają próby, których wymiary podstawy i średnika są na poziomie ok. 30 mm. W próbach tych liczności nitki osnowy są największe, gdyż ta sama określona liczba nitki została rozmieszczona na mniejszej szerokości gałęzi;

- wytrzymałość na zginanie kompozytu zależy od liczności nitki osnowy w elemencie średnika, najmniejszą natomiast wytrzymałością charakteryzują się próby, w których wymiar średnika jest największy (ok. 60 mm) zatem w próbach o najmniejszej liczności nitki osnowy;
- wartość strzałki ugięcia jest największa dla prób, w których liczba nitki osnowy w średniku jest największa;
- wzrost wytrzymałości zaobserwowano w próbach, w których występuje niższa wartość liczności nitki wątku. Przy zachowaniu wskaźnika wytrzymałości przekroju, czyli zbliżonych wymiarów przekroju kompozytu i przy zachowaniu takiego samego rozkładu nitki osnowy w poszczególnych gałęziach przekroju w większości przypadków wytrzymałość na zginanie wzrasta ze spadkiem liczności nitki wątku;
- największą wartość sztywności zginania zaobserwowano dla prób, w których występuje niski średnik (o wysokości ok. 30 mm) i większa liczność nitki osnowy w tym elemencie, najmniejszą wartością tego parametru charakteryzowały się próby o wysokim średniku i próby z niskim średnikiem, ale o małej (16 nitki/1 cm) liczności nitki osnowy;
- dla badanych kompozytów nie stwierdzono wpływu wartości współczynnika wypełnienia nitkami osnowy i wątku w elementach podstawy na wytrzymałość, jednak dla elementu średnika można zauważyć wpływ współczynnika wypełnienia nitkami osnowy na wytrzymałość kompozytu;
- na podstawie analizy obrazów kompozytów po zniszczeniu należy stwierdzić, że istnieje zależność między wartościami parametru wytrzymałości na zginanie i wielkością uszkodzenia badanego kompozytu a współczynnikiem wypełnienia przekroju uszkodzonego elementu nitkami osnowy. W większości przypadków uszkodzenie podczas badania wytrzymałościowego prób kompozytów wystąpiło w elemencie średnika.

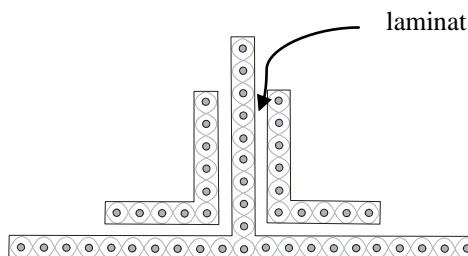
### **3.2.1. Podsumowanie pierwszego etapu prac**

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań z uwzględnieniem analizy obrazów uszkodzonych kompozytów należy stwierdzić, że najistotniejszym elementem przekroju wpływającym na wytrzymałość kompozytu o kształcie T-owym na zginanie jest element średnika i rozkład nitki w tym elemencie. W trakcie określenia wpływu różnych zmiennych na wytrzymałość na zginanie w każdym układzie analizowanych prób stwierdzono, że liczba lub liczność nitki osnowy w elemencie średnika ma największy wpływ na kształtowanie wytrzymałości na zginanie kompozytu. Jednocześnie analizując obrazy uszkodzonych kompozytów pod względem odrywania średnika od podstawy uznano, że w kolejnych etapach pracy należy wzmocnić element średnika i miejsca połączenia średnika z podstawą.

### 3.3. Drugi etap prac – Kompozyty wzmocnione laminatem

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że w przestrzennym kompozycie istotne znaczenie ma konstrukcja żebra (środnika). Przeprowadzone badania wykazały, że zwiększenie liczności nitek tak osnowy, jak i wątku w środku pozwala zwiększyć wytrzymałość kompozytu na zginanie, ale jeżeli jednocześnie zmniejszyć licznosc wątku w elemencie poziomym (podstawie), to pozwala zwiększyć wytrzymałość na zginanie. Zatem w konstrukcji tkanin przestrzennych przeznaczonych do wzmocnienia kompozytu istotną rolę odgrywa struktura elementu znajdującego się w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny pracy – zginania kompozytu.

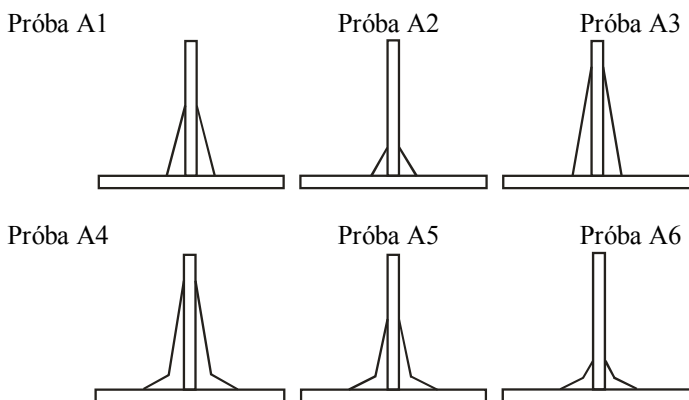
Na wytrzymałość kompozytu na zginanie ma wpływ nie tylko konstrukcja samego środniaka, ale także miejsca połączenia środniaka z podstawą. W wielu przypadkach podczas badania wytrzymałości kompozytu na zginanie następowało uszkodzenie/oderwanie środniaka od podstawy. W związku z takimi obserwacjami podjęto prace zmierzające do ustalenia wpływu dodatkowego wzmocnienia elementu środniaka i miejsca połączenia środniaka z podstawą na wytrzymałość T-kompozytu. W tym etapie prac kompozyty wzmocniono za pomocą laminatu tkaniny płaskiej z tkaniną o T-owym kształcie przekroju.



Rys. 8. Schemat zbrojenia T-owego kompozytu laminatem

W ramach prowadzonych prac wykonano kompozyty o kształcie przekroju poprzecznego T z wzmocnionym odpowiednio środniakiem (próby A1, A2, A3) i środniakiem wraz z miejscem połączenia środniaka z podstawą (próby A4, A5, A6). Kompozyty wzmocniono za pomocą tkaniny identycznej z tkaniną zasadniczą T-owego wzmocnienia, z laminowanej tak, aby uzyskać wzmocnienie na długości równej  $\frac{1}{2}$  wysokości środniaka w próbie A1, tj. na długości 15 mm, na długości równej około  $\frac{1}{3}$  wysokości środniaka, tj. 10 mm w próbie A2, i na długości równej  $\frac{2}{3}$  wysokości środniaka, tj. 23 mm w próbie A3. W przypadku kompozytów z wzmocnionym jednocześnie środniakiem i miejscem połączenia z podstawą, próby przygotowano w ten sposób aby uzyskać wzmocnienie na długości równej  $\frac{2}{3}$  wysokości środniaka, tj. około 23 mm i po 10 mm od środniaka na każdej gałęzi podstawy w próbie oznaczonej A4, na długości równej około

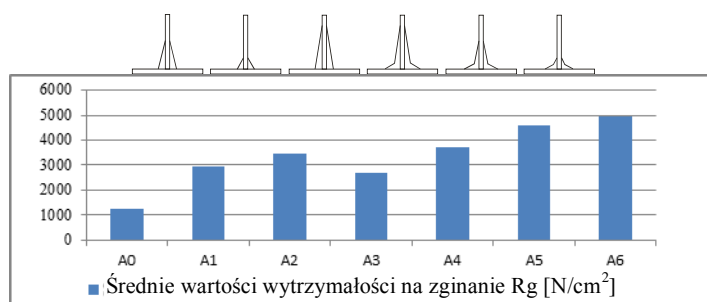
$\frac{1}{2}$  wysokości środnika, tj. 15 mm i około 10 mm od środnika na każdej gałęzi podstawy w próbie A5, oraz na długości równej  $\frac{1}{3}$  wysokości środnika, tj. około 10 mm i około 10 mm od środnika na każdej gałęzi podstawy w próbie oznaczonej A6. Próby te różniły się wysokością wzmocnienia na środniku. Schematy modeli przekrojów przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Modele przekrojów

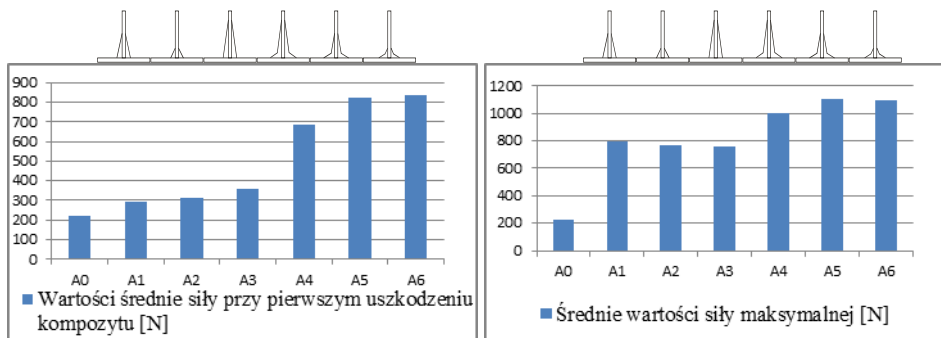
Do przygotowania kompozytów o kształcie przekroju poprzecznego „T”, z wzmocnionym elementem środnika i miejscem połączenia środnika z podstawą, zbrojonych tkaniną przestrzenną zastosowano technikę worka próżniowego.

Wytworzone kompozyty o kształcie przekroju poprzecznego „T” zostały przebadane według opracowanej procedury z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3667 w warunkach identycznych z warunkami, w których prowadzono badania kompozytów bez wzmocnienia.



Wykres 4. Wartości wyznaczonej wytrzymałości na zginanie kompozytów

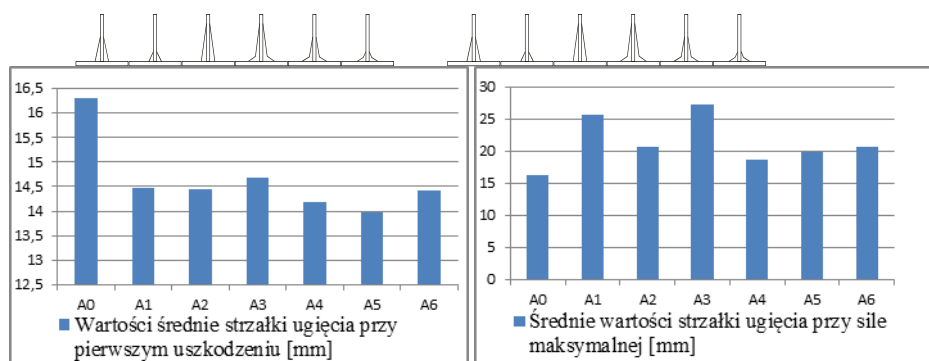
- Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że:
- Na wytrzymałość kompozytu na zginanie ma wpływ wzmocnienie elementu środnika. Istotne znaczenie ma długość wzmocnienia. W próbach oznaczonych (A1, A2, A3) wzmocniono element środnika na długości odpowiednio dla próby A1 do 1/2 wysokości środnika od podstawy, dla próby A2 do 1/3 wysokości środnika od podstawy i dla próby A3 do 2/3 wysokości środnika. Największy **ponad trzykrotny** wzrost wytrzymałości kompozytu na zginanie w porównaniu do próby bez wzmocnienia (A0) wystąpił w próbie oznaczonej A2, w której wzmocnienie środnika było najkrótsze, tj. do 1/3 wysokości środnika (**920÷1600 [N/cm<sup>2</sup>] dla prób A0 i 3210÷3792 [N/cm<sup>2</sup>] dla próby A2**) (wykres 4).
  - Najbardziej znaczący wpływ na wytrzymałość kompozytu na zginanie ma wzmocnienie nie tylko samego środnika, ale jednocześnie miejsca połączenia środnika z podstawą. W próbach oznaczonych (A4, A5, A6) został wzmocniony nie tylko środnik ale także obszar połączenia środnika z podstawą w taki sposób, że na podstawie wzmocnienie sięgało 1/3 długości każdej gałęzi podstawy we wszystkich próbach. Długość wzmocnienia środnika natomiast było wartością zmienną i odpowiednio dla próby A4 wynosiło 2/3 wysokości środnika, dla próby A5 – 1/2 wysokości środnika a dla próby A6 1/3 wysokości środnika. W tych próbach największy **pięciokrotny**, w porównaniu z próbą bez wzmocnienia (A0 dla której Rg wynosi **920÷1600[N/cm<sup>2</sup>]**), wzrost nastąpił w próbie A6 (Rg wynosi **4531÷5231[N/cm<sup>2</sup>]**), to znaczy w próbie, w której wzmocnione zostało miejsce połączenia środnika z podstawą, przy czym, długość wzmocnienia środnika była najkrótsza, tj. do 1/3 wysokości środnika (wykres 4).



Wykres 5. Wartość siły przy pierwszym uszkodzeniu i przy uszkodzeniu całkowitym

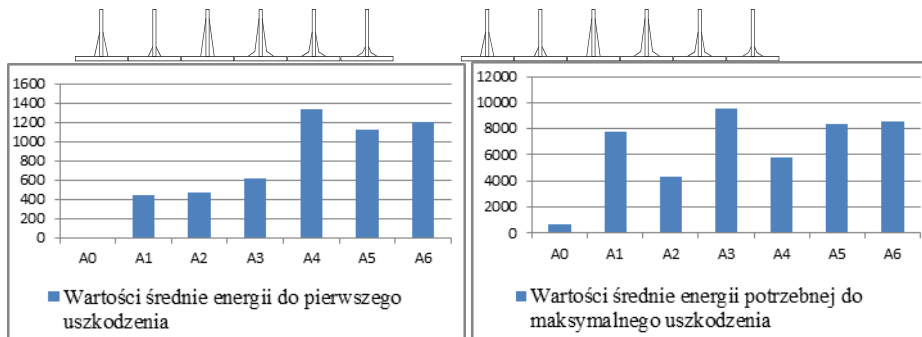
- Dla prób (A4-A6), gdzie wzmocniony został nie tylko środnik, ale także obszar połączenia środnika z podstawą, wartość siły przy pierwszym uszkodzeniu (pierwszym szczycie) jest niemal **dwukrotnie** większa niż dla prób (A1-A3), w których wzmocniony był tylko element środnika.

- W przypadku prób z wzmocnionym tylko środkiem (A1-A3) w porównaniu z próbą bez wzmocnienia A0 nastąpił wzrost wartości siły przy pierwszym uszkodzeniu o ok. 50%, natomiast dla prób z wzmocnionym całym obszarem zamocowania środka (A4-A6) nastąpił **czterokrotny** wzrost wartości tej siły.
- Wartość siły przy uszkodzeniu całkowitym w porównaniu do próby bez wzmocnienia wzrosła czterokrotnie dla prób z wzmocnionym tylko środkiem (A1-A3). Wzrost ten nastąpił do wartości siły przy pierwszym uszkodzeniu dla prób (A4-A6) z wzmocnionym środkiem i całym obszarem zamocowania środka z podstawą.
- Dla prób z wzmocnieniem całego obszaru połączenia, tzn. środka i podstawy (A4-A6) w porównaniu do próby A0 nastąpił ponad pięciokrotny wzrost wartości siły maksymalnej przy całkowitym uszkodzeniu.



Wykres 6. Wartości strzałki ugięcia przy pierwszym uszkodzeniu i przy sile maksymalnej

- W przypadku wartości strzałki ugięcia należy stwierdzić, że nie ma istotnych różnic w tym parametrze (wykres 6).
- Różnica między strzałką ugięcia przy uszkodzeniu maksymalnym a strzałką ugięcia przy pierwszym uszkodzeniu jest największa dla próby A3, w której wzmocnienie tylko środka sięga do  $\frac{2}{3}$  jego wysokości – w związku z tym można przypuszczać, że próba ta najbezpieczniej przenosi obciążenia (po pewnym określonym przemieszczeniu może nastąpić uszkodzenie). Dla tej próby istnieje możliwość rejestracji odkształcenia za pomocą czujników. Najmniejszą deformację od pierwszego uszkodzenia do uszkodzenia całkowitego zaobserwowano dla próby A4, tj. dla próby, w której wzmocniona została podstawa i średnik do  $\frac{2}{3}$  jego wysokości (tzn. wzmocnienie najdłuższe środka).



Wykres 7. Wartości energii przy pierwszym uszkodzeniu i przy maksymalnym uszkodzeniu

- Blisko czterokrotny wzrost energii zniszczenia liczonej do pierwszego uszkodzenia wykazuje próba A4, czyli próba z wzmocnieniem podstawy i najdłuższym wzmocnieniem środka – do 2/3 jego wysokości w porównaniu z próbkami, w których wzmocniony został tylko środek.
- Największe zapotrzebowanie na energię od pierwszego uszkodzenia do całkowitej destrukcji wykazuje próba A3, w której występuje najdłuższe wzmocnienie środka – do 2/3 jego wysokości.

### 3.3.1. Podsumowanie drugiego etapu prac

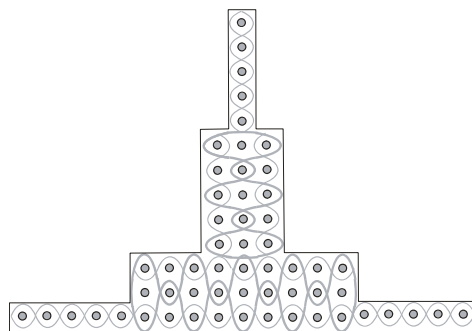
Omówiono uzyskane wyniki badań wytrzymałości na zginanie T-kompozytów, których zbrojenie stanowiła tkanina o T-owym kształcie przekroju dodatkowo wzmocniona poprzez zlaminiowanie jej w założonych miejscach. Taki sposób wzmocnienia przekroju wynikał z wniosków uzyskanych w poprzednim etapie prac. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- największą wytrzymałością charakteryzuje się próba A6, w której wzmocniony został cały obszar zamocowania, tj. podstawa i środek do 1/3 wysokości (najkrótsze wzmocnienie środka) zarówno przy pierwszym, jak i przy maksymalnym uszkodzeniu,
- największy przyrost strzałki ugięcia od pierwszego uszkodzenia do uszkodzenia maksymalnego wykazuje próba A3 z najdłuższym (do 2/3 wysokości) wzmocnieniem tylko środka (najdłużej jest zdolna do przenoszenia obciążeń),
- wzmocnienie elementu środka umożliwia uzyskanie kompozytów charakteryzujących się lepszymi właściwościami wytrzymałościowymi. W kolejnym etapie prac z wzmocnieniem kompozytu T zostały podjęte próby monolitycznego wzmocnienia struktury tkaniny zbrojeniowej za pomocą wielowarstwowych struktur tkanych.



### 3.4. Trzeci etap prac – Wzmocnienie monolityczne tkaniną wielowarstwową

W tym etapie pracy kompozyty wzmocniono za pomocą struktur wielowarstwowych.



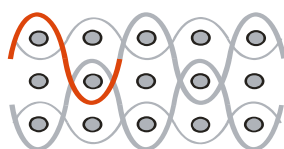
Rys. 10. Schemat zbrojenia tkaniną wielowarstwową T-owego kompozytu

W pierwszej części przeprowadzono prace polegające na doborze odpowiedniej, do wzmocnienia kompozytu, struktury tkaniny wielowarstwowej.

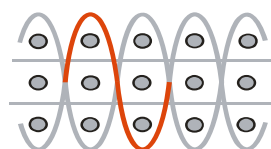
Opracowano modele strukturalnych tkanin wielowarstwowych zróżnicowanych pod względem sposobu wiązania warstw (rysunek 11), zaprojektowano rozwiązania splotowe, wykonano tkaniny wielowarstwowe i kompozyty zbrojone tymi tkaninami, przeprowadzono badania wytrzymałościowe tkanin oraz kompozytów i analizę parametrów strukturalnych tkanin zbrojeniowych.

Modele strukturalne tkanin wielowarstwowych:

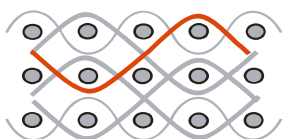
- model O/L – wiązanie prostopadłe warstwa po warstwie,
- model O/T – wiązanie prostopadłe przez całą grubość tkaniny,
- model A/L – wiązanie pod kątem warstwa po warstwie,
- model A/T – wiązanie pod kątem przez całą grubość tkaniny.



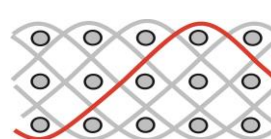
**Model O/L**



**Model O/T**



**Model A/L**



**Model A/T**

Rys. 11. Modele strukturalne tkanin wielowarstwowych [3]

Sposób przeplatania osnowy wiążącej wpływa na właściwości wytrzymałościowe i sztywność tkaniny wielowarstwowej, a jednocześnie na właściwości mechaniczne kompozytu i stopień przesylenia zbrojenia żywicą. Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie struktur tkanin o T-owym kształcie przekroju poprzecznego wzmocnionych w jednym procesie technologicznym za pomocą struktury wielowarstwowej.

W związku z wnioskiem, że na właściwości wytrzymałościowe kompozytu o kształcie T ma wpływ struktura żebra (średnika), a także na podstawie analizy wyników uzyskanych podczas badania kompozytów wzmocnionych laminatem wykonano próby z wzmocnieniem monolitycznym średnika i średnika z miejscem jego połączenia z podstawą.

Wzmocnienie zostało wykonane z zastosowaniem splotu wielowarstwowego o strukturze O/L ze względu na wyniki badań wytrzymałościowych tkanin wielowarstwowych i kompozytów zbrojonych tymi tkaninami.

Wzmocnienie wykonano w jednym cyklu wytwórczym, tzn. na krośnie wytworzono tkaninę płaską z zastosowaniem w odpowiednich elementach przekroju T-ownika splotu wielowarstwowego O/L.

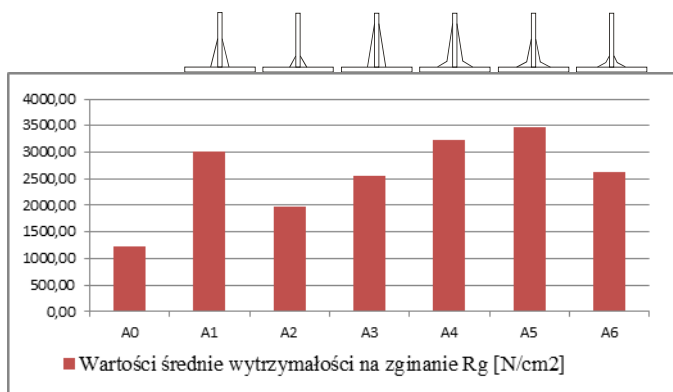
Zróżnicowane zostały długości wzmocnienia średnika identycznie jak w próbach z wzmocnionym średnikiem za pomocą laminatu, tzn.:

- A1 – długość wzmocnienia równa  $\frac{1}{2}$  wysokości średnika, tj. ok. 15 mm,
- A2 – długość wzmocnienia równa  $\frac{1}{3}$  wysokości średnika, tj. ok. 10 mm,
- A3 – długość wzmocnienia równa  $\frac{2}{3}$  wysokości średnika, tj. ok. 20 mm.

W próbach A4, A5 i A6 dodatkowo wzmocniono elementy podstawy na długości po 10 mm na każdej gałęzi podstawy, uzyskując próby:

- A4 – długość wzmocnienia równa  $\frac{2}{3}$  wysokości średnika, tj. ok. 20 mm i wzmocnienie miejsca połączenia średnika z podstawą na długości ok. 10 mm na każdej gałęzi podstawy,
- A5 – długość wzmocnienia równa  $\frac{1}{2}$  wysokości średnika, tj. ok. 15 mm i wzmocnienie miejsca połączenia średnika z podstawą na długości ok. 10 mm na każdej gałęzi podstawy,
- A6 – długość wzmocnienia równa  $\frac{1}{3}$  wysokości średnika, tj. ok. 10 mm i wzmocnienie miejsca połączenia średnika z podstawą na długości ok. 10 mm na każdej gałęzi podstawy.

Z zastosowaniem metody worka próżniowego wykonano kompozyty zbrojone wzmocnionymi tkaninami T-owymi. Tak wykonane kompozyty poddano analizie parametrów strukturalnych i geometrycznych, a następnie poddano badaniom wytrzymałościowym z zastosowaniem metody trójpunktowego statycznego zginania.

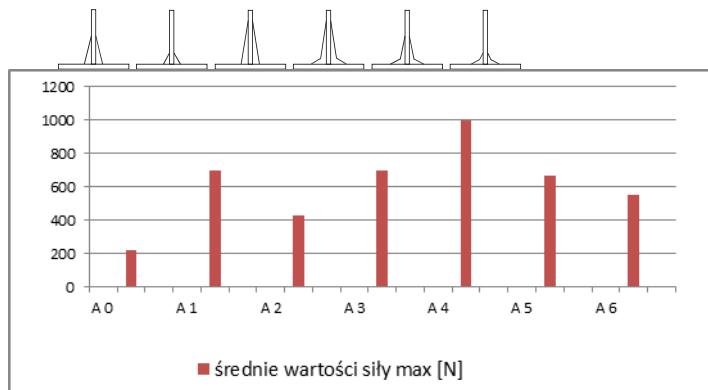


Wykres 8. Wykres średnich wartości wytrzymałości na zginanie

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

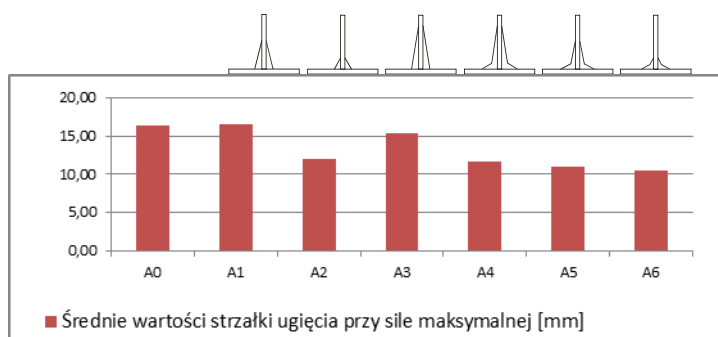
- Na wytrzymałość kompozytu na zginanie wzmocnionego monolitycznie ma wpływ długość wzmocnienia elementu środniczka i miejsca połączenia środniczka z podstawą. We wszystkich przypadkach nastąpił wzrost wytrzymałości kompozytu na zginanie w porównaniu z próbą bez wzmocnienia A0. Istotne znaczenie ma długość wzmocnienia. W próbach oznaczonych (A1, A2, A3) wzmocniono element środniczka na długości odpowiednio dla próby A1 do 1/2 wysokości środniczka od podstawy, dla próby A2 do 1/3 wysokości środniczka od podstawy i dla próby A3 do 2/3 wysokości środniczka. Największy **dwukrotny** wzrost wytrzymałości kompozytu na zginanie w porównaniu do próby bez wzmocnienia (A0) wystąpił w próbie oznaczonej A1, w której wzmocnienie środniczka było do 1/2 wysokości środniczka (**1234,27 [N/cm<sup>2</sup>] dla próby A0 i 3010,38 [N/cm<sup>2</sup>] dla próby A1**) (wykres 8).
- Najbardziej znaczący wpływ na wytrzymałość kompozytu na zginanie ma wzmocnienie nie tylko samego środniczka, ale jednocześnie miejsca połączenia środniczka z podstawą. W próbach oznaczonych (A4, A5, A6) wzmocniony został nie tylko środniczek, ale także obszar połączenia środniczka z podstawą w taki sposób, że na podstawie wzmocnienie sięgało 1/3 długości każdej gałęzi podstawy we wszystkich próbach. Długość wzmocnienia środniczka była natomiast wartością zmienną i odpowiednio dla próby A4 wynosiło 2/3 wysokości środniczka, dla próby A5 – 1/2 wysokości środniczka, a dla próby A6 1/3 wysokości środniczka. W tych próbach największy **prawie trzykrotny**, w porównaniu z próbą bez wzmocnienia (A0 dla której Rg wynosi 1234,27 [N/cm<sup>2</sup>]), wzrost nastąpił w próbie A5 (Rg wynosi **3482,15 [N/cm<sup>2</sup>]**), to znaczy w próbie, w której wzmocnione zostało miejsce połączenia środniczka z podstawą, przy czym długość wzmocnienia środniczka była do 1/2 wysokości środniczka (wykres 8).

- W obu grupach prób, tj. grupie A1-A3, czyli z wzmocnieniem tylko elementu środka i grupie prób A4-A6, w których wzmocniony został środek i elementy podstawy, największym wzrostem wytrzymałości na zginanie w porównaniu do próby bez wzmocnienia A0 charakteryzowały się próby, gdzie wzmocnienie środka sięgało do  $\frac{1}{2}$  wysokości tego elementu.
- Najmniejszy przyrost wytrzymałości na zginanie wystąpił w próbach A2 i A6, w których wzmocnienie środka było najkrótsze, tj. do  $\frac{1}{3}$  wysokości środka. W próbie A6, gdzie wzmocniony był środek do  $\frac{1}{3}$  wysokości wraz z elementami podstawy, wytrzymałość na zginanie była mniejsza niż w próbie A1, w której wzmocniony był tylko środek na długości do  $\frac{1}{2}$  wysokości tego elementu.



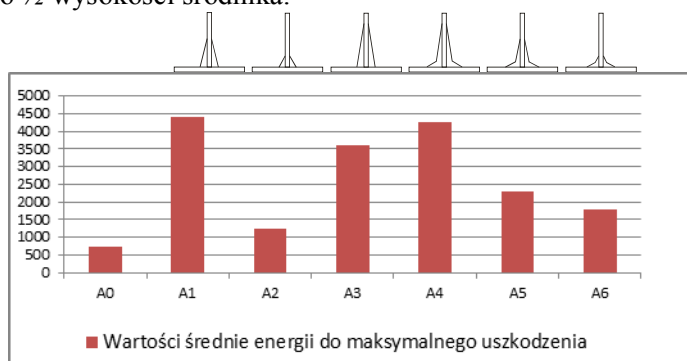
Wykres 9. Zestawienie średnich wartości siły maksymalnej przy całkowitym uszkodzeniu

- Dla prób z wzmocnieniem całego obszaru połączenia, tzn. środka i podstawy (A4-A6) w porównaniu do próby A0 nastąpił ponad pięciokrotny wzrost wartości siły maksymalnej przy całkowitym uszkodzeniu dla próby A4, tj. próby gdzie wzmocnienie środka było najdłuższe.
- W próbach z wzmocnieniem tylko elementu środka A1-A3 największą wartością siły maksymalnej przy całkowitym uszkodzeniu charakteryzowały się próby A1 i A3. Próba A2 z najkrótszym wzmocnieniem (do  $\frac{1}{3}$  wysokości środka) charakteryzowała się najmniejszą wartością siły maksymalnej przy całkowitym uszkodzeniu.



Wykres 10. Zestawienie średnich wartości strzałki ugięcia przy sile maksymalnej

- Analizując uzyskane wyniki średnich wartości strzałki ugięcia przy sile maksymalnej można stwierdzić, że w próbach A4-A6 z wzmocnieniem średnika i elementów podstawy wartości tego parametru są bardzo zbliżone – od 10,56 dla A6 do 11,64 dla A4. W próbach z wzmocnionym tylko średnikiem największą wartość strzałki ugięcia miała próba A1 16,47 z wzmocnieniem do  $\frac{1}{2}$  wysokości średnika.



Wykres 11. Zestawienie średnich wartości energii do maksymalnego uszkodzenia

- Największe zapotrzebowanie na energię, **sześciokrotnie** większe niż próba A0 bez wzmocnienia, do całkowitej destrukcji wykazuje próba A1, w której występuje wzmocnienie średnika – do  $\frac{1}{2}$  jego wysokości.

W trakcie pomiarów wytrzymałości kompozytów na zginanie prowadzono jednocześnie analizę przebiegu badania obserwując moment pierwszego uszkodzenia. Jednak w porównaniu z próbkami kompozytów wzmocnionych laminatem nie następowało widoczne pierwsze uszkodzenie. Jedynie w próbach A3 i A4 (próby z najdłuższym wzmocnieniem średnika do  $\frac{2}{3}$  wysokości) można było zaobserwować miejsce pierwszego uszkodzenia.

### 3.4.1. Podsumowanie trzeciego etapu prac

W kompozycie o kształcie przekroju T istotne znaczenie ma, jak wykazały badania zarówno tkanin wzmocnionych laminatem, jak i monolitycznie, element środka i miejsce połączenia środka z podstawą. W przypadku prób z wzmocnieniem monolitycznym największy wzrost wytrzymałości na zginanie nastąpił w próbie A5 z wzmocnieniem do  $\frac{1}{2}$  długości środka i elementów podstawy i w grupie kompozytów z wzmocnieniem wyłącznie środka również w próbie z wzmocnieniem do  $\frac{1}{2}$  wysokości środka A1. W tej próbie uzyskano sześciokrotny wzrost energii zniszczenia liczonej do chwili maksymalnego uszkodzenia.

## 4. WNIOSKI

W rozprawie zaprezentowano wyniki badań nad możliwościami kształtowania wytrzymałości na zginanie kompozytu o T-owym kształcie przekroju poprzecznego za pomocą parametrów strukturalnych tkaniny zbrojeniowej. Ponadto przeprowadzono rozważania na temat wytrzymałości na zginanie T-owego kompozytu wzmocnionego monolitycznie w taki sposób, aby możliwe było uzyskanie odpowiednio wysokich charakterystyk wytrzymałościowych. Przedstawiono trzy etapy prac eksperymentalnych:

- pierwszy etap polegał na zbadaniu wpływu parametrów strukturalnych tkanin zbrojeniowych, takich jak liczność nitek osnowy i wątku, liczba nitek osnowy w poszczególnych elementach przekroju, wskaźnik wytrzymałości przekroju, współczynnik wrobienia nitek, współczynnik wypełnienia przekroju, na właściwości wytrzymałościowe kompozytu. Przy czym tkanina zbrojeniowa była tkaniną pojedynczą w każdym elemencie przekroju;
- drugi etap prac polegał na zbadaniu wytrzymałości na zginanie kompozytów o T-owym kształcie przekroju, przy czym, na podstawie wniosków z etapu pierwszego, tkanina zbrojeniowa wzmocniona została za pomocą laminatu w sposób wskazany w etapie pierwszym, tj. wzmocniony został element środka i miejsce jego połączenia z podstawą;
- trzeci etap prac, nawiązujący do etapu drugiego, polegał na zbadaniu wytrzymałości na zginanie kompozytu o T-owym kształcie przekroju z monolitycznym wzmocnieniem w obszarze środka i miejsca jego połączenia z podstawą uzyskane za pomocą zastosowania struktury wielowarstwowej w odpowiednich miejscach przekroju.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. **Na właściwości wytrzymałościowe kompozytu ma wpływ „gęstość” struktury wyrażona licznymi nitek osnowy i wątku.**

Zwiększenie liczności nitek osnowy przy niezmienionej liczności nitek wążku w elemencie znajdującym się w płaszczyźnie zginania, wzdłuż którego odbywa się zginanie (nitki osnowy w elementach podstawy) powoduje wzrost wytrzymałości na zginanie (odbywające się wzdłuż nitek osnowy). Wzrost liczności nitek wążku przy niezmienionej liczności osnowy w elemencie znajdującym się w płaszczyźnie zginania powoduje spadek wytrzymałości na zginanie (odbywające się wzdłuż nitek osnowy). Pozwala to na wytwarzanie kompozytów o niezmiennych właściwościach mechanicznych przy mniejszej masie układu wzmacniającego.

2. **W przestrzennym kompozycie istotne znaczenie ma konstrukcja żebra (środnika).** Przeprowadzone badania wykazały, że zwiększenie liczności nitek, tak osnowy jak i wążku, w środkniku pozwala zwiększyć wytrzymałość kompozytu na zginanie, ale jeżeli jednocześnie zmniejszona zostanie liczność wążku w elemencie poziomym (podstawie), to wytrzymałość na zginanie będzie większa. Zatem w konstrukcji tkanin przestrzennych przeznaczonych do wzmocnienia kompozytu istotną rolę odgrywa struktura elementu znajdującego się w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny pracy-zginania kompozytu.
3. **Na podstawie badań stwierdzono, że sztywność zginania kompozytu zbrojonego przedmiotową tkaniną o przekroju T jest zależna od liczności nitek osnowy w elemencie środknika.** Wzrost liczności nitek osnowy w środkniku powoduje wzrost sztywności zginania. Dla badanych kompozytów nie stwierdzono zależności parametru wytrzymałości na zginanie od współczynnika wypełnienia nitkami osnowy i wążku dla elementów podstawy, zależność taką można stwierdzić dla współczynnika wypełniania nitkami osnowy elementu środknika.
4. **Na poziom degradacji (delaminacji) kompozytu mają wpływ parametry struktury tkaniny zbrojeniowej wyrażone współczynnikami wypełnienia przekroju nitkami osnowy i wążku oraz sposób połączenia środknika z podstawą.** W wyniku analizy stwierdzono, że istnieje zależność między wielkością uszkodzenia badanego kompozytu a współczynnikiem wypełnienia przekroju uszkodzonego elementu nitkami osnowy. Przy większym wypełnieniu przekroju nitkami osnowy występuje większe uszkodzenie (delaminacja). W znaczącej większości uszkodzenie, podczas badania wytrzymałościowego prób kompozytów, wystąpiło w elemencie środknika, tj. elemencie, który był poddany działaniom sił ściskających. W próbach oznaczonych IIA1a, IIA 2a, III A1a, IIIA2a nastąpiło oderwanie podstawy od środknika, co jest prawdopodobnie spowodowane niewłaściwym połączeniem elementu środknika z podstawą wynikającym z rozwiązań splotowych.
5. **W przypadku kompozytów zbrojonych tkaniną wzmocnioną zarówno laminatem, jak i monolitycznie, element środknika i miejsce połączenia**

środnika z podstawą ma istotne znaczenie na wytrzymałość kompozytu na zginanie. We wszystkich przypadkach nastąpił wzrost wytrzymałości kompozytu na zginanie w porównaniu z próbą bez wzmocnienia. W obu grupach wzmocnienia monolitycznego, tj. grupie z wzmocnieniem tylko środnika i grupie z wzmocnieniem środnika i miejsca jego połączenia z podstawą, największy wzrost wytrzymałości nastąpił w próbach, w których wzmocnienie sięgało do  $\frac{1}{2}$  wysokości środnika. Natomiast w próbach z wzmocnieniem za pomocą laminatu największą wytrzymałością charakteryzuje się próba, w której wzmocniony został cały obszar zamocowania, tj. podstawa i środnik do  $\frac{1}{3}$  wysokości (najkrótsze wzmocnienie środnika).

6. **Poprzez modyfikację struktury tkaniny można w znaczącym zakresie wpływać na właściwości wytrzymałościowe podczas zginania oraz „sterować” procesem destrukcji, a tym samym programować proces niszczenia materiału konstrukcyjnego po przekroczeniu granicznej wartości obciążenia.** Przez modyfikację konstrukcji tkaniny w obszarze zamocowania środnika do podstawy można uzyskać wzrost energii zniszczenia liczonej do chwili wystąpienia pierwszego uszkodzenia. Można również sterować stopniem deformacji kształtownika kompozytowego w ten sposób, by podczas zniszczenia na skutek przeciążenia zapewnić maksymalny czas życia konstrukcji z zachowaniem zasady, że od chwili wystąpienia pierwszego objawu uszkodzenia przyrasta zapotrzebowanie na energię do dalszej deformacji i destrukcji.

### Literatura

- [1] **Ochelski S.:** *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa 2004, ISBN 83-204-2890-4.
- [2] Materiały informacyjne firmy Milar.
- [3] **Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K.:** *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, Elsevier 2002.

## MODELLING OF THE STRENGTH PROPERTIES OF WOVEN SPATIAL PREFORMS BASED ON THEIR STRUCTURAL PARAMETERS

### Summary

The aim of the study was to investigate strength formation mechanism and the development of the method for modelling the bending strength of the T-shape woven reinforced composite by means of the woven structural parameters. The T-shape reinforcements were woven and impregnated with epoxy resin by using



a vacuum bagging technique to form composite. It is assumed that the determination of the impact of various woven structural parameters will allow the prediction of mechanical properties of the composite on the stage of its design. The tests were conducted using the modified three-point-bending procedure. The T-shape woven structure was manufactured with high tenacity continuous-filament PES. The results of studies were presented in the range of T-shape single and strengthened structure. Three stages of experimental work were introduced:

- the first stage was to study the impact of structural parameters of reinforcing fabrics, such as e.g. the density of the warp and weft, the number of warp threads in various parts of T-shape section, crimp of threads, on the strength properties of the composite. Reinforcing fabric was a single fabric in each T-shape section,
- the second stage of the work was to study the bending strength of the T-shaped reinforced composites, while, on the basis of the first stage conclusions, reinforcing fabric was strengthened by the laminate in the join region between web and flange,
- the third stage of the work, referring to the second one, consisted in an examination of the bending strength of the T-shaped reinforced composites, wherein the join region between web and flange in reinforcing fabric was strengthened by the monolithic multilayer structure.

The result of my research is that the evidence exists to show, that:

1. Structure "density", expressed as the density of warp and weft threads, has an impact on the strength properties of the composite.

2. The properties of the spatial composite structure depend on the join region between web and flange.

3. The level of degradation (delamination) of the composites depends on the reinforcing fabric structure parameters, such as: coefficient of filling the section with warp and weft threads, and the way of connecting web and flange.

4. In the case of composites reinforced with fabric strengthened by the laminate and monolithic multilayer structure, the element of the web and the join region between web and flange are essential for the bending strength of the composite.

5. Modification of structure of the fabric can significant by influence bending strength, and can forecast the destruction process. It is possible to program the destruction process of construction material after the limit load is exceeded.