

KATARZYNA PIEKŁAK**Wydział Technologii Materiałowych
i Wzornictwa Tekstyliów
Politechniki Łódzkiej****INNOWACYJNA TECHNOLOGIA
PRZESTRZENNYCH DZIANIN KOLUMIENKOWYCH
– STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI**Promotor: **dr hab. inż. Zbigniew Mikołajczyk, prof. PŁ**Recenzenci: **dr hab. inż. Janusz Juraszek, prof. ATH**
prof. dr Ryszard Michał Kozłowski
prof. dr hab. inż. Kazimierz Kopias

W początkowej części pracy przedstawiono ogólne tendencje rozwoju w zakresie tekstyliów technicznych zarówno dzianych, tkanych jak i plecionych ze szczególnym uwzględnieniem wyrobów przestrzennych. Sformułowano istotne cechy budowy nowej generacji dzianin przestrzennych, w tym przestrzennych przesywanych dzianin kolumienkowych, uwzględniających struktury o więcej niż dwóch warstwach zewnętrznych i przynajmniej jednej warstwie wewnętrznej. Na podstawie zdefiniowanej geometrii dzianin kolumienkowych 3D określono założenia do koncepcji budowy nowoczesnych osnowarek o więcej niż dwóch grzebieniach igłowych. W celu sprawdzenia poprawności postawionych założeń konstrukcyjnych zbudowano model użytkowy osnowarki czterogrzebieniowej, a następnie wytworzono na nim pierwsze struktury dzianych belek. Dla zdefiniowanych struktur dzianych opracowano model geometryczno-strukturalny bazujący na bryle w formie prostopadłościanu o podstawie kwadratowej. Ponadto opracowano algorytm projektowania strukturalno-technologicznego dzianin kolumienkowych 3D oraz zbudowano komputerowy program symulacji właściwości zarówno struktur dzianych jak i kompozytów, w którym wykonano badania symulacyjne właściwości belki przestrzennej. W środowisku programu ANSYS przeprowadzono także badania numeryczne wytrzymałości kompozytów przestrzennych. Dla rzeczywistych struktur belek kompozytowych epoksydowo-szklanych wykonano badania empiryczne procesu zginania i ściskania z wykorzystaniem techniki termowizyjnej, w trakcie których prowadzono rejestrację wartości temperatury na powierzchni obciążanych kompozytów.

1. WPROWADZENIE

W okresie ostatnich 30 lat odnotowuje się znaczący postęp w rozwoju technik dziewiarskich, w tym dzianin kolumniowych wytwarzanych na maszynach osnowowych. Postęp ten dotyczy nie tylko dzianin płaskich stosowanych na wyroby odzieżowe, bieliźniane, czy dekoracyjne, ale przede wszystkim dzianin o przeznaczeniu technicznym, wykorzystywanych np.: na odzież ochronną, w wyposażeniu wnętrz, w wyrobach medycznych, w zastosowaniach motoryzacyjnych, w wyrobach elektroprzewodzących, czy chroniących przed promieniowaniem i innych [1÷8].

Odmienne typ stanowią dwuprawe dzianiny dystansowe zaliczane do grupy struktur trójwymiarowych. Wytwarzane są one na dwugrzebieniowych maszynach osnowowych, a ich grubość może być zmieniana w zakresie od kilku do kilkudziesięciu milimetrów [9÷17]. Możliwość istotnego zwiększenia grubości w tej grupie dzianin (maksymalnie do 67 mm) spowodowała, iż zaczęto je aplikować w obszarach technicznych, między innymi jako wzmocnienia lekkich, a zarazem wysokowytrzymałych konstrukcji kompozytowych.

Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, iż obok struktur dzianych, dla przemysłu tekstylnego istotne znaczenie odgrywają wyroby tkane i plecione. Wyroby te oprócz swoich podstawowych form płaskich o zastosowaniach dekoracyjnych mogą charakteryzować się znacznie bardziej rozbudowaną architekturą przestrzenną, przyjmując postać powszechnie stosowanych elementów konstrukcyjnych. W przypadku technik dziewiarskich nie odnotowano wzmianek, aby umożliwiały one tworzenie tak wysoce rozbudowanych struktur pod względem ich przestrzennej budowy.

Tekstylnia techniczne, od których oczekuje się podwyższonych właściwości wytrzymałościowych, w głównej mierze są wykonywane ze specjalnych nitek charakteryzujących się wysokimi parametrami mechanicznymi (np.: nitki szklane, bazaltowe, węglowe, aramidowe i inne) [18÷25].

Materiały kompozytowe coraz częściej wypierają powszechnie stosowane materiały konstrukcyjne, np. metalowe czy drewniane [26]. Obecnie na wzmocnienia kompozytowe stosuje się tekstylnia płaskie, które do swojej ostatecznej postaci, kompozytowego wyrobu przestrzennego, kształtowane są na specjalnych formach i usztywniane z wykorzystaniem żywic poliestrowych lub epoksydowych. W większości przypadków kompozyty te posiadają stosunkowo wysoką gęstość, a co za tym idzie, dużą masę. Autorzy w licznych publikacjach podnoszą, iż budowanie kompozytów powinno odbywać się w sposób świadomy tak, aby nie tworzyć litych brył uformowanych na skutek warstwowego nakładania na siebie kolejnych pokładów tekstylnych [27÷29]. Należy bowiem dążyć do opracowania technologii umożliwiającej otrzymywanie kompozytów o strukturze przestrzennej ażurowo.

Intensywny rozwój technik i technologii dziewiarskich ukierunkowanych na wytwarzanie tekstyliów technicznych znajdujących zastosowanie między innymi we wzmocnieniach kompozytowych, zainspirował do prowadzenia badań nad przestrzennymi strukturami dzianymi.

Prezentowane w pracy technologie są technikami nowymi, które mogą znaleźć zastosowanie we wzmocnieniach lekkich, azurowych, a zarazem wysokowytrzymałych kompozytów przestrzennych. Technologie te bazują na technikach wytwarzania dzianin kolumnkowych na maszynach osnowowych o więcej niż dwóch grzebieniach igłowych. Umożliwiają one kształtowanie formy przestrzennej tworzonych dzianin bezpośrednio na etapie procesu dziania.

2. CEL I TEZA PRACY

Cel pracy doktorskiej

Celem niniejszej pracy było *opracowanie nowej technologii i budowy innowacyjnej grupy kolumnkowych dzianin przestrzennych, które znajdą zastosowanie jako wzmocnienia kompozytów dzianych wraz z analizą właściwości wytrzymałościowych kompozytów przestrzennych przeprowadzoną w oparciu o badania symulacyjne w środowisku MES oraz badania eksperymentalne z zastosowaniem techniki termowizyjnej.*

Sformułowany cel pracy poprzez uzyskane rezultaty badań posłużył udowodnieniu prawdziwości postawionej tezy pracy.

Teza pracy

Techniki dziewiarskie stwarzają potencjalne możliwości opracowania oryginalnych sposobów maszynowego dziania nowej generacji przestrzennych struktur dzianin technicznych ze szczególnym zastosowaniem ich do wzmocnień kompozytów. Poprzez projektowanie właściwości geometrycznych i strukturalnych kolumnkowych dzianin przestrzennych można kształtować i optymalizować właściwości wytrzymałościowe kompozytów. Analizę tychże właściwości można dokonać w oparciu o symulację komputerową z zastosowaniem metody elementów skończonych, jak również na drodze badań empirycznych w niekonwencjonalnym podejściu z wykorzystaniem techniki termowizyjnej.

3. BUDOWA I TECHNOLOGIA PRZESTRZENNYCH DZIANIN KOLUMIENKOWYCH

3.1. Architektura przestrzennych dzianin kolumienkowych

Kolumienkowe dzianiny przestrzenne, wytwarzane jako gotowe wyroby 3D o określonej budowie geometrycznej i strukturalnej, **zbudowane są z więcej niż dwóch warstw zewnętrznych i co najmniej jednej warstwy wewnętrznej** [30÷34]. Warstwy zewnętrzne są zbudowane ze splotów lewo-prawych i oczek splotów warstw wewnętrznych, natomiast warstwa wewnętrzna składa się z odcinków nitki przebiegających pomiędzy warstwami zewnętrznymi w różnej konfiguracji. Ilość warstw zewnętrznych tworzonej kolumienkowej dzianiny przestrzennej jest określona liczbą grzebieni igłowych osnowarki, na której jest wytwarzany wyrób. Przedstawione w niniejszym rozdziale struktury przestrzennych dzianin kolumienkowych są przedmiotem dwóch zgłoszeń patentowych, pierwszego pod nazwą *Dziany wyrób przestrzenny* o numerze P-386074 i drugiego zatytułowanego *Dziany kolumienkowy wyrób przestrzenny* o numerze P-386075.

Przestrzenne dzianiny kolumienkowe mogą być wytwarzane z nitki klasycznych, nitki z przeznaczeniem na wyroby techniczne (nitki szklane, nitki paraaramidowe typu kevlar), nitki metalizowanych, nitki kompozytowych, nitki z nanowłókien, jak również z nitki w postaci równoległego strumienia włókien oplecionego nitkami monofilamentowymi.

Dzianiny te mogą posiadać formę „regularnych” jak i „nieregularnych” graniastosłupów otwartych o podstawie w kształcie podstawowych figur geometrycznych, jak np.: trójkąt, czworokąt, wielokąt, a także figur bardziej rozbudowanych tworzących bryły przestrzenne, które w swej budowie odnoszą się do elementów konstrukcyjnych w postaci, np.: ceownika, teownika czy dwuteownika stosowanych w budownictwie oraz w przemyśle maszynowym. Ponadto dzianiny te mogą posiadać parzystą bądź nieparzystą liczbę warstw zewnętrznych większą od dwóch. Z pewnych względów praktycznych i ekonomicznych przewiduje się wytwarzanie dzianin z maksymalną liczbą warstw wynoszącą od 6 do 8. Nie ogranicza to jednak wytwarzania wyrobów o większej liczbie tych warstw, w wyniku czego otrzymuje się przestrzenne dzianiny kolumienkowe, których forma regularnego graniastosłupa będzie zbliżona do walca.

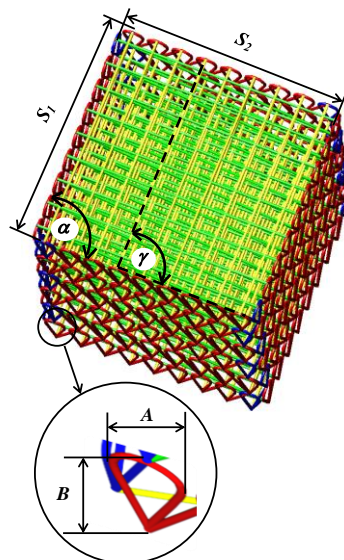
Przestrzenne dzianiny kolumnkowe o parzystej liczbie warstw zewnętrznych

Podstawową strukturą wśród całej grupy przestrzennych dzianin kolumnkowych o parzystej liczbie warstw zewnętrznych jest **graniastosłup o podstawie czworokąta** (rys. 3.1).

Dzianina ta jest zbudowana z czterech warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej. Warstwy zewnętrzne połączone są ze sobą brzegami za pomocą nitki, które powodują, iż bryła dzianiny stanowi jedną całość bezpośrednio na etapie jej wytwarzania na maszynie osnowowej.

Oczka w przestrzennej dzianinie kolumnkowej we wszystkich warstwach zewnętrznych mogą posiadać taką samą lub różną wielkość zarówno w wysokości B , jak i szerokości A . Ponadto szerokość S_i poszczególnych par przeciwległych warstw zewnętrznych dzianiny oraz kąt α zawarty pomiędzy sąsiednimi warstwami zewnętrznymi może przyjmować takie same bądź różne wartości. Liczba splotów warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej może być różna, w zależności od złożoności struktury wyrobu.

Nitki warstwy wewnętrznej mogą przebiegać w układzie zbliżonym do prostopadłego w stosunku do warstw zewnętrznych, które łączą $\gamma = 90^\circ$ lub pod innym kątem $\gamma \neq 90^\circ$, co można uzyskać poprzez zwiększenie liczby grzebieni igielnicowych sterujących nitkami wypełniającymi wewnątrz dzianej bryły.

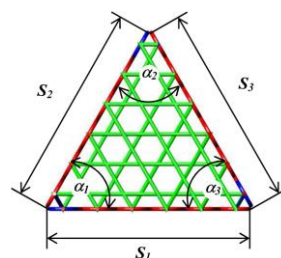
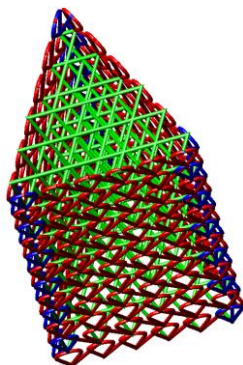


Rys. 3.1. Działy wyrób przestrzenne o parzystej liczbie warstw zewnętrznych

Przestrzenne dzianiny kolumnkowe o nieparzystej liczbie warstw zewnętrznych

Kolejny wariant budowy przestrzennych wyrobów kolumnkowych stanowią kolumnkowe dzianiny przestrzenne o nieparzystej liczbie warstw zewnętrznych większej od dwóch.

Na rysunku 3.2 zaprezentowano projekt przestrzennej dzianiny



Rys. 3.2. Działy wyrób przestrzenne o nieparzystej liczbie warstw zewnętrznych

kolumienkowej o przekroju poprzecznym w kształcie trójkąta. Wyrób ten posiada trzy warstwy zewnętrzne o jednakowej szerokości S_i , które są ustawione względem siebie pod stałym kątem α .

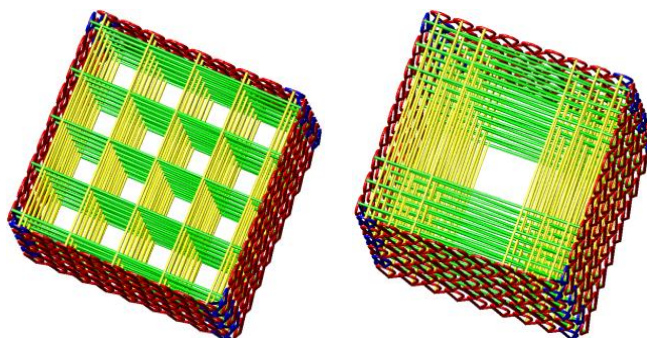
Dzianiny te charakteryzują się następującymi parametrami strukturalnymi:

- stałą lub zmienną wielkością oczek we wszystkich warstwach zewnętrznych;
- stałą lub zmienną szerokością S_i poszczególnych warstw zewnętrznych;
- stałym lub zmiennym kątem α_i zawartym pomiędzy sąsiednimi warstwami zewnętrznymi.

W wyrobach tych nitki tworzące warstwę wewnętrzną mogą przebiegać kolejno pomiędzy sąsiednimi warstwami zewnętrznymi lub mogą przybierać bardziej złożoną konfigurację, wpływając na równomierność i stopień zapelnienia tejże warstwy.

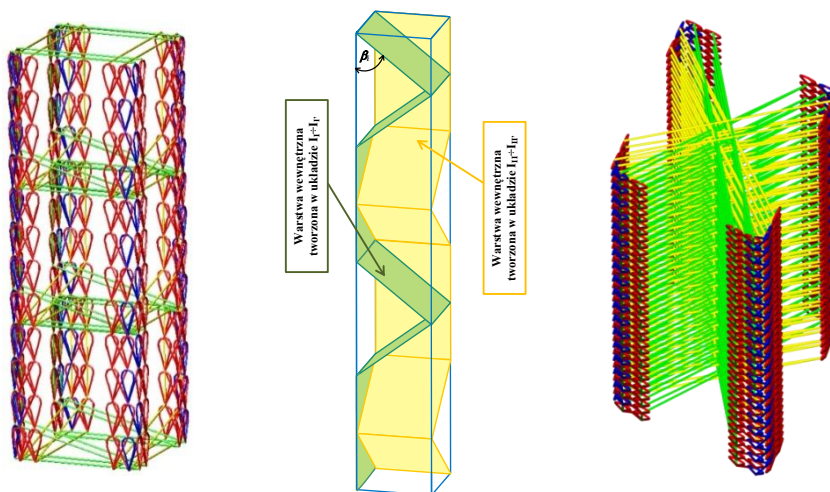
Przestrzenne ażurowe dzianiny kolumienkowe

Wśród całej grupy przestrzennych dzianin kolumienkowych wyodrębnić można struktury, których warstwa wewnętrzna ma charakter ***ażurów przestrzennych***. Ażury te są tworzone w wyniku niepełnego raportu nawleczenia grzebieni igielnicowych wprowadzających nitki warstwy wewnętrznej. W efekcie powstają wolne przestrzenie w kierunku pionowym. Ażury mogą być także uzyskiwane poprzez zastosowanie odpowiednich splotów, tworząc wolne przestrzenie w kierunku poziomym (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Przykłady dzianych wyrobów ażurowych

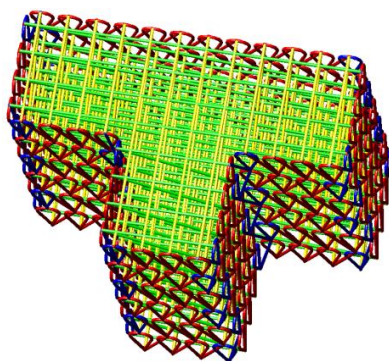
Opracowana technologia pozwala również uzyskiwać wolne przestrzenie jednocześnie w kierunku pionowym jak i poziomym, tworząc wyroby o budowie zbliżonej do ram stosowanych w budownictwie, w konstrukcjach stalowych bądź drewnianych (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Przykłady dzianin ażurowych przestrzennie

Przestrzenne reliefowe dzianiny kolumnkowe

Kolejną grupę stanowią *struktury o charakterze reliefu przestrzennego*, pod którego pojęciem jest rozumiana zmiana wysokości powierzchni poszczególnych warstw zewnętrznych.

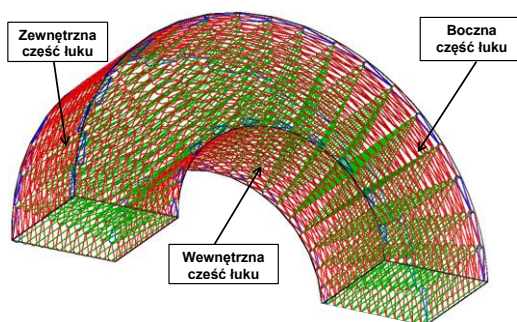


Rys. 3.5. Działy reliefowy wyrób przestrzenny o podstawie bryły w kształcie teownika

Struktury te mogą być dzianinami bryłami o podstawie w kształcie np. krzyża, ceownika, teownika, czy dwuteownika, a zatem przyjmują formę powszechnie stosowanych elementów konstrukcyjnych. W układach tych poszczególne fragmenty brył mogą mieć jednakowe bądź zróżnicowane wymiary (rys. 3.5). W strukturze tych wyrobów również mogą być tworzone ażury, zarówno w warstwach zewnętrznych jak i wewnętrznych, łącząc w ten sposób architekturę przestrzennych ażurowych dzianin kolumnkowych ze strukturami reliefowymi.

Przestrzenne dzianiny kolumnkowe o zmiennej wysokości oczek w warstwach zewnętrznych

Odmienny wariant kolumnkowych dzianin przestrzennych stanowią **wyroby w formie łuku przestrzennego** kształtowane zmienną wielkością oczek w wysokości raportu i jego szerokości (rys. 3.6) [31, 32]. Przekrój poprzeczny bryły może posiadać kształt prostych lub złożonych figur geometrycznych. Łuk, który tworzy formę bryły dzianiny kolumnkowej, może być łukiem okręgu, paraboli, elipsy lub hiperboli.



Rys. 3.6. Przykład dzianego wyrobu przestrzennego w kształcie łuku okręgu

Przestrzenne dzianiny kolumnkowe o strukturze walcowej



Rys. 3.7. Przykład dzianiny przestrzennej w kształcie walca

Odminną grupę stanowią **przestrzenne dzianiny kolumnkowe o strukturze walcowej** (rys. 3.7) [30]. Warstwę zewnętrzną stanowi wyrób w postaci powłoki walcowej. Warstwa wewnętrzna jest tworzona przez jedną nitkę lub grupę nitek, wrabianych w oczka warstwy zewnętrznej zgodnie z określonym splotem. Splot tej warstwy może tworzyć strukturę zapełnioną bądź ażurową. Niezapełnione nitkami przestrzenie wewnątrz wyrobu mogą przyjmować różne kształty w postaci np. kul, elips, walców, jak również innych bardziej skomplikowanych brył geometrycznych.

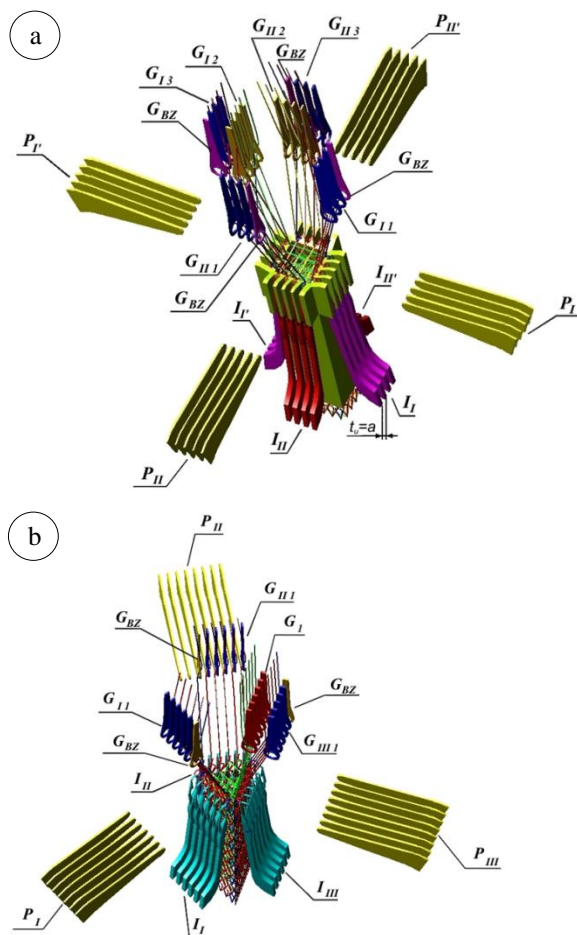
3.2. Technologia przestrzennych dzianin kolumnkowych

Przeprowadzony przegląd patentowy oraz dokonana analiza literatury naukowej, podręczników akademickich oraz fachowych czasopism włókienniczych nie wzmiankują o innych strukturach 3D i osnowowych maszynach

dziewiarskich wyposażonych w więcej niż dwa grzebienie igłowe do wytwarzania dzianych wyrobów przestrzennych w postaci regularnych, jak i nieregularnych brył geometrycznych.

Osnowowa maszyna dziewiarska o liczbie grzebieni igłowych większej od dwóch

Osnowowa maszyna dziewiarska o liczbie grzebieni igłowych większej od dwóch do wytwarzania przestrzennych dzianin kolumnkowych w postaci brył geometrycznych może posiadać parzystą bądź nieparzystą liczbę tych grzebieni. Liczba grzebieni igłowych ściśle określa kształt tworzonego wyrobu (rys. 3.8) [32, 35, 36]. Grzebienie igłowe są grzebieniami płaskimi, wyposażonymi w igły jęczyzkowe lub dwudzielne. Ustawione są one w określonym porządku, który określa kształt przekroju poprzecznego bryły wyrobu dzianego. Z pewnych względów praktycznych i ekonomicznych przewiduje się stosowanie maksymalnie 8 grzebieni. Nie ogranicza to jednak konstrukcji maszyn o większej ilości tych grzebieni. W zależności od konstrukcji maszyny przewiduje się możliwość zmiany numeru uiglenia E , szerokości S oraz głębokości spychania Z poszczególnych grzebieni igłowych, dzięki czemu istnieje możliwość kształtowania odmiennych parametrów strukturalnych przestrzennej bryły dzianej. Z grzebieniami igłowymi współpracują grzebienie igielnicowe tworzące spoty warstw zewnętrznych oraz warstwy wewnętrznej. W zależności od stopnia złożoności struktury dzianiny przestrzennej, liczba grzebieni



Rys. 3.8. Koncepcja budowy osnowarki:
a) czterogrzebieniowej, b) trzygrzebieniowej

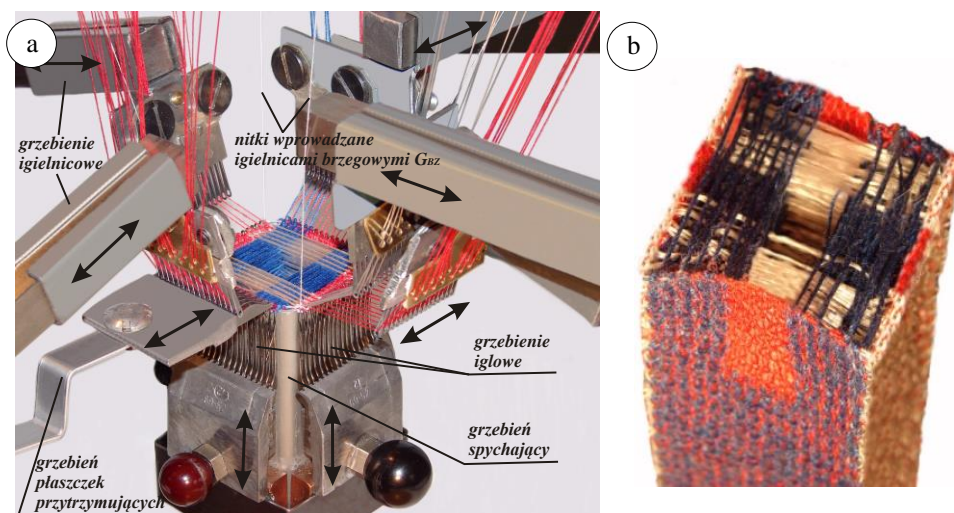
igielnicowych może być różna i odpowiada wymaganej liczbie systemów podawanych nitek. W każdym grzebieniu igielnicowym, wprowadzającym nitki warstw zewnętrznych występują indywidualnie sterowane igielnice brzegowe G_{BZ} . Ich zadaniem jest zamknięcie struktury zewnętrznej bryły dzianiny w narożach. Liczba indywidualnie sterowanych igielnic jest ściśle uzależniona od kształtu figury tworzącej przekrój poprzeczny dzianej bryły i odpowiada liczbie boków tejże figury.

Ponadto maszyna jest wyposażona w płaszczki przytrzymujące i grzebień spychający. Sposób podawania nitek jest sposobem znanym z klasycznych osnowarek. Rozpatruje się także możliwość podawania negatywnego lub podawanie negatywne wspomagane czynnym odwijaniem z wałów osnowowych. Alternatywne rozwiązanie stanowi odwijanie nitek z ram natykowych. W osnowarce przewiduje się całkiem odmienny sposób odbioru dzianiny. Jest to podyktowane tym, iż wyrób jest tworem przestrzennym o grubości od kilkunastu do kilkuset milimetrów. Urządzenie odbierające stanowi zespół wałków odbierających, które ściśle przylegają do warstw zewnętrznych tworzonego wyrobu i, obracając się z zadeklarowaną prędkością, równomiernie odbierają tworzony wyrób przestrzenny. Alternatywnym rozwiązaniem odbioru mechanicznego może być odbiór pneumatyczny.

Przedstawione w niniejszym rozdziale osnowarki do wytwarzania dzianin kolumniowych przestrzennych są przedmiotem patentu pod nazwą *Osnowarka do wytwarzania dzianin kolumniowych przestrzennych* o numerze P-386073.

Model użytkowy czterogrzebieniowej maszyny osnowowej

W ramach wykonywanej pracy doktorskiej został zbudowany model użytkowy czterogrzebieniowej maszyny osnowowej (rys. 3.9a). Model został skonstruowany na bazie rzeczywistych elementów oczkotwórczych osnowarki o 12 numerze uiglenia. Maszyna jest wyposażona w cztery grzebienie igłowe i sześć grzebieni igielnicowych. Podawanie nitek odbywa się w sposób bierny ze szpułek usytuowanych w górnej części maszyny, co stanowi pewną analogię do powszechnie stosowanych wałów osnowowych. Dodatkowo osnowarka posiada grzebienie płaszczyk przytrzymujących oraz grzebienie spychające tworzące zamknięty kanał, wewnątrz którego jest odbierana wytworzona dzianina przestrzenna. Wszystkie elementy oczkotwórcze, tj. grzebienie igłowe, grzebienie igielnicowe oraz grzebienie płaszczykowe są sterowane manualnie. Odbiór tworzonych wyrobów przestrzennych odbywa się w sposób grawitacyjny. W celu sprawdzenia poprawności postawionych założeń, co do opracowanych struktur przestrzennych jak i ich technologii, na modelu użytkowym osnowarki poczyniono próby wytworzenia pierwszych dzianin (rys. 3.9b).



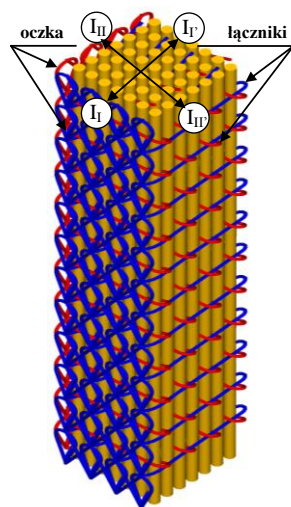
Rys. 3.9. Fotografia: a) modelu użytkowego cztergrzebiowej maszyny osnowowej, b) rzeczywistej struktury przestrzennej dzianiny kolumnkowej

3.3. Przestrzenne przesywane dzianiny kolumnkowe

Przestrzenne przesywane dzianiny kolumnkowe stanowią innowacyjną grupę struktur wnoszących duży wkład w obszar technik dziewiarskich. Wyroby te, analogicznie do opisanych powyżej w rozdziale 3.1 przestrzennych dzianin kolumnkowych, są zbudowane z więcej niż dwóch warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej. Zasadniczą różnicą pomiędzy niniejszymi dwiema grupami struktur przestrzennych jest to, iż w proponowanych powyżej przestrzennych belkach dzianych istnieje pewna trudność wprowadzenia pionowych elementów wzmacniających ich strukturę w kierunku wzdłużnym, dlatego też opracowano nową grupę przestrzennych przesywanych wyrobów włókienniczych oraz technologię ich otrzymywania.

Budowa i technologia przestrzennych przesywanych dzianin kolumnkowych

Przestrzenna przesywana dzianina kolumnkowa jest zbudowana z warstwy wewnętrznej, stanowiącej wypełnienie i jednocześnie wzmocnienie w kierunku wzdłużnym bryły oraz z warstw zewnętrznych, zespalających strukturę przestrzenną w jedną całość [37, 38] (rys. 3.10).

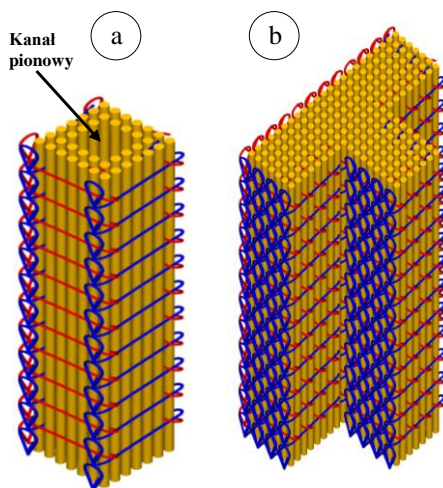


Rys. 3.10. Przestrzenna przesywana dzianina kolumnkowa o przekroju kwadratowym

W każdej z par ścianek zewnętrznych występuje pewne zróżnicowanie pod względem strukturalnym. Jedna ze ścianek w danej parze jest utworzona na bazie dzianin lewo-prawych, natomiast druga do niej przeciwnie jest zbudowana z łączników, które to spajają warstwę wewnętrzną w jedną całość, nadając tym samym kształt i wymiary przekroju poprzecznego przesywanej bryły 3D. Ścianki, w których strukturze występują oczka dzianiny, mogą być zbudowane na bazie struktur lewo-prawych kolumnkowych, tj. struktur dzianin wieloigielnicowych ażurowych, gładkich, wątkowych, platerowanych, dwuigłowych, a także dzianin zakardowych barwnych i strukturalnych. Warstwa wewnętrzna przestrzennej przesywanej dzianiny kolumnkowej, oprócz wymienionych powyżej struktur wprowadzanych w kierunku wzdłużnym, jest także zbudowana z nitek będących łącznikami wiążącymi przeciwległe warstwy zewnętrzne.

Przeszywany wyrób przestrzenny posiada parzystą liczbę warstw zewnętrznych. Liczba par warstw zewnętrznych jest ściśle uzależniona od liczby układów elementów przesywających, tj. od liczby grzebieni igieł przesywających i współpracującej z nimi liczby grzebieni igielnicowych i grzebieni płaszczkowych.

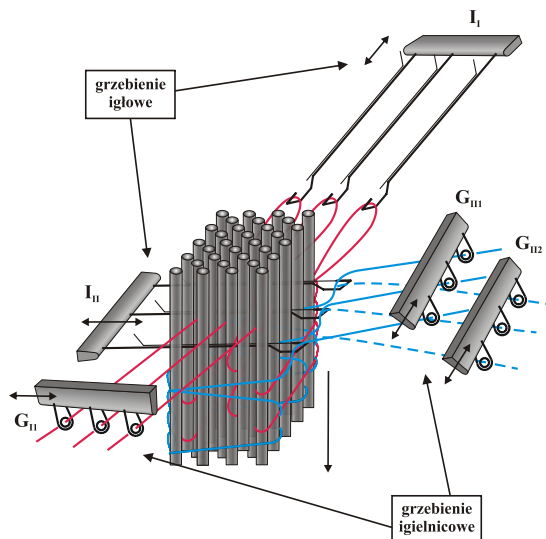
Niniejsza technologia uwzględnia również tworzenie wyrobów o budowie ażurowej oraz reliefowej (rys. 3.11).



Rys. 3.11. Przykład przestrzennej przesywanej dzianiny kolumnkowej o budowie: a) ażurowej, b) reliefowej

Z punktu widzenia surowcowego przestrzenne przesywane dzianiny kolumnkowe mogą być wytwarzane z nitek klasycznych, nitek z przeznaczeniem na wyroby techniczne (nitki szklane, nitki paraaramidowe typu kevlar), nitek metalizowanych, nitek kompozytowych, nitek z nanowłókien, jak również z nitek w postaci równoległego strumienia włókien oplecionego nitkami monofilamentowymi.

Przedstawione powyżej struktury przestrzennych przesywanych dzianin kolumnkowych będą wytwarzane na wielogrzebieniowej osnowowej dziewiarskiej maszynie przesywającej (rys. 3.12). Maszyna jest wyposażona w co najmniej dwa grzebienie igłowe, z którymi współpracuje po jednym lub kilka grzebieni igielnicowych oraz grzebienie płaszczkowe. Wielogrzebieniowa osnowowa dziewiarska maszyna przesywająca posiada z góry założoną liczbę grzebieni igłowych i liczbę grzebieni igielnicowych, których szerokość S i numer uiglenia E można zmieniać w zależności od założonych parametrów strukturalnych i geometrycznych wytwarzanej bryły dzianiny. Podawanie nitki i odbiór gotowego wyrobu będzie się odbywać w sposób analogiczny do zaprezentowanej powyżej technologii przestrzennych dzianin kolumnkowych.



Rys. 3.12. Koncepcja budowy czterogrzebieniowej osnowowej dziewiarskiej maszyny przesywającej do tworzenia brył przesywanych o czterech warstwach zewnętrznych

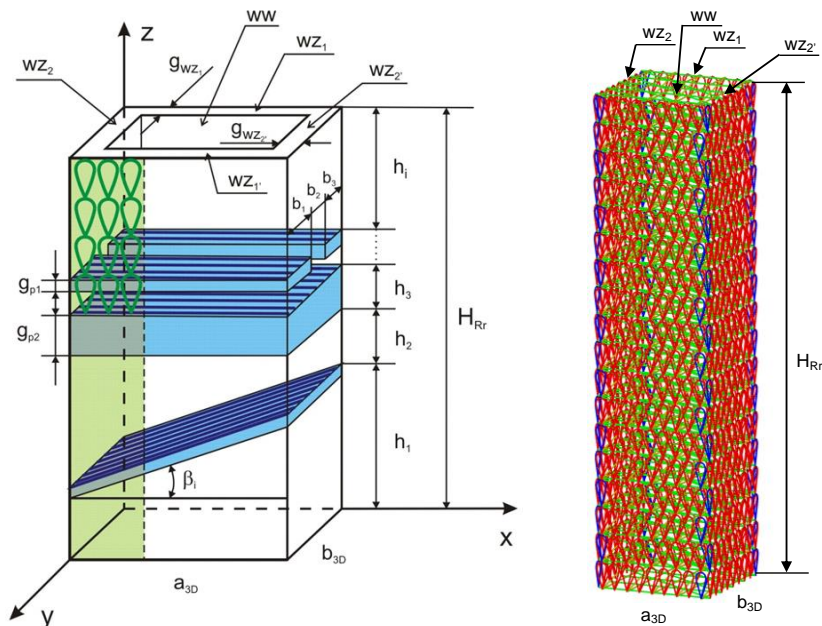
4. MODEL GEOMETRYCZNO-STRUKTURALNY KOLUMNKOWYCH DZIANIN PRZESTRZENNYCH

4.1. Charakterystyka modelowanego obiektu

Model geometryczno-strukturalny dotyczy przestrzennych dzianin kolumnkowych, których budowę scharakteryzowano w rozdziale 3. Podstawową strukturą przestrzenną o znaczącym potencjale aplikacyjnym w konstrukcjach inżynierskich jest bryła w formie prostopadłościanu o podstawie w kształcie prostokąta, która posłużyła do zbudowania modelu geometryczno-strukturalnego (rys. 4.1). Niniejszy model bryły dzianej jest zbudowany z warstw zewnętrznych wz_1 , wz_2 oraz warstwy wewnętrznej wi .

Ścianki zewnętrzne stanowią dwa przeciwległe układy, z których jeden to ścianka wz_1 i do niego przeciwległy wz_1' oraz drugi układ ułożony do poprzedniego pod kątem 90° wz_2 i do niego przeciwległy wz_2' . Budowę bryły dzianiny można odnieść do architektury dzianin dystansowych. Połączenie ze

sobą dwóch struktur dzianin dystansowych ustawionych względem siebie pod kątem 90° w osi wyrobu umożliwia uzyskanie bryły przestrzennej dzianiny kolumnienkowej.



Rys. 4.1. Model geometrii przestrzennej bryły dzianej

Wszystkie warstwy zewnętrzne w przestrzennej dzianinie kolumnienkowej mogą posiadać jednakową lub zróżnicowaną budowę. Ponadto, cały wyrób może być wykonany z jednakowego surowca lub jego zróżnicowanie może następować w obszarze poszczególnych ścianek. Grubość warstw zewnętrznych jest uzależniona od mas liniowych zastosowanych nitek, jak również od ilości splotów składowych. Warstwa wewnętrzna jest tworzona poprzez wprowadzanie nitek pomiędzy ściankami zewnętrznymi. W całym raporcie wysokości bryły dzianej, oznaczonej jako H_{Rr} , warstwa wewnętrzna może mieć budowę wypełnioną lub segmentową. W przypadku struktury segmentowej na wysokości raportu bryły H_{Rr} występują pomniejsze elementy budowy o wysokościach h_i . Segmenty te mogą posiadać jednakową wysokość bądź też zróżnicowaną. Przegrody w stosunku do ścianek zewnętrznych mogą być ułożone prostopadłe do warstw zewnętrznych pod kątem $\alpha = 90^\circ$, bądź też pod kątem $\alpha \neq 90^\circ$ kształtującym różne ułożenie „półki”.

Zgodnie z założeniami, istnieje możliwość indywidualnego kształtowania parametrów geometrii zarówno poszczególnych warstw zewnętrznych jak

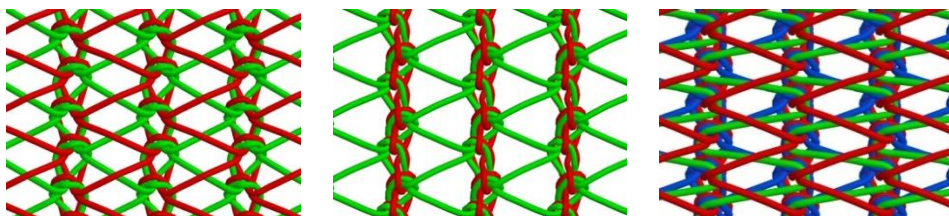
i warstwy wewnętrznej. Niniejszy model ujmujący szczegółowy przypadek dzianej bryły w postaci graniastosłupa czworokątnego można odnieść do opisu innych typów budowy dzianin 3D.

4.2. Modelowanie struktury splotów warstw zewnętrznych i wewnętrznej w ujęciu 3D

Modelowanie struktury splotów warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej wykonano w środowisku unikalnego programu ProCad warpknit 5.

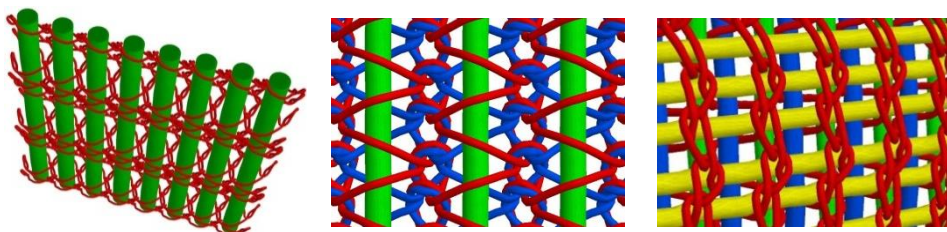
Warstwy zewnętrzne przestrzennej bryły dzianej stanowią kolumniowe dzianiny o splotach lewo-prawych. Najbardziej pożądanymi są dzianiny o niskiej podatności na deformację mechaniczną. Rozpatrywaną grupę płaskich dzianin lewo-prawych z przeznaczeniem na ścianki zewnętrzne przestrzennych brył dzianych podzielono na trzy podgrupy, które ujmują odpowiednio: *dzianiny na bazie splotów podstawowych małorozciągliwe, dzianiny wątkowe oraz dzianiny ażurowe wzmacniane nitkami wątków w układzie pionowym i poziomym*. Istotnymi parametrami wpływającymi na strukturę wyrobu obok liczby i rodzaju splotów składowych jest masa liniowa nitek oraz ścisłość rządkowa i kolumniowa.

W pierwszej grupie zostały uwzględnione dzianiny o prostych splotach, charakteryzujące się krótkimi łącznikami ograniczającymi rozciągliwość struktury. Zaliczyć tu można splot trykotu o rzutach przeciwbieżnych czy splot łańcuszka (rys. 4.2). Sploty te dodatkowo można łączyć z układami wątków.



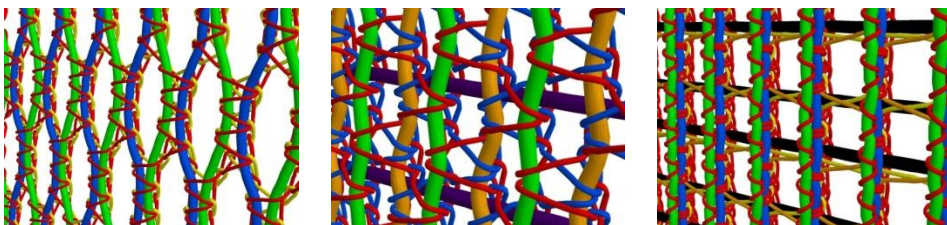
Rys. 4.2. Przykłady połączeń splotowych, małorozciągliwych

Druga grupa dzianin bazuje na splotach wątkowych. Nitki wątku są wprowadzane jako odcinki proste w kierunku rządka, kolumniki lub w obu kierunkach jednocześnie (rys. 4.3). Wątki wykonane są z przędzy o wysokiej masie liniowej i dobrych parametrach wytrzymałościowych. Kierunki ich ułożenia w dzianinie decydują o właściwościach mechanicznych wyrobu. Sploty podstawowe są wykonane z przędzy o znacznie mniejszej masie liniowej i stanowią jedynie wzajemne zespolenie poszczególnych układów nitek wątku.



Rys. 4.3. Przykłady splotów wątkowych

Ostatnią grupą splotów warstw zewnętrznych przestrzennych brył dzianych są dzianiny ażurowe wzmocnione nitkami wątków w układzie pionowym i poziomym. Stanowią one pewną odmianę w stosunku do dwóch powyżej przedstawionych grup reprezentujących dzianiny będące strukturami wypełnionymi o dość wysokiej masie powierzchniowej, której wartość wpływa znacząco na wynikową masę przestrzennej bryły dzianej. Prezentowane w trzeciej grupie sploty zawierają nitki tworzące ażury o niskiej masie liniowej oraz nitki wątków o wysokiej masie liniowej, które wzmocniają konstrukcję dzianiny (rys. 4.4). Układy wątków wzmocniających mogą przebiegać pionowo, poziomo, ukośnie lub po łuku. Rodzaj splotu ażurowego decyduje o kształcie tworzonych ażurów oraz o możliwości wprowadzenia nitek wątku.



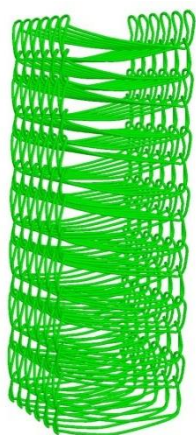
Rys. 4.4. Przykłady splotów ażurowych wzmocnianych nitkami wątków

W analogiczny sposób, jak miało to miejsce w przypadku dzianin lewo-prawych ścianek zewnętrznych, **struktury dwuprawych dzianin dystansowych, tworzących warstwę wewnętrzną bryły dzianiny, podzielono na trzy podgrupy obejmujące: dwuprawe dystansowe sploty gładkie o strukturze zwartej, dwuprawe dystansowe sploty wątkowe w układzie wątków pionowych i poziomych oraz dwuprawe dystansowe sploty ażurowe.**

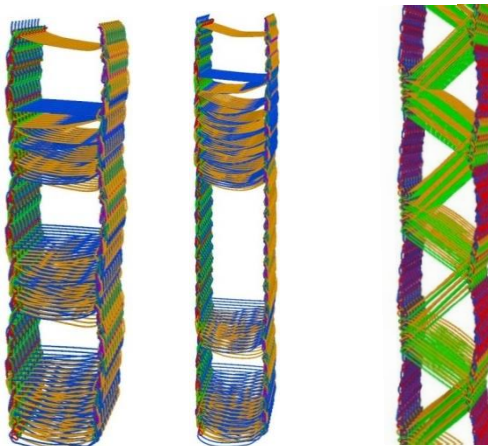
Poszczególne nitki składowe warstwy wewnętrznej splotów gładkich o strukturze zwartej, zaliczonych do pierwszej grupy, mogą posiadać zróżnicowaną masę liniową (rys. 4.5). Ponadto masa liniowa nitek splotów warstw zewnętrznych może być odmienna od wartości mas liniowych nitek splotów warstwy wewnętrznej. Na budowę warstwy wewnętrznej można również

wpływać poprzez zmianę liczby splotów składowych, modyfikując stopień jej zagęszczenia.

W drugiej grupie splotowej warstwy wewnętrznej zostały uwzględnione dwuprawe dystansowe sploty ażurowe. Układ ażurowy w postaci przegród w istotny sposób wpływa na masę wyrobu przestrzennego. Grubość, rozmieszczenie i kąt ułożenia przegród w stosunku do warstw zewnętrznych może być taki sam na całej długości dzianej belki (wyrób izostrukuralny – jednorodny) lub zróżnicowany (wyrób anizostrukuralny – niejednorodny) (rys. 4.6).



Rys. 4.5. Przykład budowy warstwy wewnętrznej o zwartej strukturze



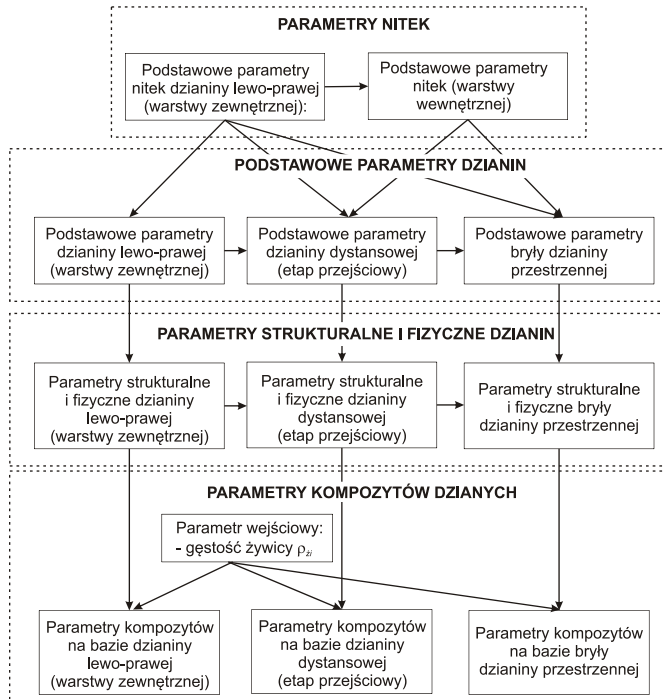
Rys. 4.6. Przykład budowy warstwy wewnętrznej o strukturze ażurowej

Trzecia grupa splotów warstwy wewnętrznej, w analogii do struktur splotów lewo-prawych, uwzględnia grupę dzianin wątkowych. W tego typu dzianinach układy wątków pionowych jak i poziomych występują w warstwach zewnętrznych wyrobu.

4.3. Algorytm projektowania strukturalno-technologicznego kolumnkowych dzianin przestrzennych i kompozytu

Algorytm projektowania strukturalno-technologicznego powyżej opisanej struktury dzianiny i zbudowanego na jej bazie kompozytu obejmuje cztery bloki (rys. 4.7):

- parametry nitek,
- podstawowe parametry dzianin,
- parametry strukturalne i fizyczne dzianin,
- parametry kompozytów dzianinych.



Rys. 4.7. Algorytm projektowania strukturalno-technologicznego dzianiny i kompozytu

Algorytm bazuje na znanych modelach struktur dzianin płaskich lewo-prawych i dwuprawych dystansowych. Dla zawartych w nim parametrów opracowano niespełna 450 zależności obliczeniowych określających parametry zarówno poszczególnych elementów składowych warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej, jak i całej przestrzennej bryły dzianej.

Pierwszy segment *parametry nitek* obejmuje zarówno parametry zadawane z góry przez projektanta, jak również parametry wyznaczone na podstawie odpowiednich formuł obliczeniowych. Wśród parametrów deklarowanych przez użytkownika można wymienić: masy liniowe nitek splotów składowych warstwy zewnętrznej Tt_{szi} i splotów składowych warstwy wewnętrznej Tt_{swj} oraz masy właściwe tworzywa nitek splotów składowych, zaś jako wielkość obliczaną grubość nitek splotów składowych d_{szi} i d_{swj} .

Drugi segment *podstawowe parametry dzianin* ujmuje w trzech oddzielnych blokach podstawowe parametry ścianek zewnętrznych jako odpowiednik dzianin lewo-prawych, warstwy wewnętrznej jako analogia do dzianin dystansowych oraz parametry bryły dzianiny przestrzennej. W segmencie tym parametrami deklarowanymi odnoszącymi się bezpośrednio do przestrzennej bryły dzianej będą między innymi wymiary niniejszej struktury, tj. szerokość a_{3D} i głębokość b_{3D} oraz wysokość raportu H_{Rr} , a jedynym wyznaczanym parametrem

na podstawie raportów splotów, ścisłości i długości nitek będzie masa jednego metra bieżącego dzianiny przestrzennej M_{3D} .

W trzecim segmencie zatytułowanym *parametry strukturalne i fizyczne dzianin* zdefiniowano zależności obliczeniowe determinujące szczegółowe parametry struktur dzianin. W bloku związanym bezpośrednio z przestrzenną bryłą dzianą uwzględniono zależności na następujące parametry związane: z powierzchnią nitek, z objętościami nitek, z objętościami przestrzennej bryły dzianej, z objętościami odniesionymi do jednego metra bieżącego dzianiny, ze współczynnikiem porowatości dzianiny przestrzennej oraz z gęstością dzianiny w jednym metrze kwadratowym kompozytu dzianego.

Czwarty segment algorytmu obliczeniowego *parametry kompozytów dzianych*, ujmuje parametry związane bezpośrednio ze strukturami kompozytowymi wykonanymi na bazie dzianin zarówno lewo-prawych, dwuprawych dystansowych oraz dzianin przestrzennych. Jediną zmienną wejściową deklarowaną przez projektanta w tym segmencie jest gęstość żywicy ρ_{zi} . Parametrami obliczanymi w tym bloku są między innymi: współczynniki wypełnienia objętościowego żywicą, współczynniki masy dzianiny do masy kompozytu, współczynniki masy żywicy do masy kompozytu, gęstość jednego metra bieżącego kompozytu dzianego, czy gęstość żywicy w jednym metrze bieżącym kompozytu.

Kompozyt zgodnie z założeniami może być tworzony na trzy różne sposoby: poprzez całkowite wypełnienie wolnych przestrzeni żywicą, poprzez wypełnienie wolnych przestrzeni żywicą o różnym stopniu spienienia oraz poprzez pokrycie powierzchni nitek otoczką z żywicy. Zastosowanie drugiej i trzeciej metody otrzymywania kompozytu ma na celu obniżenie jego docelowej masy.

W oparciu o stworzony algorytm projektowania strukturalno-technologicznego dzianiny i kompozytu oraz sformułowane procedury obliczeniowe w środowisku programu Microsoft Excel zaprogramowano algorytm obliczeniowy. W niniejszym algorytmie wygenerowano formuły, dzięki którym można dokonywać zmian parametrów wejściowych. Algorytm obliczeniowy jest podzielony na trzy części, które kolejno obejmują:

- parametry dzianin lewo-prawych (warstw zewnętrznych) oraz wykonanych przy ich udziale kompozytów,
- parametry dzianin dwuprawych dystansowych (wariantu przejściowego) oraz wykonanych przy ich udziale kompozytów,
- parametry przestrzennych brył dzianych oraz wykonanych przy ich udziale kompozytów.

Ponadto algorytm został zbudowany w ten sposób, iż wszystkie trzy wymienione powyżej segmenty są ze sobą sprzężone. Oznacza to zatem, iż przykładowo obliczona wartość długości nitki w oczku dla struktury lewo-prawej bierze także udział w obliczeniach obejmujących budowę ścianek zewnętrznych

dzianiny dystansowej, jak również warstw zewnętrznych przestrzennej bryły dzianej. Na rysunku 4.8 a i b zaprezentowano wybrane fragmenty niniejszego algorytmu obliczeniowego.

	A	B	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1													
2	1	szerokość raportu spłotu warstwy 1 zewnętrznej R_{s1} , kol	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	2	wysokość raportu spłotu warstwy 2 zewnętrznej R_{s2} , rz	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	3	masa liniowa nitki i tego spłotu składowego warstwy zewnętrznej $T_{L_{sd}}$, g/m	100,00	100,00	160,00	160,00	200,00	200,00	260,00	260,00	300,00	300,00	360,00
5	4	numer ugięcia maszyny E	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
6	5	liczbać rąbkowa deklarowana na 5 maszynie $P_{r,m}$, rz/10mm	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
7	6	ścialność rąbkowa P_r , rz/100 mm	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
8	7	ścialność kolumnkowa P_c , kol/100 mm	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24
9	8	szerokość kolumnki A , mm	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12
10	9	wysokość rzędka B , mm	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
11	10	współczynnik kształtu oczka C	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
12	11	masa właściwa tworzywa nitki i tego spłotu składowego $P_{t,s}$, g/cm ³	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
13	12	grubość nitki i tego spłotu składowego d_{sd} , mm	0,30	0,30	0,38	0,38	0,43	0,43	0,49	0,49	0,53	0,53	0,58
14	13	wartość współczynnika n uzależniona od grubości nitki w oczku i tego spłotu warstwy zewnętrznej wg. Allison'a $k_{r,s}$, mm	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	14	długość nitki w oczku i tego spłotu warstwy zewnętrznej dla tego grzebienia l_{gr} , mm	12,64	12,64	13,21	13,21	13,54	13,54	13,99	13,99	14,26	14,26	14,65
16	15	długość nitki w oczku i tego spłotu lgowego wg. Grosberg'a $l_{gr,lg}$, mm	14,37	14,37	14,57	14,57	14,69	14,69	14,84	14,84	14,94	14,94	15,06

Rys. 4.8 a. Algorytm obliczeń parametrów strukturalnych dzianin kolumnkowych w oparciu o środowisko programowe Microsoft Excel - fragment dotyczący struktury dzianiny lewo-prawej (ścianki zewnętrznej) przy zmianie masy liniowej nitki

	A	B	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
381		maksymalna obciążalność w jednym mb kompozytu dzianego $P_{12,2,max}$, m ²	2,40E-03		2,39E-03		2,39E-03			2,29E-03		2,27E-03
383		maksymalna masa żywicy w jednym mb kompozytu dzianego $M_{12,2,max}$, g/m ³	2833,65		2787,15		2755,24			2706,20		2672,81
385		masa jednego mb dzianiny przestrzennej $M_{12,2}$, g	136,07		190,45		227,78			285,13		324,18
387		max masa jednego mb kompozytu dzianego $M_{12,2,max}$, g	2969,72		2977,60		2983,01			2991,32		2996,98
389		współczynnik maksymalnej masy dzianiny do maksymalnej masy kompozytu $U(M_{12,2,max}/M_{12,2,max})$	0,05		0,06		0,08			0,10		0,11
		współczynnik maksymalnej masy żywicy do maksymalnej masy kompozytu $U(M_{12,2,max}/M_{12,2,max})$	0,95		0,94		0,92			0,90		0,89
391		gęstość jednego mb kompozytu dzianego $\rho_{12,2,max}$, kg/m ³	1187,89		1191,04		1193,20			1196,33		1198,79
393		10% masa żywicy w jednym mb kompozytu dzianego $M_{12,2,10\%}$, g	283,37		278,72		275,52			270,62		267,28
400		10% masa jednego mb kompozytu dzianego $M_{12,2,10\%}$, g	419,43		469,17		503,30			555,75		591,46
402		współczynnik masy dzianiny do 10% masy kompozytu $U(M_{12,2,10\%}/M_{12,2,max})$	0,32		0,41		0,45			0,51		0,55
404		współczynnik 10% masy żywicy do 10% masy kompozytu $U(M_{12,2,10\%}/M_{12,2,max})$	0,68		0,59		0,55			0,49		0,45
406		10% gęstość jednego mb kompozytu dzianego $\rho_{12,2,10\%}$, kg/m ³	167,77		187,67		201,32			222,30		236,58
408		20% masa żywicy w jednym mb kompozytu dzianego $M_{12,2,20\%}$, g	566,78		557,43		551,05			541,24		534,56
409		20% masa jednego mb kompozytu dzianego $M_{12,2,20\%}$, g	702,80		747,88		778,52			826,37		858,74

Rys. 4.8 b. Algorytm obliczeń parametrów strukturalnych dzianin kolumnkowych w oparciu o środowisko programowe Microsoft Excel - fragment dotyczący parametrów strukturalnych kompozytów przestrzennych

4.4. Analiza parametrów dzianej bryły kolumnkowej i kompozytu przestrzennego

W opracowanym arkuszu obliczeniowym dokonano symulacji parametrów strukturalno-geometrycznych kompozytów dzianych. Badania dotyczyły bryły prostopadłościowej o wymiarach przekroju poprzecznego 50 mm × 50 mm

z kanałami wewnętrznymi o wysokości 50 mm i grubości przegród prostokątnych równej 50 mm.

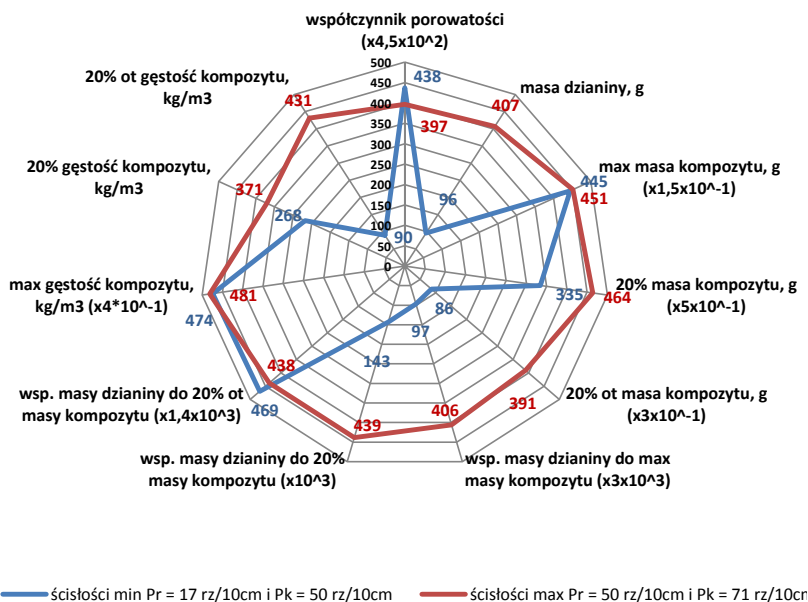
Obliczenia przeprowadzono dla następujących danych wejściowych:

- numeru uiglenia maszyny osnowowej od 6E do 18E oraz wartości ścisłości rządkowej zadawanej na maszynie od 1.7 rz/10 mm do 5 rz/10 mm;
- masy liniowej nitki zarówno w warstwach zewnętrznych jak i wewnętrznych w zakresie od 100 tex, do 400 tex;
- rodzaju tworzywa nitki: poliester = $1,38 \text{ g/cm}^3$, aramid = $1,44 \text{ g/cm}^3$, grafit = $1,80 \text{ g/cm}^3$, szkło = $2,60 \text{ g/cm}^3$ i bazalt = $2,66 \text{ g/cm}^3$;
- zmiany wielkości pola powierzchni przekroju poprzecznego od 25 dm^2 do 900 dm^2 .
- procentowego udziału żywicy spienionej od 5% do 50%.

Analiza wyników obejmowała następujące parametry: współczynnik porowatości dzianiny i współczynnik zapelnienia objętościowego dzianiny, masę dzianiny i masę kompozytu dzianego oraz współczynnik masy dzianiny do masy kompozytu.

a) Zmiana ścisłości kolumnkowej P_k i ścisłości rządkowej Pr

Na wykresie radarowym (rys. 4.9) zestawiono minimalne i maksymalne wartości wybranych parametrów bryły dzianiny i kompozytu dzianego w funkcji ścisłości rządkowej i kolumnkowej.

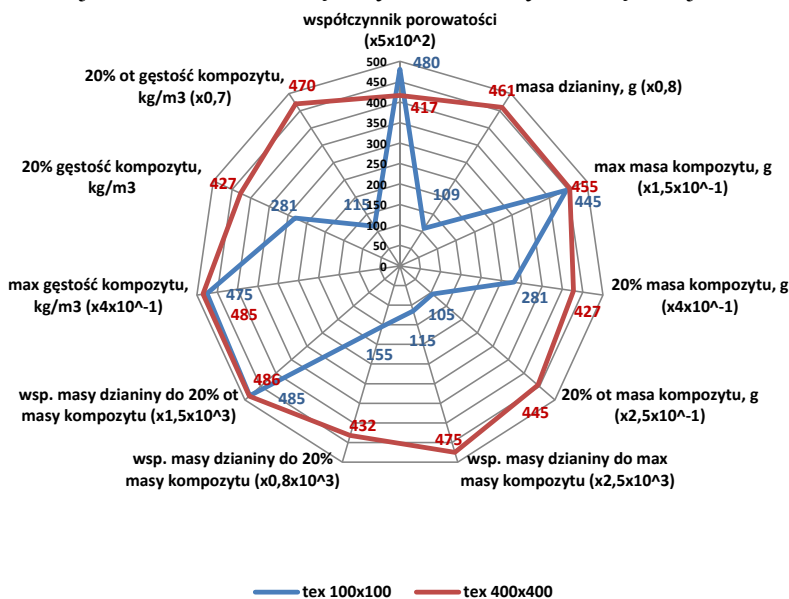


Rys. 4.9. Wykres wybranych parametrów dzianiny i kompozytu w funkcji ścisłości rządkowej i kolumnkowej

Przeprowadzona analiza wykazała, iż różnicowanie wartości ścisłości rządkowej i kolumnkowej nie odgrywa kluczowego znaczenia na takie parametry, jak: współczynnik masy dzianiny do masy kompozytu z udziałem 20% otoczki żywicy oraz gęstość kompozytu maksymalnie wypełnionego żywicą. Dla niniejszych parametrów odnotowano jedynie niewielkie zmiany ich wartości przy skrajnych zmianach ścisłości. Znaczący wpływ zmian wartości ścisłości stwierdzono dla masy dzianiny (96-407 g), masy kompozytu przy udziale 20% otoczki żywicy (286-1302 g), współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu maksymalnie wypełnionego żywicą (0,032-0,135), współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu z żywicą spienioną (0,143-0,439) oraz gęstości kompozytu z udziałem otoczki żywicy stanowiącej 20% przyrost średnicy nitek (110-502 kg/m³). Wymienione powyżej parametry charakteryzują się największymi różnicami w wartościach przy skrajnych zmianach ścisłości, a zatem dają duże pole działań w procesie optymalizacyjnym wyrobu końcowego. W przypadku masy kompozytu z żywicą spienioną (669-927 g) oraz gęstości tegoż kompozytu (268-371 kg/m³) również odnotowano wpływ zmian ścisłości, jednakże nie jest on już tak duży.

b) *Zmiana masy liniowej nitek warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej*

Na wykresie radarowym (rys. 4.10) zestawiono minimalne i maksymalne wartości wybranych parametrów bryły dzianiny i kompozytu dzianego w funkcji masy liniowej nitek warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej.



Rys. 4.10. Wykres wybranych parametrów bryły dzianiny i kompozytu przestrzennego w funkcji masy liniowej nitek warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej

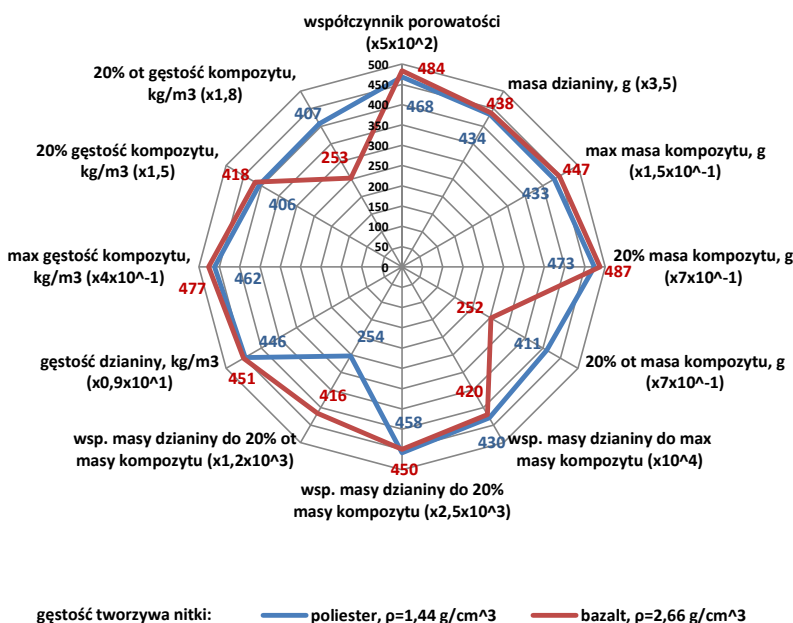
Przeprowadzona analiza wykazała, iż różnicowanie wartości masy liniowej nitek warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej nie ma kluczowego wpływu na takie parametry, jak: masa kompozytu maksymalnie wypełnionego żywicą, współczynnik masy dzianiny do masy kompozytu z udziałem 20% otoczki żywicy oraz maksymalna gęstość kompozytu. Znaczący wpływ zróżnicowania wartości mas liniowych nitek odnotowano dla masy dzianiny (136-576 g), masy kompozytu przy udziale otoczki z żywicy stanowiącej 20% przyrost średnicy nitek (421-1778 g), współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu maksymalnie wypełnionego żywicą (0,046-0,190), współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu z żywicą spienioną (0,194-0,540) oraz gęstości kompozytu z udziałem otoczki z żywicy stanowiącej 20% przyrost średnicy nitek (164-672 kg/m³).

Wymienione powyżej parametry charakteryzują się największymi różnicami w wartościach przy skrajnych zmianach mas liniowych nitek i umożliwiają na prowadzenie działań zmierzających w kierunku uzyskania wyrobu końcowego o optymalnych parametrach.

c) Zmiana rodzaju tworzywa nitek

Z przedstawionego wykresu ilustrującego rozkład wybranych parametrów bryły dzianiny i kompozytu przestrzennego w funkcji gęstości tworzywa nitek (rys. 4.11) można wnioskować, iż zmiana gęstości tworzywa nitek ma istotny wpływ jedynie na parametry związane ze strukturą kompozytową utworzoną poprzez nanoszenie żywicy w postaci otoczki.

Masa kompozytu zmieniała się od 587 g, dla wzmocnienia z nitek poliestrowych, do 361 g dla wzmocnienia z nitek bazaltowych. Współczynnik masy dzianiny do masy kompozytu wykonanego przy udziale otoczki z żywicy stanowiącej 20% przyrost średnicy nitek zmieniał się od 0,211 dla nitek poliestrowych do 0,347 dla nitek bazaltowych, zaś gęstość niniejszego kompozytu zawierała się w granicach od 226 kg/m³ dla poliestru do 140 kg/m³ dla bazaltu. Przytoczone wartości informują o obszarach, w których poprzez zmianę gęstości tworzywa nitek można optymalizować samą strukturę bryły dzianiny, jak również konstrukcję kompozytową wzmocnianą niniejszą dzianiną. W przypadku współczynnika porowatości bryły dzianiny, masy dzianiny, jak również parametrów dotyczących zarówno kompozytu z maksymalnym udziałem żywicy oraz żywicy w układzie spienionym nie odnotowano istotnego wpływu na wartości tychże parametrów w wyniku zmian gęstości tworzywa nitek z uwagi na mały udział tworzywa nitek w całkowitej masie kompozytu przestrzennego.



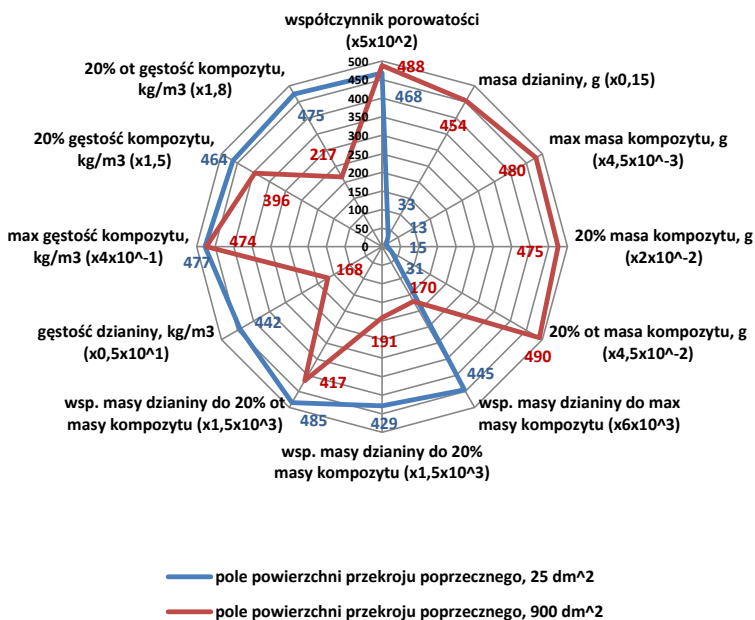
Rys. 4.11. Wykres wybranych parametrów bryły dzianiny i kompozytu przestrzennego w funkcji gęstości tworzywa nitki

d) *Zmiana wielkości pola powierzchni przekroju poprzecznego bryły*

Zilustrowany na rysunku 4.12 wykres radarowy podsumowuje wpływ wielkości pola przekroju poprzecznego na wybrane parametry bryły dzianiny, jak i kompozytów przestrzennych wykonanych na bazie tejże dzianiny.

Przeprowadzona analiza wskazuje na brak istotnych zmian w wartościach współczynnika porowatości dzianiny (różnice rzędu 4%) oraz gęstości kompozytu przy maksymalnym wypełnieniu jego struktury żywicą (różnice rzędu 1%) dla skrajnych wartości pola przekroju poprzecznego wynoszących odpowiednio 25 dm^2 i 900 dm^2 . Niewielki wpływ zróżnicowania wielkości pola odnotowano w przypadku współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu z otoczką z żywicą, który był na poziomie 16% oraz gęstości kompozytu z żywicą spienioną, gdzie różnice wynosiły 17%.

Znacznie większe zmiany w funkcji wielkości pola zarejestrowano dla następujących parametrów: współczynnik masy dzianiny do masy kompozytu z maksymalnym udziałem żywicą (różnice rzędu 161%), współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu z żywicą spienioną (różnice rzędu 124%), gęstości dzianiny (różnice rzędu 163%) oraz dla gęstości kompozytu z otoczką z żywicą (różnice rzędu 119%). Maksymalny wpływ wielkości pola wystąpił w przypadku masy zarówno samej bryły dzianej (różnice rzędu 1269%), jak i mas poszczególnych kompozytów ($\Delta_{\text{max}} = 3476\%$, $\Delta_{20\%} = 2971\%$, $\Delta_{20\%, \text{ot}} = 1494\%$).



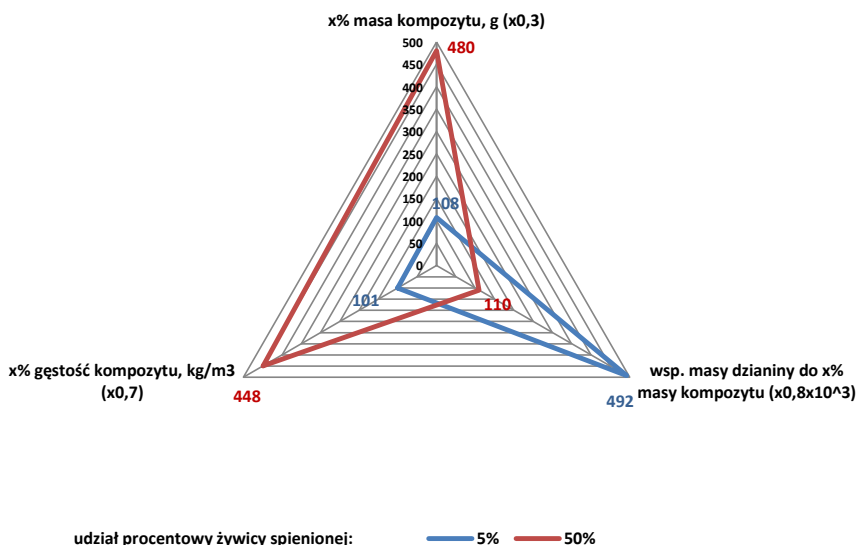
Rys. 4.12. Wykres wybranych parametrów bryły dzianiny i kompozytu przestrzennego w funkcji wielkości pola powierzchni przekroju poprzecznego

e) *Zmiana udziału procentowego żywicy spienionej w masie kompozytu przestrzennego*

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, iż masa kompozytu zmieniała się od 359g dla 5% udziału żywicy do 1602g dla 50% udziału żywicy, a zatem dziesięciokrotny procentowy wzrost udziału żywicy w strukturze przestrzennej kompozytu spowodował wzrost masy wyrobu o 4,5 razy. Ponadto przeprowadzona analiza zależności współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu w funkcji udziału procentowego żywicy spienionej wykazała, iż wartość niniejszego współczynnika zmieniała się od 0,616 dla 5% udziału żywicy do 0,138 dla 50% jej udziału. Stwierdzono zatem, iż wzrost udziału procentowego żywicy z wartości 5% do 50% spowodował spadek współczynnika masy dzianiny do masy kompozytu z procentowym udziałem żywicy spienionej o 4,5 razy. Zauważono także, iż na skutek zmiany udziału procentowego żywicy w granicach od 5% do 50% gęstość kompozytu sukcesywnie narastała z poziomu 144 kg/m³ do 641 kg/m³. Zatem dziesięciokrotny procentowy wzrost udziału procentowego żywicy spowodował wzrost gęstości o 4,5 razy.

Zmiana udziału procentowego żywicy spienionej wykazuje istotny wpływ zarówno na masę kompozytu z procentowym udziałem żywicy spienionej, współczynnik masy dzianiny do masy kompozytu z procentowym udziałem

żywicy spienionej jak również na gęstość kompozytu z procentowym udziałem żywicy spienionej na poziomie różnic wynoszących 346% (rys. 4.13).



Rys. 4.13. Wykres wybranych parametrów kompozytu przestrzennego w funkcji udziału procentowego żywicy spienionej

5. MODELOWANIE KOMPUTEROWE WŁASNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH PRZESTRZENNYCH KOMPOZYTÓW DZIANYCH

Metoda elementów skończonych (MES) jest powszechnie stosowaną metodą numeryczną, służącą do rozwiązywania różnorodnych zagadnień inżynierskich [38-41]. Wśród najczęściej używanych programów komputerowych bazujących na niniejszej metodzie wymienić można następujące środowiska programowe: ANSYS, ABAQUS, ADINA, ProEngineer, CATIA, Patran/Nastran i wiele innych. Program ANSYS jest narzędziem wysoce rozbudowanym. Przed przystąpieniem do obliczeń istotne jest zdefiniowanie, jakiego rodzaju zjawiska będą rozpatrywane, to jest przykładowo: mechaniczne, termiczne, magnetyczne, elektrostatyczne, elektromagnetyczne i inne.

5.1. Badania eksperymentalne parametrów mechanicznych kompozytów dzianych

W modelowaniu komputerowym własności wytrzymałościowych przestrzennych kompozytów dzianych założono, iż jako dane wejściowe zadeklarowane zostaną rzeczywiste wartości parametrów mechanicznych, takich jak moduł Younga i liczba Poissona. W tym celu w środowisku programu komputerowego ProCad warpknit 5 zaprojektowano sześć wariantów splotowych wieloigielnicowych dzianin kolumienkowych, które odpowiadają swoją budową strukturze ścianek zewnętrznych nowej generacji przestrzennych dzianin kolumienkowych. Projekty dzianin o splotach wątkowych gładkich i splocie ażurowym wytworzono na maszynie osnowowej firmy Karl Mayer typu RL5 NF o numerze uiglenia 12E, która znajduje się na wyposażeniu Laboratorium Maszyn Dziewiarskich Katedry Dziewiarstwa. Dzianiny wykonano z nitek szklanych o masie liniowej 200 tex oraz z rovingu szklanego o masie liniowej 300 tex.

Dla uzyskanych dzianin wyznaczono podstawowe parametry strukturalne, takie jak: masa powierzchniowa, grubość, ścisłość rządkowa i kolumienkowa. Powyższe struktury dziane posłużyły do wytworzenia kompozytów szklano-epoksydowych. Kompozyty wykonano metodą ręczną. Dla wytworzonych próbek kompozytowych wyznaczono: masy, grubości, udziały procentowe mas powierzchniowych dzianin w masach kompozytów oraz masy, jakie stanowi żywica.

Badania eksperymentalne dzianin i zbudowanych na ich bazie kompozytów, mające na celu wyznaczenie wartości modułów Younga oraz liczby Poissona, zostały wykonane w Katedrze Materiałoznawstwa, Towaroznawstwa i Metrologii Włókienniczej Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej.

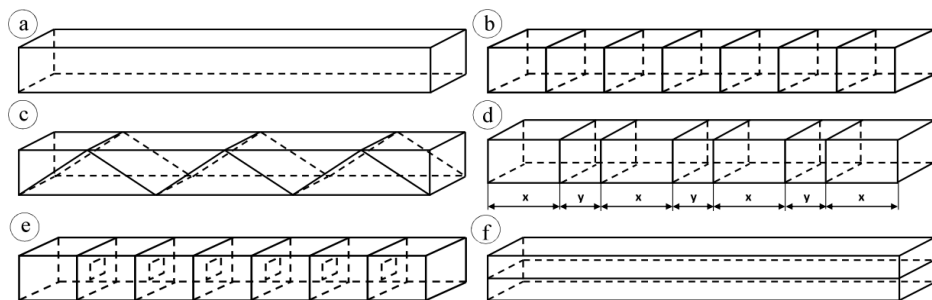
Próbki dzianin i kompozytów poddano procesowi rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Instron typu 5985, w oparciu o polskie normy PN-EN ISO 13934-1, PN-EN ISO 527-1, PN-EN ISO 527-4, PN-EN ISO 527-5 [43-46]. Łącznie przebadano 120 próbek (po 60 próbek zarówno dla dzianin jak i kompozytów). Próby rozciągania dzianin przeprowadzono z prędkością 5mm/min przy obciążeniu wstępnym 2 N, natomiast badania wytrzymałości kompozytów wykonano z prędkością przesuwu głowicy 0,2 mm/min przy obciążeniu wstępnym 10 N. Pomierzone wartości Modułu Younga dla dzianin zawierały się w zakresie od 6,011 do 710,868 MPa, zaś dla kompozytów zmieniały się w granicach od 1681,913 do 3926,705 MPa.

Na podstawie powyżej przedstawionych badań zaobserwowano, iż kompozyty szklano-epoksydowe posiadają średnio 17-krotnie większy moduł Younga w stosunku do modułu sztywności jakim charakteryzowały się dzianiny, będące jednym z komponentów niniejszych kompozytów. Stwierdzono także, iż parametry wytrzymałościowe kompozytów mogą być kształtowane poprzez odpowiedni dobór splotów jak i tworzywa nitek dzianin stanowiących ich wzmocnienie.

5.2. Symulacja komputerowa właściwości wytrzymałościowych przestrzennych kompozytów dzianych

Celem niniejszej analizy symulacji właściwości wytrzymałościowych przestrzennych kompozytów dzianych było wykazanie wpływu wybranych parametrów mechanicznych rozpatrywanych belek w funkcji przede wszystkim architektury przestrzennej tychże kompozytów, a tym samym dzianej bryły przestrzennej. Podjęty cel był podyktowany przedstawieniem wybranych właściwości mechanicznych kompozytu w oparciu o budowę przestrzennej dzianiny wytwarzanej zgodnie z nową technologią dziania.

W oparciu o pomierzone wartości modułu Younga dla kompozytów zbudowanych z dzianin kolumnkowych z włókien szklanych wzmocnionych żywicą epoksydową typu Epidian 5[®] został przeprowadzony eksperyment numeryczny wytrzymałości struktur przestrzennych. W tym celu opracowano warianty geometryczne przestrzennych kompozytów dzianych, których geometria ściśle odpowiadała możliwościom nowej technologii przestrzennych dzianin kolumnkowych (rys. 5.1 a-e). Ponadto opracowano także jeden model, którego geometria ujmowała możliwości technologiczne przestrzennych kolumnkowych dzianin przesywanych (rys. 5.1 f).



Rys. 5.1. Rysunki schematyczne modeli geometrycznych belek kompozytowych: a) belka "pusta", b) belka z przegrodami prostopadłymi równomiernie rozmieszczonymi, c) belka z przegrodami skośnymi, d) belka z przegrodami prostopadłymi o zmiennym rozstawieniu x i y , e) belka z przegrodami prostopadłymi z wydrążonym otworem, f) belka z przegrodami wzdłużnymi

W celu przeprowadzenia symulacji wytrzymałościowych poczyniono następujące założenia, ujmujące: budowę modelu geometrycznego belki kompozytowej, warianty konfiguracji trzpieni obciążających i podpór względem belki kompozytowej, parametry materiałowe modelu geometrycznego, warunki kontaktu pomiędzy trzpieniem obciążającym i kompozytem, oraz podporami i kompozytem, rodzaj siatki podziału na elementy skończone, warunki brzegowe modelu oraz analizę uzyskanych wyników pomiarów.

Obliczenia przeprowadzono dla następujących parametrów wejściowych:

- trzy warianty geometryczne belki: belka „pusta”, belka z przegrodami prostokątnymi, belka z przegrodami skośnymi, w układach podparcia dwu-, trzy- i czteropunktowego;
- grubość warstw zewnętrznych i przegród warstwy wewnętrznej belki:
 - a) dla belki z przegrodami prostokątnymi w zakresie 2,5-5,0 mm;
 - b) dla belki z przegrodami skośnymi w zakresie od 2,5 do 4,5 mm;
- liczba przegród w warstwie wewnętrznej w zakresie 7-70 przegród (wypełnienie warstwy wewnętrznej od 5 do 50%);
- odległości x i y pomiędzy przegrodami warstwy wewnętrznej od $x = 50,00$ mm, $y = 50,00$ mm do $x = 5,00$ mm, $y = 83,75$ mm;
- wielkości otworu w przedgrodzie warstwy wewnętrznej w zakresie od $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ do $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$;
- moduł Younga w przedziale od 1681,913 do 3313,353 MPa;
- siła obciążająca w zakresie od 3500 do 12000 N;
- liczba przegród wzdłużnych w belce w zakresie od 1 do 5 przegród.

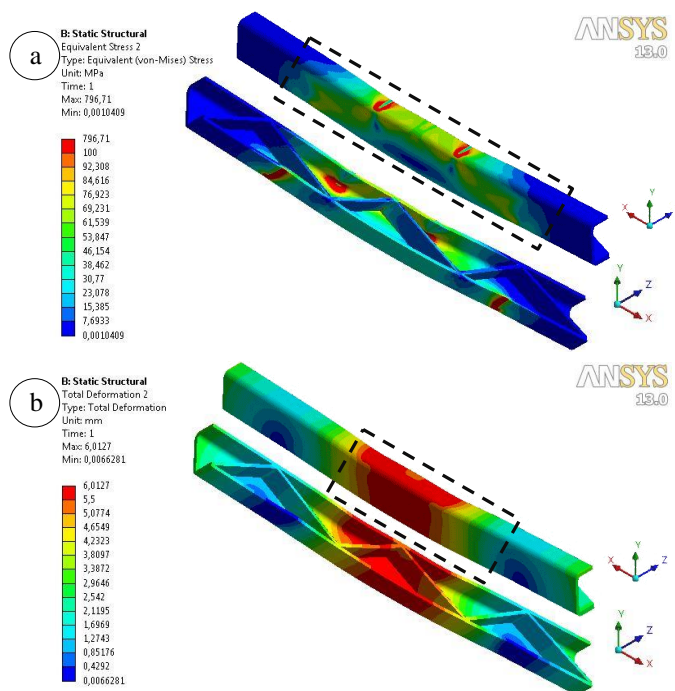
Analizę właściwości wytrzymałościowych przestrzennych kompozytów dzianych wykonano w oparciu o środowisko programowe ANSYS Workbench bazujące na metodzie elementów skończonych MES.

a) *Analiza wyników eksperymentu numerycznego przestrzennych belek kompozytowych w układzie zginania dwu-, trzy- i czteropunktowego*

Seria obliczeń, ujmująca zarówno zmianę geometrii belek kompozytowych w trzech jej konfiguracjach, to jest belkę „pustą”, belkę z przegrodami prostokątnymi i belkę z przegrodami skośnymi oraz trzy odmienne układy zginania: dwu-, trzy- i czteropunktowego, pozwoliła wysunąć następujące wnioski:

- optymalnym wariantem geometrycznym wśród wszystkich trzech układów zginania okazała się belka z przegrodami skośnymi (rys. 5.2), bowiem wykazywała ona najmniejsze deformacje i powstające w ich rezultacie najniższe wartości naprężeń zredukowanych w porównaniu do belek: „pustej” i z przegrodami prostokątnymi;
- występowanie w warstwie wewnętrznej przegród w znaczący sposób wpływa na zmniejszenie naprężeń zredukowanych;
- konfiguracja skośna przegród powoduje równomierny rozkład naprężeń w warstwach bocznych belek;
- w przypadku przegród skośnych następuje lepsze przenoszenie naprężeń generowanych w warstwach zewnętrznych;
- dla stałej wartości obciążenia największe naprężenia jak i odkształcenia powstają w belce przy zginaniu w układzie dwupunktowym.

Wartości tych parametrów sukcesywnie maleją dla układu zginania trzy-
punktowego i czteropunktowego.



Rys. 5.2. Mapy rozkładu naprężeń i odkształceń w belce kompozytowej z przegrodami skośnymi, poddanej procesowi zginania w układzie podparcia czteropunktowego

b) *Seria obliczeń uwzględniająca belkę, w której wartościami zmiennymi były grubości zarówno ścianek zewnętrznych jak i przegród w warstwie wewnętrznej*

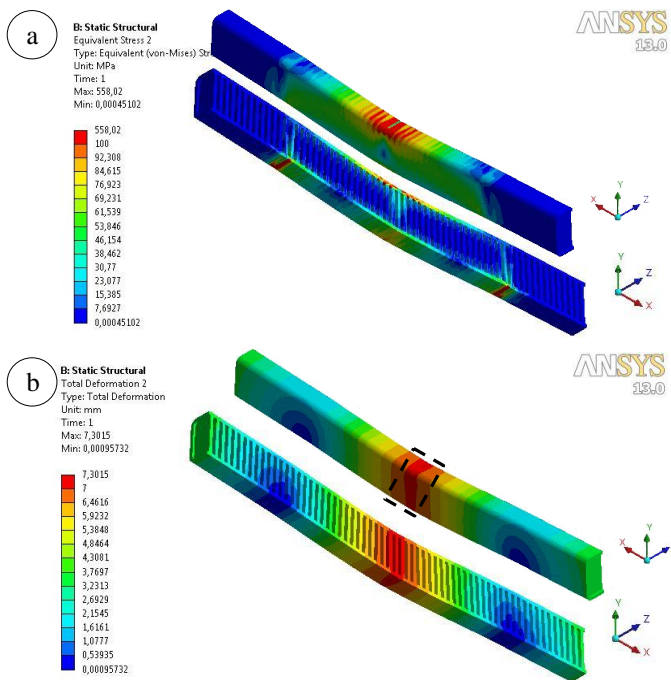
Na podstawie symulacji numerycznej dotyczącej wpływu grubości warstw zewnętrznych g_{wz} jak i grubości przegród g_{ww} w belkach z „pólkami” prostopadłymi i skośnymi stwierdzono, że:

- w obu przeprowadzonych eksperymentach numerycznych odnotowano znaczny wpływ zmiany grubości warstw zewnętrznych na uzyskane wyniki procesu zginania trzypunktowego. Wzrost niniejszej grubości w przypadku belek z przegrodami prostopadłymi spowodował obniżenie zarówno wartości naprężeń zredukowanych jak i odkształceń o 50%. W przypadku bryły kompozytowej z przegrodami skośnymi uzyskano spadek naprężeń zredukowanych o ponad 40% i zmniejszenie odkształceń o 35%. W obydwu wariantach obliczeniowych nastąpił niemalże dwukrotny wzrost masy belek;

- modyfikacje grubości przegród prostopadłych i skośnych nie spowodowały istotnych zmian w analizowanych parametrach, jakimi były naprężenia zredukowane i odkształcenie belek;
- zaobserwowano znaczący wpływ geometrii ustawienia przegród w warstwie wewnętrznej na parametry mechaniczne belki. Przykładowo dla wariantu, w którym elementy składowe belki posiadały jednakową grubość rzędu 2,5 mm w modelach z przegradami skośnymi odnotowano niespełna o 20% niższe wartości naprężeń i o 24% mniejsze deformacje w stosunku do brył, których warstwę wewnętrzną stanowiły przegrody prostopadłe;
- zauważono, iż w belkach ze skośnym ułożeniem „półek” przenoszenie obciążeń przez przegrody pozwoliło obniżyć naprężenia w warstwach zewnętrznych belki.

c) *Seria obliczeń uwzględniająca belkę ze zróżnicowaną liczbą przegród w warstwie wewnętrznej*

Przeprowadzony eksperyment numeryczny wykazał, że liczba półek w istotny sposób wpływa na wartości naprężeń zredukowanych i odkształceń powstających w belce na skutek obciążania jej wymuszeniem siłowym (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Mapy rozkładu naprężeń i odkształceń w belce kompozytowej z 63 przegradami poprzecznymi

Zwiększenie wypełnienia warstwy wewnętrznej „pólkami” z 5% do 50% powodującego 55% zwiększenie masy kompozytu 3D wpłynęło na powstanie różnic w uzyskanych naprężeniach i odkształceniach. W trakcie prowadzonej analizy zaobserwowano, iż istotne znaczenie odgrywa usytuowanie „półek” prostopadłych względem trzpienia obciążającego, bowiem, 40% wzrost wypełnienia warstwy wewnętrznej przegrodami w obydwu przypadkach dał znacząco odmienne rezultaty. Przy nieparzystej liczbie przegród, gdzie trzpień obciążający kontaktował się z belką na wysokości przegrody środkowej, odnotowano 14% spadek naprężenia i zmniejszenie ugięcia belki o 10%. Bardziej korzystny układ geometryczny powodujący obniżenie naprężenia zredukowanego aż o 55% i zmniejszenie ugięcia belki o 20% stanowi układ przegród prostopadłych, w którym siła wymuszająca ugięcie działała między dwiema środkowymi przegrodami.

d) *Seria obliczeń dotycząca zmiany odległości x i y pomiędzy półkami warstwy wewnętrznej*

Analiza wyników symulacji wykazała, że zmiana odległości x i y pomiędzy przegrodami prostopadłymi warstwy wewnętrznej wpływa w istotny sposób na parametry wytrzymałościowe belek, bowiem zmniejszanie wartości odległości x od 45 mm do 15 mm powodowało, iż kompozyt ulegał coraz mniejszemu ugięciu oraz były generowane naprężenia zredukowane o tendencji malejącej. Ponadto stwierdzono, iż zbyt duże zbliżenie do siebie par przegród prostopadłych wpływa negatywnie na wytrzymałość obciążanego modelu numerycznego. W związku z tym najbardziej optymalnym wariantem według przeprowadzonej analizy jest kompozyt, w którym pary przegród były oddalone od siebie o $x = 15,00$ mm i $y = 76,25$ mm.

e) *Seria obliczeniowa ujmująca modyfikację przegród warstwy wewnętrznej*

Przeprowadzona seria obliczeniowa ujmująca modyfikację przegród warstwy wewnętrznej symulacji numerycznej wykazała, iż wielkość otworu w przegrodach warstwy wewnętrznej wpływa na poziom powstałych w obciążanej belce wartości naprężeń zredukowanych i odkształceń. Redukcja wartości naprężeń w stosunku do belki „pustej” wynosiła powyżej 200 MPa. Ponadto analizowane bryły kompozytowe z kanałem w przegrodach wykazały najmniejszą podatność na deformację. Nie odnotowano istotnego wpływu wielkości wydrążonego w przegrodach kanału na parametry wytrzymałościowe kompozytów. W związku z tym, nasuwa się wniosek, iż najbardziej optymalną konstrukcją kompozytową z niniejszego wariantu obliczeniowego jest belka, w której wydrążony kanał posiada największy przekrój poprzeczny o wymiarach 25 mm x 25 mm oraz charakteryzuje się stosunkowo małą masą.

f) Seria obliczeniowa uwzględniająca zmianę wartości Modułu Younga

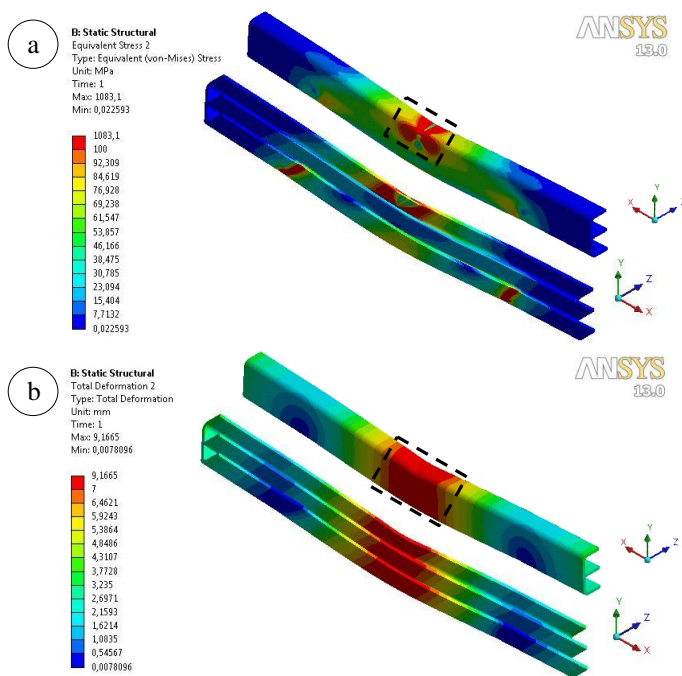
Analiza wyników eksperymentu numerycznego wykazała, że poprzez zmiany wartości modułu Younga w znaczący sposób można modelować zakres odkształceń belki. Modyfikacje wartości tego modułu poprzez zróżnicowanie struktury dzianiny wzmacniającej kompozyt wykazały również istotne oddziaływanie na masę belki, jak i oba współczynniki zarówno naprężenia zredukowanego jak i odkształcenia odniesionego do masy. Nie odnotowano natomiast istotnego wpływu zmian wartości modułu Younga na poziom naprężeń, gdyż zarejestrowane wartości tego parametru były ukształtowane niemalże na jednym poziomie.

g) Seria obliczeń uwzględniająca zmienną wartość siły obciążającej

Poprzez zwiększanie wartości siły obciążającej uzyskano proporcjonalny wzrost wartości naprężeń zredukowanych jak i wartości odkształceń występujących w rozpatrywanym obiekcie badań numerycznych. Niniejsze zjawisko potwierdza zasada znana z mechaniki wytrzymałości materiałów dla materiałów liniowo-sprężystych. Ponadto pola, w których wystąpiły duże wartości odkształceń odpowiadają obszarom, w których pojawił się wysoki poziom naprężeń zredukowanych.

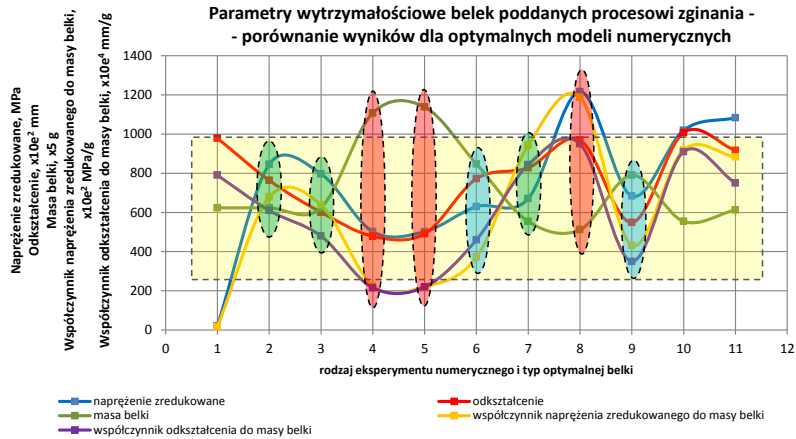
h) Seria obliczeń dotycząca belki z przegrodami wzdłużnymi

Wprowadzenie do struktury warstwy wewnętrznej przegród wzdłużnych w znacznym stopniu poprawiło właściwości wytrzymałościowe belek kompozytowych (rys. 5.4). Wzmocnienie struktury za pomocą jednej przegrody wzdłużnej przy 20% wzroście masy bryły spowodowało zmniejszenie naprężeń zredukowanych o 25,7% i spadek odkształceń o 11%. Dokonano porównania dwóch wariantów geometrycznych posiadających jednakową masę rzędu 170 g, to jest belki z 35 przegrodami prostokątnymi i z 3 przegrodami wzdłużnymi. Dla belki z przegrodami prostokątnymi uzyskano naprężenia na poziomie 629,83 MPa i odkształcenia wynoszące 7,72 mm, zaś dla kompozytu z przegrodami wzdłużnymi naprężenia zredukowane wynosiły 946,82 MPa, a odkształcenia były równe 8,03 mm. Z porównania obu wariantów o jednakowych masach wynika, iż lepszymi parametrami wytrzymałościowymi charakteryzowała się belka z 35 przegrodami prostokątnymi, bowiem posiadała ona o 33% niższe naprężenia i uległa ona o 4% mniejszym odkształceniom.



Rys. 5.4. Mapy rozkładu naprężeń i odkształceń w belce kompozytowej z jedną przegrodą wzdłużną

W celu podsumowania uzyskanych wyników badań z każdej serii pomiarowej wytypowano po jednej, optymalnej strukturze belki. Dokonana selekcja poszczególnych wariantów kompozytów została przeprowadzona w głównej mierze na podstawie uzyskanych wartości masy i naprężeń, jakie powstały w belkach po procesie zginania. Na rys. 5.5 przedstawiono wykres, na którym oznaczono uzyskane wartości badanych parametrów dla wytypowanych geometrii belek. Zakres oznaczony prostokątnym polem obrazuje obszar wartości optymalnych. Wartości, które znajdują się wewnątrz niniejszego obszaru pozwoliły określić najlepszą strukturę belkową.



Rys. 5.5. Wykres punktowy rozkładu wartości parametrów wytrzymałościowych belek poddanych procesowi zginania – porównanie wyników dla optymalnych modeli numerycznych: 1 – zginanie dwupunktowe – belka z przegrodami skośnymi; 2 – zginanie trzypunktowe – belka z przegrodami skośnymi; 3 – zginanie czteropunktowe – belka z przegrodami skośnymi; 4 – zmiana grubości warstwy zewnętrznej g_{wz} i przegród prostopadłych $g_{ww}-g_{wz} = 5,00$ mm; $g_{ww} = 2,50$ mm; 5 – zmiana grubości warstwy zewnętrznej g_{wz} i przegród skośnych $g_{ww}-g_{wz} = 4,50$ mm; $g_{ww} = 3,50$ mm; 6 – zmiana liczby przegród prostopadłych w warstwie wewnętrznej – 35 przegród prostopadłych; 7 – zmiana odległości x i y pomiędzy przegrodami prostopadłymi warstwy wewnętrznej – $x = 15,00$ mm, $y = 76,25$ mm; 8 – modyfikacja wielkości otworu w przegrodach prostopadłych – otwór o wymiarach 25 mm x 25 mm; 9 – zmiana wartości modułu Younga – $E_3 = 3926,705$ MPa; 10 – zmiana wartości siły obciążającej – siła obciążająca 9000 N; 11 – zmiana liczby przegród wzdłużnych w warstwie wewnętrznej – jedna przegroda

Podsumowując, przeprowadzona analiza numeryczna przestrzennych belek kompozytowych wykonanych na bazie dzianiny z nitek szklanych i żywicy epoksydowej typu Epidian 5[®] wykazała, że najbardziej optymalną strukturą okazała się belka z przegrodami skośnymi poddana procesowi zginania czteropunktowego, w wyniku którego uzyskano następujące wartości poszczególnych parametrów wytrzymałościowych: naprężenie zredukowane: 796,71 MPa, odkształcenie belki: 6,013 mm, masa belki: 124,71 g, współczynnik naprężenia zredukowanego do masy belki: 6,39 MPa/g oraz współczynnik odkształcenia do masy belki: 0,048 mm/g.

Podkreślić należy, iż przeprowadzone symulacje właściwości wytrzymałościowych przestrzennych belek kompozytowych zostały przeprowadzone przy założeniu, iż są one zbudowane z materiałów izotropowych – analiza liniowa. W celu wykonania dokładniejszych obliczeń symulacyjnych należałoby wykonać eksperyment numeryczny w oparciu o analizę nieliniową.

6. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH KOMPOZYTÓW PRZESTRZENNYCH W OPARCIU O TECHNIKĘ TERMOWIZYJNĄ

Nową metodą, niestosowaną do tej pory w badaniach wytrzymałościowych we włókienniczych kompozytach o architekturze przestrzennej, jest technika termowizyjna. Metoda ta wykorzystuje promieniowanie termiczne emitowane z powierzchni badanego elementu poddawanego wymuszeniu kinematycznemu [46]. Główną zaletą tejże metody jest to, iż pomiar jest dokonywany na rzeczywistych obiektach o niezmienionej skali wielkości.

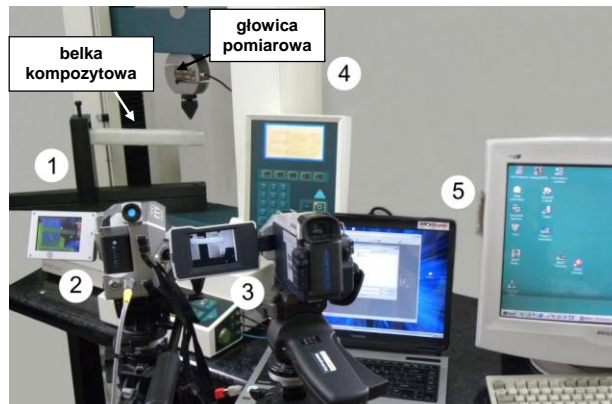
6.1. Charakterystyka obiektu badań

Materiał badań stanowiły próbki przestrzennych belek kompozytowych [48, 49]. Belki były wykonane z kolumienkowej dzianiny typu DOS o splecie trykotu wzmocnionej wątkami zarówno w układzie pionowym jak i poziomym. Surowcem zastosowanym do wykonania dzianiny była przędza szklana, przy czym masa liniowa nitki wątków pionowych i poziomych wynosiła 3x68 tex. Dzianina do postaci kompozytów włóknistych została utwardzona w żywicy epoksydowej typu Epidian® 5 z zastosowaniem utwardzacza typu Z-1. Próbkę kształtowano w sposób ręczny na formie o przekroju poprzecznym prostopadłościanu o wymiarach 40 x 40 mm. Przygotowane belki kompozytowe zostały wysuszone, a następnie przycięto je na odpowiednie długości: do badań zginania na długość 350 mm i do badań ściskania na długość 200 mm. Na powierzchnię przygotowanych belek kompozytowych naniesiono siatkę z podziałką 10 mm x 10 mm w celu ułatwienia późniejszej analizy ich odkształceń.

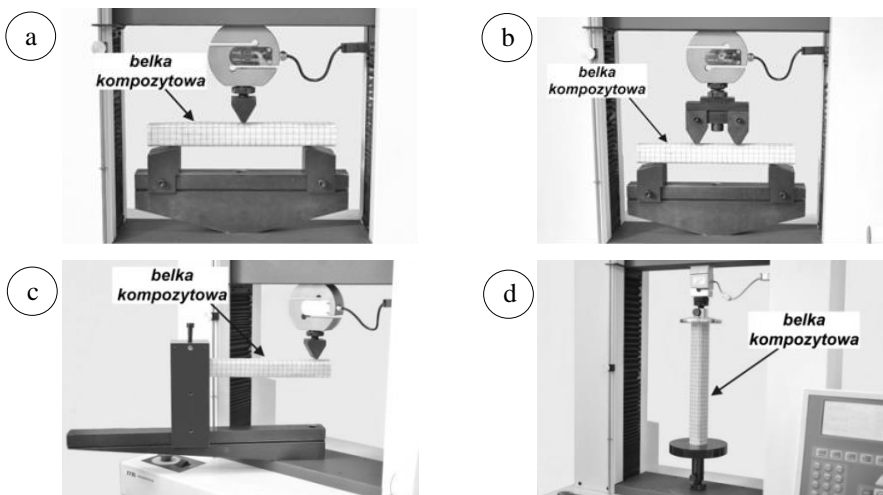
6.2. Stanowisko pomiarowe i metodyka badań termowizyjnych

Do badań zostało zaprojektowane stanowisko pomiarowe (rys. 6.1).

W badaniach wytrzymałościowych na zginanie wykorzystano 4 różne układy uchwytów (rys. 6.2). Uchwyty zaprojektowano w ramach pracy doktorskiej w oparciu o polskie normy PN-EN ISO 14125 i PN-EN ISO 178. Trzy z wytworzonych uchwytów przeznaczone są do badania własności wytrzymałościowych przestrzennych belek kompozytowych przy zginaniu w trzy-, cztero- i dwupunktowych układach podparcia oraz uchwyt do ściskania (rys. 6.2).



Rys. 6.1. Stanowisko pomiarowe wytrzymałości kompozytów: maszyna wytrzymałościowa typu Hounsfield H50K-S z głowicą pomiarową o nacisku do 50 000 N (4); zestaw uchwyty do badań wytrzymałościowych (1); kamera termowizyjna typu VarioCAM® HiRes firmy JENOPTIK (2); kamera cyfrowa marki Sony typu DCR-TRV-16E (3); dwa stanowiska komputerowe (jedno służące do obsługi maszyny wytrzymałościowej, drugie do rejestracji obrazów z kamery termowizyjnej) (5)



Rys. 6.2. Uchwyty do badań wytrzymałości kompozytów: a) układ do zginania przy trzypunktowym podparciu, b) układ do zginania przy czteropunktowym podparciu, c) układ do zginania przy dwupunktowym podparciu, d) układ do ściskania przy dwupunktowym podparciu

Pomiary zginania były prowadzone z prędkością przesuwu głowicy 50 mm/min. Badanie metodą termowizji zostało zrealizowane przy współpracy Instytutu Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Do analizy wyników pomiarów uzyskanych z kamery termowizyjnej został użyty autorski program Pana prof. B. Więcka pod nazwą ThermalScope, v 2.15.

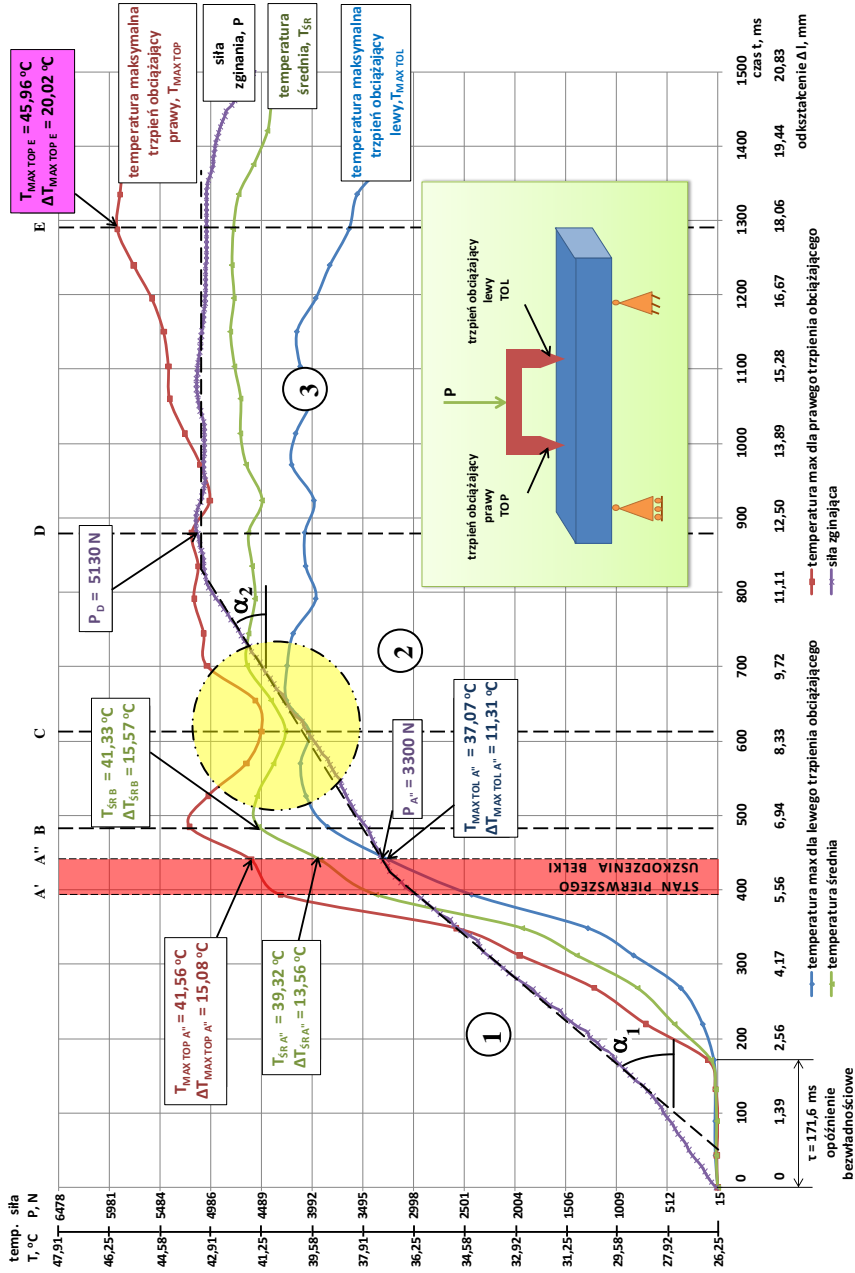
6.3. Wyniki i analiza badań

Badania wytrzymałościowe wykonano dla czterech różnych układów podparcia belki. W pomiarach prowadzonych za pomocą kamery termowizyjnej i cyfrowej obserwowano jedynie jeden z boków belki. Przedstawiona analiza jest analizą uproszczoną, nieuwzględniającą charakteru budowy belki. Dla pełniejszej analizy należałoby zidentyfikować rozkłady temperatury we wszystkich czterech ściankach kompozytu: dwóch pionowych i dwóch poziomych. Zarówno zdjęcia zginanej belki jak i termogramy zostały zarejestrowane z odpowiednią częstotliwością: kamerą cyfrową 25 kl/s i kamerą termowizyjną 1,15 kl/s.

Zginanie kompozytu w układzie podparcia czteropunktowego

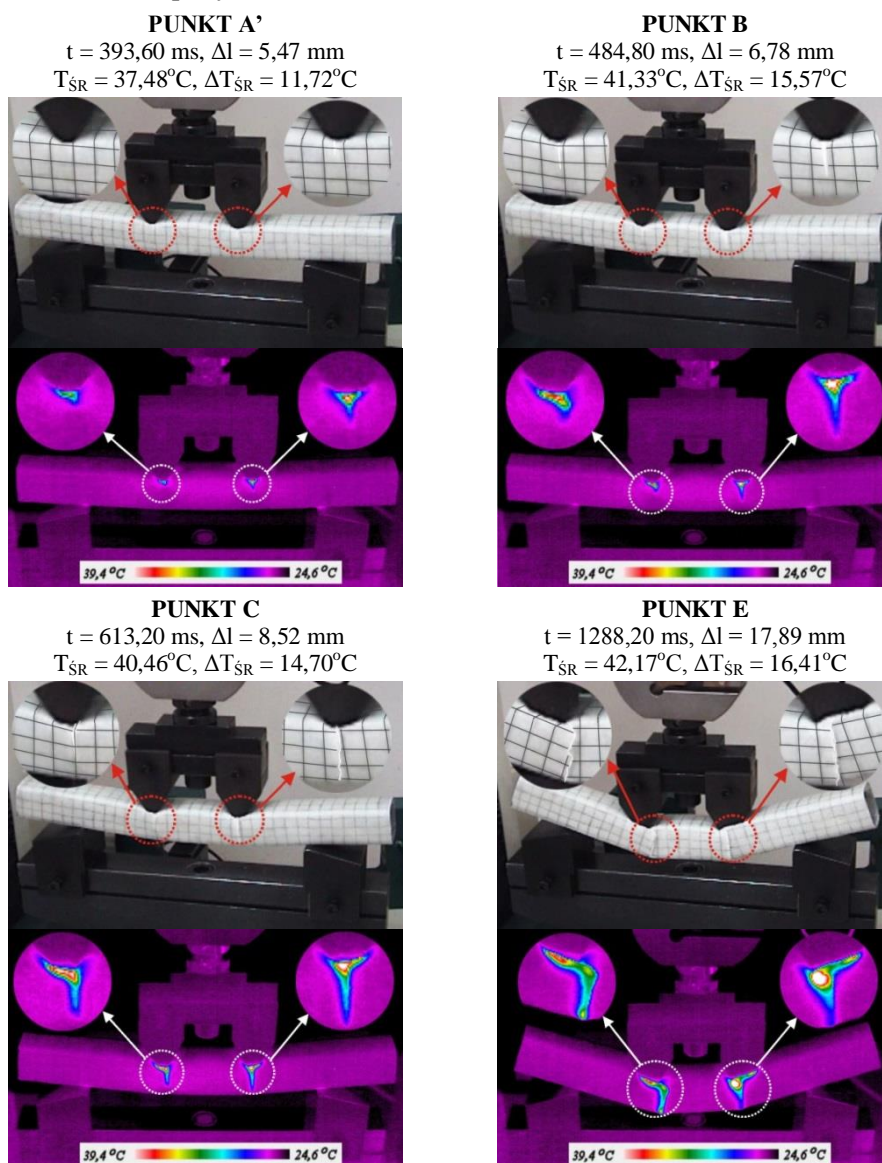
Na rysunku 6.3 został zobrazowany wykres współzależności między siłą wymuszającą ugięcie belki i temperaturą obszaru zginania w funkcji jej odkształcenia. Fioletowa krzywa obrazuje charakter zmian wartości siły zginającej w czasie, krzywe: czerwona i niebieska przedstawiają zmiany wartości temperatury maksymalnej odczytane odpowiednio dla prawego i lewego trzpienia obciążającego, natomiast zielona krzywa - zmiany wartości temperatury średniej dla obu trzpieni. Zaznaczony na wykresie czerwonym polem zakres pomiędzy punktami A' i A'' obrazuje stan pierwszych uszkodzeń belki w postaci mikropęknięć. Dalszy przyrost ugięcia powoduje sukcesywną deformację belki. Charakterystycznym zjawiskiem wyraźnego pęknięcia belki na całej wysokości jej ścianki jest spadek temperatury w zginanym kompozycie, co na wykresie zostało zaznaczone żółtym polem.

W przypadku zginania belki w układzie podparcia czteropunktowego stan pierwszych widocznych uszkodzeń kompozytu odnotowano po około 400÷450 ms trwania doświadczenia, w wyniku którego nastąpiło ugięcie belki rzędu 6mm. Zaobserwowane pęknięcia były wywołane siłą około 3 kN, w trakcie których nastąpił średni wzrost temperatury o 12°C w stosunku do temperatury wyjściowej belki. Ponadto zauważono, iż zarejestrowane maksymalne wartości temperatur dla lewego trzpienia obciążającego były średnio niższe o około 5°C w stosunku dla temperatur w obszarze prawego trzpienia. Maksymalna wartość zarejestrowanej temperatury w procesie zginania w układzie podparcia czteropunktowego wyniosła 45,95°C, co stanowi przyrost w stosunku do wyjściowej temperatury belki o 20,02°C, zaś maksymalna odnotowana wartość siły to 5130 N.



Rys. 6.3. Wykres współzależności siły wymuszającej ugięcie belki i temperatury obszaru zginania w funkcji odkształcenia w układzie czteropunktowym

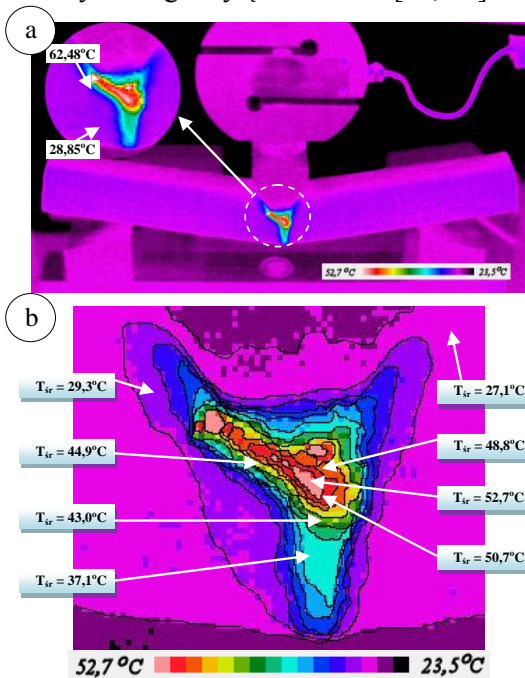
Cztery z wybranych punktów zginania przestrzennej cienkościennej belki kompozytowej zostały zamieszczone na rysunku 6.4 w postaci fotografii rzeczywistych deformacji i odpowiadających im zdjęć termowizyjnych. Dodatkowo na zdjęciach zobrazowano powiększone obszary odkształceń i uszkodzeń kompozytu.



Rys. 6.4. Zdjęcia cyfrowe wraz z termogramami dla charakterystycznych punktów (A', B, C, E) badania wytrzymałości belki kompozytowej w układzie czteropunktowego zginania

Zginanie kompozytu w układzie podparcia trzypunktowego

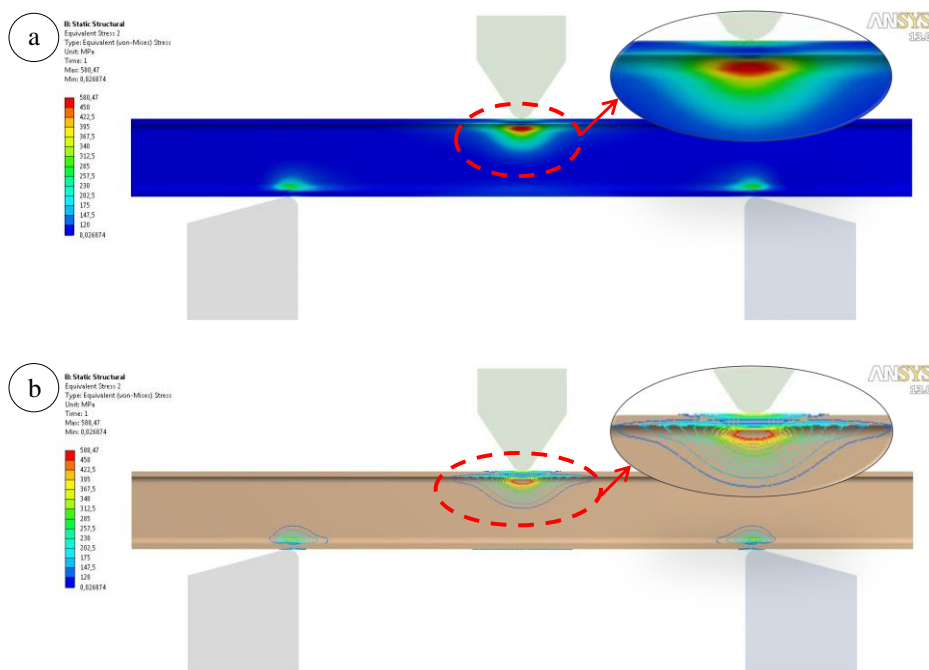
Na rysunku 6.5a zobrazowano przykładowy termogram w układzie trzypunktowego zginania cienkościennej belki kompozytowej. Na powiększeniu zaznaczono graniczne wartości temperatur w obszarze destrukcji belki. Na rysunku 6.5b przedstawiono termogram wykonany w oparciu o specjalny dobór skali, na którym pola temperaturowe tworzą linie zwane izotermami. Niniejszy termogram wykonano dla obszaru deformacji prezentowanego na rysunku 6.5a. Uzyskane izotermy odpowiadają znanym z literatury izochromom naprężeń głównych będących miejscami geometrycznymi punktów o stałej wartości maksymalnego wyężenia belki [50, 51].



Rys. 6.5. Zginanie kompozytu w układzie trójpunktowego podparcia: a) przykładowy termogram, b) termogram w skali „izoklinowej”

W wyniku przeprowadzonego badania eksperymentalnego pierwsza widoczna deformacja belki zginanej w układzie podparcia trzypunktowego nastąpiła po upływie 321,00 ms. Po tym czasie nastąpiło odkształcenie się kompozytu o 4,46 mm na skutek obciążenia jej siłą 2368 N. Zarejestrowana w tym obszarze wartość temperatury maksymalnej była na poziomie 40,48°C, co stanowiło przyrost temperatury w stosunku do temperatury wyjściowej o 14,72°C. Maksymalna wartość zarejestrowanej temperatury w procesie zginania w układzie podparcia czteropunktowego wyniosła 62,48°C, co stanowi przyrost w stosunku do wyjściowej temperatury belki o 36,72°C, zaś maksymalna wartość siły to 3448 N.

W ramach prowadzonych analiz w układzie trzypunktowego zginania belki kompozytowej w środowisku komputerowym programu ANSYS zamodelowano układ odpowiadający rzeczywistym warunkom obciążanej belki kompozytowej w układzie trzypunktowego podparcia. Symulację wykonano dla: wartości modułu Younga na poziomie $E_4 = 3251$ MPa, liczby Piossona $\nu = 0,28$ oraz siły obciążającej o wartości 9 kN. Uzyskany obszar występowania naprężeń odpowiada polom temperaturowym na termogramach (rys. 6.6).

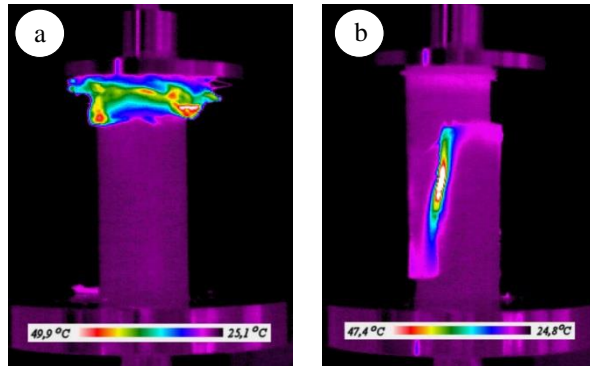


Rys. 6.6. Mapy rozkładu naprężeń w belce kompozytowej poddanej procesowi zginania w układzie trzypunktowego podparcia: a) w skali barwnej, b) w skali izochromowej

Przeprowadzona symulacja numeryczna potwierdziła zatem, iż za pomocą techniki termowizyjnej w sposób bezkontaktowy można lokalizować obszary występowania największych naprężeń w elementach konstrukcyjnych poddawanych procesowi zginania.

Badania kompozytu w układzie ściskania

Procesowi dwupunktowego pionowego ściskania poddano belki o długości 200 mm. Zaskakującym efektem prowadzonego procesu niszczenia kompozytów była ich odmienna reakcja na siłę ściskającą. W pierwszym przypadku (rys. 6.7a) niszczenie następowało w górnej części belki sukcesywnie w miarę przykładanego wymuszenia. W przypadku belki zaprezentowanej na rys. 6.7b destrukcja miała zupełnie odmienny charakter, a mianowicie następowało pewnego rodzaju ścinanie warstw bocznych badanego elementu. Nadmienić jednak należy, iż zaobserwowany maksymalny wzrost temperatury dla obu prób oscylował w pobliżu takich samych wartości rzędu $57,64 \div 61,66^\circ\text{C}$, a zatem zakres przyrostu wydzielonego ciepła w stosunku do wartości wyjściowej temperatury badanej belki zawierał się w granicach $\Delta T = 30,99 \div 35,28^\circ\text{C}$.



Rys. 6.7. Przykładowe termogramy ściskania cienkościennej belki kompozytowej z odmiennym efektem jej destrukcji

Przedstawione badania potwierdzają tezę, iż poprzez analizę obszarów o zróżnicowanych przyrostach temperatury w oparciu o technikę termowizyjną można określić jakościowo, możliwe, że również ilościowo, rozkłady naprężeń w badaniach wytrzymałościowych kompozytów.

Potwierdzeniem założonej tezy są nie tylko prezentowane w niniejszej pracy badania empiryczne, ale także badania prowadzone w ośrodkach badawczych w kraju i za granicą, zajmujące się analizą powstawania omawianego zjawiska [52÷53].

7. PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy było *opracowanie nowej technologii i budowy innowacyjnej grupy kolumnkowych dzianin przestrzennych, które znajdują zastosowanie jako wzmocnienia kompozytów dzianych wraz z analizą właściwości wytrzymałościowych kompozytów przestrzennych przeprowadzoną w oparciu o badania symulacyjne w środowisku MES oraz badania eksperymentalne z zastosowaniem techniki termowizyjnej.*

Podsumowanie ujmuje opis istotnych zagadnień, w tym nowatorskich i oryginalnych rozwiązań w zakresie prowadzonych badań naukowych.

1. Obecny stan wiedzy na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury krajowych i zagranicznych czasopism, patentów jak i monografii naukowych wskazuje, iż powszechnie znane są dzianiny płaskie o splotach wieloigielnicowych gładkich, barwnych, ażurowych i wątkowych oraz przestrzenne dzianiny dystansowe o znacznej grubości, sięgającej nawet 70 mm.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego nie stwierdzono, aby wśród technik dziewiarskich istniały technologie wywarzania przestrzennych dzianin kolumnkowych o zróżnicowanej architekturze

- przestrzennej, w formie regularnych, jak i nieregularnych brył geometrycznych: graniastosłupów, walców i innych bardziej skomplikowanych struktur przestrzennych, które przyjmują postać wyrobów gotowych w postaci wzmocnień w materiałach kompozytowych.
2. Sformułowano istotne cechy budowy nowej generacji dzianin przestrzennych uwzględniających struktury o więcej niż dwóch warstwach zewnętrznych i przynajmniej jednej warstwie wewnętrznej. Przestrzenne struktury dziane swoją formą odpowiadają graniastosłupom o podstawach w kształcie prostych bądź złożonych figur geometrycznych. W grupie przestrzennych brył dzianych można wymienić struktury o budowie zwartej, reliefowej lub ażurowej w odniesieniu zarówno do warstw zewnętrznych jak i warstwy wewnętrznej wyrobu. Architektura przestrzenna nowych dzianin 3D ujmuje także struktury w formie łuków na bazie okręgu, elipsy, hiperboli i innych.
 3. Opracowano nowe struktury przestrzennych przesywanych dzianin kolumienkowych o strukturach geometrycznych zbliżonych do powszechnie stosowanych elementów konstrukcyjnych. Cechą charakterystyczną przestrzennych przesywanych brył jest możliwość wprowadzania wzdłuż struktury warstwy wewnętrznej prostych odcinków materiałów tekstylnych lub nietekstylnych. Celem wprowadzanych wzdłużnych odcinków nitek jest zwiększenie wytrzymałości elementów kompozytowych na rozciąganie i ściskanie. Ponadto zaproponowano koncepcję budowy wielogrzebieniowych osnowowych dziewiarskich maszyn przesywających przeznaczonych do wywarzania przestrzennych przesywanych dzianin kolumienkowych.
 4. Sformułowane założenia do koncepcji budowy nowych wielogrzebieniowych maszyn osnowowych ujmują dwa typy osnowarek o parzystej i nieparzystej liczbie grzebieni. W pracy określono rodzaje elementów oczkotwórczych występujących w niniejszych maszynach oraz zdefiniowano charakter ich ruchu. Sprecyzowano także sposób podawania nitek oraz zaproponowano rozwiązanie nowego urządzenia odbierającego.
 5. Zbudowano model użytkowy czterogrzebieniowej maszyny osnowowej bazujący na opracowanej koncepcji maszyny wielogrzebieniowej. Osnowarka zawiera w swojej budowie rzeczywiste elementy oczkotwórcze maszyny osnowowej o 12 numerze uiglenia. Wszystkie elementy, tj. grzebień igłowy, grzebień igielnicowy oraz grzebień płaszczkowy są sterowane manualnie, podawanie nitek odbywa się w sposób bierny, zaś odbiór dzianiny następuje grawitacyjnie. Celem sprawdzenia poprawności postawionych założeń na zbudowanym modelu funkcjonalnym wykonano pierwsze struktury przestrzennych dzianin kolumienkowych z nitek poliestrowych i szklanych.
 6. Opracowany model geometryczno-strukturalny dotyczy całościowego ujęcia przestrzennej bryły dzianiny kolumienkowej oraz jej elementów składowych. Model zobrazowano dla wybranej struktury dzianej w formie prostopadłościanu o podstawie kwadratowej. Niniejszy model umożliwił kształtowanie parametrów geometrii zarówno poszczególnych warstw

zewnątrznych jak i warstwy wewnętrznej. W modelowaniu architektury przestrzennej dzianiny, w tym jej warstw zewnętrznych i warstw wewnętrznych, wykorzystano unikatowy, jedyny w Polsce program komputerowy ProCad warpknit 5.

7. Opracowany autorski, oryginalny program projektowana strukturalno-technologicznego dzianin i kompozytów obejmuje cztery bloki tematyczne ujmujące: parametry nitek, podstawowe parametry dzianin, parametry strukturalne i fizyczne dzianin oraz parametry kompozytów dzianych. Sformułowanych zostało niespełna 450 zależności obliczeniowych określających parametry zarówno poszczególnych elementów składowych warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej, jak i całej przestrzennej bryły dzianej. Niniejsze zależności posłużyły do zbudowania komputerowego programu symulacji właściwości zarówno struktur dzianych jak i kompozytów.
8. Wykonano badania symulacyjne właściwości belki przestrzennej z przegrodami prostopadłymi. Analizę przeprowadzono dla sumarycznej liczby 91 wariantów. W symulacji uwzględniono wyznaczenie parametrów warstw zewnętrznych na bazie dzianin lewo-prawych oraz warstwy wewnętrznej w oparciu o dzianiny dystansowe. Ponadto zostały wyznaczone parametry ujmujące bezpośrednio całą strukturę dzianiny przestrzennej. W prowadzonej symulacji jako zmienne wejściowe potraktowano: ścisłość rządkową i kolumnkową, masę liniową nitek, rodzaj tworzywa nitek, wielkość pola przekroju poprzecznego bryły oraz procentowy udział żywicy spienionej. W uogólnionym spojrzeniu na analizę badań symulacyjnych właściwości dzianin i kompozytów należy podkreślić, iż:
 - Analizowane tekstylia przestrzenne charakteryzują się dużym stopniem porowatości struktury (współczynnik porowatości od 0,88 do 0,97), co stwarza szeroki obszar działań dla procesów optymalizacyjnych dotyczących udziału masowego żywicy w budowie lekkich kompozytów przestrzennych.
 - Występują znaczące różnice w programowanej masie dzianiny w zakresie od 96 g do 576 g (sześciokrotne różnice masy). Parametrami, które mają istotny wpływ na zmiany masy dzianiny są: ścisłość rządkowa i kolumnkowa oraz masa liniowa nitek.
 - Występują duże różnice w masie dla trzech wariantów wypełnienia kompozytów, które średnio wynoszą: dla przypadku maksymalnego udziału żywicy 2998 g, dla żywicy spienionej 868 g i dla żywicy w postaci otoczki 1032 g. Można zatem wnioskować, iż redukcja udziału masy żywicy w całkowitej objętości kompozytu ma kluczowe znaczenie przy kształtowaniu masy kompozytu. Zastosowanie żywicy spienionej spowodowało ponad czterokrotne obniżenie całkowitej masy wyrobu kompozytowego, zaś powleczenie otoczką z żywicy nitek tworzących wzmocnienie bryły dzianej skutkuje zmniejszeniem masy kompozytu aż o 6,2 razy.

9. Przeprowadzono badania symulacyjne wytrzymałości kompozytów przestrzennych w środowisku programu ANSYS. Przyjęty model obliczeniowy był modelem otwartym uwzględniającym rzeczywiste wartości pomierzonego modułu Younga na bazie zaprojektowanych struktur dzianin. Obliczenia prowadzono dla procesu zginania w trzech układach podparcia oraz dla różnych zmiennych wejściowych ujmujących zarówno geometrię belki, parametry mechaniczne i typ obciążenia. Łącznie eksperyment numeryczny przeprowadzono dla 111 wariantów obliczeniowych. Optymalną strukturą jest belka kompozytowa z przegrodami skośnymi poddana procesowi zginania w układzie podparcia czteropunktowego, w wyniku którego uzyskano następujące wartości poszczególnych parametrów wytrzymałościowych: naprężenie zredukowane: 796,71 MPa, odkształcenie belki: 6,013 mm, masa belki: 124,71 g, współczynnik naprężenia zredukowanego do masy belki: 6,39 MPa/g oraz współczynnik odkształcenia do masy belki: 0,048 mm/g. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż optymalizację właściwości wytrzymałościowych kompozytu przeprowadzono w aspekcie budowy i parametrów strukturalnych dzianiny 3D wzmacniającej kompozyt.
10. Przeprowadzono badania empiryczne procesu zginania i ściskania przestrzennych kompozytów dzianych z wykorzystaniem techniki termowizyjnej, w trakcie których prowadzono rejestrację wartości temperatury na powierzchni obciążanych kompozytów. Przeprowadzono analizę korelacji pomiędzy zmianami wymuszającej siły obciążającej a zarejestrowanymi wartościami temperatury. W wyniku badań wytrzymałościowych ujmujących wykorzystanie techniki termowizyjnej zauważono, że na etapie wystąpienia pierwszych mikropęknięć i pęknięć struktury kompozytu zarejestrowano w obszarze destrukcji średni przyrost temperatury dla wszystkich badanych belek, który wynosi 10,25°C. Z punktu rozpatrywania całego cyklu obciążania temperatura średnia przyrosła o ponad 30,00°C w odniesieniu do wartości temperatury wyjściowej. Porównano rozkład izoterm zginanych belek kompozytowych z izochromami naprężeń głównych uzyskanych w badaniach symulacyjnych wykonanych w oparciu o metodykę elementów skończonych. Uzyskany efekt korelacji stanowi przesłankę do jakościowej analizy rozkładu pomierzonych naprężeń w zginanych elementach kompozytowych w oparciu o analizę map termicznych rozpatrywanych obiektów.
11. Przedstawiona architektura przestrzennych wyrobów dzianych i przesywanych podlega łącznie trzem zgłoszeniom patentowym: P-386074, P-386075 i P-402319, zaś maszyny do ich wytwarzania ujmuje patent udzielony: P-386073. Ponadto innowacyjne dziane struktury przestrzenne wraz z ich technologią zostały nagrodzone srebrnym medalem na Światowej Wystawie Innowacji, Badań Naukowych i Nowoczesnej Techniki Brussels Innova, „Eureka Contest 2010” oraz wyróżnione

dypłomem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Opracowana technologia jak i prowadzone badania zostały zaprezentowane na Międzynarodowej Konferencji Autex, na Międzynarodowym Kongresie Dziewiarskim oraz na 5 cyklicznych konferencjach wydziałowych. Rezultaty prowadzonych badań stanowiły także materiał 6 publikacji, w tym 4 znajdujących się na liście filadelfijskiej.

Literatura

- [1] **Grębowski J.:** *Dzianiny techniczne otwierają nowe rynki*, Przegląd – Włókno, Odzież, Skóra, Nr 1, 2004, ss. 24-27.
- [2] **Grębowski J.:** *Dziewiarska technika osnowowa do wytwarzania dzianin technicznych i ich obszar zastosowania*, Technik Włókienniczy, Nr 8, 1991, ss. 151-153.
- [3] **Grębowski J.:** *Nowoczesne osnowarki i wytwarzane na nich dzianiny techniczne. Cz. II*, Przegląd Włókienniczy, Nr 3, 2003, ss. 23-26.
- [4] **Grębowski J.:** *Nowoczesne osnowarki i wytwarzane na nich dzianiny techniczne. Cz. I*, Przegląd Włókienniczy, Nr 2, 2003, ss. 22-26.
- [5] **Linke M., Sarsour J., Stegmaier T., Planck H.:** *Textilien für den Umweltschutz – Beispiele aus der Forschung*, Melliand Textilberichte, No. 6, 2010, ss. 250-252.
- [6] *Cetex Chemnitzer Textilmaschinenentwicklung gGmbH*, Melliand Textilberichte No. 9, 2006, s. 667.
- [7] **Legner M.:** *CMS-Flachstricktechnologie für technische Anwendungen*, Melliand Textilberichte, No. 9, 2006, ss. 635-636.
- [8] *Textiles for environmental protection-current examples from research*, Technical Textiles, No. 2, 2011.
- [9] *Pressless GmbH: Erfolgreich im Segment 3D-Textilien*, Melliand Textilberichte, No. 5, 2007, ss. 320-321.
- [10] *Neue Software für dreidimensionale Legungsdarstellung und – simulation*, Melliand Textilberichte, No. 11-12, 2008, ss. 456-457.
- [11] **Illing-Günther H., Helbig R., Arnold R., Erth H., Schiebel P., Puroil H., Herrmann A.:** *Textile preforms with a high level of pre-fabrication for fiber reinforced composites*, Melliand English, No. 10, 2008, ss. 113-114.
- [12] **Rumpf S.:** *Textile Peltier element out of modified plasma coated structures in spacer fabrics*, Melliand English, No. 9, 2008, ss. 96-97.
- [13] **Helbig F.:** *New dimensions for functional, regular 3D knitting*, Melliand English No. 10, 2006, ss. 153-155.
- [14] **Mayer K.:** *Maschinen für die nächste Generation*, Technische Textilien, No. 46, 2003, s. 263.
- [15] **Helbig F.:** *Geometric elements of regular 3D knitting*, Melliand English No. 3, 2007, pp. 25-26.
- [16] **Helbig F.:** *New dimensions for functional, regular 3D knitting*, Melliand English No. 10, 2006, p. 153.
- [17] **Comez L.:** *3D fibrin textiles for the biomedical sector*, Technical Textiles, No. 1, 2011.

-
- [18] **Cyniak D., Czekalski J., Jackowski T., Kowalski J., Maj R.:** *Przędze mieszan-kowe trudnopalne przeznaczone na techniczne wyroby uszczelniające*, Przegląd – Włókno, Odzież, Skóra, Nr 5, 2007, ss. 46-50.
- [19] **Chylewska B., Cyniak D., Czekalski J., Przybył K.:** *Możliwości wytwarzania przędz z włókien aramidowych*, Technologie, ss. 10-13.
- [20] **Ankudowicz W., Dopierała H., Słewa J.:** *Wpływ procesu pneumatycznego teksturo-wania na właściwości teksturowanych przędz szklanych*, Przegląd Włókienniczy, 1994, ss. 11-14.
- [21] **Czekalska E., Fortuniak K.:** *Nowe możliwości zastosowania włókien węglowych*, Techniczne wyroby włókiennicze, Nr 1, 1999, ss. 16-18.
- [22] **Wojciechowska E., Panek C.:** *Kevlar® – preferowany wariant w systemie ochrony osobistej*, Techniczne wyroby włókiennicze, Nr 2, 1999, ss. 41-42.
- [23] **Adamkiewicz P., Cynika D.:** *Włókna szklane i wyroby z nich wywarzane w zastosowaniu włókienniczym. Cz. II*, Przegląd – Włókno, Odzież, Skóra, Nr 11, 2005, ss. 29-31.
- [24] **Adamkiewicz P., Cynika D.:** *Włókna szklane i wyroby z nich wywarzane w zastosowaniu włókienniczym. Cz. I*, Przegląd – Włókno, Odzież, Skóra, Nr 10, 2005, ss. 30-31.
- [25] **Redlich G., Czekalska E., Fortuniak K.:** *Zastosowanie przędz aramidowych do taśm przenośnikowych*, Przegląd Włókienniczy, 1993, ss. 81-82.
- [26] *Can carbon really replace steel and natural fibre replace glass*, Technical Textiles International, 2011.
- [27] *JEC Innovation Awards Program 2011*, Technical Textiles, No. 2, 2011.
- [28] *JEC Composites spreads its wings to cover the whole world*, Technical Textiles International, 2011.
- [29] *Increasing opportunities for technical textiles in composites*, Technical Textiles International, 2008, June, pp. 27-33.
- [30] **Mikołajczyk Z., Pieklak K., Golczyk A., Wiater Z.:** *Dziany wyrób przestrzenny*, zgłoszenie patentowe z dnia 12.09.2008 r., P – 386074.
- [31] **Pieklak K., Mikołajczyk Z.:** *New Generation of Structures in Warp-Knitted Distance Fabrics*, Międzynarodowa Konferencja AUTEX 2009, 26-28 maja 2009 r., CESME – Turcja.
- [32] **Pieklak K., Mikołajczyk Z.:** *Original Concept of a New Multicomb Warp-Knitting Machine for Manufacturing Spatial Knitted Fabrics*, Fibres & Textiles In Eastern Europe, Vol. 17, No. 3(74) 2009, pp. 76-80.
- [33] **Pieklak K., Mikołajczyk Z.:** *New Technology of Warp-Knitted Distance Fabrics*, XII Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Łódź, 2009, s. 4.
- [34] **Mikołajczyk Z., Pieklak K., Golczyk A., Wiater Z.:** *Dziany kolumniowy wyrób przestrzenny*, zgłoszenie patentowe z dnia 12.09.2008 r., P – 386075.
- [35] **Mikołajczyk Z., Pieklak K., Golczyk A., Wiater Z.:** *Osnowarka do wytwarzania dzianin kolumniowych przestrzennych*, patent z dnia 12.09.2008 r., P – 386073.
- [36] **Pieklak K., Mikołajczyk Z.:** *Multi-Comb Warp-Knitting Machine*, XIII Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Łódź, 2010, s. 4.

- [37] **Mikołajczyk Z., Piekłak K.:** *Przeszywana dzianina kolumienkowa*, zgłoszenie patentowe z dnia 31.12.2012 r., P – 402319.
- [38] **Mikołajczyk Z., Piekłak K.:** *Innovative Structures and Technology of Spatial Warp-Knitted Fabrics*, 45 Międzynarodowy Kongres Dziewiarzy IFKT, 27-29 maja 2010 r., Ljubljana, Słowenia.
- [39] **Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.:** *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji – ćwiczenia z zastosowaniem systemu ANSYS*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006, s. 181.
- [40] **Rakowski G.:** *Metoda elementów skończonych – wybrane problemy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006, s. 154.
- [41] **Grądzki R.:** *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002, s. 126.
- [42] **Rakowski G., Kacprzyk Z.:** *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, s. 452.
- [43] PN-EN ISO 13934-1. *Tekstyliia. Właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska.*
- [44] PN-EN ISO 527-1. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Zasady ogólne.*
- [45] PN-EN ISO 527-4. *Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami.*
- [46] PN-EN ISO 527-5. *Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Warunki badań kompozytów tworzywowych wzmocnionych włóknami jednokierunkowo.*
- [47] **Więcek B., De Mey G.:** *Termowizja w podczerwieni – podstawy i zastosowania*, PAK, Warszawa 2011, s. 372.
- [48] **Piekłak K., Mikołajczyk Z.:** *Strength Tests of 3D Warp-Knitted Composites with the Use of the Thermovision Technique*, *Fibres & Textiles In Eastern Europe*, Vol. 19, No. 5(88) 2011, pp. 100-105.
- [49] **Piekłak K., Mikołajczyk Z.:** *Analysis of the Stresses Distribution in the Spatial Knitted Composites Using the Thermovision Technique*, XIV Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Łódź, 2011, s. 6.
- [50] **Kopkowicz M.:** *Metody doświadczalne badań konstrukcji*, OWPRz, Rzeszów 2003, s. 152.
- [51] **Banasiak M.:** *Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów*, PWN, Warszawa 2000, s. 224.
- [52] **Piekłak K., Mikołajczyk Z.:** *New Generation of Structures in Warp-Knitted Distance Fabrics*, Międzynarodowa konferencja AUTEX 2009, 26-28 maja 2009 r., CESME – Turcja
- [53] **Brémond P.:** *New developments in Thermo Elastic Stress Analysis by Infrared Thermography*, IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires – Octubre 2007, p. 11.

AN INNOVATIVE TECHNOLOGY OF THE SPATIAL WARP-KNITTED FABRICS – STRUCTURE AND PROPERTIES

Summary

In the beginning of the doctoral thesis was presented general trends in the development of technical textiles that contains both knitted fabrics, woven fabrics and plaited fabrics. The prepared analysis mainly based on the spatial textiles, that are mostly used in the composite systems.

The paper contains four main sections. The first one includes the building and the technology of spatial warp-knitted fabrics and 3D stitch combined fabrics. These fabrics create solids that in cross-section have basic plane figures with an even number of sides, like squares, hexagons, or with an odd number of sides like triangles, pentagons. The cross-sections of the knitted fabrics may also have more sophisticated shapes such as T-bars, double-T bars, channel bars and others, whose form is similar to the commonly used structural beams. The spatial knitted fabrics can be produced from different types of threads. The chapter also describes the concept of building of the multi-needlebar machine with an even and odd number of needle bars. The basic mechanisms and machine components were characterized. The loop forming process for the three- and four-needlebar machines were determined. The prototype of the four-needlebar machines were designed and constructed. All mechanisms of the machines are operated manually. The first solid of the knitted structure with the square cross-section were manufactured on this machine. The new generation of the spatial warp-knitted fabrics and 3D stitch combined fabrics will be applied in the reinforcement of light and high-strength composites.

The next chapter presents a geometric – structural model of the spatial warp-knitted fabrics based on the basic structure of the fabric in the form of a rectangular prism. The model of the 3D fabric is the sum of the parameters of the componential models: a model of the external layers and a model of the internal layers. An algorithm of the structural and technological design was developed. The algorithm contains the structure of the knitted fabric and based on its composite structure. The algorithm is built from four sections: the threads parameters, the basic parameters of the knitted fabrics, the structural and physical parameters of knitted fabrics and the parameters of the „knitted composites”. Nearly 450 mathematical relationships that describe the parameters of the fabric and the composite were formulated. These mathematical relationships were used to create a worksheet to simulate the geometric – structural parameters.

The next chapter includes computer modeling of the mechanical properties of the „spatial knitted composites”. The simulations were performed in the ANSYS environment, based on the finite element method. The object of the research was a composite beam in the form of a thin-walled prism.

The computational model was an "open model" based on the real values of the Young's modulus, that were measured on a testing machine, assuming that the model has anisotropic properties. The simulations were carried out in the three different systems of support, which means in the two-, three- and four-point support system. In the calculations were changed: the internal layer geometry of the beam, the thickness of the external and the internal layers, the number and the distance between the perpendicular barriers, the construction of the barrier, the measured value of the Young's modulus and the value of the loading force. The total sum of the computational variants was 111.

The last chapter includes an analysis of the strength properties of the spatial composites based on the infrared technique. The experimental research was carried out by three-, or four-point bending process and compression process of the composite beams. The composite beams were made from the fabrics from the glass fibers strengthened by an epoxy resin. The experiment was carried out on the measuring position equipped with two cameras: an infrared camera used for the registration of the thermal images and a digital camera. The recorded results of force and temperature on the surface of the composite were used to analyze changes of the exciting force and the temperature as a function of time.

The building and the technology of the spatial warp-knitted fabrics and 3D stitch combined fabrics were awarded with a silver medal at the World Exhibition „Eureka Contest 2010”. They are also the object of one patent and three patent applications, six publications and a few oral presentations.