

Politechnika Łódzka



Politechnika Łódzka Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Instytut Architektury Tekstyliów

Rozprawa doktorska

Właściwości mechaniczne kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych

mgr inż. Agata Poniecka

Promotor: dr hab. inż. Marcin Barburski, prof. uczelni

Składam serdeczne podziękowania

Promotorowi dr hab. inż. Marcinowi Barburskiemu, prof. uczelni za nieocenioną opiekę merytoryczną, cierpliwość, zaangażowanie i wiarę w moje możliwości.

Prof. Davidowi Ranzowi oraz prof. Jesusowi Cuartero z University of Zaragoza za pomoc w realizacji badań mechanicznych oraz okazane wsparcie.

Dr. hab. inż. Andrzejowi Marcinkowskiemu, prof. uczelni za pomoc w wykonaniu Środowiskowej Oceny Cyklu Życia.

Dr inż. Justynie Pinkos oraz MSc Pavlosowi Tamiolakis za pomoc w przeprowadzeniu badań numerycznych.

Dr hab. Adamowi Puszkarzowi za pomoc w wykonaniu badań tomografii komputerowej.

Mgr inż. Edycie Kwiatkowskiej za pomoc, przyjaźń, zrozumienie i słowa otuchy.

Pracownikom Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej za okazaną życzliwość.

Mamie, Rodzinie i Przyjaciołom za wyrozumiałość, zrozumienie i wsparcie.

Streszczenie

W kontekście zrównoważonego rozwoju, produkcja kompozytów może być trudnym wyzwaniem, ze względu na wykorzystywane materiały oraz złożoność procesów produkcyjnych. Często stosuje się w nich żywice syntetyczne oraz włókna szklane lub węglowe, które mają negatywny wpływ na środowisko, zarówno podczas procesu produkcji, jak i po zakończeniu użytkowania produktu [1, 2]. Jednym ze sposobów na poprawę zrównoważonego rozwoju w produkcji kompozytów jest stosowanie ekologicznych materiałów, takich jak na przykład naturalne włókna roślinne (np. lniane, konopne), które mają mniej negatywny wpływ na środowisko naturalne. Ponadto, planowanie produkcji kompozytów powinno uwzględniać recykling i odzyskiwanie surowców wtórnych, aby zmniejszyć ilość odpadów i zminimalizować wpływ na środowisko naturalne. Z tego powodu, w ostatnich latach wzrosło wykorzystywanie w przemyśle kompozytów zawierających jako wzmocnienie włókna naturalne. Autorka niniejszej pracy, pragnąc połączyć aspekty ekologiczne z innowacyjnością, postanowiła zbadać właściwości mechaniczne kompozytów wzmacnianych haftem technicznym wykonanym z włókien lnianych. Wybór lnu jako materiału wzmacniającego jest podyktowany jego odnawialnościa, biodegradacja oraz niskim wpływem na środowisko w porównaniu z tradycyjnymi włóknami syntetycznymi. Tradycyjne metody wzmacniania kompozytów opierają się na zastosowaniu ciągłych włókien lub tkanin. Niniejsza praca proponuje innowacyjne podejście, polegające na wykorzystaniu haftu technicznego wykonanego z włókien lnianych jako elementu wzmacniającego. Haft techniczny, dzięki swojej złożonej strukturze, może zapewnić kompozytom unikalne właściwości, takie jak zwiększona odporność na zginanie czy lepsze rozłożenie naprężeń. Celem badań jest ocena wpływu różnych parametrów haftu technicznego, takich jak długość ściegu czy kierunek ułożenia włókien, na właściwości mechaniczne otrzymanych kompozytów.

Badania skupiły się na haftach technicznych wykonanych na hafciarce komputerowej firmy ZSK model JCZA 0109-550 wyposażonej w głowicę typu W. Projekty haftu były wykonane w dedykowanym oprogramowaniu GiS BasePack 10, co pozwalało na uzyskanie dokładnych i powtarzalnych wzorów.

W niniejszej pracy dokonano analizy właściwości mechanicznych kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych. W celu

weryfikacji użyteczności takich kompozytów, badaniom poddano również tradycyjne kompozyty, zawierające jako wzmocnienie tkaninę. Poszczególne rozdziały odpowiadają kolejnym etapom prac badawczych. Badania te następowały kolejno po sobie, a otrzymane wyniki prowadziły do kolejnych etapów. Poniżej przedstawiono schemat prowadzonych prac badawczych.



Rysunek 1. Schemat prac badawczych zawartych w pracy

W pierwszych badaniach skupiono się na właściwościach mechanicznych samego haftu – przeprowadzono testy trzech różnych orientacji niedoprzędu lnianego w hafcie – 0°, 90° oraz 45°. Dokonano również oceny wytrzymałości haftu składającego się z trzech warstw (o kierunkach ułożenia kolejno 0°, 90°, 0°) oraz samego niedoprzędu lnianego i nitki tworzącej haft.

Na podstawie otrzymanych wyników badań wytrzymałościowych haftu opracowano siedmiowarstwowe warianty haftu, z których następnie wykonano kompozyty metodą infuzji. Poszczególne warianty różniły się pomiędzy sobą kierunkiem ułożenia niedoprzędu w poszczególnych warstwach. Otrzymane kompozyty zbadano pod kątem wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu. Badania te opisano w rozdziale nr 4.

Kolejnym etapem prac było kompleksowe zbadanie kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych. Skupiono się na wyłonieniu najbardziej optymalnej długości ściegu. W tym celu zaprojektowano i wykonano próbki haftu o długościach ściegu 2, 4 oraz 8 mm. Wykonano następnie kompozyty metodą infuzji. W celu porównania, badaniom poddano również kompozyty zawierające jako wzmocnienie tkaninę oraz jednokierunkowy układ włókien, które poddano następnie szeregowi badań wytrzymałościowych:

- wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia przy rozciąganiu,
- wytrzymałości na zginanie: ILSS Interlaminar shear strength
- odporności na pękanie: DCB Mode I Interlaminar Fracture Toughness

Z powodu zauważalnych różnic w wytrzymałości kompozytów, zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych o zróżnicowanych długościach ściegu, zdecydowano się na zbadanie struktury haftu za pomocą mikrotomografii komputerowej. Badanie to miało na celu wykrycie mikro urazów w strukturze haftu, powstających podczas procesu haftowania.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny posłużyły do wykonania podstawowych modeli numerycznych metodą elementów skończonych. Opracowano następnie plan eksperymentu składający się z 15 wariantów haftu. Wszystkie warianty zostały zamodelowane metodą elementów skończonych w programie "Patran-Nastran" firmy MSC Software.

Wybrane modele numeryczne zostały poddane weryfikacji. Wykonano próbki, które zostały następnie poddane badaniu wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu. Otrzymane wyniki zestawiono z modelami numerycznymi.

Ostatnim elementem pracy było dokonanie Środowiskowej Oceny Cyklu życia (Life Cycle Assessment) w celu porównania wpływu na środowisko przykładowego przedmiotu wykonanego z haftu technicznego z przedmiotem wykonanym z tkaniny.

Abstract

In the context of sustainable development, the production of composites can pose a significant challenge due to the materials used and the complexity of the manufacturing processes. Synthetic resins and glass or carbon fibers are often used in composite production, which have a negative impact on the environment, both during the production process and at the end of the product's life [1, 2]. One way to improve sustainability in composite production is to use environmentally friendly materials, such as natural plant fibers (e.g., flax, hemp), which have a less negative impact on the natural environment. Additionally, composite production should consider recycling and recovery of secondary raw materials to reduce waste and minimize environmental impact. For this reason, the use of composites reinforced with natural fibers has increased in industry in recent years. The author of this work, wishing to combine ecological aspects with innovation, decided to investigate the mechanical properties of composites reinforced with technical embroidery made from flax fibers. The choice of flax as a reinforcing material is due to its renewability, biodegradability, and low environmental impact compared to traditional synthetic fibers. Traditional methods of reinforcing composites rely on the use of continuous fibers or fabrics. This work proposes an innovative approach, involving the use of technical embroidery made from flax fibers as a reinforcing element. Technical embroidery, due to its complex structure, can provide composites with unique properties, such as increased bending resistance or better stress distribution. The aim of the study is to assess the influence of various parameters of technical embroidery, such as stitch length and fiber orientation, on the mechanical properties of the resulting composites.

The research focused on technical embroideries made on a ZSK JCZA 0109-550 computer embroidery machine equipped with a type W head. Embroidery designs were created in the dedicated GiS BasePack 10 software, which allowed for obtaining extremely accurate and repeatable patterns.

In this work, a analysis of the mechanical properties of composites containing technical embroidery made of flax fibers as reinforcement was carried out. In order to verify the usefulness of such composites, traditional composites containing woven fabric as reinforcement were also tested. In order to systematize the structure of the work, individual chapters correspond to the successive stages of the research work. These studies followed one another sequentially, and the results obtained led to the next stages. The structure of the work reflects this hierarchy in the form of subsequent chapters. The diagram below presents a schematic of the research conducted.



Figure 1. Scheme of research work included in the thesis

In the initial studies, the focus was on the mechanical properties of the embroidery itself. Tests were conducted on three different orientations of the flax roving the embroidery: 0° , 90° , and 45° . The strength of the embroidery consisting of three layers (with the following orientation: 0° , 90° , 0°) was also evaluated, as well as the strength of the flax roving and the securing thread forming the embroidery.

Based on the results of the strength tests of the embroidery, seven-layer embroidery variants were developed, from which composites were then produced using the infusion method. The individual variants differed from each other in the direction of the roving in the individual layers. The resulting composites were tested for tensile strength and elongation at break. These studies are described in chapter 4.

The next stage of the research involved a comprehensive study of composites reinforced with technical flax fiber embroidery. The focus was on determining the optimal stitch length. Therefore, embroidery samples with stitch lengths of 2, 4, and 8 mm were designed and produced. Composites were then produced using the infusion method. For comparison, composites reinforced with woven fabric and unidirectional fiber arrangement were also tested and subjected to a series of strength tests:

- tensile strength and elongation at break,
- bending strength: ILSS Interlaminar Shear Strength
- fracture toughness: DCB Mode I Interlaminar Fracture Toughness

Due to noticeable differences in the strength of composites containing technical embroidery made of flax fibers with varying stitch lengths, it was decided to investigate the structure of the embroidery using computer microtomography. This study aimed to detect micro-damages in the structure of the embroidery that occurred during the embroidery process.

The conducted strength tests of composites containing technical embroidery were used to create basic numerical models using the finite element method. An experiment plan consisting of 15 embroidery variants was then developed. All variants were modeled using the finite element method in the "Patran-Nastran" MSC Software.

Selected numerical models were verified. Samples were produced and then subjected to tensile strength and elongation at break tests. The obtained results were compared with numerical models.

The final element of the work was to conduct a Life Cycle Assessment (LCA) to compare the environmental impact of a sample product made of technical embroidery with a product made of woven fabric.

Spis treści

Streszczenie	5
Abstract	8
Spis treści	11
Wykaz skrótów i symboli	15
Wstęp	17
1. Cel i hipoteza pracy	19
2. Przegląd literatury	
2.1. Wprowadzenie do tematu kompozytów	
2.1.1. Historia kompozytów	
2.1.2. Historia i rozwój kompozytów z włóknami naturalnymi	21
2.1.2. Definicja i klasyfikacja kompozytów ze względu na rodzaj ma	trycy oraz
wzmocnienia	23
2.1.3. Rynek kompozytów	
2.2. Technologie wytwarzania wzmocnień kompozytów. Omówienie t	echnologii
Tailored Fibre Placement	
2.2.1. Tkaniny	
2.2.2. Jednokierunkowy układ włókien	
2.2.3. Z-pinning	
2.2.4. Przeszywanie	
2.2.5. Automated Fiber Placement	
2.2.6. Haft techniczny – Tailored Fibre Placement	
2.3. Zastosowanie haftu technicznego	
2.4. Charakterystyka wykorzystanych surowców	44
2.4.1. Włókna lniane	44
2.4.2. Żywica epoksydowa	45

2.5. Zrównoważony rozwój w kontekście produkcji i wykorzystywania kompozytów
2.5.1. Kompozyty powstające z recyklingu47
2.5.2 Eko produkty używane do produkcji kompozytów48
2.5.3. Zużyte kompozyty oraz kompozyty poddawane recyklingowi
2.6. Podsumowanie przeglądu literatury50
3. Badania wstępne – właściwości mechaniczne haftu technicznego wykonanego z
włókien lnianych
3.1. Materiały i metody
3.2. Analiza wyników badań56
3.3. Wnioski
4. Badania wytrzymałościowe kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft
techniczny
4.1. Materiały i metody63
4.2. Analiza wyników badań67
4.2.1. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy rozciąganiu67
4.2.2. Wytrzymałość na zginanie70
4.3. Wnioski
5. Analiza porównawcza właściwości mechanicznych kompozytów wzmocnionych haftem technicznym, tkaniną oraz jednokierunkowym układem niedoprzędu75
5.1. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy rozciąganiu
5.1.1. Materiały i metody
5.1.2. Analiza wyników badań80
5.1.3. Wnioski
5.2. Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe (ILSS - Interlaminar shear
strength)93
5.2.1. Materiały i metody93
5.2.2. Analiza wyników badań95

5.2.3. Wnioski	98
5.3. Odporność na pękanie (DCB - Double Cantilever Beam)	99
5.3.1. Materiały i metody	99
5.3.2. Analiza wyników badań	103
5.3.3. Wnioski	109
6. Badanie haftu metodą mikrotomografii komputerowej	111
6.1. Materiały i metody	111
6.2. Analiza wyników badań	112
6.3. Wnioski	117
7. Metodyka badań numerycznych	118
7.1 Badania numeryczne haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lni	anego 119
7.1.1. Wynik badań numerycznych haftu technicznego wykonanego z niedop lnianego	rzędu 122
7.1.2. Analiza wyników badań	125
7.2. Badania numeryczne kompozytów zawierających jako wzmocnienie techniczny	haft : 126
7.2.1. Przygotowanie modeli numerycznych kompozytów	126
7.2.2. Wyniki badań numerycznych kompozytów zawierających jako wzmoch haft techniczny	nienie 127
7.2.3. Analiza wyników badań numerycznych	130
7.3. Zestaw 15 modeli numerycznych kompozytów zawierających jako wzmoch haft techniczny	nienie 131
7.3.1. Przygotowanie modeli numerycznych kompozytów	131
7.3.2. Przeprowadzenie symulacji	136
7.3.3. Podsumowanie i wnioski	153
7.4. Analiza wyników z badań numerycznych	154
7.4.1 Weryfikacja modelu numerycznego	154

7.4.2 Wnioski	158
8. Środowiskowa Ocena Cyklu Życia (Life Cycle Assessment)	159
8.1. Metodyka badań	159
8.2. Materiały	161
8.3. Analiza wyników badań	163
8.4. Wnioski	168
9. Podsumowanie i wnioski	170
9.1. Perspektywy dalszych badań	174
10. Bibliografia	176
11.Spis tabel	186
12. Spis ilustracji	188
13. Załączniki	194

Wykaz skrótów i symboli

a – poziom istotności

σz – naprężenia normalne w płaszczyźnie z

txy – naprężenia styczne w płaszczyźnie xy

txz – naprężenia styczne w płaszczyźnie xz

2D – ang. 2-dimensional – dwuwymiarowy

3D – ang. *3-dimensional* – trzywymiarowy

AI – ang. Artificial Intelligence – sztuczna inteligencja

AFP - ang. Automated Fibre Placement - automatyczne układanie włókien

ATL - ang. Automated Type Laying - automatyczne układanie taśm

CTS – ang. Continuous Tow Shearing

DALY - z ang. Disability Adjusted Life-Years – lata życia skorygowane niesprawnością)

DCB - ang. Double Cantilever Beam - podwójna belka wspornikowa

EOL - ang. End of Life Products - koniec życia produktu

FPF - ang. First Ply Failure - uszkodzenie w pierwszej warstwie

FRC – ang. Fibre Reinforcement Composite – kompozyt wzmocniony włóknami

ILSS – ang. Interlaminar Shear Strength – wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe

LCA - ang. Life Cycle Assessment - Środowiskowa Ocena Cyklu Życia

MIIFT – ang. Mode I Interlaminar Fracture Toughness – metoda badania odporności materiałów kompozytowych na pękanie w trybie I

OEM – ang. Original Equipment Manufacturer – producent oryginalnego wyposażenia)

- p prawdopodobieństwo statystyki testu
- PBAT kopolimer adypinianu butylenu i tereftalanu butylenu
- PCL polikaprolakton
- PHB polihydroksymaślan
- PHBV poli(3-hydroksymaślan-co-3-hydroksywalerianian)
- PLA polilaktyd
- PVA poli(alkohol winylowy)
- Species.yr ang. Species yearly ilość gatunków wymierających w ciągu jednego roku
- TFP ang. Tailored Fibre Placement dedykowane ułożenie włókien
- UD ang. Unidirectional jednokierunkowe ułożenie włókien
- VA ang. Variable Axial zmienna oś

Wstęp

Świat stoi obecnie przed ryzykiem katastrofy klimatycznej. Ciągle rosnąca ilość śmieci sprawia, że firmy poszukują nowych rozwiązań, umożliwiających minimalizowanie powstających odpadów poprodukcyjnych. Gospodarki światowe coraz częściej zwracają się

ku idei zrównoważonego rozwoju. Bardzo ważnym aspektem takiej gospodarki jest zasada reduce – reuse – recycle, czyli ograniczanie produkcji i powstawania odpadów, jak najdłuższe eksploatowanie wytworzonych już dóbr oraz recykling tych przedmiotów, które już nie nadają się do użytku. Technologia haftu technicznego wpisuje się w zasadę zrównoważonego rozwoju. Jego główną zasadą jest bowiem wytworzenie dokładnie wcześniej zaplanowanego kształtu przedmiotu, przy określonych własnościach mechanicznych – powstające odpady z wykrojów są zatem zredukowane do minimum. Z tego powodu, w niniejszej pracy skupiono się na zastosowaniu haftu technicznego jako wzmocnienia kompozytów.

W poniższych badaniach, wykorzystanie lnu jako surowca wzmacniającego kompozyt, podyktowane było zasadami zrównoważonego rozwoju. W porównaniu do innych surowców naturalnych, len jest najbardziej ekologiczny w uprawie, posiadając równocześnie przy tym największe właściwości wytrzymałościowe [3]. Dodatkowo, uprawa lnu wolna jest od zanieczyszczeń, a odpady powstające podczas przetwarzania włókien są nietoksyczne i nieszkodliwe [4]. Stanowi on zatem doskonałą alternatywę przy produkcji kompozytów, w porównaniu do wykorzystywanych do tej pory włókien syntetycznych czy szklanych [5, 6, 7].

Duża różnorodność technologii haftu technicznego umożliwia jego szerokie zastosowanie, m.in. jako [8, 9, 10]:

- maty grzewcze,
- maty sensoryczne (badanie temperatury, wilgotności),
- elektrody tekstylne monitorujące czynności życiowe w mundurach strażaków lub żołnierzy przy wykorzystaniu przędzy elektroprzewodzącej,
- haftowane połączenia pomiędzy systemami elektronicznymi w tekstyliach,
- trójwymiarowe haftowane kolektory prądowe do baterii litowo-jonowych,

- przymocowywanie diod LED,
- mocowanie materiałów włóknistych (włókna szklane, węglowe, elektroprzewodzące, aramidowe, termoplastyczne, ceramiczne) na podkładach włókienniczych lub innych elastycznych materiałach o złożonych kształtach.

Tkanina zbudowana jest z dwóch układów prostopadłych do siebie nitek. Z tego powodu, charakteryzuje się zbliżonymi wartościami wytrzymałościowymi w przypadku siły działającej zarówno wzdłuż wątku, jak i osnowy. Jej wartości wytrzymałościowe są natomiast słabsze w przypadku sił działających pod innym kątami [11, 12, 13, 14]. Technologia haftu technicznego umożliwia natomiast ułożenie włókien pod dokładnie zaplanowanym kątem. Dzięki temu, możliwe jest zoptymalizowanie własności wytrzymałościowych produkowanego wyrobu [15].

1. Cel i hipoteza pracy

Celem niniejszej pracy jest ocena właściwości mechanicznych kompozytów, w których jako wzmocnienie zastosowano haft techniczny wykonany z włókien lnianych.

Cele szczegółowe pracy sformułowano następująco:

1. Kształtowanie właściwości mechanicznych kompozytu poprzez opracowanie oraz wytworzenie struktur haftowanych o optymalnych właściwościach mechanicznych, służących jako wzmocnienie kompozytu.

2. Przedstawienie nowych rozwiązań w produkcji kompozytów, biorąc pod uwagę minimalizowanie odpadów powstających podczas produkcji.

Hipotezę pracy określono następująco:

Haft techniczny może z powodzeniem zastępować płaskie wyroby włókiennicze podczas wytwarzania kompozytów.

Jako hipotezy szczegółowe przyjęto stwierdzenia iż:

 Wzdłużne ułożenie oraz zwiększenie ilości warstw haftowanego medium wpływa na poprawę właściwości mechanicznych kompozytów zawierających układy haftowane jako wzmocnienie.

2. Produkcja kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju.

Nowość naukowa pracy polega na opracowaniu nowego rozwiązania w produkcji wzmocnień kompozytów przy wykorzystaniu włókien lnianych. Haftowane wzmocnienia kompozytowe są aktualnie wytwarzane z włókien szklanych oraz węglowych. Len może natomiast stanowić doskonałą alternatywę dla tych włókien. Zastosowanie w kompozytach haftu technicznego jest bardziej przyjazne dla środowiska, w porównaniu do tkanin, ponieważ przyczynia się do minimalizowania powstających odpadów produkcyjnych.

Znaczenie praktyczne wyników badań wpływa na zwiększenie asortymentu kompozytów wzmacnianych włóknami naturalnymi.

2. Przegląd literatury

2.1. Wprowadzenie do tematu kompozytów

2.1.1. Historia kompozytów

Kompozyt to materiał składający się z dwóch lub więcej rodzajów tworzyw (tzw. faz). Historia materiałów kompozytowych sięga starożytności. Starożytni Egipcjanie i Mezopotamczycy używali mieszanki gliny i słomy do produkcji cegieł, które były bardziej wytrzymałe i odporne na pekanie niż czysta glina. W starożytnym Egipcie stosowano także laminowanie drewna, aby uzyskać bardziej wytrzymałe materiały na meble i łodzie [16, 17, 18]. W drugiej połowie XIX wieku Joseph Monier wprowadził beton zbrojony, w którym stalowe pręty były zatopione w betonie, co znacznie poprawiło jego wytrzymałość na rozciąganie [19]. Rewolucja chemiczna zmieniła proces produkcji wprowadzono polimeryzację, która pozwalała przekształcać żywice z postaci płynnej w stałą o usieciowanej strukturze molekularnej. Wraz z rozwojem tworzyw sztucznych w XX wieku pojawiły się nowe materiały wzmacniające kompozyty, takie jak winyl, polistyren, żywice fenolowe i poliestrowe. Pierwsze tworzywo sztuczne - bakelit - powstało w 1907 roku i oferowało lepsze właściwości niż wcześniejsze materiały kompozytowe. Sam materiał jednak nie był wystarczająco wytrzymały do zastosowań konstrukcyjnych. Przełom nastąpił w 1935 roku, kiedy firma Owens Corning opracowała pierwsze włókno szklane, dając początek branży tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem. Lata 30. XX wieku przyniosły rozwój żywic stosowanych do dziś w przemyśle kompozytowym. Połączenie włókna szklanego i żywicy poliestrowej nienasyconej, opatentowanej w 1936 roku, umożliwiło tworzenie bardzo wytrzymałych struktur kompozytowych [18, 20].

Kolejne lata przyniosły rozwój kompozytów węglowych i aramidowych, które charakteryzują się wyjątkową wytrzymałością i niską masą, co znalazło zastosowanie w przemyśle lotniczym, wojskowym i sportowym.

Po drugiej wojnie światowej przemysł kompozytów starał się wyjść poza zastosowania wojskowe. Kompozyty weszły na rynek cywilny w 1946 roku wraz z wprowadzeniem pierwszego komercyjnego kadłuba łodzi. Brandt Goldsworthy wniósł znaczący wkład w rozwój tej dziedziny, będąc pionierem w użyciu włókna szklanego w deskach surfingowych, co zrewolucjonizowało ten sport. Wynalazł on również pultruzję, proces produkcji stosowany do dziś w produkcji kompozytów [21, 22].

Obecnie rozwijane są kompozyty na bazie nanomateriałów, takich jak nanorurki węglowe i grafen, które oferują jeszcze lepsze właściwości mechaniczne, termiczne i elektryczne [23, 24].

Materiały kompozytowe odgrywają kluczową rolę w nowoczesnej technologii, znajdując zastosowanie w szerokim zakresie dziedzin – od budownictwa i transportu, po medycynę i elektronikę. Ich rozwój jest napędzany przez ciągłe dążenie do stworzenia materiałów o lepszych właściwościach, które są jednocześnie lżejsze, bardziej wytrzymałe i bardziej odporne na różnorodne warunki eksploatacyjne.

Oczekuje się, że rynek kompozytów z włóknami naturalnymi będzie w najbliższych latach rosnąć, ponieważ coraz więcej osób poszukuje zrównoważonych i przyjaznych dla środowiska materiałów. Nowe technologie produkcji, do których należy haft techniczny, otwierają nowe możliwości dla zastosowań tych materiałów.

2.1.2. Historia i rozwój kompozytów z włóknami naturalnymi

Historia kompozytów wykonanych z włókien naturalnych sięga starożytności, kiedy to używano słomy do wzmacniania cegieł, ceramiki i łodzi. W XIII wieku naszej ery, Mongołowie produkowali łuki wykonane z kompozytów składających się z mieszanki bambusa, drewna, rogów zwierzęcych i jedwabiu – za matrycę służyła naturalna żywica sosnowa [20]. Samo drewno można uznać za naturalny kompozyt, ponieważ składa się z mieszkanki włókien celulozowych osadzonych w matrycy ligninowej [25]. Kompozyty, w formie w jakiej znamy je dzisiaj, zaczęły być produkowane na szerszą skalę w pierwszej połowie XX wieku, dzięki opatentowaniu żywic polimerowych [26].

W USA, rynek kompozytów zawierających jako wzmocnienie włókna naturalne, odnotował 13 % dynamikę rozwoju w latach 1994-2004. Szacuje się, iż w 2010 roku, rynek kompozytów z włókien naturalnych był warty 2,1 miliarda dolarów [20]. Średni roczny wzrost rynku tego typu kompozytów na świecie w latach 2003-2007 wynosił 38%, przy czym najbardziej znaczący roczny wzrost odnotowano w Europie - na poziomie 48%. Rynek ten w 2007 roku szacowano na 360 tyś ton, a w 2020 roku osiągnął już 3,45 miliona ton. Jeżeli chodzi o wartość rynku kompozytów wzmacnianych włóknami naturalnymi, w 2023 wynosił on 328 milionów dolarów. Szacuje się, iż w 2028 roku wzrośnie on do 424 milionów dolarów. Przemysł oparty na materiałach kompozytowych odnosi

sukcesy na całym świecie, a kompozyty wzmocnione włóknami naturalnymi znacząco przyczyniają się do rozwoju tych branż [27, 28].

Według Nova Institute oraz FNR, od 2012 roku zaobserwować można gwałtowny wzrost wykorzystania lnu jako wzmocnienia kompozytów w aplikacjach technicznych, meblach, dobrach konsumpcyjnych oraz przemyśle motoryzacyjnym. W porównaniu do roku 2012, w 2017 wyprodukowano i wykorzystywano 3 razy więcej takich kompozytów [6].

Kompozyty z włóknami syntetycznymi są na szeroką skalę stosowane w przemyśle samochodowym. Jednak rosnąca świadomość ekologiczna oraz konieczność podporządkowania się Celom Zrównoważonego Rozwoju [29], coraz częściej skłania producentów w branży transportowej do korzystania z kompozytów zawierających jako wzmocnienie włókna naturalne. Takie kompozyty są lekkie, wytrzymałe, odnawialne, tanie i biodegradowalne [18]. Dzieki mniejszej masie kompozytów naturalnych, w porównaniu do syntetycznych, samochód zużywa mniej paliwa, co zmniejsza ślad weglowy i pomaga spełniać globalne przepisy środowiskowe [30]. W przeciętnym samochodzie osobowym, kompozyty wykonane z włókien syntetycznych ważą około 20 kg. Ilość wszystkich tworzyw sztucznych w samochodzie osobowym szacuje się na około 130 kg. Rocznie, na wysypiska śmieci trafia nawet 507 000 ton odpadów tworzyw sztucznych pochodzących z przemysłu samochodowego [31]. Możliwości ich recyklingu są dosyć ograniczone, co najczęściej skutkuje składowaniem takich odpadów na wysypisku śmieci lub utylizowaniem ich poprzez spalanie. Zastąpienie ich kompozytami wykonanymi z włókien naturalnych przyczynia się do zmniejszenia odpadów, ponieważ przy zastosowaniu odpowiedniej żywicy, kompozyty z włóknami naturalnymi mogą być biodegradowalne. Dodatkowo, stosowanie materiałów bio-kompozytowych może obniżyć koszt wyprodukowania elementów wnętrza samochodu o 20 % i dodatkowo zmniejszyć masę pojazdu o nawet 30% w przypadku niektórych komponentów [32, 33]. Zastosowanie haftu technicznego do produkcji wzmocnień kompozytów dodatkowo obniża ilość powstających podczas produkcji odpadów, z uwagi na brak konieczności wycinania pożądanych kształtów. Dzięki temu, odpady produkcyjne są w znacznym stopniu zminimalizowane.

Innymi gałęziami przemysłu, w których wykorzystywane są kompozyty z włókien naturalnych są m.in. przemysł lotniczy, opakowania, budownictwo, żeglarstwo lub sport [34]. Kompozyty z włóknami lnianymi charakteryzują się wysoką zdolnością do tłumienia drgań oraz odpornością na zginanie i procesy zmęczeniowe. Len jest również odporny na promieniowanie UV oraz posiada tzw. przejrzystość radiową [35].

Wyzwaniem stojącym przed kompozytami w włóknami naturalnymi, jest hydrofilowość włókien, prowadząca do powstawania pęknięć w kompozycie na skutek dyfuzji kapilarnej (pęcznienie włókien pod wpływem wilgoci). Rozwiązaniem może być dodanie do kompozytu nanocząsteczek grafenu [36].

Kompozyty zawierają jako wzmocnienie tkaniny lub luźne włókna. Haft techniczny oferuje innowacyjne podejście do wzmacniania kompozytów, pozwalając na redukcję ilości odpadów produkcyjnych. Dzięki haftowi możemy precyzyjnie planować kierunek ułożenia włókien w produkcie, co skutkuje znaczną poprawą jego właściwości fizycznych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie i odporność na uszkodzenia mechaniczne. To podejście nie tylko optymalizuje proces produkcji, ale także przyczynia się do bardziej zrównoważonego rozwoju przemysłu kompozytowego.

2.1.2. Definicja i klasyfikacja kompozytów ze względu na rodzaj matrycy oraz wzmocnienia

Celem wytwarzania kompozytu jest osiągnięcie materiału, którego właściwości będą przewyższać właściwości poszczególnych materiałów składowych. Elementy tworzące kompozyt to lepiszcze (inaczej nazywane również matrycą, z ang. *matrix*) oraz wzmocnienie. Lepiszcze zapewnia spójność, a także umożliwia przeniesienie obciążeń, na które narażony jest kompozyt. Wzmocnienie odpowiada w głównej mierze za osiągane wartości mechaniczne, zapewniając odporność na ściskanie, zginanie czy rozciąganie. Kompozyty są heterogeniczne i często anizotropowe. Natura matrycy i wzmocnienia, kształt i proporcja wzmocnienia oraz zastosowany proces produkcji to parametry, które mogą wpływać na właściwości materiału kompozytowego. Wprowadzenie wzmocnień o dobrej wytrzymałości na rozciąganie i bardzo wysokich modułach do matrycy polimerowej pozwala na poprawę właściwości mechanicznych [37].

Rodzaje wzmocnień przedstawiono na rysunku nr 2.



Rysunek 2. Podział kompozytów ze względu na rodzaj wzmocnienia: a) cząstkami, b) włóknami krótkimi, c) włóknami długimi, d) tkaning, e) warstwami (laminat) [38]

Ze względu na budowę, kompozyty można podzielić na wzmacniane [39]:

 - cząstkami - w tej grupie zbrojenie stanowi cząstka o małych rozmiarach, na przykład nanorurki węglowe lub grafen. Kompozyty te charakteryzują się wyjątkowymi właściwościami mechanicznymi, elektrycznymi i termicznymi. Znajdują się one we wczesnej fazie rozwoju, ale mają potencjał do zastosowania w wielu dziedzinach, takich jak elektronika, lotnictwo i kosmonautyka.

 włóknami krótkimi - w tej grupie zbrojenie stanowi włókno o krótkiej długości, które jest równomiernie rozproszone w osnowie. Kompozyty te charakteryzują się dobrymi właściwościami udaroodpornymi i łatwością przetwarzania. Znajdują zastosowanie w obudowach urządzeń, elementach dekoracyjnych i innych dziedzinach, gdzie wymagana jest dobra odporność na uderzenia.

 włóknami długimi - w tej grupie zbrojenie stanowi włókno o dużej długości, które biegnie w jednym lub w wielu kierunkach. Kompozyty te charakteryzują się wysoką wytrzymałością i sztywnością. Znajdują zastosowanie w konstrukcjach nośnych, elementach maszyn i innych dziedzinach, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość mechaniczna.

tkaniną - może być ona wykonana z różnych materiałów, takich jak włókno szklane,
węglowe, aramidowe lub naturalne włókna roślinne. Zaletą kompozytów zbrojonych
tkaniną jest wysoka wytrzymałość i sztywność – tkanina zapewnia równomierne rozłożenie
sił w materiale, co czyni go bardziej wytrzymałym i sztywnym niż kompozyty zbrojone
włóknami lub cząsteczkami.

 warstwami (laminat) – warstwy te mogą być wykonane z papieru, tkanin, włókien szklanych, węglowych, aramidowych lub innych materiałów. Laminaty mogą być lżejsze niż tradycyjne materiały, takie jak stal czy aluminium, co czyni je atrakcyjnymi dla zastosowań w transporcie i budownictwie. Główna różnica pomiędzy kompozytami wzmacnianymi cząstkami, a kompozytami wzmacnianymi włóknami polega na geometrii cząstek fazy rozproszonej. Cząsteczki w pierwszym typie mają zazwyczaj kształt kulisty, podczas gdy włókna charakteryzują się nieregularną geometrią, przy wyższym stosunku długości do średnicy [40].

Innym rodzajem klasyfikacji kompozytów, który można przyjąć, jest podział ich ze względu na rodzaj zastosowanej matrycy. Do najpopularniejszych rodzajów należą [41, 42]:

 matryce metalowe – w tej grupie matrycę najczęściej stanowią stopy aluminium, magnezu, tytanu lub niklu. Wzmocnieniem są zazwyczaj włókna metalowe, ceramiczne lub węglowe. Kompozyty te charakteryzują się wysoką wytrzymałością, sztywnością i przewodnością cieplną. Znajdują zastosowanie w lotnictwie, kosmonautyce, przemyśle motoryzacyjnym i innych dziedzinach, gdzie wymagane są wysokie parametry użytkowe.

- matryce ceramiczne – w tej grupie matrycę stanowi materiał ceramiczny, na przykład tlenek glinu, węglik krzemu lub azotek tytanu. Wzmocnieniem są zazwyczaj włókna ceramiczne lub węglowe. Kompozyty te charakteryzują się wysoką twardością, odpornością na ścieranie i wysoką temperaturą topnienia. Znajdują zastosowanie w narzędziach skrawających, elementach konstrukcyjnych pracujących w wysokich temperaturach i innych dziedzinach, gdzie wymagana jest wysoka odporność na zużycie.

- matryce polimerowe - w tej grupie matrycę stanowi tworzywo sztuczne, na przykład żywica epoksydowa, poliester lub polipropylen. Wzmocnieniem są zazwyczaj włókna szklane, węglowe, aramidowe lub naturalne. Kompozyty te charakteryzują się niską masą, dużą wytrzymałością na rozciąganie i dobrą odpornością chemiczną. Znajdują zastosowanie w budownictwie, transporcie, sporcie i innych dziedzinach, gdzie wymagane są lekkie i wytrzymałe materiały.

Kompozyty można również klasyfikować ze względu na surowiec wykorzystywany do wykonania wzmocnienia [43, 44, 45]:

kompozyty zbrojone włóknami szklanymi – najpopularniejszy typ kompozytu.
Wzmocnienie stanowi włókno szklane, które jest lekkie, wytrzymałe i odporne na korozję.
Stosowane w szerokim zakresie, m.in. w budownictwie, transporcie, przemyśle i sporcie.

 kompozyty zbrojone włóknami węglowymi - mocniejszy i sztywniejszy typ, niż kompozyty z włóknem szklanym. Wzmocnienie stanowi włókno węglowe, które jest wyjątkowo lekkie, wytrzymałe i odporne na temperaturę. Stosowane w wymagających zastosowaniach, m.in. w lotnictwie, kosmonautyce, sporcie wyczynowym i motoryzacji. kompozyty zbrojone włóknami aramidowymi – wytrzymałe na rozciąganie i odporne na uderzenia, ale droższe niż kompozyty z włóknem szklanym. Wzmocnienie stanowi włókno aramidowe, które jest również znane pod nazwami handlowymi jako Kevlar lub Nomex. Stosowane w zastosowaniach wymagających wysokiej odporności mechanicznej, m.in. w ochronie balistycznej, sprzęcie sportowym i elementach konstrukcyjnych.

 kompozyty zbrojone włóknami naturalnymi – ekologiczna i zrównoważona alternatywa dla kompozytów syntetycznych. Wzmocnienie stanowią włókna naturalne takie jak len, konopie, juta lub bambus. Stosowane tam, gdzie ważna jest biodegradacja i niska emisja CO₂, m.in. w opakowaniach, meblach i elementach dekoracyjnych.

 kompozyty zbrojone włóknami metalowymi – wyjątkowo wytrzymałe i sztywne, ale ciężkie i drogie. Wzmocnienie stanowią włókna metalowe, takie jak aluminium, tytan lub stal. Stosowane m.in. w konstrukcjach lotniczych i kosmicznych.

Oprócz wyżej wymienionych typów kompozytów istnieją również inne, mniej popularne rodzaje, takie jak kompozyty zbrojone włóknami ceramicznymi, kompozyty zbrojone nanorurkami węglowymi lub kompozyty zbrojone grafenem.

Rodzaj użytego wzmocnienia ma znaczący wpływ na właściwości kompozytu, takie jak wytrzymałość, sztywność, lekkość, odporność na korozję i temperaturę.

Wybór odpowiedniego kompozytu do danego zastosowania zależy od wielu czynników, takich jak wymagane właściwości, cena, dostępność materiałów i technologia produkcji.

2.1.3. Rynek kompozytów

W 2021r. wielkość światowego rynku kompozytów oszacowano na 88 mld dolarów. W 2023 było to już niemal 112 mld dolarów. Prognozowane jest, iż, wartość ta będzie wzrastać o około 6 % rocznie, osiągając w 2032 roku 190 mld dolarów [46]. Natomiast wartość europejskiego rynku kompozytów w 2018r. wynosiła 16,6 mld dolarów. Przewiduje się, iż będzie wzrastać w równym tempie, co wartość światowa. Głównymi sektorami napędzającymi wzrost mają być gałęzie motoryzacyjne oraz lotnicze, które dotknął chwilowy zastój w drugiej połowie 2020 roku, spowodowany pandemią Covid-19. Popyt na kompozyty wzrośnie również w branży energetyki wiatrowej. Trwające konflikty zbrojne na świecie również przyczyniają się do wzrostu popytu na lekkie kompozyty, wykorzystywane w sektorze obronnym [47].

Jednym z czynników mających wpływ na tak szybki rozwój branży kompozytów jest wspomaganie procesu produkcji sztuczną inteligencją. Techniki AI (ang. *Artificial Intelligence*) są wykorzystywane w produkcji kompozytów w autoklawach do kontrolowania temperatury i ciśnienia, utwardzania kompozytów, ustalania kontroli nad środowiskiem utwardzania, a także do wykrywania wad kompozytów [48].

Materiały kompozytowe są szeroko stosowane w motoryzacji, lotnictwie i przemyśle energii odnawialnej. Spodziewane jest, iż innowacje technologiczne mające na celu zminimalizowanie czasu cyklu produkcyjnego pobudzą popyt na kompozyty w sektorze motoryzacyjnym [49]. Obecność surowych przepisów dotyczących ochrony środowiska w Europie zmusiła producentów samochodów do włączenia kompozytów do produkcji samochodów. Na całym świecie, zwłaszcza w Europie, przepisy zmuszają producentów OEM (ang. *Original Equipment Manufacturer* – producent oryginalnego wyposażenia) do znacznego ograniczania emisji dwutlenku węgla emitowanego przez pojazdy. Oczekuje się, że proponowane regulacje w krajach będą dalej napędzać popyt na produkty z tego sektora [50, 51].

Podobnie rzecz ma się w przypadku aeronautyki. Jest to jeden z najszybciej rozwijających się sektorów na rynku europejskim. Zużycie kompozytów w tej branży wzrasta ze względu na ich lekkość i wysoką sztywność. Podstawowym celem stosowania materiałów kompozytowych w tych rozwiązaniach jest zmniejszenie masy samolotu i wprowadzenie maszyn o ulepszonych osiągach. Obecnie w samolotach typu Boeing 787 (w których w jako jednych z pierwszych wykorzystywano kompozyty) niemal 50 % użytych do produkcji materiałów stanowią kompozyty. Przy produkcji samochodów, procent ten wynosi od 8 do 12. Europa jest jednym z kluczowych rynków w sektorze lotniczym i obronnym, a popyt jest napędzany przez producentów samolotów, takich jak Airbus i Dassault Aviation [52]. Kompozyty znajdują zastosowanie również przy produkcji artykułów sportowych oraz w przemyśle morskim i naftowym.

2.2. Technologie wytwarzania wzmocnień kompozytów. Omówienie technologii Tailored Fibre Placement

Charakterystyka samego wzmocnienia, wykorzystywanego do wytwarzania kompozytów, tj. ułożenie włókien, rodzaj splotu, masa liniowa przędzy, czy gęstość ułożenia przędzy w tkaninie, ma wpływ na odporność kompozytu na pękanie [53]. W odniesieniu do włókien lnianych, kompozyty zawierające jako wzmocnienie tkaniny, wykazują większą odporność na pękanie, w porównaniu do kompozytów zawierających jako wzmocnienie jednokierunkowy układ włókien (UD fabric) [54]. Na poprawę odporności na pękanie kompozytów mają również wpływ następujące technologie: z-pinning [55], przeszywanie [56] oraz wykorzystywanie tkanin 3D [57]. Poniższy rozdział omawia różne technologie wzmocnień wykorzystywanych do produkcji kompozytów i ich wpływ na właściwości wytrzymałościowe gotowego produktu. Z uwagi na charakter pracy zdecydowano się nie omawiać wzmocnień wykonanych z włókien krótkich oraz cząstek, ponieważ autorka pracy pragnęła się skupić na wzmocnieniach, które można porównać z haftem technicznym.

2.2.1. Tkaniny

Najczęściej stosowanym rodzajem wzmocnienia w kompozytach są tkaniny, w szczególności wykonane z włókien szklanych, węglowych lub aramidowych [58]. W przypadku klasycznych tkanin wzmacniających, dwa prostopadłe względem siebie układy nitek są przeplatane wzajemnie, a tkaniny układane są w kompozycie warstwowo. Niemniej jednak, niska odporność na zmęczenie i sztywność tkaniny 2D, gdy jest poddawana naprężeniom ścinającym, sprawiają, że jej użycie jest wyzwaniem. Ponadto, kompozyty wykonane ze struktur 2D są słabsze i podatne na delaminację. W związku z tym, stabilność kompozytu jest ograniczona do dwóch, a maksymalnie trzech osi, co w przypadku wielu zastosowań okazuje się niewystarczające. Dlatego też niekiedy używa się do wzmocnień tkanin wieloosiowych. Takie tkaniny charakteryzują się zarówno dobrą stabilnością, jak i wystarczającą grubością i wytrzymałością na obciążenia, idealnie nadając się do kompozytów płaskich o mało skomplikowanych kształtach. Jednak nie są one odpowiednie w przypadku kompozytów o złożonych kształtach, ze względu na brak

możliwości uformowania ich w dowolnym kierunku. W takich przypadkach, używa się trójwymiarowe struktury tkane, dziane lub plecione [59].

Tkaniny wykonane z nitek o większym skręcie zapewniają większą wytrzymałość od tych o niższym skręcie, dzięki efektywnemu rozkładowi naprężeń [60]. Różnice pomiędzy tkaniną o splocie płóciennym oraz skośnym wskazują, iż określona struktura tkaniny wpływa na koncentracje naprężeń i propagację pęknięć [61, 62]. Wyższe wrobienie nitek w tkaninie może powodować niższą sztywność oraz wytrzymałość na rozciąganie kompozytu, w porównaniu do laminatów jednokierunkowych (UD fabric) [63].

Kompozyty laminowane z warstw tkanin są podatne na pękanie i delaminację, co obniża ich sztywność i wytrzymałość. Delaminacja może wystąpić przy ściskaniu, rozciąganiu, zginaniu i innych obciążeniach podczas formowania kompozytu [64].

Możemy wyróżnić trzy podstawowe schematy rozwarstwiania kompozytu, zależne od rodzaju obciążenia. Są to:

 Schemat I, zwany schematem rozwierania, gdzie powierzchnie pęknięcia oddalają się od siebie, a szczelina rozprzestrzenia się prostopadle do swojego frontu, gdy naprężenia normalne σz w osnowie przekraczają dopuszczalne wartości.

 Schemat II, nazywany schematem ścinania wzdłużnego, charakteryzujący się poślizgiem powierzchni pęknięcia w kierunku prostopadłym do frontu szczeliny, gdzie szczelina rozwija się, gdy naprężenia styczne τxy w osnowie przekraczają dopuszczalne wartości.

 Schemat III, zwany schematem ścinania poprzecznego, gdzie powierzchnie szczeliny przesuwają się względem siebie w kierunku równoległym do frontu szczeliny, a pęknięcie jest związane z krytycznymi wartościami naprężeń stycznych txz.

Rozwiązaniem problemu powstawania pęknięć międzywarstwowych może być zastosowanie haftu technicznego. Technologia ta zapewnia bowiem łączenie warstw za pomocą ściegu zyg-zag.

Innym rodzajem tkanin stosowanych do wzmocnienia kompozytów są tkaniny wielowarstwowe, inaczej nazywane 3D. W takich tkaninach, dwie lub więcej warstw formowanych jest na krośnie jednocześnie, ze wzajemnym połączniem warstw nitkami osnowy. Tkaniny 3D zwiększają stabilność termiczną i właściwości mechaniczne kompozytów, a także redukują delaminację między warstwową [59].

Kompozyty wzmocnione tkaninami znajdują zastosowanie w przemyśle samochodowym, meblarskim, lotniczym lub żeglarskim.

2.2.2. Jednokierunkowy układ włókien

Na właściwości mechaniczne tkaniny wpływ ma wrobienie nitek osnowy i wątku. Aby wyeliminować tę zależność, do produkcji wzmocnień kompozytowych wykorzystuje się również materiał o jednokierunkowym układzie włókien (ang. *Unidirectional Fabric – UD*) [65]. W celu uniknięcia przesunięć układów włókien, przeszywa się je nicią, najczęściej poliestrową. Przykład materiału UD wykonanego z włókien węglowych przedstawiono na rysunku nr 3.



Rysunek 3. Materiał UD wykonany z włókien węglowych [66]

Taki materiał nie posiada (lub posiada minimalne) wrobienia nitek, co zapewnia mu lepsze właściwości mechaniczne, większą sztywność i dłuższą żywotność zmęczeniową w porównaniu do tkaniny [67]. Jednakże dosyć luźna struktura materiału UD powoduje marszczenie i przesuwanie się układów włókien, szczególnie podczas formowania wzmocnień o skomplikowanych kształtach, co prowadzi do nierównomiernego rozłożenia włókien w kompozycie. Rozwiązaniem tych problemów może być np. układnie kolejnych warstw pod różnymi kątami [68].

Kompozyty z jednokierunkowym układem włókien są silnie anizotropowe, co oznacza, że ich właściwości mechaniczne różnią się w zależności od kierunku obciążenia. Całe obciążenie rozciągające jest przenoszone przez włókna ułożone w jednym kierunku, natomiast wytrzymałość w kierunku poprzecznym jest minimalna [69].

Produkcja kompozytów z jednokierunkowym układem włókien jest stosunkowo prosta i tania, jednak anizotropia kompozytów z jednokierunkowym układem włókien może utrudniać projektowanie konstrukcji i wymaga dokładnej analizy naprężeń.

2.2.3. Z-pinning

W większości wzmocnień kompozytowych (tkaniny, jednokierunkowe układy włókien, automated fiber placement) kilka warstw płaskich wyrobów włókienniczych układanych jest na sobie, zapewniając wzmocnienie w płaszczyznach x oraz y. Brak jest natomiast wzajemnego połączenia pomiędzy warstwami w płaszczyźnie z, co prowadzi do podatności na rozwarstwianie kompozytu. Technologia Z-pinningu, polegająca na wprowadzaniu cienkich prętów z włókien lub metalu (z-pinów) w kierunku grubości kompozytu, poprawia wytrzymałość na rozwarstwianie kompozytów. Udział z-pinów w kompozycie wynosi zazwyczaj od 0,5 do 5,0% objętości. Przed ostatecznym utwardzeniem, nośnik z pianki zawierający z-piny umieszcza się na nieutwardzonym prepregu, a z-piny są wprowadzane za pomocą wibracji ultradźwiękowych lub wysokiego ciśnienia. Nadmiar pianki i wystające z-piny usuwa się [70, 71]. Widok kompozytów zawierających wzmocnienie w postaci z-pinów przedstawiono na rysunku nr 4.



Rysunek 4. Przykład kompozytów wzmocnionych z-pinami [72]

Odporność na rozwarstwienie w trybie I laminatów kompozytowych z z-pinami (10–15 kJ/m²) jest większa niż w przypadku kompozytów wzmacnianych cząstkami lub krótkimi włóknami (zwykle poniżej 4 kJ/m²), przeszywaniem (5–10 kJ/m²) czy tkaninami 3D (do 3–4 kJ/m²) [72].

Wprowadzanie z-pinów do jeszcze nieutwardzonego prepregu powoduje mikrouszkodzenia materiału, takie jak falistość i pęknięcia włókien, które koncentrują naprężenia wokół otworów. W efekcie, wytrzymałość i sztywność laminatu kompozytowego ulegają niewielkiemu obniżeniu. Zwiększenie liczby z-pinów pogłębia ten efekt. Aby złagodzić te negatywne skutki, można zastosować cieńsze z-piny lub bardziej zaawansowane metody ich wprowadzania [70].

Kompozyty wzmocnione z-pinami zastosowano m.in. przy budowie samolotów (Airbus A340-600, Boeing 7E7) i bolidów Formuły 1 [70, 73].

2.2.4. Przeszywanie

Przeszywanie (lub igłowanie) materiału tworzącego wzmocnienie kompozytu jest prostą metodą wzmacniającą płaski wyrób włókienniczy i zapobiegającą powstawaniu rozwarstwiania. Proces ten polega na przeszywaniu nitkami aramidowymi, węglowymi lub poliestrowymi płaskich wyrobów włókienniczych przy pomocy przemysłowej maszyny do szycia. Do najczęściej stosowanych rodzajów ściegów należy stębnówka oraz łańcuszek. W przypadku tradycyjnej stębnówki, splecenie nitek występuje w środkowej warstwie laminatu, co może prowadzić do koncentracji naprężeń i zmniejszenia właściwości mechanicznych w płaszczyźnie. Zmodyfikowany ścieg blokowy, w którym splatanie nici znajduje się na powierzchni preformy, zmniejsza koncentracje naprężeń spowodowane falistością włókien oraz występowaniem przestrzeni wypełnionych żywicą [74].

Parametry procesu szycia wywierają znaczący wpływ na właściwości mechaniczne kompozytów zarówno w kierunku równoległym, jak i prostopadłym do warstw. Zmiany tych parametrów, takie jak rodzaj nici, gęstość ściegów czy napięcie nici, mogą prowadzić do istotnych różnic w module Younga i wytrzymałości na rozciąganie. Chociaż szycie zazwyczaj powoduje niewielkie obniżenie tych właściwości, to dla elementów konstrukcyjnych poddawanych dużym naprężeniom w płaszczyźnie, takie jak elementy skrzydła samolotu, może to mieć istotne konsekwencje. Dlatego optymalizacja parametrów szycia jest kluczowa dla zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości i sztywności konstrukcji kompozytowych [75, 76].

2.2.5. Automated Fiber Placement

Automated Fiber Placement (AFP) to innowacyjna technologia w dziedzinie produkcji kompozytów. Działa na podobnej zasadzie co haft techniczny, wykorzystując zautomatyzowany system, który układa włókna w z góry określonych ścieżkach. Precyzja ta jest kluczowa dla optymalizacji stosunku wytrzymałości do masy.

Rysunek nr 5 przedstawia schemat technologii Automated Fibre Placement.



Rysunek 5. Schemat technologii Automated Fibre Placement [77]

Technologia AFP wykorzystuje oprogramowanie, które oblicza optymalną ścieżkę układania włókien, aby zapewnić efektywne przenoszenie obciążeń przez materiał kompozytowy, redukując nadmiar materiału i maksymalizując wytrzymałość.

Tradycyjne metody formowania komponentów często napotykają trudności w przypadku elementów o złożonej geometrii. Technologia AFP oferuje rozwiązanie, zapewniając precyzyjne układanie włókien dostosowane do specyficznych wymagań konstrukcyjnych.

AFP pozwala na modyfikację ułożenia włókien w obrębie jednego elementu, wzmacniając go w miejscach narażonych na największe obciążenia. To z kolei prowadzi do optymalizacji wydajności i redukcji masy. Precyzyjne sterowanie układem włókien umożliwia tworzenie elementów o złożonych geometriach, takich jak aerodynamiczne panele nadwozia, zakrzywione ramy lub części z wewnętrznymi strukturami.

AFP eliminuje potrzebę łączenia wielu mniejszych elementów, co upraszcza proces produkcyjny i poprawia jego wydajność.

Technologia AFP oferuje szereg istotnych zalet w zakresie produkcji komponentów o skomplikowanej geometrii, zapewniając precyzyjne układanie włókien, optymalizację wydajności i redukcję masy. Znajduje ona szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, gdzie kluczowa jest wysoka jakość i niezawodność elementów konstrukcyjnych:

tworzenie lekkich i wytrzymałych elementów nadwozia, pokryw silnika oraz kół,
co przekłada się na lepszą wydajność i oszczędność paliwa,

produkcja wytrzymałych obudów akumulatorów w samochodach elektrycznych,
które są jednocześnie lekkie, zapewniając ochronę oraz przyczyniając się do ogólnej
efektywności energetycznej pojazdów elektrycznych,

- tworzenie elementów karoserii o aerodynamicznych kształtach [77].

Istotną różnią pomiędzy AFP a haftem technicznym jest fakt, iż w przypadku pierwszego rozwiązania włókna (niedoprzęd, taśma, tkanina) są jedynie układane warstwowo, bez wzajemnych połączeń pomiędzy warstwami. W hafcie technicznym natomiast ścieg zyg-zag przeszywa wszystkie warstwy materiału, wzmacniając przy tym całą strukturę, przy jednoczesnym zapobieganiu powstawania pęknięć między warstwowych.

Oprócz technologii Automated Fiber Placement istnieją również inne technologie układania pasm w sposób krzywolinijny. Należą do nich Automated Tape Laying (ATL) oraz stosunkowo nowa technologia Continuous Tow Shearing (CTS). Technologie te również polegają na układaniu taśm prepregnowanych, bez wzajemnego przeszywania warstw. Nie wymagają one również użycia materiału bazowego, ale mają poważne ograniczenie jeśli chodzi o minimalny promień umieszczenia taśm [78]. Ponadto, taśmy, podobnie jak tkaniny, mają określoną szerokość – uzyskanie mniejszego elementu wiąże się z koniecznością wycięcia go z większego kawałka materiału, a co za tym idzie, powstają odpady produkcyjne. Haft techniczny eliminuje taką konieczność, dzięki dokładnie zaprogramowanej ścieżce układania medium na podkładzie.

2.2.6. Haft techniczny – Tailored Fibre Placement

W niniejszej pracy, przedmiotem badań był haft techniczny, który został wykonany na hafciarce komputerowej firmy ZSK, model JCZA 0109-550. Maszyna ta wyposażona jest w głowicę typu W, która umożliwia układanie liniowych wyrobów włókienniczych (jak również kabli, przewodów, światłowodów i innych ciągłych materiałów) według wcześniej zaprojektowanego kształtu na wybranym rodzaju podłoża. Wyroby te są przymocowywane do podłoża za pomocą ściegu typu zyg-zag przy użyciu przędzy mocującej. Maksymalna wysokość nawarstwionych układów może wynosić 8 mm.

Widok hafciarki komputerowej, będącej na wyposażeniu Instytut Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej, przedstawiono na rysunku nr 6.



Rysunek 6. Hafciarka komputerowa firmy ZSK, model JCZA 0109-550 [źródło własne]

Projekty poszczególnych wariantów haftu zostały utworzone w specjalistycznym oprogramowaniu GiS BasePack wersja 10, dedykowanym hafciarkom ZSK.
Technologia haftu technicznego, określana jako Tailored Fiber Placement (TFP) została opracowana w Institute of Polymer Research Dresden w Niemczech, w latach 90. XX wieku [79]. Jest to zaawansowana metoda produkcji materiałów kompozytowych, która umożliwia automatyczną produkcję elementów o złożonej geometrii, optymalnie dostosowanych do wymagań konkretnego zastosowania. Technologia ta pozwala na układaniu medium na powierzchni płaskiego wyrobu włókienniczego w dowolnym kierunku, w osi X oraz Y. Dzięki nakładaniu na siebie warstw haftu, możliwe jest również osiągnięcie pewnego wymiaru w kierunku osi Z, jednak jest to dosyć mocno ograniczone TFP umożliwia wykonanie dowolnie możliwościami technicznymi hafciarki. zaprojektowanego wcześniej wzoru, co przekłada się w bardzo wysokim stopniu na redukcję odpadów produkcyjnych. W przypadku haftu nie jest konieczny proces wykrawania materiału, ponieważ otrzymujemy gotowy produkt. Jedynym odpadem jest włóknina lub inny rodzaj podkładu, na którym wykonywany bvł haft. a również to można redukować, poprzez wykorzystywanie odpowiedniej wielkości tamborków. Technologia TFP umożliwia uzyskanie materiałów o złożonej strukturze, w których włókna sa rozłożone w sposób optymalny, dostosowany do obciażeń jakim maja być poddane. Dzięki zastosowaniu TFP możliwe jest uzyskanie elementów o bardzo wysokiej wytrzymałości i sztywności, przy jednoczesnym zmniejszeniu ich masy oraz kosztów produkcji [79, 80].

Jak pokazano na rysunku nr 7, ciągły wyrób włókienniczy umieszczany jest zgodnie z wcześniej zaprogramowanym kształtem na płaszczyźnie 2D i przymocowywany jest nicią szwalniczą do płaskiego materiału bazowego, za pomocą ściegu typu zyg-zag. Haft wykonywany jest zgodnie z zaprojektowaną ścieżką, poprzez obracanie stopki prowadzącej wiązkę włókien oraz przesuwanie materiału bazowego w dwóch prostopadłych kierunkach.

37



Rysunek 7. Technologia haftu technicznego [81]

Niewątpliwą zaletą haftu technicznego jest wysoka stabilność wymiarowa wytworzonych elementów (dzięki wzmocnieniu układu nitką mocującą zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej) oraz znakomita powtarzalność procesu produkcyjnego. Dzięki pełnej dowolności kierunku ułożenia medium na podkładzie, jaki oferuje hafciarka komputerowa, haft techniczny może być w pełni personalizowany. Automatyzacja procesu haftowania daje pełną kontrolę nad wykonaniem wzoru oraz zużyciem surowców [82].

Dzięki technologii TFP możliwe jest również przymocowywanie kabli, rurek silikonowych lub światłowodów, co przedstawiono na rysunku nr 8.



Rysunek 8. Przymocowanie rurki silikonowej za pomocą haftu technicznego [83]

2.3. Zastosowanie haftu technicznego

Haft stosowany jest od starożytności. Przez wiele lat służył jedynie jako forma ozdabiania ubrań oraz przedmiotów codziennego użytku [84]. Jednak w latach 90. XX wieku, w Institute of Polymer Research w Niemczech opracowano technologię haftu technicznego, nazwaną jako Tailored Fibre Placement (w skrócie TFP) [85].

Haft techniczny stosowany jest do precyzyjnego rozmieszczenia włókien w kompozycie, co pozwala na uzyskanie optymalnych właściwości mechanicznych. Pożądane właściwości kompozytów osiąga się poprzez kierowanie obciążeń prawie wyłącznie wzdłuż orientacji włókien, co minimalizuje obciążenie ścinające matrycy [86]. Dzięki zastosowaniu w kompozycie układu włókien o zmiennej osi (VA – ang. *variable axial*), można uzyskać lepsze właściwości pod względem sztywności i wytrzymałości w porównaniu do tradycyjnych kompozytów. Termin VA oznacza zmienianie orientacji włókien na poziomie warstwy. Przykład haftu o zróżnicowanych kierunkach ułożenia włókien, przedstawiono na rysunku nr 9.



Rysunek 9. Przykład możliwości ułożenia włókien w hafcie technicznym [87]

Pożądane parametry kompozytów osiąga się poprzez kierowanie obciążeń prawie wyłącznie wzdłuż orientacji włókien, minimalizując tym samym obciążenie ścinające w matrycy [86]. Ta metoda jest szczególnie przydatna w produkcji kompozytów o złożonych kształtach, gdzie tradycyjne metody układania włókien mogą być trudne lub niemożliwe. Przykład takiego kompozytu przedstawiono na rysunkach 10a i 10b, które prezentują felgę samochodową.



Rysunek 10a i 10b. Widok felgi samochodowej wykonanej za pomocą haftu technicznego [88, 89]

Badania przeprowadzone w Institute of Polymer Research Dresden udowodniły, że kompozyty termoutwardzalne zawierające w swojej strukturze otwory, wykonane przy pomocy haftu technicznego, posiadają podobne właściwości mechaniczne podczas do kompozytów cyklicznego rozciagania zawierających jako wzmocnienie jednokierunkowe układy włókien (UD fabric) [90]. Ponadto, technologia haftu technicznego może przyczyniać się do optymalizacji rozkładu naprężeń wzdłuż elementów kompozytu narażonych na uszkodzenia [91]. Jednakże, wszystkie badania prowadzone były przy wykorzystaniu włókien weglowych, szklanych lub aramidowych. W literaturze przedmiotu brak jest opracowań dotyczących kompozytów wykonanych metodą TFP przy wykorzystaniu włókien lnianych. Dlatego autorka niniejszej pracy postanowiła pochylić się nad tym tematem.

Obecnie, haft techniczny wykorzystuje się w dużej mierze w tekstronice. Do płaskich wyrobów włókienniczych przymocowywane są sensory, cyfrowe komponenty lub anteny. Przykład koszulki zawierającej czujniki do pomiaru EKG, połączone haftem można zobaczyć na rysunku nr 11.



Rysunek 11. Koszulka z haftowanymi elektrodami i przewodnikami [92]

Haft techniczny służy do łączenia elementów elektronicznych na wyrobie włókienniczym, a także tworzy cewki do jednostronnego układu magnetycznego rezonansu jądrowego jako alternatywa dla litej miedzi, co można zobaczyć na rysunku nr 12 [93].



Rysunek 12. Cewka wykonana przy pomocy haftu technicznego [93]

W procesie haftowania wykorzystywane mogą być różne materiały, m.in. przewody elektryczne, światłowody, włókna szklane lub węglowe, przędze elektroprzewodzące [94]. Technologia TFP wykorzystywana jest do tworzenia mat grzewczych (np. w siedzeniach samochodowych), co przedstawiono na rysunku nr 13 poniżej.



Rysunek 13. Mata grzewcza wykonana przy pomocy haftu technicznego [95]

Włókna węglowe służą tutaj jako przewodniki ciepła w matach lub foliach grzewczych. Takie wyroby są lekkie, cienkie, bardzo elastyczne i trudnopalne. Węglowe maty grzewcze równomiernie rozprowadzają ciepło po całej swojej powierzchni [95].

Innymi przykładami wykorzystania haftu technicznego mogą być stabilizatory i ortezy medyczne (rysunek 14), artykuły sportowe, takie jak np. siodełko rowerowe (rysunek nr 15) lub elementy silników (rysunek nr 16).



Rysunek 14. Orteza wykonana przy pomocy haftu technicznego [96]



Rysunek 15. Siodełko rowerowe wykonane technologią haftu technicznego [97]



Rysunek 16. Element silnika wykonany przy pomocy haftu technicznego [98]

Powstają również próby wykorzystywania haftu technicznego do tworzenia w pełni spersonalizowanych wyrobów odzieżowych oraz obuwniczych. Przykładem takie przedmiotu są buty sportowe firmy Adidas, co przedstawiono na rysunkach poniżej.





Haft techniczny przeżywa obecnie dynamiczny rozwój, stając się kluczowym elementem w tworzeniu innowacyjnych materiałów o szerokim zastosowaniu. Jego rosnąca popularność wynika z kilku czynników:

- Precyzja i personalizacja: Dzięki nowoczesnym maszynom hafciarskim możliwe jest precyzyjne ułożenie włókien pod różnymi kątami, co pozwala na tworzenie materiałów o dokładnie określonych właściwościach. To z kolei umożliwia dostosowanie produktu do bardzo specyficznych potrzeb klienta.
- Lekkość i wytrzymałość: Materiały stworzone na bazie haftu technicznego łączą w sobie niewielką masą z dużą wytrzymałością. To sprawia, że są idealne do zastosowań w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym czy sportowym.

 Ekologiczne aspekty: Coraz większe zainteresowanie materiałami ekologicznymi sprawia, że haft techniczny, szczególnie ten wykonany z naturalnych włókien, zyskuje na znaczeniu.

2.4. Charakterystyka wykorzystanych surowców

2.4.1. Włókna lniane

W porównaniu do produkcji włókien syntetycznych, otrzymywanie włókien naturalnych charakteryzuje się korzyściami zarówno ekonomicznymi, jak i środowiskowymi. Produkcja jednego kilograma włókna lnianego wymaga około 10 MJ energii, co stanowi jedną piątą energii potrzebnej do wyprodukowania jednego kilograma włókna szklanego (około 50 MJ) [100, 101].

Wykorzystywanie włókien naturalnych do produkcji kompozytów w istotnym stopniu zmniejsza zużycie surowców pochodzących z przetwórstwa ropy naftowej [102]. Większość włókien naturalnych jest uważana za neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla, co oznacza, że pochłaniają one tyle samo CO₂, ile emitują [103]. Włókna naturalne są również tańsze w produkcji, w porównaniu do włókien syntetycznych [101, 104].

Włókna naturalne posiadają równie dobrą wytrzymałość, co włókna syntetyczne. Charakteryzują się też wysoką sztywnością. Szczególnie wyróżnia się tutaj włókno lniane, które posiada wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 27-73 cN/tex. Wytrzymałość ta jest jeszcze większa dla włókien w stanie mokrym [105, 106]. Własności mechaniczne wybranych włókien używanych w produkcji kompozytów zestawiono w tabeli nr 1 [107, 108].

Włókno	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Wydłużenie [%]	Moduł Younga [GPa]	Gęstość [g/cm³]
Bawełna	290-590	2,00-10,00	6,00-10,00	1,21
Len	800-1500	2,7-3,2	27,6	1,40
Konopie	550-900	1,60	70	1,48
Juta	400-800	1,50	10-30	1,46
Ramia	511-635	3,6	9,4-22,00	1,50
Sizal	400-700	0,5-14,00	9,00-12,00	1,45
Włókno szklane typu E	2400	3,00	73,00	2,55

Tabela 1. Właściwości mechaniczne wybranych włókien

Włókno szklane typu S	4580	4,60	85,00	2,50
Aramid	300	2,50	124,00	1,40
Włókno węglowe	2550	1,30	20,00	1,82

Włókno lniane, o gęstości zaledwie 1,4-1,5 g/cm³, jest znacznie lżejsze od włókna szklanego (ok. 2,5 g/cm³). Mimo to, jego sztywność jest porównywalna ze sztywnością szkła, a wytrzymałość na rozciąganie sięga nawet 1100 MPa. Dzięki takim właściwościom, len jest doskonałym kandydatem do tworzenia lekkich, ale wytrzymałych kompozytów [109].

Wytrzymałość na rozciąganie jest czynnikiem decydującym o odporności samego kompozytu na powstawanie pęknięć [110]. Dodatkowo, wzmocnienia kompozytowe z włókien lnianych, wykazują się wysokim poziomem tłumienia drgań [111]. Właściwości mechaniczne zarówno włókien lnianych, jak i kompozytów z ich udziałem, są zbliżone do włókien szklanych (które są najczęściej używane do wzmocnień kompozytów), dlatego z powodzeniem mogą je zastępować w produkcji kompozytów [112, 113]. Takie kompozyty znajdują zastosowanie w branży motoryzacyjnej, jako wnętrza samochodów, panele drzwiowe, deski rozdzielcze [114, 115, 116], jak i również w przemyśle lotniczym, budowlanym, rekreacyjnym, sportowym i opakowaniowym [117]. Mając na uwadze wszystkie powyższe zalety włókien lnianych, zdecydowano się na wykorzystanie ich w niniejszej pracy.

2.4.2. Żywica epoksydowa

Żywica epoksydowa jest najczęściej używaną żywicą podczas procesu wytwarzania kompozytów. Posiada dobre właściwości mechaniczne oraz chemiczne. Posiada wysoką twardość, przy jednoczesnej dużej odporności na temperaturę oraz wodoodporności. W porównaniu do żywic winylowych oraz poliestrowych, żywica epoksydowa posiada znacznie mniejszą kurczliwość oraz nie wydziela szkodliwych substancji lotnych podczas utwardzania. Charakteryzuje się również doskonałymi właściwościami adhezyjnymi [118].

W początkowych etapach badań do wytworzenia kompozytów zastosowano żywicę HAVEL Composites LH145 (rozdział 4). Natomiast w dalszej części (rozdział 5) zdecydowano się na zastosowanie żywicy, która jest bardziej ekologiczna i ma mniejszy ujemny wpływ na środowisko. Żywica epoksydowa SR GreenPoxy 33 jest produkowana z dużą zawartością węgla pochodzenia roślinnego – 35% struktury molekularnej pochodzi z surowców roślinnych. Zastosowany utwardzacz to SD 4772. Charakteryzuje się on niską lepkością i dobrymi właściwościami zwilżania, zapewniającymi niskie zużycie żywicy. System żywica + utwardzacz przeznaczony jest do używania w temperaturze od 25 do 40°C. Zawartość biopochodnego węgla w mieszance wynosi około 27%. Wszystkie komponenty są wolne od substancji CMR (rakotwórczych, mutagennych lub działających toksycznie na rozrodczość). Właściwości żywicy epoksydowej SR GreenPoxy 33 przedstawiono w tabeli poniżej.

|--|

Cecha	Charakterystyka	
Kolor	Przezroczysty	
Skład chemiczny	Żywica epoksydowa. Produkt reakcji pomiędzy alkoholami i epichlorohydryną.	
Przechowywanie	Do dwóch lat, w temperaturze 18-25°C	
Gęstość	1,159 g/cm³ w 20°C	
Zawartość węgla pochodzenia roślinnego	34-36 %	
	6 380 mPa⋅s w 15°C	
	3 240 mPa⋅s w 20°C	
Lepkość	1 780 mPa⋅s w 25°C	
	1 040 mPa⋅s w 30°C	
	410 mPa⋅s w 40°C	

Właściwości utwardzacza SD 4772 przedstawiono w tabeli nr 3.

Tabela 3. Właściwości utwardzacza SD 4772

Cecha	Charakterystyka
Kolor	Przezroczysty/żółty
Gęstość	0,93 g/cm ³ w 20°C
	13 mPa⋅s w 15°C
	11 mPa⋅s w 20°C
Lepkość	9 mPa⋅s w 25°C
	7 mPa⋅s w 30°C
	5 mPa⋅s w 40°C

Właściwości mechaniczne systemu żywica epoksydowa SR GreenPoxy 33 + utwardzacza SD 4772 przedstawiono w tabeli nr 4.

		Warunki ut	twardzania	
	24 h w 40°C	20 h w 50°C	16 h w 60°C	8 h w 80°C
Moduł sprężystości [N/mm²]	3200	3200	3200	3100
Maksymalna wytrzymałość [N/mm²]	56	75	80	77
Wytrzymałość przy zerwaniu [N/mm²]	56	74	8	73
Wydłużenie przy maksymalnej wytrzymałości [%]	1	2.1	3.6	3.7
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	1	2.1	3.9	3.8
Wytrzymałość na ścinanie [N/mm²]	51	52	54	50
Temperatura zeszklenia [°C]	67	73	82	90

Tabela 4. Właściwości mechaniczne systemu żywica epoksydowa SR GreenPoxy 33 + utwardzacz SD 4772

2.5. Zrównoważony rozwój w kontekście produkcji i wykorzystywania kompozytów

2.5.1. Kompozyty powstające z recyklingu

Istnieją rozwiązania recyklingu kompozytów zawierających włókna weglowe, w celu wykorzystania ich do dalszej produkcji kompozytów mogących znaleźć zastosowanie w przemyśle samochodowym oraz lotniczym. Regeneracja włókna węglowego początkowo obejmuje oczyszczanie kompozytu z metali oraz cięcie dużych struktur kompozytowych do rozmiarów odpowiednich do dalszej obróbki. Wydajność tego procesu wynosi 4 tony na godzine. Odzyskiwanie włókien weglowych odbywa się w procesie pirolizy, w którym żywica jest wypalona. Piec jest w stanie zapewnić wydajność 1500 ton rocznie. Włókno weglowe jest następnie poddawane dalszej obróbce i powstaje z niego mata włókninowa lub pellet. Użycie włókna węglowego z recyklingu może obniżyć koszt wzmocnienia kompozytu włóknami o około 40%. Kolejną zaletą jest fakt, iż włókno weglowe pochodzące z recyklingu ma o ponad 10% mniejszy potencjał wpływu na ocieplenie klimatu niż włókna pierwotne. Kompozyt wykonany z recyklingu charakteryzuje się taką samą wydajnością produkcji, jak kompozyt wykonany z włókna pierwotnego o długości 6 mm. Ponadto, kompozyt z recyklingu zachowuje 90% pierwotnej wytrzymałości na rozciąganie, nie wykazując przy tym zmiany modułu Younga [119, 120, 121].

W przypadku odpadów budowlanych i rozbiórkowych, drewna, papieru, czy tworzyw sztucznych, surowce te wykorzystuje się głównie do pozyskania energii w wyniku spalania. Wykorzystanie ich w obiegu zamkniętym, do produkcji recyklingowych kompozytów, jest nadal rzadkością. Zmieszanie i ewentualne zanieczyszczenie materiałów to wyzwania ograniczające recykling. Recykling metali, szkła, papieru, kartonu i gipsu wymaga specjalistycznych technologii. Degradacja i zanieczyszczenie materiałów często mają wpływ na właściwości kompozytów z materiałów pochodzących z recyklingu. Przetwarzane materiały często powodują nieciągłości w kompozycie, jeśli nie zostały poddane prawidłowej obróbce. Ewentualne zastosowanie takich tworzyw należy rozważyć indywidualnie. Również korzyści dla środowiska, jakie można uzyskać, zależą od składu materiału kompozytowego. Oszacowanie prawdziwego potencjału recyklingowych kompozytów pozostaje trudne, ponieważ badania dotyczące jakości przetwarzania, ekonomiki, śladu węglowego, zdrowia i bezpieczeństwo są nieliczne i są specyficzne dla danego składu [122, 123].

2.5.2 Eko produkty używane do produkcji kompozytów

Włókna naturalne odgrywają ważną rolę w opracowywaniu wysokowydajnych, w pełni biodegradowalnych "zielonych" kompozytów, które będą kluczowymi materiałami w rozwiązywaniu bieżących problemów środowiskowych. W porównaniu do roku 2012, w 2017 wyprodukowano i wykorzystywano 3 razy więcej kompozytów zawierających włókna naturalne. Ukazuje to, iż rośnie popyt na kompozyty wzmacniane surowcami naturalnymi. Włókna naturalne mogą być stosowane jako zielone zamienniki ze względu na ich zalety, takie jak niewielka masa, dobre właściwości mechaniczne i niska gęstość przy dobrej wytrzymałości. Innymi włóknami naturalnymi, wykorzystywanymi do produkcji kompozytów są m.in. juta, kapok, bawełna, kokos, kenaf, kudzu, lipa, sizal, konopia, alpaka, wełna, angora. Mianem "zielonych kompozytów" określić można takie kompozyty, w których zarówno żywica, jak i wzmocnienie są w pełni biodegradowalne i powstały z surowców odnawialnych. Żywice biodegradowalne otrzymywane są z roślin, zwierząt lub bakterii. Są to m.in. naturalne kauczuki, białko sojowe, chityna i chitozan, skrobia, żelatyna, PLA, PHBV, PCL, PVA, PBAT, PHB [124, 125, 126].

2.5.3. Zużyte kompozyty oraz kompozyty poddawane recyklingowi

Zdecydowaną większość na rynku stanowią kompozyty wykonane z włókien szklanych oraz węglowych. Dzięki swoim właściwościom, takim jak wysoka wytrzymałość w odniesieniu do niskiej masy, wysoka sztywność, wysoka zdolność tłumienia, długa żywotność, wysoka odporność na zużycie oraz korozję i ogień, znajdują one zastosowanie w lotnictwie, turbinach wiatrowych, czy przemyśle samochodowym [127, 128]. Ciągłe zapotrzebowanie na zielone źródła energii wpływa na wzrost produkcji kompozytów wykorzystywanych do budowy turbin wiatrowych. Wraz ze wzrostem tego zapotrzebowania, same turbiny również są ciągle ulepszane i rozbudowywane, zwiększająca swoją wagę i rozmiar. Obecne turbiny wiatrowe zdatne są do użytku przez około 20-25 lat. Przewidywane jest, iż w latach 2020-34, powstanie ponad 200 tys. ton odpadów pochodzących ze zużytych turbin wiatrowych [129]. Ustawodawstwo dotyczące ochrony środowiska (m.in. pakiet Komisji Europejskiej dotyczący gospodarki odpadami w obiegu zamkniętym (Circular Economy Package)) zobowiązuje do zwiększenia recyklingu odpadów [130]. Chociaż produkty z materiałów kompozytowych są zazwyczaj wytrzymałe i mogą być użytkowane przez długi okres, pierwsza generacja produktów kompozytowych, takich jak np. wiatraki, zbliża się do końca cyklu życia produktu. Stwarza to nowy problem, a mianowicie konieczność recyklingu kompozytów. Materiał ten jest skonstruowany w taki sposób, aby był mocny i trwały. Jest on niejednorodny, co sprawia, że recykling jest bardzo trudny. Dodatkowo, kompozyty są często używane w połączenie z innymi materiałami, takimi np. jak wypełnienia piankowe, co prowadzi do powstawania mieszanych strumieni odpadów [131, 132].

Największą część rynku stanowią termoutwardzalne kompozyty polimerowe, wzmacniane włóknami szklanymi. W samej Europie rocznie na rynek trafia ponad milion ton takich kompozytów [133]. Z racji budowy samego kompozytu, tj. jego niejednorodnej struktury, recykling jest bardzo skomplikowany. Kompozytów takich nie można powtórnie przetopić, aby uzyskać nowy element. Materiały te poddaje się recyklingowi na dwa sposoby [134]:

 recykling mechaniczny, który jest stosunkowo prosty, mało kosztowny i najpowszechniejszy. Zużyte materiały poddaje się rozdrabnianiu, mieleniu oraz klasyfikacji. W wyniku tych procesów otrzymuje się recyklat, który można ponownie wykorzystać. recykling termiczny – wykorzystanie wysokiej temperatury (300-1000°C) do pyrolizy żywicy oraz separacji włókien i wypełniaczy. Czyste włókna mogą być następnie wykorzystane do dalszej produkcji (posiadają jednak gorsze właściwości od włókien pierwotnych), natomiast pozostały materiał wykorzystuje się jako paliwo.

Jeśli chodzi o kompozyty wzmacniane włóknami węglowymi, zależnie od technologii produkcji kompozytów, ilość odpadów włókien weglowych wynosi 30-40%, w skali światowej daje to obecnie ok. 24 kt, a prognozuje się, że w 2021 roku ilość odpadów włókien węglowych wyniesie 32 kt. Obecnie recyklingowi poddaje się mniej niż 1 kt. Około 2/3 wszystkich odpadów włókien to odpady z produkcji, a 1/3 to włókna ze zużytych części. Znaczną część z odpadów tworzyw sztucznych stanowią materiały kompozytowe wzmacniane włóknami (FRC), ponieważ mają szeroki wachlarz zastosowań, m.in. w budownictwie, aeronautyce, przemyśle lotniczym, artykułach sportowych, przemyśle energii odnawialnej. Materiały FRC charakteryzują się dużą wytrzymałością, dużą trwałością, niską masą i dużą elastycznością kształtów, co czyni je dobrą alternatywą dla stali i innych materiałów. Rozwój branży FRC nie tylko zwiększył produkcję i konsumpcję, ale również prowadzi do powstania dużej ilości materiałów wycofanych z eksploatacji (EOL – ang. End of life products). Konserwacja i recykling zużytego złomu FRC stał się ważnym wyzwaniem dla zrównoważonej gospodarki o obiegu zamkniętym. W 2015 roku, w samej tylko Unii Europejskiej, wyprodukowano prawie 300 tys. ton odpadów kompozytowych, z czego 250 tys. ton to produkty EOL. Obecnie większość odpadów kompozytowych (prawie 98%) trafia na wysypisko, a te, które poddawane są dalszej obróbce, najczęściej wykorzystywane są jako paliwo. Ponieważ wykorzystywanie materiałów kompozytowych ciągle wzrasta, istotne jest opracowanie rozwiązań w celu redukcji powstających odpadów [135, 136].

2.6. Podsumowanie przeglądu literatury

W powyższym przeglądzie literatury dokonano szczegółowego omówienia różnych rodzajów kompozytów. Dokonano analizy właściwości włókien lnianych w kontekście ich zastosowania w materiałach kompozytowych, ze szczególnym uwzględnieniem ich zalet w porównaniu z włóknami syntetycznymi (np. szkło, węgiel). Omówiono zastosowanie haftu technicznego oraz przedstawiono istniejące rozwiązania w zakresie wzmacniania kompozytów, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania tkanin. Przedstawiono również problem dotyczący recyklingu kompozytów i ich wpływu na środowisko naturalne.

Autorzy dostrzegają lukę w istniejącej literaturze dotyczącą zastosowania haftu technicznego jako elementu wzmacniającego w kompozytach, zwłaszcza w kontekście zrównoważonego rozwoju. Z tego powodu, zdecydowano się podjąć ten temat badawczy w niniejszej pracy.

3. Badania wstępne – właściwości mechaniczne haftu technicznego wykonanego z włókien lnianych

Pierwszy etap badań był etapem wstępnym, którego celem było zbadanie podstawowych właściwości mechanicznych haftu technicznego. Analiza różnych orientacji niedoprzędu lnianego oraz porównanie wytrzymałości haftu wielowarstwowego z pojedynczymi komponentami stanowiła fundament dla dalszych, bardziej kompleksowych badań. Wyniki wstępnych analiz pozwoliły na precyzyjne sformułowanie hipotez dotyczących optymalnej konstrukcji haftu jako wzmocnienia kompozytów. Na rysunku poniżej wskazano etap prac omawianych w poniższym rozdziale.



Rysunek 18. Schemat prac badawczych

3.1. Materiały i metody

Badanie obejmowało zaprojektowanie oraz wykonanie haftów jednooraz wielowarstwowych. Trzy pierwsze warianty składały się z jednej warstwy haftu. Poszczególne warianty różniły się pomiędzy sobą kierunkiem ułożenia niedoprzędu:

- pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki,
- pod kątem 90° do kierunku wzdłużnego próbki,
- pod kątem 45° do kierunku wzdłużnego próbki,

Wybrano różne kąty ułożenia niedoprzędu (0°, 90° i 45° względem kierunku wzdłużnego próbki) w celu zbadania wpływu kierunku włókien na właściwości mechaniczne wykonanego haftu technicznego. Projekty haftów wykonano w oprogramowaniu GiS BasePack wersja 10, służącego do wykonywania wzorów hafciarskich (rysunki 19-21).



Rysunek 19. Sposób ułożenia niedoprzędu pod kątem 0º do kierunku wzdłużnego próbki [źródło własne]



Rysunek 20. Sposób ułożenia niedoprzędu pod kątem 90º do kierunku wzdłużnego próbki [źródło własne]



Rysunek 21. Sposób ułożenia niedoprzędu pod kątem 45º do kierunku wzdłużnego próbki [źródło własne]

Czwarty rodzaj haftu składał się z trzech warstw haftu, ułożonych kolejno na sobie. Warstwy ułożone było pod kierunkami: 0°, 90° oraz 0°.

Długość ściegu zyg-zag dla wszystkich wariantów haftu wynosiła 4 mm.

Wszystkie hafty zostały wykonane z niedoprzędu lnianego firmy Safilin o masie liniowej 400 tex. Poliestrowa przędza firmy Ariadna o masie liniowej 25 tex została użyta do wykonania ściegu mocującego typu zyg-zag. Właściwości niedoprzędu według informacji producenta zestawiono w tabeli nr 5 [137].

Parametr	Wartość
Masa liniowa	400 tex
llość skrętów na metr	40
Kolor	Naturalny
Zawartość włókien lnianych	100 %
Pochodzenie lnu	Unia Europejska
Pranie	TAK (alkaliczne)
Wybielanie	NIE
Apreturowanie	NIE
Kondycjonowanie	NIE
Wilgotność włókien	~9%
Siła zrywająca	32 N
Wytrzymałość	8 cN/tex
Wydłużenie	1 %
Moduł rozciągania	12 GPa
Gęstość włókien	1,44 g/cm ³

Tabela 5. Właściwości niedoprzędu Inianego

Haft został wykonany na tkaninie bawełnianej o splocie płóciennym o masie powierzchniowej 125 g/m². Aby wyeliminować nierówności na powierzchni haftu, pod tkaniną umieszczono włókninę poliestrową o masie powierzchniowej 35 g/m².

Wytworzone warianty haftu przedstawiono na zdjęciach poniżej.



Rysunek 22. Haft techniczny o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki



Rysunek 23. Haft techniczny o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 90° do kierunku wzdłużnego próbki



Rysunek 24. Haft techniczny o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 45° do kierunku wzdłużnego próbki



Rysunek 25. Haft techniczny składający się z trzech warstw o kierunkach ułożenia niedoprzędu pod kątem kolejno 0°, 90°, 0° do kierunku wzdłużnego próbki

Wykonane w ten sposób hafty poddano badaniom wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu. Badania przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN ISO 13934-1 [138]. Tożsamym badaniom poddano również niedoprzęd lniany oraz przędzę mocującą, z których wykonane były hafty. Badania te przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN ISO 2062: 2010 [139].

W celu zbadania wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu, przeprowadzono test polegający na stopniowym rozciąganiu próbki przy stałej prędkości aż do jej zerwania. W trakcie tego procesu zarejestrowano wartość wydłużenia względnego przy osiągnięciu maksymalnej siły oraz maksymalnej siły zrywającej,

Badanie przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej SHIMADZU, która miała ustaloną stałą stopę wydłużania. Maszyna była wyposażona w komputer z dedykowanym oprogramowaniem do sterowania jej funkcjami. Widok maszyny przedstawiono na rysunku nr 26.



Rysunek 26. Maszyna wytrzymałościowa SHIMADZU

Parametry badania haftów przedstawiono w tabeli nr 6.

Parametr	Wartość
Wymiary próbki	150 mm x 15 mm
Odległość zacisków	100 mm
Prędkość rozciągania	100 mm/min
Liczba pomiarów	5

Tabela 6. Parametry badań wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu haftów

Parametry badania niedoprzędu oraz nici mocującej przedstawiono w tabeli nr 7.

Tabela 7. Parametry badań wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu niedoprzędu oraz nici mocującej

Parametr	Wartość
Długość próbki	350 mm
Odległość zacisków	250 mm
Prędkość rozciągania	250 mm/min
Liczba pomiarów	25

Próbki zostały umieszczone w luźnym stanie między zaciskami maszyny. Oś próbki przebiegała przez środek zacisków. W celu dodatkowego zabezpieczenia, próbka została pneumatycznie przytwierdzona w szczękach. Oprogramowanie rejestrowało wartości maksymalnej siły oraz wydłużenia względnego w punkcie osiągnięcia tej siły. Każda próbka była stopniowo rozciągana do chwili zerwania.

Wyniki zostały przedstawione w formie wykresów zależności siły od wydłużenia (rysunek 27). Z uzyskanych wyników obliczono średnią arytmetyczną. Rezultaty zostały zestawione na zbiorczych wykresach dla poszczególnych wariantów próbek.

3.2. Analiza wyników badań

Jako początkowy etap badań porównano wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu jednowarstwowych układów haftów. Wyniki te zestawiono z układem składającym się z trzech warstw haftu. Na rysunku 27 poniżej przedstawiono wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie od wydłużenia badanych wariantów.



Rysunek 27. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od wydłużenia przy rozciąganiu haftów jednowarstwowych oraz trójwarstwowego haftu

Do poziomu wytrzymałości około 2 MPa oraz wydłużenia około 2,5 %, wszystkie charakterystyki są do siebie zbliżone. Od tego poziomu, wytrzymałość oraz wydłużenie haftów o układach 90° oraz 45° przebiega niemal identycznie. Układ 45° wykazał się minimalnie większą wytrzymałością, natomiast mniejszym wydłużeniem, od układu 90°. Różnice były statystycznie nieistotne. Te dwa warianty wykazały się znacząco mniejszą wytrzymałością od wariantu 0° oraz od trójwarstwowego układu haftu. Na podstawie przebiegu wykresu 0° zauważyć można, iż próbki nie podlegały rozciąganiu w sposób równomierny podczas całego przebiegu badania - może to wskazywać na miejscowe osłabienia lub wzmocnienia próbek. Po osiągnięciu wartości około 13 MPa, próbki były na tyle zniszczone, iż przy wzroście wydłużenia śniła rozciągająca nie zwiększała swoje wartości. Trzywarstwowy układ haftu wykazał się znacząco większym wydłużeniem od pozostałych wariantów, a jego wytrzymałość była o prawie 35 % większa. Proces rozciagania w przypadku tego wariantu również nie był równomierny na każdym etapie, szczególnie jest to widoczne w ostatniej fazie przed destrukcją próbki. Bezpośredni kontakt włókien ułożonych pod kątem prostym względem siebie, połączony z działaniem sił rozciągających, powodował wzajemne przesuwanie się i pękanie zarówno włókien niedoprzędu, jak i nitki mocującej, co miało bezpośredni wpływ na wytrzymałość całego haftu

Na rysunku nr 28 zestawiono maksymalne wartości wytrzymałości badanych wariantów haftów.



Rysunek 28. Średnia maksymalna wytrzymałość na rozciąganie haftów jedno- oraz trzywarstwowych

Spośród haftów składających się z jednej warstwy, największą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzował się układ 0°. W tym układzie wszystkie włókna ułożone były zgodnie z kierunkiem działającej siły rozciągającej, zatem spośród wszystkich wariantów najwięcej włókien brało udział w procesie rozciągania. W przypadku ułożenia włókien pod kątem 90°, na samym początku rozciągania praktycznie żadne włókno nie bierze udziału w tym procesie. Ułożenie niedoprzędu w sposób ciągły powoduje, że wraz z rozciaganiem, cześć włókien może dażyć do zmiany położenia z ułożenia 90° do 0°. Jednak faktyczny udział włókien w procesie rozciagania i tak będzie niewielki. W przypadku tej próbki, większość obciążeń skupiona jest na nitce mocującej oraz podkładzie, na którym został wykonany haft. W przypadku układu 45°, sytuacja wygląda podobnie. Jednak w tym przypadku występuje większy udział sił ścinających, powodujących zmianę położenia włókien z układu 45° do układu 0°. Natomiast porównując do siebie próbki 90° oraz 45°, różnica w ich wytrzymałości jest bardzo mała i wynosi około 0,10 MPa. Odchylenie standardowe wariantu 90°, wynoszące tylko 0,24 MPa, wskazuje na małą zmienność w wynikach, co oznacza, że wyniki próbek 90° są stosunkowo stabilne i spójne. Odchylenie standardowe wariantu 45° wynoszące 0,72 MPa wskazuje na umiarkowaną zmienność wyników, ale jest wyższe niż w próbce 90°, co oznacza, że wyniki próbek 45° są bardziej zróżnicowane.

Haft z układem 0° jest około dwa i pół razy bardziej wytrzymały od haftów 90° i 45°. Natomiast haft, który składał się z trzech warstw, wykazał się o około 30 % wyższą wytrzymałością na rozciąganie od układu 0°. Odchylenie standardowe wariantu 0° wynoszące 1,43 MPa wskazuje na zmienność w wynikach próbki 0, co oznacza, że wyniki próbek tej grupy mogą różnić się dość znacząco. Dla trójwarstwowego wariantu, odchylenie standardowe było mniejsze i wynosiło 0,56 MPa. Zwiększenie liczby warstw haftu wpływa zatem na poprawę stabilności wyników badań.

Na rysunku nr 29 zestawiono średnie maksymalne wartości wydłużenia poszczególnych wariantów haftów.



Rysunek 29. Średnie maksymalne wydłużenie przy rozciąganiu haftów jedno- oraz trzywarstwowych

Spośród jednowarstwowych układów haftów, największym wydłużeniem charakteryzował się układ 0°. Wydłużenie to wynosiło 17,5 %. Jednak biorąc pod uwagę odchylenie standardowe tej wartości, różnice statystyczne pomiędzy tym wariantem a 90° oraz 45° nie są znaczące. Zdecydowanie największym wydłużeniem w momencie zerwania próbki wykazał się trójwarstwowy haft. Jego wydłużenie przy zerwaniu osiągnęło wartość około 27 %. Jednak jego odchylenie standardowe również było znaczące, co wskazuje na dużą nierównomierność prób względem siebie.

Na rysunku nr 30 przedstawiono siłę zrywającą oraz wydłużenie kolejnych prób niedoprzędu lnianego.



Rysunek 30. Siła zrywająca oraz wydłużenie niedoprzędu Inianego użytego do wykonania haftu technicznego

Niedoprzęd lniany cechował się znaczącymi fluktuacjami wytrzymałości, co skutkowało zróżnicowanymi wynikami. W wyniku przeprowadzonych 25 prób, uśredniona wytrzymałość na rozciąganie po przeliczeniu wyniosła 7,37 cN/tex, przy odchyleniu standardowym na poziomie 1,89. Podobnie, uśrednione wydłużenie po przeliczeniu wynosiło 1,69 %, z nieznacznie stabilniejszym odchyleniem standardowym równym 0,23.

Na rysunku nr 31 przedstawiono siłę zrywającą oraz wydłużenie kolejnych prób nici poliestrowej, która została wykorzystana do przymocowania niedoprzędu lnianego w procesie wykonywania haftu technicznego.



Rysunek 31. Siła zrywająca oraz wydłużenie przy rozciąganiu nitki poliestrowej użytej do wykonania haftu technicznego

Wytrzymałość nitki poliestrowej prezentowała się jako bardzo stabilna i powtarzalna w badaniach. W wyniku przeprowadzenia 25 prób, średnia wytrzymałość na wydłużenie wyniosła 45,33 cN/tex, co potwierdzono przy niewielkim odchyleniu standardowym na poziomie 0,50. Dodatkowo, uśrednione wydłużenie po przeliczeniu wynosiło 31,95 %, z odchyleniem standardowym wynoszącym 0,85.

3.3. Wnioski

Mimo że deklarowana przez producenta wytrzymałość niedoprzędu na rozciąganie wynosi 8 cN/tex, wyniki badań wskazują na średnią wytrzymałość 7,37 cN/tex, co może wynikać z różnorodności próbek, metod pomiaru, warunków testowania lub jakości samego materiału. Duże odchylenie standardowe wskazuje na znaczną zmienność wytrzymałości między poszczególnymi próbami, co sugeruje, że wytrzymałość rzeczywista może się wahać w szerokim zakresie i nie zawsze osiąga wartość podawaną przez producenta.

Średnie wydłużenie niedoprzędu lnianego uzyskane w badaniach (1,69 %) jest wyraźnie wyższe niż wartość podawana przez producenta (1 %). Mniejsze odchylenie standardowe (0,23) w porównaniu do wytrzymałości wskazuje na większą stabilność wyników wydłużenia, chociaż nadal przekracza wartość deklarowaną przez producenta.

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono, iż najwyższą wytrzymałość haftu na rozciąganie uzyskuje się w przypadku równoległego ułożenia niedoprzędu lnianego do kierunku działania siły rozciągającej. Natomiast ułożenie niedoprzędu pod kątem 90° oraz 45° nie ma istotnego znaczenia dla wytrzymałości próbki.

Zwiększenie ilość warstw haftu nie wpływa wprost proporcjonalne do zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie. Natomiast zwiększenie liczby warstw haftu wpływa na poprawę stabilności wyników badań.

Problemem napotkanym w trakcie wykonywania haftu było nierównomierne odwijanie niedoprzędu lnianego z nawoju, skutkujące zrywami oraz powstawaniem naddatków. Na etapie kolejnych prób zniwelowano to poprzez modyfikację układu podającego niedoprzęd.

Wykonane badania posłużyły do opracowania układów haftów służących do wykonania preformy kompozytów. Dzięki tym badaniom możliwe było bardziej efektywne i precyzyjne wykonywanie preformy, co przyczyniło się do lepszej jakości produkowanych wzmocnień kompozytów.

4. Badania wytrzymałościowe kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny

Wstępne badania przedstawione w rozdziale nr 3 skupiły się na charakterystyce mechanicznej samego haftu. Opierając się na wynikach tych badań, zaprojektowano sześciowarstwowe struktury haftu o różnych układach włókien, służące jako wzmocnienie kompozytów. Na rysunku 32 wskazano na pomarańczowo drugi etap badań eksperymentalnych rozprawy, opisany w poniższym rozdziale.



Rysunek 32. Schemat prowadzonych badań

4.1. Materiały i metody

Przedmiotem następnego etapu badań były kompozyty polimerowe, zawierające jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów technicznych. Haft został wykonany z niedoprzędu lnianego firmy Safilin o masie liniowej 400 tex oraz monofilamentu poliamidowego firmy Gunold o masie liniowej 11 tex. Długość ściegu zyg-zag wynosiła 2 mm, natomiast szerokość 1,2 mm. Jak wiadomo z pierwszego etapu badań, wytrzymałość niedoprzędu lnianego wynosiła 7,37 cN/tex, natomiast wydłużenie wynosiło 1,69 %. Jako podkład do wykonania haftu służyła włóknina poliestrowa o masie powierzchniowej 35 g/m² oraz tkanina bawełniana o masie powierzchniowej 280 g/m².

Wytworzono sześć wariantów próbek badawczych. Każdy wariant wykonany był z siedmiu warstw o zróżnicowanym ułożeniu niedoprzędu. Poszczególne warianty różniły się pomiędzy sobą kierunkiem ułożenia niedoprzędu w poszczególnych warstwach w stosunku do kierunku wzdłużnego próbki. Zastosowano kąty ułożenia: 0°, +45°, 90° oraz -45°. Szczegółowe ułożenie warstw w poszczególnych wariantach zestawiono w tabeli nr 8. W tabeli nr 8 przedstawiono w sposób graficzny orientację niedoprzędu w kolejnych warstwach haftu.

Tabela 8.	Kierunek ułożenia	niedoprzędu w	v kolejnych	warstwach	poszczególnych	wariantów
		, .			, ,	

Numer wariantu	Kierunek ułożenia niedoprzędu w kolejnych warstwach haftu	Graficzna orientacja niedoprzędu w kolejnych warstwach haftu
1	0º, 45º, -45º, 90º, -45º, 45º, 0º	
2	90º, 45º, -45º, 0º, -45º, 45º, 90º	
3	0º, 90º, 0º, 90º, 0º, 90º, 0º	
4	0º, 45º, 0º, -45º, 0º, 45º, 0º	
5	90º, 45º, 90º, -45º, 90º, 45º, 90º	-/-\-/-
6	0º, 0º, 0º, 0º, 0º, 0º, 0º	

Widok wykonanego haftu przedstawiono na rysunku nr 33.



Rysunek 33. Haft techniczny z włókien Inianych [źródło własne]

Wykonane hafty zostały następnie zalaminowane żywicą epoksydową i wytworzono z nich kompozyty, wykorzystując metodę worka próżniowego. Do wykonania kompozytów wykorzystano żywicę epoksydową HAVEL Composites LH145 oraz utwardzacz HAVEL Composites H135 w proporcji 100:35. Właściwości żywicy podano w tabeli nr 9.

Parametr	Wartość
Gęstość formy płynnej	1,15 kg/l
Czas utwardzania	4 godz.
Właściwości u	twardzonej żywicy
Całkowity skurcz objętościowy	1-2 %
Temperatura ugięcia pod wpływem ciepła	65 ºC
Wytrzymałość na zginanie	100 N/mm ²
Moduł sprężystości przy zginaniu	2,8-3,0 kN/mm ²
Wydłużenie przy zerwaniu	4,5-5,0 %
Wytrzymałość na rozciąganie	60-70 N/mm ²

Tabela 9. Właściwości żywicy użytej do wykonania kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien Inianych

Wykonanie kompozytów polegało na ręcznym nasączaniu warstw haftu mieszaniną żywicy oraz utwardzacza, szczelnym zamknięciu całego pakietu w elastycznym worku próżniowym, a następnie usunięciu zbędnego powietrza wraz z nadmiarem mieszaniny żywicznej za pomocą pompy próżniowej. Ciśnienie wewnątrz układu wynosiło około 70-80 kPa. Proces utwardzania przeprowadzony był w 25°C i trwał ponad 4 godziny. Próbki były wyjmowane z worka po minimum 24 godzinach.

Na poniższym rysunku przedstawiono zdjęcie gotowego kompozytu.



Rysunek 34. Wytworzony kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien Inianych [źródło własne]

Wytworzone próbki poddano następnie badaniom wytrzymałościowym – wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenie przy rozciąganiu oraz wytrzymałości

na zginanie. Badania zostały przeprowadzone na maszynie INSTRON 4485 wyposażonej w 50 kN głowicę.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu prowadzone było w oparciu o normę PN-EN ISO 527-4 [140]. Badanie to polegało na rozciąganiu ze stałą prędkością przygotowanych próbek, aż do momentu ich zerwania. W czasie rozciągania rejestrowane były wartości wydłużenia względnego przy maksymalnej sile, wartości siły maksymalnej, wartości siły zrywającej oraz wartości wydłużenia względnego przy rozerwaniu. Parametry badania przedstawiono w tabeli nr 10.

Tabela 10. Parametry badania wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu sześciu wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów

Parametr	Wartość
Wymiary próbki	190 mm x 20 mm x 5 mm
Odległość zacisków	100 mm
Prędkość rozciągania	100 mm/min
Liczba pomiarów	5

Wyniki badań zostały podane w formie danych liczbowych (tabela nr 12) oraz wykresu wytrzymałości w funkcji wydłużenia (rysunek 35).

Odporność na zginanie została zbadana w oparciu o normę BS EN ISO 14125:1998 [141]. Próbę tę wykonano według schematu trójpunktowego wraz z rejestracją siły zginającej. Badanie polegało na umieszczeniu próbki na podporze, zawierającej dwa punkty styku z próbką, a następnie oddziaływanie na próbkę górnym ramieniem maszyny. Badanie prowadzono do momentu zniszczenia próbki lub chwili styku dolnej powierzchni próbki z podporą. W ramach badania wyznaczono maksymalną siłę zginającą oraz naprężenie. Parametry badania przedstawiono w tabeli nr 11.

Tabela 11. Parametry badania odporności na zginanie sześciu wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów

Parametr	Wartość
Wymiary próbki	190 mm x 20 mm x 5 mm
Odległość podpór	80 mm
Prędkość przemieszczania ramienia	5 mm/min
Liczba pomiarów	5

4.2. Analiza wyników badań

4.2.1. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy rozciąganiu

Na rysunku nr 35 przedstawiono zależność naprężenia rozciągającego poszczególnych wariantów od ich wydłużenia.



Rysunek 35. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie wyprodukowanych kompozytów

Przy wydłużeniu wynoszącym około 0,3% można zauważyć zmianę nachylenia wykresów. Jest to charakterystyczna cecha rozciągania kompozytów w zakresie odkształceń odwracalnych modułu. Wskazuje to na pojawienie się pęknięcia w pierwszej warstwie kompozytu, osiągając stan tzw. FPF (ang. *First Ply Failure*), co skutkuje nieodwracalnymi zmianami. Przed tą zmianą pojawiały się pojedyncze, rozproszone mikropęknięcia, które nie powodowały zauważalnych zmian na wykresie rozciągania. Dopiero nagromadzenie pęknięć naruszających grubość kompozytu powyżej 0,1 mm doprowadziło do zmiany nachylenia diagramu obciążenia.

Wariant 6 wykazał najwyższą wytrzymałość na rozciąganie. W tym wariancie układ włókien w hafcie był zgodny z działaniem siły rozciągającej. Zniszczenie próbki nastąpiło wtedy, gdy wszystkie włókna zaangażowane w rozciąganie zostały całkowicie przerwane. W przypadku innych wariantów, maksymalna wytrzymałość na rozciąganie była niższa. W tych próbkach włókna były ułożone pod różnymi katami do działającej siły rozciągającej

i z tego powodu dodatkowo poddawane były ścinaniu, zginaniu i siłom rozerwania, co obniżało wytrzymałość badanych kompozytów. Po pojawieniu się początkowych pęknięć, struktura kompozytu nie została całkowicie zniszczona - poszczególne fragmenty przędzy i włókien były wciąż nietknięte i pękały, gdy dołożono więcej siły. Następowało stopniowe rozwarstwianie i gromadzenie się mikropęknięć, co ostatecznie prowadziło do całkowitego zerwania próbki.

Tabela nr 12 oraz Rysunek 36a i 36b przedstawiają średnie wyniki kolejnych prób poszczególnych wariantów wraz z wartościami odchylenia standardowego.

Tabela 12. Średnie wydłużenie oraz średnia maksymalna wytrzymałość kolejnych wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów

Numer wariantu	Kierunek ułożenia niedoprzędu w kolejnych warstwach haftu	Średnie wydłużenie [%]	Średnia maksymalna wytrzymałość [MPa]
1	0º, 45º, -45º, 90º, -45º, 45º, 0º	3,98 ± 0,24	71,5 ± 3,9
2	90º, 45º, -45º, 0º, -45º, 45º, 90º	3,31 ± 0,02	56,6 ± 4,3
3	0º, 90º, 0º, 90º, 0º, 90º, 0º	3,95 ± 0,27	93,4 ± 7,9
4	0º, 45º, 0º, -45º, 0º, 45º, 0º	3,85 ± 0,30	87,4 ± 3,2
5	90º, 45º, 90º, -45º, 90º, 45º, 90º	2,53 ± 0,48	39,2 ± 6,8
6	0º, 0º, 0º, 0º, 0º, 0º, 0º	5,30 ± 0,14	125,9 ± 6,6



Rysunek 36a i 36b. Średnie wydłużenie oraz średnia maksymalna wytrzymałość kolejnych wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów

Warianty 1, 3 i 4 wykazały się podobnymi wartości średniego wydłużenia, podczas gdy wariant nr 2 charakteryzował się nieco niższym wydłużeniem. Wariant 5 miał najmniejsze wydłużenie spośród wszystkich kompozytów – ponad dwukrotnie mniejsze niż wariant 6. Wariant ten zawierał najwięcej włókien ułożonych pod kątem 90° do działającej siły rozciągającej, dlatego podczas rozciągania włókna te były głównie poddawane siłom ścinającym. W tym wariancie, siły działały prostopadle do kierunku ułożenia włókien. Wysoka zawartość układów o kącie 0° (warianty 3, 4 i 6) zwiększała wartość wydłużenia kompozytów.

Warianty 3 i 4 wykazały podobne wartości wytrzymałości. Nieznacznie bardziej wytrzymały okazał się wariant 3 – zawierał on więcej układów o kącie 0°, więc w procesie rozciągania więcej włókien przenosiło naprężenie. Wariant 2, który zawierał tylko o jeden układ o kącie 0° mniej niż wariant 1, wykazywał wartości wytrzymałości o około 15% niższe niż wariant 1. Najniższą wartością wytrzymałości charakteryzował się wariant 5, który miał największą liczbę układów o kącie ułożenia 90°. Wartości wytrzymałości tego wariantu były około dwukrotnie niższe niż w wariantach 1, 3 i 4 oraz około 25% niższe niż w wariancie 2. Wariant 5 zawierał dwa razy więcej układów o kącie 90° niż wariant 2.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyraźnie stwierdzić, że wariant 6, który zawierał jedynie hafty ustawione pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki, charakteryzował się najwyższą wytrzymałością oraz największym wydłużeniem podczas jednokierunkowego rozciągania. Wartości wytrzymałości tego wariantu są ponad czterokrotnie większe niż wartości wariantu 5 i około dwukrotnie wyższe niż w pozostałych wariantach.

W przypadku wariantu 6 siły rozciągające działają w kierunku podłużnym próbki, dlatego naprężenia rozciągające działają również wzdłuż włókien. W przypadku układu o kącie 90° te siły działają prostopadle, co oznacza, że mniej włókien jest zaangażowanych w proces rozciągania, dlatego te warianty mają niższą wytrzymałość. To samo dotyczy układów o kącie ±45°, gdzie działają również siły ścinające. Koncepcja haftu technicznego polega na systematycznej zmianie orientacji włókien w poszczególnych warstwach laminatu. Dzięki temu można precyzyjnie kierować obciążenia wzdłuż włókien, minimalizując szkodliwe naprężenia ścinające w matrycy, co przekłada się na optymalizację właściwości mechanicznych kompozytu. Ta metoda jest szczególnie

przydatna przy produkcji elementów o złożonych kształtach, gdzie tradycyjne metody układania włókien napotykają ograniczenia.

Dla badania wytrzymałości na rozciąganie, wyniki testu Kruskala-Wallisa (p = 0,0137), przy przyjętym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$) wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej, która brzmiała: rodzaj zastosowanego wzmocnienia (kierunek ułożenia włókien w próbce) nie ma wpływu na wytrzymałość kompozytu.

Dla wartości wydłużenia, wyniki testu Kruskala-Wallisa (p = 0,0174), przy przyjętym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$) wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej, która była taka sama, jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie.

Wyniki badań potwierdziły hipotezę, iż kierunek ułożenia włókien w strukturze wpływa na własności mechaniczne gotowego kompozytu.

4.2.2. Wytrzymałość na zginanie

Tabela nr 13 i rysunek 37 przedstawiają średnie wartości wytrzymałości na zginanie kolejnych wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów.

Tabela	13.	Średnie	wartości	wytrzymałości	па	zginanie	kompozytów	zawierających	jako	wzmocnienie	haft
techniczny											

Numer	Kierunek ułożenia niedoprzędu w	Średnia maksymalna wytrzymałość na				
wariantu	kolejnych warstwach haftu	zginanie [MPa]				
1	0º, 45º, -45º, 90º, -45º, 45º, 0º	96,45 ± 7,76				
2	90º, 45º, -45º, 0º, -45º, 45º, 90º	78,53 ± 1,75				
3	0º, 90º, 0º, 90º, 0º, 90º, 0º	106,58 ± 0,74				
4	0º, 45º, 0º, -45º, 0º, 45º, 0º	120,71 ± 3,88				
5	90º, 45º, 90º, -45º, 90º, 45º, 90º	61,96 ± 1,58				
6	0º, 0º, 0º, 0º, 0º, 0º, 0º	141,09 ± 1,50				



Rysunek 37. Średnie wartości wytrzymałości na zginanie kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny

Spośród wyprodukowanych kompozytów wariant 6 wykazał najwyższą wytrzymałość na zginanie, osiągając maksymalny poziom wytrzymałości wynoszący 141 MPa. Wariant 5 wykazał wartości wytrzymałości ponad dwukrotnie niższe niż wariant 6.

Wariant 4, który zawierał 4 warstwy niedoprzędu ułożonego pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki, charakteryzował się wysoką wytrzymałością na zginanie, wynoszącą około 120 MPa. Wariant 3, o podobnej strukturze do wariantu 4, był nieco mniej wytrzymały. Oba te warianty (3 i 4) miały taką samą liczbę warstw o kącie ułożenia niedoprzędu 0° (cztery), podczas gdy pozostałe warstwy różniły się od siebie. Porównując te dwa warianty, można stwierdzić, że układ niedoprzędu pod kątem 45° ma bardziej korzystny wpływ na zwiększenie wytrzymałości na zginanie niż układ pod kątem 90°. W przypadku gdy niedoprzęd ułożony jest w kierunku 45° do kierunku wzdłużnego próbki, włókna są poddawane siłom zginającym, ścinającym i rozciągającym. Natomiast gdy niedoprzęd jest ustawiony w kierunku 90°, siły działają prostopadle do kierunku włókien, a udział włókien w procesie zginania jest mniejszy. Różnica w maksymalnych wartościach wytrzymałości osiągniętych dla tych dwóch wariantów wynosi około 15%.

Warianty 1 i 2 zawierały te same warstwy o kącie 90°, 45° i –45°, ale różniły się liczbą warstw o kącie 0°. Opcja 1 miała dwie z nich, podczas gdy opcja 2 miała jedną. Tak mała różnica w liczbie warstw o kącie 0° pozwoliła zwiększyć wytrzymałość o około 15%.

Podobnie jak w przypadku testów wytrzymałości na rozciąganie, warianty 2 i 5 miały najniższe wartości wytrzymałości na zginanie.

Na rysunku nr 38 przedstawiono charakterystykę wytrzymałości na zginanie oraz ugięcie wyprodukowanych kompozytów.



Rysunek 38. Wytrzymałość na zginanie oraz ugięcie wyprodukowanych kompozytów

Wszystkie warianty charakteryzowały się podobnym przebiegiem krzywych na wykresach. Wariant 6 charakteryzował się najwyższą wytrzymałością na zginanie, ponieważ posiadał największą liczbę układów o ułożeniu pod kątem 0°. Jest to analogiczna sytuacja jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie. Warianty 2 i 5 charakteryzowały się bardzo podobnymi przebiegami wykresów, jednak wariant 2 osiągnął znacznie większe ugięcie. Konstrukcja tych wariantów była niemal identyczna i składały się one głownie z układów $\pm 45^{\circ}$ oraz 90°. Wariant numer 2 zawierał jednak jako środkową warstwę układ 0°, natomiast wariant nr 5 - -45°. To pozwoliło wariantowi nr 2 na uzyskanie większej wytrzymałości oraz o 50% większego ugięcia. Można zatem wnioskować, iż zwiększony udział włókien ustawionych pod kątem 45° zmniejsza sztywność kompozytu i zwiększa jego ugięcie.

Warianty 1, 3 i 4 wykazywały sukcesywnie wyższe wytrzymałości. Spośród nich, wariant 1 zawierał najmniej warstw o układzie 0° - tylko dwie. Warianty 3 i 4 zawierały cztery takie warstwy - co potwierdza wniosek, że zwiększenie liczby warstw o układzie 0° pozytywnie wpływa na poprawę wytrzymałości kompozytu. W wersji 3, co druga warstwa była ustawiona pod kątem 90°, podczas gdy w wersji 4 - pod kątem 45° i -45°. Obniżona
wytrzymałość kompozytu w przypadku tych dwóch wariantów wynikała z mniejszej proporcji włókien w procesie zginania.

Wartości maksymalnego ugięcia wszystkich wariantów były podobne i wynosiły około 6 mm. Jedynym wyjątkiem był wariant 2 - jego ugięcie wynosiło ponad 9 mm. Warstwy z niedoprzędem ułożonym pod kątem $\pm 45^{\circ}$ i 90° w stosunku do kierunku działania siły wpływają na zmniejszenie sztywności kompozytu. Można to zauważyć po mniejszym nachyleniu krzywej na wykresie. Im więcej warstw o kącie $\pm 45^{\circ}$ i 90° zawierał kompozyt, tym mniejszą posiadał sztywność - można to szczególnie zaobserwować w przypadku wariantów 2 i 5.

Wyniki testu Kruskala-Wallisa (p = 0,0064), przy przyjętym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$) wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej, która zakładała, iż kierunek włókien w próbce nie ma wpływu na wytrzymałość na zginanie.

Wyniki badań potwierdziły hipotezę, iż kierunek ułożenia włókien w strukturze wpływa na własności mechaniczne gotowego kompozytu.

4.3. Wnioski

Przedstawione w powyższym rozdziale badania prezentują wyniki testów wytrzymałościowych kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów. Do wykonania wzmocnień użyto włókien lnianych ze względu na jego dużą wytrzymałość – największą spośród wszystkich naturalnych włókien roślinnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, wyciągnięto następujące wnioski:

 Większość kompozytów polimerowych jest klasyfikowana jako materiały kruche, a więc ich względne wydłużenie wynosi od 1% do 3% [142]. Spośród wyprodukowanych wariantów tylko wariant 5, zawierający najwięcej systemów o kącie 90°, osiągnął wydłużenie poniżej 3%. Pozostałe warianty oscylowały wokół 4% - wydłużenie wariantu 6 wyniosło ponad 5%. W tkaninach, które najczęściej używane są do wzmocnienia kompozytów, występuje wrobienie spowodowane przemiennym przeplotem przędz osnowy i wątku. To nie pozwala na pełne wykorzystanie ich właściwości mechanicznych. W przypadku haftu, takie wrobienie nici nie występuje, więc włókna mogą przenosić pełne obciążenie.

- 2. Kombinacja systemów o kącie ułożenia niedoprzędu 90°, 45° i -45° (wariant 5) wykazała najniższe wartości wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia przy rozciąganiu oraz wytrzymałości na zginanie. Ten wariant zawierał najwięcej, bo aż 4, systemy o ułożeniu włókien pod kątem 90°. Ponadto, wariant 2, który również składał się głównie z systemów o kącie 90°, 45° i -45°, wykazał niskie wartości wytrzymałości. Można więc wnioskować, że układ włókien w kierunku prostopadłym i ukośnym do działania sił rozciągających i momentu zginającego nie wpływa istotnie na poprawę właściwości mechanicznych danego kompozytu. Z drugiej strony układ niedoprzędu, a więc włókien lnianych, w kierunku siły rozciągającej, ma pozytywny wpływ na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie. Wynika to z większej liczby włókien zaangażowanych w rozciąganie. Jednak, przy układaniu włókien pod kątem do działania siły, poza siłą rozciągającą, działają również siły ścinające i zginające, co dodatkowo obniża wytrzymałość badanego produktu.
- 3. Test zginania to jedna z metod statycznego określania właściwości wytrzymałościowych materiałów. Wraz z zwiększeniem udziału warstw o kącie 0°, wytrzymałość na zginanie badanych kompozytów rosła. Wynikało to z większej liczby włókien zaangażowanych w proces zginania.

5. Analiza porównawcza właściwości mechanicznych kompozytów wzmocnionych haftem technicznym, tkaniną oraz jednokierunkowym układem niedoprzędu

Przedstawione w poprzednich rozdziałach (3 oraz 4) badania koncentrowały się na jednym rodzaju haftu, o długości 2 mm. W kolejnych badaniach zdecydowano się skupić na porównaniu różnych długości ściegu, w celu wyboru najbardziej optymalnej długości ściegu typu zyg-zag. Celem tych badań było sprawdzenie, czy długość ściegu zyg-zag, przekładająca się na ilość wkłuć igły w strukturę haftu oraz zawartość monofilamentu tworzącego ścieg ma wpływ na wartości wytrzymałościowe kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny. Na rysunku nr 39 zaznaczono etap prac badawczych, który będzie poruszany w poniższym rozdziale.



Rysunek 39. Schemat prowadzonych badań

Zawarte w poniższym rozdziale badania prezentują porównanie trzech różnych długości ściegu haftu: 2, 4 oraz 8 mm. Przedstawione jest to na rysunku nr 40.



Rysunek 40. Wizualizacja użytych długości ściegu zyg-zag [źródło własne]

Przedmiotem wszystkich przedstawionych w tym rozdziale badań były kompozyty, zawierające jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych. W celu porównania, wykonano również kompozyty zawierające jako wzmocnienie tkaninę lnianą oraz materiał o jednokierunkowym ułożeniu włókien (materiał UD), również wykonany za pomocą haftu technicznego. Tkanina firmy Safilin wykonana była z niedoprzędu lnianego o masie liniowej 400 tex. Do wytworzenia haftu technicznego oraz układu UD również wykorzystano niedoprzęd firmy Safilin o masie liniowej 400 tex oraz monofilament firmy Gunold o masie liniowej 11 tex. Szerokość ściegu wynosiła 1,2 mm. W przypadku materiału UD, ten sam niedoprzęd lniany został zamocowany do podłoża jedynie na końcach próbki, co zobaczyć można na rysunku nr 41.



Rysunek 41. Po lewej: Jedna warstwa haftu. Po prawej: materiał UD [źródło własne]

Wykonano ułożenie jednokierunkowe w danej warstwie. Miało to na celu równoległe ułożenie włókien w jednym kierunku, eliminując przy tym wrobienie i odkształcenie nitek, które jest typowe dla tkanin.

Zarówno hafty, jak i materiał UD został wykonany na podkładzie z tkaniny bawełnianej o masie powierzchniowej 280 g/m² oraz włókniny poliestrowej o masie powierzchniowej 35 g/m².

Tkanina lniana wykonana była z tego samego niedoprzędu, z którego wykonane zostały hafty. Masa powierzchniowa tkaniny o splocie płóciennym wynosiła 400 g/m². Wrobienie nitek wynosiło 2 %. Widok tkaniny przedstawiono na rysunku nr 42.



Rysunek 42. Tkanina Iniana wykorzystana do wykonania kompozytów

Ogółem wytworzono pięć rodzajów wzmocnień:

- Haft techniczny o długości ściegu 2 mm
- Haft techniczny o długości ściegu 4 mm
- Haft techniczny o długości ściegu 8 mm
- Jednokierunkowy układ niedoprzędu lnianego, również wykonany na maszynie hafciarskiej (UD fabric).
- Tkanina Iniana

Ze wszystkich próbek zostały następnie wykonane kompozyty metodą infuzji. Metoda ta polegała na ułożeniu przygotowanych wcześniej próbek na formie wykonanej z laminatu, przykryciu ich poliestrową tkaniną pomocniczą oraz siatką prowadzącą, a następnie zamknięciu układu workiem foliowym i uszczelnieniu go taśmą butylową. Na dwóch przeciwnych brzegach układu zostały zamocowane rurki odprowadzające powietrze oraz doprowadzające mieszankę żywiczną. Składała się ona z żywicy epoksydowej SR GreenPoxy 33 i utwardzacza SD4772 w stosunku 100:32.

Proces odsysania powietrza z sytemu do wytworzenia kompozytu i iniekcji mieszanki żywicznej był prowadzony jednocześnie do czasu przesycenia całego kompozytu, zaś podciśnienie 1 Bar utrzymywane było aż do utwardzenia się kompozytu (minimum 4 godziny). W celu odprowadzenia nadmiaru mieszanki żywicznej z kompozytu zastosowano naczynie przejściowe (ang. resin trap), które umieszczone zostało na drodze laminat-pompa próżniowa. Po przesączeniu żywicą, cały układ był utwardzany przez minimum 4 godziny w temperaturze 50°C.

Kompozyty zawierające wzmocnienie w postaci haftu o określonych długościach ściegu poddano badaniom wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu; wytrzymałości na zginanie (ILSS - Interlaminar shear strength); oraz odporności na pękanie (DCB - Double Cantilever Beam). Każdy kolejny podrozdział prezentuje wyniki badań kolejnych testów wytrzymałościowych.

5.1. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy rozciąganiu

5.1.1. Materiały i metody

Badaniom poddano kompozyty zawierające jako wzmocnienie pięć rodzajów wytworzonych wzmocnień. Dodatkowo, wybrane warianty wytworzone zostały w trzech kierunkach ułożenia niedoprzędu. W sumie wytworzono zatem 12 rodzajów wzmocnień. Każdy układ wzmocnień składał się z czterech warstw. Poszczególne warianty próbek przedstawiono w tabeli nr 14.

Wariant	Oznaczenie	Graficzna orientacja niedoprzędu w kolejnych warstwach	Masa powierzchniowa suchej próbki [g/m2]	Masa powierzchniowa kompozytu [g/m2]	Stosunek objętościowy włókna do żywicy [%]
Haft 0⁰ 2mm	0º 2mm		1424	3439	41
Haft 0º 4mm	0º 4mm		1273	3318	38
Haft 0º 8mm	0º 8mm		1227	3561	34
Haft ±45º 2mm	±45º 2mm		1387	3425	40
Haft 90⁰ 2mm	90º 2mm		1515	5015	30
Haft 90⁰ 4mm	90º 4mm		1303	3455	38

Tabela 14. Rodzaje wytworzonych wzmocnień

Haft 90º 8mm	90º 8mm		1227	3561	34
Materiał UD 0º	0º UD		1281	3502	36
Materiał UD ±45º	±45º UD	$\backslash / / \backslash$	1010	1923	52
Materiał UD 90º	90º UD		1327	3408	39
Tkanina 0º/90º	Tkanina 0º/90º		1802	4309	42
Tkanina ±45⁰	Tkanina ±45º	\times	1867	4254	44

Po zakończeniu w pełni procesu utwardzania żywicy (po 24 godzinach), gotowy kompozyt został wyciągnięty z formy i przygotowany do badań. Wszystkie kompozyty zostały następnie pocięte na próbki o odpowiedniej wielkości. W przypadku próbek przeznaczonych do testu wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia przy rozciąganiu, do wcześniej odpowiednio przygotowanego kompozytu zostały przymocowane wsporniki. Wykonane one były z włókna szklanego i zostały umocowane na brzegach kompozytu. Miało to za zadanie zredukować koncentrację naprężeń w obrębie mocowań próbki w zaciskach maszyny testującej.

Badania wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN ISO 527-4 [143]. Test polegał na rozciąganiu przygotowanych próbek ze stałą prędkością aż do momentu ich zerwania. W trakcie rozciągania rejestrowane były wartości względnego wydłużenia przy maksymalnej sile, wartości maksymalnej siły, wartości siły zerwania oraz wartości względnego wydłużenia w momencie zerwania. Badania przeprowadzono na maszynie uniwersalnej INSTRON model 8032 przy pomocy głowicy 100 kN. Wydłużenie próbek mierzono za pomocą ekstensometru o długości wzorcowej 50 mm.

Parametry testu przedstawiono w tabeli nr 15.

Parametr	Wartość
Wymiary próbki	250 mm x 25 mm x 3,5 mm
Odległość zacisków	100 mm
Prędkość rozciągania	1 mm/min
Liczba pomiarów	5

Tabela 15. Parametry testu wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu

Wyniki testu przedstawiono w formie danych liczbowych oraz wykresu naprężenia rozciągającego w funkcji wydłużenia.

5.1.2. Analiza wyników badań

Na rysunku nr 43 przedstawiono maksymalne wartości wytrzymałości na rozciąganie poszczególnych badanych wariantów kompozytów.



Rysunek 43. Maksymalne wartości wytrzymałości na rozciąganie

Wytrzymałość na rozciąganie jest największa w przypadku działania siły wzdłuż próbki (układy 0°). W tych układach, najwięcej włókien bierze udział w procesie rozciągania.

Spośród kompozytów zawierających jako wzmocnienie układy o kierunku 0°, największą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzował się wariant o długości ściegu

4 mm. Był on około 10% bardziej wytrzymały od wariantu 8 mm oraz 15% bardziej wytrzymały od wariantu 2 mm. Zaobserwować zatem można, iż zbyt duża ilość wkłuć igły podczas haftu (wariant 2 mm) wpływa negatywnie na wytrzymałość kompozytu. Spowodowane jest to prawdopodobnie uszkodzeniem struktury próbki, co zmniejsza jej wytrzymałość. Również zbyt szeroki ścieg (8 mm) nie poprawia wytrzymałości. W tym przypadku mniej monofilamentu trzyma niedoprzęd, więc ogólnie mniej materiału bierze udział w procesie rozciągania, niż w przypadku próbek zawierających ścieg o długości 4 mm, co wpływa na zmniejszenie wytrzymałości całej próbki. Warianty UD oraz kompozytu wzmocnionego tkaniną wykazały się zdecydowanie mniejszą wytrzymałością na rozciąganie od wariantów zawierających jako wzmocnienie haft UD jedynie 60% techniczny. Wariant posiadał wytrzymałości wariantu 4 mm, natomiast tkanina jedynie 46%. W przypadku wariantu UD, niska wytrzymałość spowodowana była chaotycznym ułożeniem niedoprzedu w próbce. Pomimo tego, iż w procesie haftowania niedoprzęd był przymocowany w kierunku wzdłużnym, nie udało się uniknąć falowania oraz przemieszczania się niedoprzędu pomiędzy poszczególnymi warstwami. Tkanina natomiast posiada dwa układy nitek, przeplatających się wzajemnie pod kątem prostym na całej długości próbki. Teoretycznie, przy czterech warstwach tkaniny, udział w rozciąganiu bierze 8 nitek, jednak faktycznie połowa z nich ułożona jest pod kątem 90° do działającej siły rozciągającej, zatem nie przenoszą one znaczącej ilości obciążeń. Z tego powodu, próbka zawierająca tkaninę wykazała się prawie dwukrotnie mniejszą wytrzymałością, od próbek zawierających jako wzmocnienie haft techniczny.

Charakterystyka wytrzymałościowa kompozytów zawierających niedoprzęd ułożony pod kątem 90° była proporcjonalna do układów 0°. Również największą wytrzymałością wykazał się wariant 4 mm, a najmniejszą wariant UD. Wyjątkiem był tutaj wariant zawierający jako wzmocnienie tkaninę. Wykazał się on kilkukrotnie większą wytrzymałością od pozostałych próbek. Powodem tego była budowa samej tkaniny – połowa nitek ułożona była pod kątem 0° do działającej siły rozciągającej, zatem to one odpowiadały za wytrzymałość próbki. W pozostałych wariantach nie występowała taka sytuacja, wszystkie niedoprzędy ułożone były pod kątem 90° do działającej siły. Również w przypadku tych wariantów można było zaobserwować zależność, iż haft wpływa na poprawę wytrzymałości kompozytu. Wariant 8 mm posiadał dwukrotnie większą wytrzymałość od wariantu UD, wariant 2 mm – trzykrotnie większą, natomiast wariant

4 mm – dwuipółkrotnie większą. Wynikało to z większego uporządkowania włókien w strukturze próbki oraz dodatkowego materiału, jakim był monofilament.

W przypadku ułożenia niedoprzedu pod katem ±45°, przeprowadzono badania dla kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft 2 mm, UD oraz tkaninę. Jak można zauważyć na wykresie nr 43, największą wytrzymałością na rozciąganie wykazała się próbka zawierająca jako wzmocnienie tkaninę. Wszystkie warianty wzmocnień składały się z czterech warstw, jednak tkanina zawiera w jednej warstwie dwa układy nitek, zatem ilość nitek przenoszących obciążenie była dwukrotnie większa. Pomimo tego, próbka z haftem była jedynie o 20% mniej wytrzymała, przy czym jej masa powierzchniowa była o prawie 25 % mniejsza. Oznacza to, że zastosowanie haftu miało pozytywny wpływ na wytrzymałość kompozytu. Cały kompozyt był wzmocniony "rusztowaniem" z haftu niedoprzęd ułożony był na płaszczyźnie próbki, a w płaszczyźnie prostopadłej do niej, mocujacy monofilament przechodził przez kompozyt. Wariant UD był zdecydowanie najmniej wytrzymały na rozciąganie – wykazał się jedynie jedną trzecią wytrzymałości haftu. Wpływ na tak niską wytrzymałość miała chaotyczna struktura wzmocnienia. W przypadku haftu niedoprzęd jest zamocowany w dokładnie predefiniowanym miejscu, dlatego w każdym punkcie próbki siła rozciągająca działała pod kątem ±45°. Natomiast niedoprzęd w próbce UD był ułożony chaotycznie, co można zobaczyć na rysunku nr 44. Z tego powodu, siły rozciągające działały pod różnymi kątami.



Rysunek 44. Widok kompozytu zawierającego jako wzmocnienie materiał UD wykonany na hafciarce komputerowej.

Z powodu występowania w tkaninie dwóch prostopadłych względem siebie układów nitek, wartości wytrzymałości na rozciąganie przy sile działającej pod kątem 0° oraz 90° są takie same. Tkanina charakteryzuje się większą izotropowością własności mechanicznych w porównaniu do jednokierunkowych ułożonych haftów oraz materiałów UD (rysunek nr 43). Warianty haftowane natomiast charakteryzują się dużą rozpiętością wyników wytrzymałości na rozciąganie, w zależności od kierunku ułożenia niedoprzędu w próbce, a co za tym idzie, kierunku działającej siły. W przypadku haftów zarówno 2, jaki i 4 mm, próbki zawierające niedoprzęd ułożony pod kątem 0° do działającej siły, wykazały się prawie sześciokrotnie większą wytrzymałością od próbek zawierających niedoprzęd ułożony pod kątem 90°. Natomiast porównując haft 8 mm, różnica ta była prawie dziesięciokrotna. Powodem tak niskiej wytrzymałości układów 90° jest mała ilość włókien biorąca udział w procesie rozciągania. W przypadku siły działającej pod kątem ±45°, w rozciąganiu bierze udział więcej włókien (porównując do siły działającej pod kątem 90)° oraz występują siły ścinające. Dlatego wartość wytrzymałości haftu 2 mm była prawie dwukrotnie większa w przypadku siły działającej pod kątem $\pm 45^{\circ}$, niż w przypadku siły 90°. Te zależności pozwalaja na optymalne wykorzystanie właściwości haftu. W przypadku tkaniny lub materiału UD rozmieszczenie włókien w gotowym produkcie często jest dosyć losowe. Z kolei haft pozwala precyzyjnie planować i mocować włókna w określony sposób. Dlatego, jeśli kierunek sił działających na kompozyt jest znany, można zoptymalizować jego właściwości, wykorzystując do tego celu haft. W takim przypadku, możemy ułożyć włókna jak najbliżej 0° do siły działającej na produkt, zwiększając tym samym jego wytrzymałość.

Na podstawie wyniku testu Shapiro-Wilka: p = 0,1698 na poziomie istotności α = 0,05 nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu zmiennej dla maksymalnej wytrzymałości przy kierunku 0°.

Wyniki testu Levene'a (p = 0,0299) i testu Browna-Forsythe'a (p = 0,0550), przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wskazują na odrzucenie hipotezy zakładającej jednorodność (równość) wariancji w porównywanych próbach.

Dla wszystkich kierunków ułożenia włókien w próbkach, wyniki testu Kruskala-Wallisa (p=0,0003), przy przyjętym poziomie istotności (α=0,05) wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej, która brzmiała: rodzaj zastosowanego wzmocnienia nie ma wpływu na wytrzymałość kompozytu. Maksymalne wydłużenie podczas rozciągania wyprodukowanych kompozytów przedstawiono na rysunku 45.



Rysunek 45. Maksymalne wydłużenie badanych kompozytów

Biorac pod uwagę kompozyty zawierające jako wzmocnienia hafty ułożone pod kątem 0°, analogicznie jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie, największym wydłużeniem charakteryzował się układ haftowany 4 mm, następnie 8 mm, a na końcu 2 mm. Układ 4 mm wykazał się 25% większym wydłużeniem od wariantu 2 mm, oraz 20% wiekszym wydłużeniem od wariantu 8 mm. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie układ UD 0° wykazał się najmniejszym wydłużeniem z tej grupy wzmocnień (warianty 0°). Jego wydłużenie było o 30% mniejsze od wariantu 4 mm. Zdecydowanie największym wydłużeniem charakteryzował się kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę. Wynika to z faktu, iż niedoprzęd w strukturze tkaniny ma wrobienie (2 %), co wpływa na zwiększenie wydłużenia. Materiał UD nie posiada natomiast takiego wrobienia. Niższe wydłużenie kompozytów zawierających haft jako wzmocnienie wynika także z udziału nici mocującej, która zwiększa sztywność całego kompozytu. W przypadku wariantów 0°, maksymalne wydłużenie kompozytu zawierającego jako wzmocnienie tkanine było około dwukrotnie większe od pozostałych próbek. Spowodowane to było budową samej tkaniny. Zawiera ona bowiem dwa układy prostopadłych względem siebie nitek, zatem więcej włókien brało udział w procesie rozciągania. Wartości wydłużenia tkaniny były takie same zarówno w przypadku siły działającej pod kątem 0°, jak i 90°.

Układy haftowane 0° wykazały się większym wydłużeniem od układów 90°. Spowodowane to jest działaniem siły rozciągającej wzdłuż osi włókien. W obrębie wariantów zawierających układy haftowane 90°, również największym wydłużeniem wykazał się wariant 4 mm. Wartości wydłużenia 2 i 8 mm były prawie takie same, różnica wynosiła zaledwie 1% i są statystycznie nieistotne. Natomiast różnica pomiędzy tymi wariantami, a 4 mm, wynosiła 15%. 4 mm jest zatem optymalną długością ściegu – pomiędzy dużą liczbą przeigłowań osłabiających strukturę (wariant 2 mm), a zmniejszoną ilością monofilamentu wzmacniającego haft (wariant 8 mm). Wariant UD w tej grupie (układy 90°) wykazał się najmniejszym wydłużeniem spośród wszystkich przebadanych kompozytów. Podczas rozciągania kompozytu prostopadle do kierunku ułożenia włókien siła rozciągająca jest przenoszona przede wszystkim przez żywicę która jest krucha i charakteryzuje się znacznie mniejszymi własnościami mechanicznymi niż włókno. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę był około pięciokrotnie większy od pozostałych wariantów 90°. Tak samo jak w przypadku wariantów 0°, jest to spowodowane większym udziałem włókien w procesie rozciągania.

Porównując do siebie wszystkie układy haftowane i UD, wariant 2mm o kierunku ułożenia niedoprzędu pod kątem $\pm 45^{\circ}$, wykazał się największym wydłużeniem. Dzieje się tak, ponieważ po przyłożeniu siły rozciągającej, w kompozycie dochodzi najpierw do działania sił ścinających i zginających. Włókna w kompozycie najpierw muszą pokonać drogę z ułożenia $\pm 45^{\circ}$ do ułożenia w kierunku 0° - wtedy poddawane są działaniu siły rozciągającej. Z tego też powodu największym wydłużeniem spośród wszystkich wykonanych kompozytów, wykazał się wariant zawierający jako wzmocnienie tkaniną ułożoną pod kątem $\pm 45^{\circ}$ względem działającej siły.

Rozpatrując osobno każdy kierunek ułożenia włókien (0°, 90° oraz ±45°), w każdym przypadku to kompozyt UD wykazywał najmniejsze wydłużenie. W hafcie, niedoprzęd przytrzymywany jest dodatkowo przez nitkę mocującą, czyli monofilament. W przypadku materiału UD, niedoprzęd zamocowany był tylko na końcach próbki, a na całej jej długości jego układ nie był kontrolowany. Dochodziło do powstawania niekontrolowanych falowań na długości próbki i przesuwania się niedoprzędu pomiędzy warstwami. Włókna były ułożone pod różnymi kątami do działającej siły, co mogło wpływać na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie. Jednak układy haftowane zawierały dodatkowo monofilament. Ten element również przenosił obciążenia, co wpłynęło na zwiększenie wydłużenia układów haftowanych w porównaniu do wariantów UD.



Na rysunku nr 46 przedstawiono wykresy wytrzymałości od wydłużenia wszystkich wariantów ułożonych pod kątem 0° do działającej siły rozciągającej.

Rysunek 46. Wykres zależność wytrzymałości od wydłużenia wariantów 0°

W obrębie wariantów 0°, wszystkie trzy rodzaje haftów (2, 4 oraz 8 mm), posiadały podobną do siebie charakterystykę procesu rozciągania (rysunek 46). Różniły się jedynie maksymalną wytrzymałością oraz wydłużeniem. Zauważyć można, iż w porównaniu do nich, kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę, charakteryzował się zdecydowanie mniejszą wytrzymałością na rozciąganie oraz większym wydłużeniem oraz mniejszym modułem Younga. Pomimo tego, iż w 4 warstwach tkaniny było 8 warstw niedoprzędu, nadal to haft wykazał się większą wytrzymałością na rozciąganie. Jednak z tego też powodu, tkanina posiada większe wydłużenie w porównaniu do haftu. Przewaga wytrzymałości haftu spowodowana jest użyciem monofilamentu w strukturze haftu, który wzmacnia całą próbkę.



Rysunek 47. Widok próbek o układzie niedoprzędu 0º po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie

Na zdjęciach przedstawiających próbki po teście rozciągania (rysunek 47) można zauważyć, że w przypadku kompozytów wzmocnionych haftem pęknięcie było poziome. Wszystkie niedoprzędy w tych systemach przenosiły zatem podobną liczbę obciążeń. Kompozyt zawierający materiał UD jako wzmocnienie, z kolei pękał w sposób nierównomierny, ponieważ niedoprzęd w tym kompozycie nie były dokładnie ułożony pod kątem 0° do działającej siły rozciągającej. Pęknięcie kompozytu zawierającego jako wzmocnienie tkaninę było zbliżone do poziomej linii – jednak jak można zauważyć, nie wszystkie nitki w tkaninie uległy zerwaniu w tym samym miejscu. Może być to spowodowane wrobieniem nitek.

Na rysunku nr 48 przedstawiono wykresy wytrzymałości od wydłużenia wszystkich wariantów ułożonych pod kątem 0° do działającej siły rozciągającej.



Rysunek 48. Wytrzymałość oraz wydłużenie wariantów 90°

W przypadku układu niedoprzędu pod kierunkiem 90° w strukturach haftowanych, monofilament haftujący jako jedyny przenosi obciążenia działającej siły rozciągającej – siły rozciągające działają prostopadle do kierunku ułożenia włókien lnianych, a w samej żywicy dochodzi do mikropęknięć. Dlatego też, układy te wykazały się najniższą wytrzymałością na rozciąganie ze wszystkich przebadanych wariantów. Jednocześnie, przy układzie 90°, próbki haftowane wykazywały się większą wytrzymałość na rozciąganie, niż próbka zawierająca UD. Ze względu na swoją budowę, tkanina wykazała się zdecydowanie większym wydłużeniem i większą wytrzymałością na rozciąganie – większy udział włókien w procesie rozciągania.



Rysunek 49. Widok próbek o układzie niedoprzędu 90º po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie



Rysunek 50. (ciąg dalszy) Widok próbek o układzie niedoprzędu 90° po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie

Wygląd próbek po teście rozciągania przedstawiono na rysunku 49. Pęknięcie próbek zawierających jako wzmocnienie haft oraz materiał UD, w których niedoprzęd ułożony był pod kątem 90° do przyłożonej siły był linią prostą. Włókna niedoprzędu nie były ułożone pod kątem 0° do przyłożonej siły, więc nie można było zaobserwować widocznych pionowych pęknięć próbek. W przypadku kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft, tylko monofilament, odpowiadał za przeniesienie obciążenia. Natomiast w przypadku próbki zawierającej tkaninę jako wzmocnienie, można było zauważyć nieregularne, ukośne pęknięcie. Spowodowane jest to udziałem dwóch, prostopadłych do siebie układów nici w tkaninie.



Rysunek 51. Wytrzymałość oraz wydłużenie wariantów ±45°

W przypadku ułożenia włókien pod kątem ±45° do kierunku działania siły rozciągającej, haft 2 mm oraz tkanina wykazywały się początkowo bardzo zbliżoną

charakterystyką wytrzymałościową (rysunek 50). Jednak kompozyt zawierający tkaninę osiągnął ostatecznie ponad dwukrotnie większe wydłużenie. Monofilament mocujący niedoprzęd w hafcie nie pozwolił na osiągnięcie maksymalnego wydłużenia. Struktura tkaniny również przyczynia się do jej większego wydłużenia – przędze posiadają wrobienie, więc gdy są rozciągane, najpierw ulegają wyprostowaniu, a następnie rozciągają się. Nieuporządkowana struktura wariantu UD miała wpływ na jego niskie parametry wytrzymałościowe, zdecydowanie niższe od pozostałych kompozytów.



Rysunek 52. Widok próbek o układzie niedoprzędu ±45° po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie

W przypadku działania siły pod kątem ±45° do kierunku włókien można było zaobserwować pęknięcia ułożone pod tym samym kątem (rysunek 51). Jest to szczególnie widoczne w przypadku kompozytu zawierającego materiał UD jako wzmocnienie. W tej wersji struktura włókien była ułożona najluźniej. Na zdjęciu przedstawiającym próbkę zawierającą haft, można wyraźnie zobaczyć pozostałości monofilamentu tworzącego haft - był on w dużej mierze odpowiedzialny za wytrzymałość próbki. Dlatego ta wersja okazała się silniejsza niż wariant zawierający tkaninę UD. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę wykazał się poziomym pęknięciem.

Dla wszystkich rodzajów włókien, wyniki testu F dla jednoczynnikowej analizy normalności rozkładu wariancji (p = 0,0000), przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej.

Wyniki testu Levene'a (p = 0,1157) i testu Browna-Forsythe'a (p = 0,2887), przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wskazują na brak podstaw do odrzucenia hipotezy zakładającej jednorodność (równość) wariancji w porównywanych próbach. W przypadku kompozytów zawierających włókna ułożone pod kątem 0°, wyniki testu F dla jednoczynnikowej analizy wariancji (p = 0,0000), przy przyjętym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$) wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej, która brzmiała: rodzaj zastosowanego wzmocnienia nie ma wpływu na wydłużenie kompozytu.

W przypadku kompozytów zawierających włókna ułożone pod kątem 90°, wyniki testu Kruskala-Wallisa (p = 0,003), przy przyjętym poziomie istotności (α = 0,05) wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej, która brzmiała: rodzaj zastosowanego wzmocnienia nie ma wpływu na wydłużenie kompozytu.

W przypadku kompozytów zawierających włókna ułożone pod kątem ±45°, wyniki testu Kruskala-Wallisa (p = 1), przy przyjętym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$) wskazują na brak podstaw do odrzucenia weryfikowanej hipotezy zerowej, która brzmiała: rodzaj zastosowanego wzmocnienia nie ma wpływu na wydłużenie kompozytu.

Wariant o kącie ułożenia włókien ±45° jest wariantem pośrednim pomiędzy kątami 0° oraz 90°, a więc dwoma skrajnymi orientacjami pod względem wydłużenia. Zmiana kąta od 0° do ±45° oraz od ±45° do 90° nie powoduje istotnie statystycznych różnic w wartościach wydłużenia kompozytu. Wartości wytrzymałości oraz wydłużenia kompozytów z różnymi kierunkami ułożenia włókien zostały zamodelowane i zbadane w rozdziale poświęconym badaniom numerycznym (rozdział nr 6).



Na rysunku nr 52 zaprezentowano moduł Younga kompozytów poddanych badaniu.

Rysunek 53. Moduł Younga testowanych kompozytów

Największą wytrzymałość i największy moduł Younga osiąga się w kompozytach jednokierunkowych (0°) obciążonych w kierunku włókien. Jest to cecha charakterystyczna polimerowych kompozytów konstrukcyjnych. Spośród tych układów, najniższy moduł Younga posiada kompozyt wzmocniony tkaniną – jest on około dwukrotnie niższy od pozostałych układów 0°. Jest to typowa cecha kompozytów wzmacnianych tkaniną – połowa włókien jest ułożona pod kątem 0°, a połowa pod kątem 90° do działającej siły.

Zgodnie z dostępną literaturą, średnia wartość modułu Younga przy kierunku 0° dla kompozytu UD szklano-epoksydowego wynosi około 39 GPa [144], zatem prezentowane w tym badaniu kompozyty zawierające jako wzmocnienie haft techniczny wykazały się około dwukrotnie większą wartością modułu Younga. Wyjątkiem w tym wariancie ułożenia wzmocnień była jedynie tkanina. Posiada wartość modułu Younga na poziomie 30 GPa.

W układach 90°, w kompozytach szklano-epoksydowych, moduł Younga wynosi około 15 GPa [144], zatem również przedstawione w tym badaniu kompozyty wzmocnione niedoprzędem lnianym wykazały się większym modułem Younga – oprócz wariantu UD. Wariant 4 mm – o 70%, wariant 2 mm – o 54%, wariant 8 mm – 37%, kompozyt wzmocniony tkaniną – o prawie 100%. Niższy moduł Younga w przypadku kompozytu zawierającego jako wzmocnienie materiał UD może być spowodowany chaotycznym ułożeniem włókien w próbce – dochodziło to zafalowania niedoprzędu i przesuwania się warstw pomiędzy sobą.

Dla wariantów ±45°, wartości modułu Younga są również około dwukrotnie większe od standardowych kompozytów epoksydowo-szklanych, w przypadku których wartość modułu Younga wynosi około 10 GPa [144].

5.1.3. Wnioski

Podczas testów wykazano, iż kompozyty zawierające haft jako wzmocnienie, poddane rozciąganiu w kierunku 0°, okazały się bardziej wytrzymałe niż próbki zawierające tkaninę lub materiał UD jako wzmocnienie. Zastosowanie haftu technicznego jako wzmocnienia kompozytu wpływa zatem na zwiększenie jego wytrzymałości na rozciąganie w przypadku siły rozciągającej działającej pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki.

Optymalną długością ściegu haftu jest 4 mm. Taki kompozyt charakteryzował się największą wytrzymałością na rozciąganie spośród wszystkich przebadanych wariantów. W przypadku haftu o długości 4 mm, w porównaniu do próbki z tkaniną, wytrzymałość kompozytu była około dwukrotnie większa. W kompozytach zawierających jako wzmocnienie włókna ułożone pod kątem ±45°, próbka zawierająca haft wykazywała podobne wartości wytrzymałości w porównaniu do innych wariantów. Jedynie w przypadku siły działającej pod kątem 90° próbki zawierające haft jako wzmocnienie wykazywały znacznie niższe wartości wytrzymałości

Zbyt duża (wariant 2 mm) lub zbyt mała (wariant 8 mm) ilość wkłuć igły podczas wytwarzania haftu wpływa negatywnie na wytrzymałość kompozytu na rozciąganie.

Rozpatrując każdy kierunek ułożenia wzmocnień, kompozyt ze wzmocnieniem UD wykazywał niższe wartości wytrzymałości i wydłużenia w porównaniu do kompozytów wzmocnionych haftem. Ukazuje to, iż zastosowanie haftu wpływa na uporządkowanie ułożenia włókien w kompozycie oraz zwiększenie jego wytrzymałości na rozciąganie.

Technologia haftu technicznego umożliwia optymalizowanie wartości mechanicznych wzmocnienia kompozytu.

Kompozyty zawierające haft techniczny wykonany z włókien lnianych charakteryzują się większym modułem Younga od kompozytów szklano-epoksydowych.

5.2. Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe (ILSS - Interlaminar shear strength)

5.2.1. Materiały i metody

Badaniom poddano kompozyty zawierające jako wzmocnienie haft techniczny o zróżnicowanych długościach ściegu, tkaninę oraz materiał UD. Zdecydowano się na zbadanie wytrzymałości na zginanie wariantów zawierających jako wzmocnienie włókna ułożone pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki, w celu oceny maksymalnej wytrzymałości kompozytu wzdłuż kierunku wzmocnienia. Wszystkie wzmocnienia zostały wykonane w ten sam sposób, co przy badaniu wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu. W sumie wytworzono i zbadano pięć rodzajów kompozytów. Szczegóły dotyczące wytworzonych kompozytów zestawiono w tabeli nr 16 poniżej.

Wariant	Oznaczenie	Graficzna orientacja niedoprzędu w kolejnych warstwach	Masa powierzchniowa suchej próbki [g/m2]	Masa powierzchniowa kompozytu [g/m2]	Stosunek objętościowy włókna do żywicy [%]
Haft 2mm	2mm		1962	5502	36
Haft 4mm	4mm		1675	4258	39
Haft 8mm	8mm		1675	4211	40
Materiał UD	UD		1735	4487	39
Tkanina	Tkanina	#	1938	4292	45

Tabela 16. Warianty kompozytów poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie

Właściwości odporności na zginanie zbadano zgodnie z normą ASTM D2344 [145]. Test ten przeprowadzono z wykorzystaniem trzypunktowego testu zginania z rejestracją obciążenia. Badanie prowadzono aż do momentu zniszczenia próbki lub momentu, gdy dolna powierzchnia próbki znalazła się w kontakcie z podparciem. Test określił maksymalne obciążenie oraz wytrzymałość próbki w próbie zginania. Określono również rodzaj występujących uszkodzeń.

Wytrzymałość maksymalna obliczono według wzoru

$$F = 0,75 * \frac{P_m}{b * h}$$

gdzie:

F = wytrzymałość, MPa

P_m = maksymalna siła zaobserwowana podczas testu, N

b = szerokość próbki, mm

h = grubość próbki, mm

Parametry testu przedstawiono w tabeli nr 17.

Tabela 17. Parametry testu wytrzymałości na zginanie

Parametr	Wartość
Wymiary próbki	40 mm x 20 mm x 4 mm
Odległość pomiędzy podporami	20 mm
Prędkość zginania	1 mm/min
Liczba pomiarów	5

5.2.2. Analiza wyników badań



Maksymalne wartości wytrzymałości na ścinanie przedstawiono na wykresie poniżej.

Rysunek 54. Wytrzymałość na ścinanie wyprodukowanych kompozytów

Siła przyłożona była do próbek pod kątem 90° względem kierunku ułożenia niedoprzędu. Największą wytrzymałością na ścinanie międzywarstwowe wykazał się kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft techniczny o długości ściegu 2 mm. Następnie kolejno wariant 4 mm, 8 mm, tkanina oraz materiał UD. Ta zależność wynika z ilości monofilamentu wzmacniającego próbkę wzdłuż całej jej długości w płaszczyźnie równoległej do przyłożonej siły. W miarę wzrostu długości szwu ilość monofilamentu w próbce maleje, co przekłada się na niższą wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie materiał UD charakteryzował się najmniejszą wytrzymałością, prawie dwujpółkrotnie mniejszą od najmocniejszego wariantu, czyli

2 mm. Jest to spowodowane chaotycznym układem włókien w tym typie próbki niedoprzęd był przytwierdzony jedynie na krawędziach próbki; na całej jej długości występowały falowania i wzajemne przenikanie się niedoprzędu pomiędzy warstwami. Każdy z wytworzonych wariantów haftu okazał się mocniejszy od tkaniny, pomimo tego, że każdy z układów wzmocnień (zarówno haft jak i tkanina) składał się z czterech warstw, czyli w przypadku tkaniny było to osiem układów nitek. Zastosowanie haftu jako wzmocnienia wpływa zatem pozytywnie na wytrzymałość kompozytu na ścinanie międzywarstwowe. Wariant kompozytu zawierający jako wzmocnienie tkaninę był mniej wytrzymały od wariantów 2 mm i 4 mm oraz zbliżony wytrzymałościowo do wariantu 8 mm. Jest to spowodowane faktem, iż monofilament używany do wykonania ściegu zygzakowego wzmacnia cały kompozyt, przyczyniając się do zwiększenia wytrzymałości na ścinanie między warstwowe. W przypadku wariantu 8 mm w strukturze kompozytu było najmniej tego monofilamentu, dlatego okazał się on najmniej wytrzymały spośród wszystkich wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny.

Wyniki testu Kruskala-Wallisa (p = 0,0002), przy przyjętym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$) wskazują na odrzucenie weryfikowanej hipotezy zerowej, która brzmiała: rodzaj zastosowanego wzmocnienia nie ma wpływu na wytrzymałość na ścinanie kompozytu.

Podczas tego badania, ważnym czynnikiem jest również rodzaj pęknięcia powstającego podczas przyłożenia siły. Według normy [145] pęknięcia można podzielić na: ścinanie między warstwowe, zginanie (ściskanie i rozciąganie) oraz odkształcenie nieelastyczne. Rodzaje powstałych podczas badania pęknięć przedstawiono na rysunkach 54-56.



Rysunek 55. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft o długości ściegu 8 mm, z pęknięciem typu zginanie



Rysunek 56. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę, z pęknięciem typu ścinanie między warstwowe



Rysunek 57. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie materiał UD, z pęknięciem typu ścinanie między warstwowe

W przypadku próbek wzmacnianych materiałem UD (rysunek 56) i tkaniną (rysunek 55) można było zaobserwować powstawanie pęknięć ścinających między warstwowych. Jest to typowe uszkodzenie dla kompozytów zawierających warstwy tkaniny jako wzmocnienie. W przypadku kompozytów zawierających haft jako wzmocnienie, pojawiły się pęknięcia zginające, rozciągające (rysunek 54). W tych przypadkach wytrzymałość na ścinanie między warstwowe w próbce była większa niż ta, przy której zaobserwować można było pęknięcie. Pęknięcie występowało szybciej niż osiągnięcie maksymalnej wytrzymałości. Monofilament stanowił wzmocnienie i zapobiegał powstawaniu pęknięć między warstwowych oraz delaminacji kompozytu.

Należy zauważyć, że test krótkiej belki pozwala poznać typową właściwość S13 laminatu, czyli wytrzymałość na ścinanie poza płaszczyzną. Jest to bardzo dobre wskazanie tego, jak kompozytowy laminat powinien zachowywać się poza płaszczyzną. Podobnie, jest to test właściwości poza płaszczyzną, a nie typowy test zginania. To jest powodem stosunkowo niskich właściwości, ponieważ te właściwości są związane z naprężeniem poza płaszczyzną, a nie ze wytrzymałością na zginanie.

5.2.3. Wnioski

Spośród kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft, największą wytrzymałością na ścianie charakteryzował się kompozyt z haftem technicznym o długości ściegu 2 mm. Mniejszą odpornością wykazały się kolejno kompozyty z haftem 4 mm oraz 8 mm. Kompozyty z haftem technicznym były bardziej wytrzymałe niż te wzmocnione tkaniną i materiałem UD, co świadczy o efektywności zastosowania haftu jako wzmocnienia w kompozytach.

W miarę wzrostu długości ściegu haftu (z 2 mm do 8 mm) maleje wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe kompozytów. Jest to spowodowane mniejszą ilością monofilamentu w próbce przy dłuższym ściegu, co obniża wytrzymałość kompozytu.

Kompozyt z materiałem UD wykazał najniższą wytrzymałość na ścinanie, prawie dwuipółkrotnie mniejszą od kompozytu z haftem 2 mm. Niska wartość wytrzymałości na ścinanie między warstwowe wynika z nierównomiernego układu włókien i niedoprzędu, który powodował falowanie i przenikanie się włókien między warstwami, co skutkowało niską wytrzymałością.

Haft jako wzmocnienie okazał się bardziej efektywny niż tkanina, nawet pomimo tego, że oba materiały składały się z czterech warstw. Monofilament użyty w hafcie zwiększał wytrzymałość kompozytu na ścinanie między warstwami, co przekładało się na lepsze właściwości mechaniczne kompozytu.

Próbki wzmocnione materiałem UD i tkaniną ulegały pęknięciom ścinającym między warstwami, co jest typowe dla kompozytów z warstwami tkaniny.

W kompozytach wzmocnionych haftem pojawiały się pęknięcia zginające i rozciągające, co wskazuje na wyższą wytrzymałość na ścinanie między warstwami i zapobieganie delaminacji kompozytu dzięki monofilamentowi.

Podsumowując, zastosowanie haftu technicznego jako wzmocnienia w kompozytach znacząco poprawia ich wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe w porównaniu do tradycyjnych wzmocnień tkaniną czy materiałem UD. Krótszy ścieg haftu zapewnia lepsze właściwości mechaniczne dzięki większej ilości monofilamentu wzmacniającego strukturę kompozytu.

98

5.3. Odporność na pękanie (DCB - Double Cantilever Beam)5.3.1. Materiały i metody

Test Mode I Interlaminar Fracture Toughness (MIIFT) to metoda badania odporności materiałów kompozytowych na pękanie w trybie I, czyli na rozprzestrzenianie się pęknięcia w kierunku prostopadłym do kierunku włókien w kompozycie. Jest to jedna z metod testowania odporności materiałów kompozytowych na pękanie w warunkach statycznych. Podczas testu wykorzystywane są próbki w kształcie podwójnej belki z zaczepem (ang. *DCB - Double Cantilever Beam*).

Przedmiotem badań były kompozyty, zawierające pięć rodzajów wzmocnień:

- 1) Haft techniczny o długości ściegu 2 mm, wykonany z włókien lnianych,
- 2) Haft techniczny o długości ściegu 4 mm, wykonany z włókien lnianych,
- 3) Haft techniczny o długości ściegu 8 mm, wykonany z włókien lnianych,
- Jednokierunkowy układ niedoprzędu lnianego, również wykonany na maszynie hafciarskiej (materiał UD).
- 5) Tkanina Iniana

Każdy układ wzmocnień składał się z sześciu warstw. We wszystkich wzmocnieniach włókna były ułożone wzdłuż kierunku wzdłużnego próbki. Rodzaje wytworzonych wzmocnień wraz z ich parametrami przedstawiono w tabeli poniżej.

Wariant	Oznaczenie	Masa powierzchniowa suchej próbki [g/m²]	Masa powierzchniowa kompozytu [g/m²]	Stosunek objętościowy włókna do żywicy [%]
Haft 2mm	2mm	1808	5812	31
Haft 4mm	4mm	1602	4568	35
Haft 8mm	8mm	1510	4217	36
Materiał UD	UD	2037	6042	34
Tkanina	Tkanina	2851	6712	42

Wykonanie haftów oraz materiału UD przebiegło w ten sam sposób, co w przypadku poprzednich badań. Wykorzystano również te same materiały.

Po wykonaniu trzech warstw haftu, na części próbki umieszczono folię oraz tkaninę teflonową (rysunek nr 57), umożliwiającą przeprowadzenie testu, a następnie wykonano trzy kolejne warstwy haftu. Obrazuje to rysunek nr 58. W miejscu ułożenia foli nie dokonano przeszyć. Długość wkładki z foli oraz tkaniny wynosiła 60 mm. Zgodnie z normą wymiar ten odpowiadał sumie długości szczeliny powstającej podczas testu oraz długości zaczepów przymocowywanych do próbki. Długość wkładki z ostała oznaczona na wykonanym wzmocnieniu, przed jej pocięciem na mniejsze próbki.



Rysunek 58. Umiejscowienie folii oraz tkaniny teflonowej podczas wykonywania haftu technicznego służącego jako wzmocnienie kompozytu



Rysunek 59. Widok wykonanej próbki

Po wykonaniu kompozytów, na tym końcu próbki, gdzie znajdowała się folia oraz tkanina teflonowa, zamocowano zaczepy, a cały brzeg próbki pokryto najpierw całościowo biała farbą, a następnie za pomocą czarnej farby w sprayu naniesiono kropki umożliwiające precyzyjny pomiar wielkości powstającej podczas badania szczeliny. Widok próbki przedstawiono na rysunku nr 59. Tak przygotowane próbki poddano badaniu odporności na pękanie.



Rysunek 60. Widok próbki przygotowanej do badania DCB

Test został przeprowadzony w oparciu o normę ASTM D 5528-01 [146]. Badanie polegało na rozwarciu próbek poprzez ruch głowicy aż do momentu ich zerwania lub do momentu, gdy pojedyncze pęknięcie wynosiło od 3 do 5 mm. Podczas rozciągania rejestrowano wartości obciążenia oraz długość delaminacji. W trakcie testu rejestrowano także pozycję delaminacji oraz dane dotyczące przemieszczenia obciążenia, w których

zauważono wizualny początek ruchu delaminacji na krawędzi próbki. W trakcie rozciągania rejestrowano wartości obciążenia i przemieszczenia w jak największej liczbie przyrostów długości delaminacji. W pierwszych 5 mm od początku testu, było to co 1 mm. Następnie dane dotyczące obciążenia i przemieszczenia były rejestrowane co 5 mm.

Wielkość rozwarcia próbki oznaczana była jako δ, a mierzona wartość siły to P. Testy przeprowadzono na uniwersalnej maszynie do badań INSTRON z czujnikiem obciążenia o zakresie 50 kN. Prędkość przeprowadzania testu wynosiła 5 mm/min. Parametry testu przedstawione są w tabeli nr 19.

Tabela 19.	Parametry	testu	odporności	na pękanie
------------	-----------	-------	------------	------------

Parametr	Wartość
Wymiary próbki	160 mm x 25 mm x 5 mm
Prędkość rozwierania	5 mm/min
Liczba pomiarów	5
Długość wkładki	60 mm

Dla przeprowadzonego badania próbki stałą materiałową określającą odporność kompozytu na pękanie jest krytyczna wartość współczynnika uwalniania energii, która jest wyznaczana ze wzoru:

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2Ba}$$

gdzie:

G_{Ic} – współczynnik uwalniania energii dla pierwszego sposobu obciążenia (czyste rozrywanie), KJ/m²

P – siła, N

 $\delta-\text{rozwarcie},\,\text{mm}$

B – szerokość próbki, mm

a – długość pęknięcia, mm

Wyniki testu zostały przedstawione w formach wykresów (rysunki 60-64).

5.3.2. Analiza wyników badań

Typowy wykres dla testu Double Cantilever Beam (DCB) przedstawia zależność obciążenia od rozwarcia końcówek belki. Test DCB jest stosowany do badania własności mechanicznych i wytrzymałościowych kompozytów. Wykres dla tego testu przedstawia charakterystykę obciążenia w zależności od przemieszczenia lub rozwarcia końcówek belki.

Na wykresie można zazwyczaj zobaczyć dwie główne fazy testu:

 faza początkowa: W tej fazie siła obciążenia rośnie wraz z przemieszczeniem lub rozwarciem końcówek belki. Jest to obszar, w którym obciążenie nie przekracza wartości granicznej i nie występuje pękanie żywicy lub wzmocnienia.

 faza pękania: W tej fazie siła obciążenia osiąga maksimum, a następnie gwałtownie spada wskutek pęknięcia żywicy lub wzmocnienia. Może być widoczny nagły spadek obciążenia na wykresie, co wskazuje na pęknięcie materiału.

Na poniższych wykresach przedstawiono zależności obciążenia od długości rozwarcia końcówek belek kolejno dla trzech wariantów kompozytów wzmocnionych haftem (rysunek 60) oraz dwóch pozostałych rodzajów kompozytów nie zawierających haftu jako wzmocnienia (rysunek 61).



Rysunek 61. Wykres zależności siły od wielkości rozwarcia próbek kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny

Wykres dotyczący kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft o długości ściegu 2 mm (pomarańczowa linia), od 0 do około 55 N wskazuje, iż w tym zakresie wzrost siły powoduje proporcjonalne zwiększenie długości rozwarstwienia. Przy rozwarciu belek dochodzącym do około 15 mm, zauważyć można zahamowanie przyrostu siły. W tym miejscu obserwuje się zmianę nachylenia wykresu, co może wskazywać na zmiany w zachowaniu materiału lub efekty nieliniowe wpływające na zależność pomiędzy siłą, a długością rozwarstwienia. Może to być spowodowane np. zjawiskiem związanym z reakcją materiału na większe obciążenia. Wykres osiąga maksymalną wartość dla około 60 N. Oznacza to, że dla sił powyżej tego progu długość rozwarstwienia nie rośnie dalej w sposób liniowy, lecz osiąga pewien maksymalny poziom. Przy rozwarciu dochodzącym do 22 mm, próbka ulega pęknięciu.

Charakterystyka wykresu kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft o długości ściegu 8 mm (linia niebieska) przebiega podobnie do wariantu 2 mm. Tutaj również do wartości około 50 N zaobserwować można proporcjonalny wzrost siły oraz rozwarcia końcówek belki. Po osiągnięciu wartości 23 mm, siła pozostaje taka sama. Następnie, po kolejnych kilku milimetrach rozwarcia, próbka ulega pęknięciu.

W przypadku kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft o długości ściegu 4 mm, cały proces przebiegł liniowo (linia szara). Brak jest okresów, w których zmienia się charakterystyka nachylenia wykresu, co można było zaobserwować w przypadku dwóch poprzednich wariantów. Wykres osiąga maksymalną siłę w momencie 62 N. Po przekroczeniu tej siły, próbka ulega zerwaniu. Również wartość rozwarcia, przy którym została osiągnięta maksymalna siła różni się od poprzednich wariantów i wynosi około 40 mm.



Rysunek 62. Wykres zależności siły od wielkości rozwarcia próbek kompozytów zawierających jako wzmocnienie materiał UD oraz tkaninę

Wykres powyżej (rysunek 61) przedstawia zależności obciążenia od długości rozwarcia końcówek belek dla dwóch wariantów kompozytów wzmocnionych kolejno tkaniną (żółta linia) oraz materiałem UD wykonanym za pomocą haftu komputerowego (czerwona linia).

Przyrost siły i rozwarcia w próbce zawierającej jako wzmocnienie tkaninę zachodzi szybciej, niż w przypadku próbki zawierającej jako wzmocnienie materiał UD. Proporcjonalny przyrost siły i rozwarcia osiąga maksymalną wartość na poziomie 32 mm i 57 N. Po osiągnięciu tych wartości, siła wzrasta z mniejsza prędkością w odniesieniu do przyrostu rozwarcia. Maksymalne wartości osiągnięto dla 44 mm i 61 N. Następnie próbka uległa pęknięciu. Dalsze zarejestrowane wartości zostały osiągnięte po znaczących pęknięciach.

Pierwszy schemat pękania Test Mode I Interlaminar Fracture Toughness (MIIFT) służy do wyznaczania odporności osnowy kompozytu warstwowego na delaminację pod działaniem naprężeń normalnych. W przypadku materiałów o jednorodnej strukturze, do analizy procesów pękania kruchego oraz zmęczeniowego wykorzystuje się współczynnik intensywności naprężeń K lub powiązany z nim współczynnik uwalniania energii G_I. Ten ostatni parametr jest obliczany na podstawie energii sprężystej zmagazynowanej w materiale w bezpośrednim sąsiedztwie pęknięcia, która uwalnia się w trakcie jego rozprzestrzeniania. Energia ta związana jest z odkształceniami rozciągającymi i ścinającymi materiału w obszarze otaczającym wierzchołek szczeliny [147]. Dla przeprowadzonego badania próbki stałą materiałową określającą odporność kompozytu na pękanie jest krytyczna wartość współczynnika uwalniania energii. Wartości maksymalne tej energii przedstawiono na rysunku nr 62.



Rysunek 63. Maksymalna wartość współczynnika uwalniania energii badanych kompozytów

Wartości współczynnika uwalniania energii rosły wraz ze wzrostem długości ściegu haftu. Spośród kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny, największą wartością współczynnika uwalniania energii charakteryzował się wariant o długości ściegu 8 mm. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie jednokierunkowy układ włókien (UD) wykazał się najniższą wartością maksymalną współczynnika G₁. Spośród wszystkich przebadanych wariantów, najwyższą wartością współczynnika charakteryzował się kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę. Maksymalna osiągniętą wartość tego wariantu była około dwa razy większa od maksymalnej wartości kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft o długości ściegu 2 mm. W kompozycie zawierającym jako wzmocnienie tkaninę doszło do większej delaminacji, co spowodowało uwolnienie większej ilości energii, przekładając się na większą wartość współczynnika G₁ Wyniki potwierdzają, że haft techniczny jest skutecznym wzmocnieniem, a jego właściwości można modyfikować poprzez zmianę długości ściegu.



Rysunek 64. Maksymalna wartość siły badanych kompozytów

Spośród kompozytów zawierających jako wzmocnienie układy haftowane, najmniejszą wartością siły wykazała się próbka o długości ściegu 4 mm (rysunek 63). Jednak ze statystycznego punktu widzenia, różnice pomiędzy danymi wariantami nie były znaczące. Również kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę wykazał się wartością zbliżoną, a w przypadku wariantu 8 mm – niemalże identyczną a różnice są statystycznie nieistotne. Wariant zawierający jako wzmocnienie jednokierunkowy układ włókien wykazał się około 20% niższą wytrzymałością.

Jednak pomimo tego, iż wartości siły w przypadku poszczególnych wariantów były do siebie bardzo zbliżone, próbki zawierające jako wzmocnienie haft techniczny znacząco odbiegały wartością rozwarcia szczelin, co przedstawiono na rysunku nr 64. Można to również zaobserwować na rysunkach nr 65-67.



Rysunek 65. Maksymalna wartość rozwarcia szczelin badanych kompozytów

Porównując wartości rozwarcia szczelin w przypadku kompozytu zawierającego jako wzmocnienie tkaninę do kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny, zauważyć można, iż w przypadku tkaniny wielkość rozwarcia była kilkukrotnie większa. Zatem przy zbliżonych wartościach siły, haft stanowił znaczącą barierę dla procesu rozwarstwiania kompozytu. W przypadku wariantów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny, największe rozwarcie zostało osiągnięte dla długości ściegu 4 mm, a najmniejsze dla długości 2 mm. Wariant zawierający jako wzmocnienie jednokierunkowy układ włókien wykazał się zbliżoną wartością rozwarcia do wariantu 8 mm – obydwa warianty osiągnęły rozwarcie mieszczące się pomiędzy wartościami rozwarcia 4 oraz 2 mm.

Co jest najważniejsze w przypadku przeprowadzonego badania to fakt, iż w przypadku próbek zawierających jako wzmocnienie haft techniczny, prawie w ogóle nie dochodziło do procesu rozwarstwiania. Haft stanowił barierę dla tego procesu.



Rysunek 66. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft techniczny o długości ściegu 2 mm, podczas przeprowadzenia badania.

Na zdjęciu powyżej (rysunek 65) przedstawiono ujęcie zarejestrowane podczas przeprowadzenia testu wariantu zawierającego jako wzmocnienie haft o długości 2 mm. Został na nim uchwycony moment pęknięcia próbki. Do pęknięcia doszło po 2 mm od miejsca, w którym rozpoczął się haft. Pionowe przeigłowania stanowią zatem barierę dla powstawania procesu rozwarstwiania.



Rysunek 67. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę, podczas przeprowadzania badania.


Rysunek 68. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie materiał UD, podczas przeprowadzania badania.

Na zdjęciach powyżej przedstawiono maksymalne rozwarcie próbek zawierających jako wzmocnienia tkaninę lnianą (rysunek 66) oraz jednokierunkowe ułożenie włókien (rysunek 67). W porównaniu do wcześniej przedstawionego zdjęcia, prezentującego kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft techniczny, na tych ujęciach zauważalna jest znacząca delaminacja próbek. Haft stanowi zatem barierę dla procesu rozwarstwiania kompozytu.

5.3.3. Wnioski

Test Mode I Interlaminar Fracture Toughness (MIIFT) skutecznie ocenia odporność kompozytów na rozwarstwianie w kierunku prostopadłym do włókien.

Kompozyty wzmocnione haftem technicznym (szczególnie o długości ściegu 4 mm i 8 mm) wykazały większą odporność na pękanie w porównaniu do tkaniny lnianej i jednokierunkowego układu włókien (UD). Największą odporność na rozwarstwianie wykazały się kompozyty z haftem o długości ściegu 8 mm.

Kompozyty zawierające tkaninę lnianą miały największe wartości rozwarcia szczelin, co sugeruje, że haft stanowił lepszą barierę dla rozwarstwiania.

Haft techniczny znacząco ograniczał proces rozwarstwiania w porównaniu do innych rodzajów wzmocnienia. Wprowadzenie haftu technicznego wzmocniło kompozyty, tworząc barierę dla procesu rozwarstwiania.

Największe wartości w zakresie odporności na pękanie osiągnięto przy stosowaniu haftu o długości ściegu 8 mm, co może sugerować optymalizację długości ściegu dla przyszłych zastosowań w celu maksymalizacji wytrzymałości kompozytu.

6. Badanie haftu metodą mikrotomografii komputerowej

Ze względu na obserwowane różnice w wytrzymałości kompozytów wzmacnianych haftem lnianym o zróżnicowanej gęstości ściegu, podjęto decyzję o przeprowadzeniu szczegółowej analizy struktury haftu za pomocą mikrotomografii komputerowej. Celem badania było wykrycie potencjalnych mikrouszkodzeń, które mogły powstać podczas procesu wytwarzania haftu i wpływać na wytrzymałość kompozytu. Etap badań zawartych w poniższym rozdziale zaznaczono na schemacie poniżej (rysunek nr 68).



Rysunek 69. Schemat prowadzonych badań

6.1. Materiały i metody

Jak wynika z badań opisanych we wcześniejszych rozdziałach (nr 5), wytrzymałość na rozciąganie kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny zależy od długości ściegu. Największą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzował się kompozyt, w którym długość ściegu wynosiła 4 mm, a najmniejszą – 2 mm. Zdecydowano się na przeprowadzenie badania mikrotomografii komputerowej w celu analizy wkłuć igły, a co za tym idzie, wpływu długości ściegu na strukturę haftu.

Badanie mikrotomografii komputerowej zostało przeprowadzone przy użyciu urządzenia SkyScan 1272. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku nr 69.



Rysunek 70. Mikrotomograf komputerowy (micro-CT) model SkyScan 1272 wyprodukowany przez firmę Bruker (Belgia) [źródło własne]

Obrazy 3D zostały uzyskane za pomocą oprogramowania NRecon 1.7.4.2 oraz CTvox 3.3.0 r1403 firmy Bruker. Parametry geometryczne zostały obliczone przy użyciu oprogramowania CTAn 1.17.7.2+ oraz Data Viewer 1.5.6.2, również firmy Bruker.

Parametry badania zestawiono w tabeli nr 42.

Parametr	Wartość
Napięcie źródła [kV]	50
Natężenie prądu źródła [µA]	200
Rozdzielczość [piksele]	4032 × 2688
Rozmiar piksela [µm]	5
Czas ekspozycji [ms]	400
Skok kątowy obrotu próbki [°]	0,2
Uśrednienie [liczba obrazów dla danego kąta]	4
Filtr	brak

Tabela 20. Parametry procesu skanowania haftu technicznego wykonanego z włókien lnianych

Badaniom poddano trzy rodzaje haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego firmy Safilin o masie liniowej 400 tex. Do wykonania ściegu zyg-zag wykorzystano monofilament poliamidowy firmy Gunold o masie liniowej 35 tex. Haft wykonano na tkaninie bawełnianej o masie powierzchniowej 280 g/m² oraz włókninie poliestrowej o masie powierzchniowej 35 g/m². Wszystkie użyte materiały były takie same, jak w badaniach przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach.

6.2. Analiza wyników badań

Na rysunkach 70-72 przedstawiono obrazy 3D badanych haftów, kolejno o długości ściegu 2 mm, 4 mm oraz 8 mm.



Rysunek 71. Obraz 3D haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego oraz monofilamentu poliamidowego o długości ściegu 2 mm [źródło własne]



Rysunek 72. Obraz 3D haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego oraz monofilamentu poliamidowego o długości ściegu 4 mm [źródło własne]



Rysunek 73. Obraz 3D haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego oraz monofilamentu poliamidowego o długości ściegu 8 mm [źródło własne]

Rysunki przedstawiają trójwymiarowe obrazy wewnętrznej struktury próbek haftu technicznego uzyskane za pomocą mikrotomografii komputerowej. Widoczne są poszczególne włókna lnu tworzące niedoprzęd oraz w dolnej warstwie włókna bawełniane, z których wykonana była tkanina pomocnicza (obydwa włókna oznaczone są kolorem niebieskim). Kontrastowym kolorem (kolejno czerwony, zielony oraz żółty) wyróżniono monofilament poliamidowy, który tworzył ścieg zyg-zag. Na powyższych rysunkach można zauważyć iż ścieg zyg-zag jest na tyle szeroki, iż obejmuje zazwyczaj dwie nitki niedoprzędu. Dzięki temu, struktura haftu ulega dodatkowemu wzmocnieniu.

Na rysunkach poniżej przedstawiono charakterystyczne miejsca wkłuć igły w strukturę haftu.



Rysunek 74a i 73b. Haft o długości ściegu 2 mm z zaznaczonymi charakterystycznymi miejscami wkłucia igły

Na zdjęciu powyżej zauważyć można uszkodzenie włókien lnianych w miejscu ich styku z monofilamentem poliamidowym. Najprawdopodobniej doszło do przerwania ciągłości niedoprzędu lnianego przez nitkę wykonującą ścieg zyg-zag.



Rysunek 75. Haft o długości ściegu 4 mm z zaznaczonymi charakterystycznymi miejscami wkłucia igły

W wielu miejscach zauważyć można było wkłucia igły w strukturę haftu (rysunek nr 74). Podczas wbijania igły, włókna lniane ulegały rozsunięciu, przez co niedoprzęd lniany ulegał zafalowaniu – jego oś nie była zgodna z pierwotnym kierunkiem ułożenia w próbce. Z tego powodu, w przypadku badań wytrzymałościowych, włókna nie były w pełni ułożone pod zaplanowanym kątem, co mogło wpływać na obniżenie wytrzymałości kompozytu.



Rysunek 76. Haft o długości ściegu 2 mm



Rysunek 77. Haft o długości ściegu 4 mm



Rysunek 78. Haft o długości ściegu 8 mm

Na rysunkach 75-77 można zobaczyć widoki haftów o długości kolejno 2, 4 oraz 8 mm. Ze zdjęć jasno wynika, iż wraz ze wzrostem długości ściegu, nitki niedoprzędu ulegają wyprostowaniu, natomiast w przypadku haftu o małej długości ściegu, niedoprzęd ulega mocnemu zafalowaniu. Nie jest zatem zalecana zbyt mała długość ściegu zyg-zag, ponieważ wpływa to zwiększenie falistości niedoprzędu w strukturze haftu.

Odchylenie niedoprzędu od osi jest spowodowane zarówno rozchylaniem się włókien podczas wkłuć igły, jak również samą technologią haftu. Otrzymanie ściegu typu zyg-zag jest wynikiem ruchów wahadłowych stopki podającej niedoprzęd oraz przemieszczaniem się pantografu w osiach x oraz y. Takie ruchy wpływają na zafalowanie niedoprzędu w strukturze haftu.

6.3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań mikrotomografii kompouterowej haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego i monofilamentu poliamidowego, sformułować można następujące wnioski dotyczące wpływu ściegu zyg-zag na strukturę i wytrzymałość haftu technicznego:

 W niektórych miejscach w materiale dochodzi do przerwania ciągłości niedoprzędu. To zjawisko osłabia strukturę, ponieważ ciągłość włókien jest kluczowa dla zapewnienia wytrzymałości i stabilności całego układu.

2. Wkłucia igły powodują rozchylanie się włókien tworzących niedoprzęd, co skutkuje zafalowaniem struktury. Taka zmiana w geometrii materiału prowadzi do obniżenia jego wytrzymałości mechanicznej, ponieważ nierównomierne rozłożenie napięć wzdłuż nitek sprzyja powstawaniu miejsc o zwiększonej podatności na uszkodzenia.

3. Zwiększona falistość niedoprzędu jest bezpośrednim rezultatem działania maszyny hafciarskiej. Technologia haftu ma wpływ na końcową strukturę przędzy, powodując jej charakterystyczne pofalowanie.

4. W przypadku haftu o mniejszej długości ściegu (2 oraz 4 mm) występuje większe zagęszczenie monofilamentu oraz nitki spodniej, w porównaniu do próbek o długości ściegu 8 mm. Większe zagęszczenie tych elementów strukturalnych przekłada się na wyższą wytrzymałość mechaniczną, gdyż zwiększa to ilość materiału nośnego w jednostce objętości próbki.

5. Ścieg zyg-zag, który obejmuje i łączy sąsiadujące nitki niedoprzędu, wzmacnia całą strukturę haftu. Taki sposób przeszycia poprawia spójność i integralność materiału, rozkładając naprężenia bardziej równomiernie i zapobiegając miejscowym osłabieniom.

7. Metodyka badań numerycznych

Przeprowadzone badania, które zostały omówione we wcześniejszych rozdziałach dostarczyły niezbędnych danych eksperymentalnych, które posłużyły jako podstawa do stworzenia szczegółowego modelu symulacyjnego. Celem tych symulacji było dokładne zbadanie wpływu długości ściegu zyg-zag, jego orientacji w kompozycie oraz ilości warstw haftu na wartości wytrzymałościowe kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych. Dzięki temu możliwe było głębsze zrozumienie zjawisk zachodzących w rzeczywistym systemie oraz zweryfikowanie teoretycznych założeń. Na schemacie poniżej przedstawiono etap badań zawarty w poniższym rozdziale.



Rysunek 79. Schemat prowadzonych badań

Badania numeryczne zrealizowano przy pomocy oprogramowania "Patran-Nastran" firmy MSC Software. Badania zakładały weryfikację opracowanego modelu numerycznego i przyjętych parametrów materiałowych dla określonych konfiguracji modelu tj. liczby warstw haftu, długości ściegu oraz kierunku ułożenia niedoprzędu w próbce. Proces ten polegał na porównaniu rezultatów symulacji numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych. Celem tego procesu było wyznaczenie procentowych różnic w wydłużeniu próbki oraz w wartości maksymalnej siły rozciągającej, które wynikają z poczynionych uproszczeń modelu numerycznego.

Modele numeryczne wykonano na podstawie danych z przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach badań (rozdziały 3-5), informacji pochodzących z publikacji naukowych oraz własnych szacunków.

Pierwszy etap badań numerycznych polegał na opracowaniu zhomogenizowanego modelu:

- 1) haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego,
- kompozytu zawierającego jako wzmocnione haft techniczny wykonany z niedoprzędu lnianego.

Ponadto opracowano plan eksperymentu i opracowano 15 dodatkowych modeli numerycznych opartych na danych z przeprowadzonych symulacji komputerowych. Modele te również zostały poddane analizie, a cztery wybrane warianty zostały poddane weryfikacji eksperymentalnej – wytworzono próbki i poddano je badaniom wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu.

7.1 Badania numeryczne haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego

Badania numeryczne haftu technicznego wykonane zostały zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku nr 79.



Rysunek 80. Schemat blokowy etapów badań numerycznych dla haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu Inianego

W pierwszym etapie opracowano model geometryczny haftu technicznego o wymiarach 10 cm x 2 cm (rysunek 80).



Rysunek 81. Model geometryczny haftu technicznego

Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami eksperymentalnymi, modele geometryczne haftu opracowano dla liczby warstw 1 i 3 w odpowiedniej orientacji (tabela 20). Model ten był wzorowany na przeprowadzonym eksperymencie wstępnym opisanym w rozdziale 3. Model geometryczny opracowano jako zhomogenizowaną powłokę (*shell*) przyjmując w danych wejściowych symulacji grubość dla 1 warstwy równą 1,7 mm, a dla 3 warstw 5,7 mm.

LP	llość warstw	Orientacja niedoprzędu	Maksymalna siła zrywająca
1	1	0°	633 N
2	3	0°/90°/0°	1400 N
3	1	45°	220 N

Tabela 21. Właściwości próbek użytych do wykonania modeli wirtualnych

W kolejnym etapie przystąpiono do generacji siatki elementów skończonych (rysunek 81). W tym celu została zdefiniowana siatka składająca się z 709 kwadratowych elementów (781 węzłów). Wymiar pojedynczego elementu skończonego był równy 1,66 mm.



Rysunek 82. Siatka modelu

W dalszej kolejności badań numerycznych przystąpiono do zdefiniowania parametrów materiałowych dla haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego.

Właściwości mechaniczne obliczono i oszacowano na podstawie rozważań dotyczących liczby niedoprzędów lnianych w każdej próbce oraz sposobu ich wzajemnego zszycia nitką wykonywującą haft. Wiedząc, iż masa liniowa niedoprzędu wynosiła 400 tex oraz średnica wynosiła 1,7 mm, obliczono gęstość niedoprzędu. Wynosiła ona w zaokrągleniu 200 kg/m³. Moduł sprężystości (Moduł Younga) niedoprzędu lnianego przyjęto jako 0.76 GPa [148].

Biorąc pod uwagę następujące informacje:

- każda warstwa próbki składa się z 12 niedoprzędów,
- haft został wykonany na tkaninie, pełniącą rolę "podstawy",
- w próbce występuje monofilament, którym wykonano ścieg zygzak,

zdecydowano się na zwiększenie całkowitego modułu sprężystości próbki o 80%. Wynosił on zatem $E_{11} = 1.35$ GPa. Optymalizując proces modelowania oraz porównując szacunki do wyników rzeczywistych (rozdział 3) oszacowano Moduł Younga na większą wartość.

Biorąc pod uwagę moduł sprężystości i moduł ścinania pojedynczego włókna lnianego [149] oszacowano proporcjonalnie wielkości tych wartości dla poszczególnych warstw, które tworzyły próbki haftu. Przedstawiono to w tabeli numer 21. Zebrano tam również parametry materiałowe próbek haftu.

Tabela 22. Właściwości warstw próbek haftu

Moduł sprężystości				
E11	1.35 GPa			
E22	0.4 GPa			
Modu	ł ścinania			
G12	3 GPa			
G23	1.2 GPa			
G13	3 GPa			
Pozostałe parametry materiałowe				
V (Współczynnik Poissona)	0.3			
Podłoże	tkanina bawełniana x g/m2			
Niedoprzęd	Len 400 tex			
Nitka mocująca	Poliester 25 tex			

Po etapie przyjęcia modelu materiałowego dla haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu przystąpiono do ustalenia warunków początkowych i brzegowych symulacji. W celu odwzorowania zakleszczenia jednej z krawędzi próbki, w badaniach numerycznych węzły krawędziowe modelu zamocowano tak, aby nie przemieszczały się w żadnym z kierunków układu współrzędnych XY. W dalszej kolejności zdefiniowano maksymalną siłę zrywającą na przeciwległych krawędziowych węzłach siatki modelu w stosunku do zamocowanych węzłów.

7.1.1. Wynik badań numerycznych haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych oceniano wydłużenie modelu, które następnie weryfikowano w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych. Dodatkowo analizowano rozkład naprężenia dla badanych modeli. Obciążenie wykonano przyjmując działanie siły na prawej krawędzi modelu. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunkach poniżej (rysunki 82-84).

a) Model nr 1: 1 warstwa, 0°, zadana siła: 633 N



Rysunek 83. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 1: 1 warstwa, 0°, siła: 633 N

W przypadku jednowarstwowego haftu o kierunku ułożenia niedoprzędu pod kątem 0°, maksymalne wydłużenie uzyskane w wyniku modelowania wynosiło 18,5 % i można je było zaobserwować na krawędzi, do której przyłożona była siła rozciągająca. Przyrost wartości rozciągania ułożony był równolegle do kierunku wzdłużnego próbki i zgodnie z kierunkiem ułożenia niedoprzędu.

b) Model nr 2: 3 warstwy, 0°/90°/0°, zadana siła: 1400 N



Rysunek 84. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 2: 3 warstwy, 0°/90°/0°, siła: 1400 N

Model składający się z trzech warstw haftu, w których orientacja niedoprzędu wynosiła kolejno 0°, 90° oraz 0°, wykazał się maksymalnym wydłużeniem wynoszącym 25,7 %.

Podobnie jak w przypadku wariantu składającego się z jednej warstwy niedoprzędu ułożonego pod kątem 0°, w modelu tym również można było zaobserwować przyrost wartości wydłużenia zgodnie z kierunkiem wzdłużnym próbki.

c) Próbka nr 3: 1 warstwa, 45°, zadana siła: 220 N



Rysunek 85. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 3: 1 warstwa, 45°, siła: 220 N

Model składający się z jednej warstwy haftu, ułożonego pod kątem 45° do kierunku wzdłużnego, charakteryzował się wydłużeniem na poziomie 15,5 %. W tym przypadku zaobserwować można odchylenie rozkładu przyrostu wydłużenia od kierunku wzdłużnego modelu. Odwzorowuje to działanie sił ścinających w rzeczywistej próbce poddanej działaniu siły rozciągającej.

Wyniki z badań numerycznych zamieszczono w tabeli 22 i porównano je z wynikami badań eksperymentalnych:

LP	Wariant	Wydłużenie z badań numerycznych	Wydłużenie z badań eksperymentalnych	Różnica
1	1 warstwa, 0°, 633 N	18,5 %	17 %	1,5 %
2	3 warstwy, 0°/90°/0°, 1400 N	25,7 %	27,5 %	1,8 %
3	1 warstwa, 45°, 220 N	15,5 %	14 %	1,5 %

Tabela 23. Porównanie wyników z badań numerycznych z wynikami z badań eksperymentalnych

Różnice między wynikami mierzonego wydłużenia podczas testu a wynikami wydłużenia podczas modelowania są niewielkie, oscylując w granicach 1.5-1.8 %.

Są zatem statystycznie nieistotne. Sugeruje to, iż modelowanie dobrze odwzorowuje rzeczywiste zachowanie materiału, ale może być lekko niedoszacowane lub przeszacowane, zależnie od konkretnego przypadku testowego. Różnica jest największa dla próbki 3-warstwowej (1,8%), natomiast mniejsza dla próbek 1-warstwowych (1,5%). Może to wskazywać na fakt, iż model jest bardziej dokładny w przypadku próbek jednowarstwowych niż w przypadku próbek wielowarstwowych.

Przyczyną różnic mogą być błędy występujące podczas pomiaru wydłużenia w testach eksperymentalnych lub zastosowane uproszczenia podczas wykonywania modelu numerycznego.

7.1.2. Analiza wyników badań

Głównym celem pierwszego etap badań numerycznych było zweryfikowanie opracowanego modelu i przyjętych parametrów materiałowych w stosunku do wyników badań eksperymentalnych. Różnice między wynikami modelowania a wynikami badań eksperymentalnych były niewielkie. Dlatego też można uznać, że opracowany model numeryczny poprawnie odwzorowuje rzeczywistość i może posłużyć do dalszych etapów badań numerycznych.

Deformacja próbek nr 1 (1 warstwa, 0°) oraz nr 2 (3 warstwy, 0°/90°/0°) była równoległa do osi X z lekkim symetrycznym ściskaniem w okolicy miejsca, gdzie model był zakleszczony. Różnica między tymi dwiema próbkami polegała na tym, że łuki, które powstały w próbce nr 1 podczas wydłużania, były większe (bardziej zakrzywione) niż łuki, które powstały w próbce nr 2. Dzieje się tak dlatego, ponieważ w próbce nr 1 orientacja pojedynczej warstwy wynosiła 0°, natomiast w próbce nr 2 orientacja trzech warstw to 0°/90°/0°. Opór, który powodował mniejsze łuki w próbce nr 2, to warstwa o orientacji 90°, która była prostopadła do kierunku wydłużania.

Próbka nr 3 (rysunek 84) uległa deformacji ukośnej z powodu orientacji niedoprzędu pod kątem 45°. Deformację tę można było również zauważyć w próbkach poddanych testom w laboratorium.

Maksymalna wartość naprężenia koncentrowała się wzdłuż boku, do którego przyłożone były maksymalna siła zrywająca. Naprężenie na krawędziach było znacząco

wyższe niż naprężenie w otaczającym obszarze, ze względu na wysoki współczynnik koncentracji naprężenia. Jest to bardzo powszechne zjawisko w wielu elementach mechanicznych, gdzie występuje gwałtowna zmiana geometrii elementów, co skutkuje skoncentrowaniem naprężenia w obszarze, gdzie zachodzi ta zmiana.

7.2. Badania numeryczne kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny

7.2.1. Przygotowanie modeli numerycznych kompozytów

W oparciu o przygotowany i zweryfikowany model numeryczny haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego przystąpiono do realizacji badań numerycznych dla modelu kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych.

Siatkę elementów skończonych dla modelu kompozytu przyjęto identyczną jak dla modelu haftu technicznego. Orientację niedoprzędu definiowano globalnie dla każdej z warstw danego wariantu. Wybrane parametry materiałowe obliczano i oszacowano na podstawie badań eksperymentalnych przedstawionych w rozdziale 5 oraz szacowań przyjętych w rozdziale 7.1. Moduł sprężystości wzdłuż osi X (E11) określono na podstawie badań eksperymentalnych próbki o orientacji 0°. Analogicznie określono moduł sprężystości wzdłuż osi Y (E22), wykorzystując w tym celu próbkę o orientacji 90°. Następnie w badaniach eksperymentalnych wyznaczono moduły ścinania G12 dla poszczególnych wariantów. Poniżej, w tabeli nr 23, przedstawiono parametry materiałowe przejęte dla modelu materiałowego kompozytu.

Tabela 24. Właściwości warstw próbek kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien Inianych

LP	llość warstw	Orientacja niedoprzędu	Maksymalna siła zrywająca	Gęstość	Moduł ścinania	Wartość modułu sprężystości
1	4	0°	8580 N	760 kg/m3	G12 = 3,88 GPa	E11 = 75,6 GPa;
2	4	90°	1440 N	865 kg/m3	G12 = 3,55 GPa	E22 – 24,13 GPa E11 = 75,6 GPa;
3	4	±45°	2820 N	770 kg/m3	G12 = 3.83 GPa	E22 = 24,15 GPa E11 = 75,6 GPa;
	•	2.0	202011		012 0,00 014	E22 = 24,15 GPa

7.2.2. Wyniki badań numerycznych kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny

Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych w oprogramowaniu MSC-Nastran analizowano pod kątem wydłużenia modelu, które następnie weryfikowano w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych oraz rozkład naprężenia dla badanych modeli kompozytu. Wykonane symulacje numeryczne przedstawiono na rysunkach 85-87.

a) Model nr 1: 0°, zadana siła: 8580 N



Rysunek 86. Symulacja numeryczna próbki nr 1: 0°, siła: 8580 N

Model numeryczny kompozytu zawierającego jako wzmocnienie niedoprzęd lniany ułożony pod kątem 0° charakteryzował się wydłużeniem na poziomie 2,5 %. Wartość wydłużenia wzrastała równomiernie, osiągając największą wartość przy krawędzi modelu, do którego przyłożona została siła rozciągająca.

b) Model nr 2: 90°, zadana siła: 1440 N



Rysunek 87. Symulacja numeryczna próbki nr 2: 90°, siła: 1440 N

Model numeryczny, odwzorowujący kompozyt zawierający jako wzmocnienie cztery warstwy haftu ułożone pod kątem 90° do działającej siły rozciągającej, osiągnął wydłużenie na poziomie 1,35 %. Wartości wydłużenia wzrastały wraz z kierunkiem wzdłużnym modelu, osiągając najwyższą wartość przy krawędzi, do którego przyłożona została siła rozciągająca.

c) Model nr 3: $\pm 45^{\circ}$, zadana siła: 2820 N



Rysunek 88. Symulacja numeryczna próbki nr 3: ±45°, siła: 2820 N

Model numeryczny przedstawiający kompozyt zawierający jako wzmocnienie cztery warstwy haftu ułożone pod kątem ±45° do kierunku wzdłużnego charakteryzował

się maksymalnym wydłużeniem o wartości 4,56 %. Rozkład sił w modelu ułożony był początkowo w kształcie łuku, ulegając następnie wyprostowaniu wraz ze zbliżaniem się do krawędzi modelu, do którego została przyłożona siła rozciągająca. Taki rozkład sił w modelu odzwierciedla działanie sił ścinających w rzeczywistym kompozycie poddanym działaniu siły rozciągającej.

Wyniki z badań numerycznych zamieszczono w tabeli 24 i porównano je z wynikami badań eksperymentalnych:

LP	Orientacja niedoprzędu	Wydłużenie z badań numerycznych	Wydłużenie z badań eksperymentalnych	Różnica
1	0°	2,50 %	2,30 %	0,20 %
2	90°	1,35 %	1,16 %	0,19 %
3	±45°	4,56 %	4,65%	0,09 %

Tabela 25. Zestawienie wyników z badań numerycznych z wynikami z badań eksperymentalnych

Dla modelu kompozytu o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 0°, wydłużenie podczas modelowania (2,50 %) jest nieznacznie większe niż wydłużenie zbadane podczas testu (2,30 %) – różnica wynosi 0,20 %.

Niemal identyczna różnica może być zaobserwowana w przypadku ułożenia niedoprzędu pod kątem 90°: wydłużenie podczas modelowania (1,35 %) jest większe o 0,19 % niż wydłużenie zbadane podczas testu (1,16 %).

Dla modelu o orientacji pod kątem $\pm 45^{\circ}$, różnica między wydłużeniem podczas modelowania (4,56 %) a wydłużeniem zbadanym podczas testu (4,65 %) jest jeszcze mniejsza i wynosi tylko 0,09 %.

Ogólnie rzecz biorąc, wyniki sugerują, że wydłużenie podczas modelowania jest zazwyczaj nieco większe niż wydłużenie zbadane podczas badań eksperymentalnych. Różnice te mogą wynikać z procesów uproszczenia modelu numerycznego np. gęstości siatki elementów skończonych czy zdefiniowanych właściwości materiałowych.

7.2.3. Analiza wyników badań numerycznych

Drugi etap badań numerycznych polegał na wykonaniu modeli kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych. Do weryfikacji modeli numerycznych kompozytów posłużyły wyniki badań eksperymentalnych oceny maksymalnej siły zrywającej. Zamodelowane trzy warianty kompozytów różniły się pomiędzy sobą kierunkiem ułożenia niedoprzędu.

Różnice pomiędzy wartościami wydłużenia zbadanego podczas eksperymentu, a wartościami otrzymanymi podczas modelowania wynosiły od 0,09 do 0,20 %. Można zatem uznać, iż wykonany model kompozytu był wiarygodny i można go wykorzystać do dalszych badań numerycznych bez konieczności przeprowadzania dodatkowych badań eksperymentalnych.

Deformacja modelu nr 1, złożonego z 4 warstw o orientacji 0° oraz modelu nr 2, złożonego z 4 warstw o orientacji 90° była równoległa do osi X z lekkim symetrycznym skupieniem naprężeń po stronie, gdzie przyłożono siłę.

Łuki tworzące się w modelu nr 1 (orientacja 0°) podczas wydłużania były większe (wykazał się większym katem krzywizny) niż łuki tworzące się w modelu nr 2 (orientacja 90°). Różnica ta wynikała z kierunku ułożenia niedoprzędu. Im włókna ułożone były bardziej pod kierunkiem 0° do działającej siły, tym było to bardziej zauważalne podczas badań numerycznych w postaci łuków na modelu kompozytu.

Podobnie jak w przypadku badań numerycznych dla haftu, maksymalna wartość naprężenia koncentrowała się na krawędziach modelu wzdłuż strony, która podlegała wydłużeniu. Naprężenie na krawędziach było znacząco wyższe niż naprężenie w otaczającym obszarze, co wynikało z wysokiego współczynnika koncentracji naprężenia. Jest to bardzo powszechne zjawisko w wielu elementach mechanicznych, gdzie występuje gwałtowna zmiana geometrii.

7.3. Zestaw 15 modeli numerycznych kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny

7.3.1. Przygotowanie modeli numerycznych kompozytów

Celem przeprowadzonych symulacji było zbadanie wpływu parametrów haftu technicznego na wytrzymałość kompozytów wzmacnianych włóknami lnianymi. Szczegółowa analiza skupiła się na takich czynnikach jak długość ściegu zyg-zag, jego orientacja oraz liczba warstw haftu. Poprzez analizę wpływu różnych parametrów haftu technicznego można było zidentyfikować najbardziej efektywne konfiguracje dla konkretnych zastosowań.

W celu sprawdzenia właściwości nowych, zróżnicowanych wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych, opracowano plan eksperymentu. Do przeprowadzenia eksperymentu wybrany został plan zdeterminowany, poliselekcyjny.

W tym celu przygotowano piętnaście różnych przypadków, które zostały zamodelowane; to kombinacje wariantów o zróżnicowanej liczbie warstw od 4 do 8, ułożeniu niedoprzędu pod kątem od 0° do 90° oraz długości ściegu haftu od 2 do 8 mm. Wartości te zostały wybrane tak, aby porównać je ze wcześniej przeprowadzonymi badaniami.

Modele wykonane zgodnie z planem opracowano na podstawie wcześniej wykonanych symulacji, które przedstawiono w dwóch poprzednich podrozdziałach. Opracowany plan eksperymentu przedstawiono w tabeli poniżej:

LP	llość warstw	Orientacja niedoprzędu [°]	Długość ściegu [mm]
1	4	8	3
2	4	8	7
3	4	82	3
4	4	82	7
5	4	45	5
6	8	8	3

Tabela 26. Plan eksperymentu zestawy 15 modeli numerycznych

7	8	8	7
8	8	82	3
9	8	82	7
10	8	45	5
11	6	0	5
12	6	90	5
13	6	45	2
14	6	45	8
15	6	45	5

Aby wykonać modele o zróżnicowanych parametrach, konieczne było przyjęcie następujących założeń:

 a) moduł ścinania oraz sprężystości zmieniał się wraz ze zwiększeniem długości ściegu. Założenia procentowej zmiany wartości modułów w odniesieniu do długości ściegu 2 mm zostały przedstawione w tabeli 26.

T I I 07			/ .	/		11 / • •	/
Tappia 77	/αξοτρηίρ τημα	ny wartosci modu	tu snrezvstasci arr	17 SCINANIA WIRAZ ZP	71111065701100	สะเมลกระบร	cieau hatti
10001027.	Zuiozenne zninu	ny wartostrinouu	14 591629510501010	12 Schhama Whaz 20	20016425261116111	aragosers	,cicgu naj ti

Długość ściegu	Spadek wartości modułu sprężystości oraz ścinania
2 mm	0 %
3 mm	-5 %
5 mm	-5 %
7 mm	-3 %
8 mm	-2 %

- b) na podstawie rzeczywistych badań wiadomo, iż kompozyt zawierający 4 warstwy haftu posiadał grubość 3 mm, natomiast kompozyt zawierający 6 warstw – 4 mm. W rezultacie grubość próbki złożonej z 8 warstw przyjęto na poziomie 5 mm.
- c) gęstość próbek nie zmieniała się znacząco w zależności od orientacji niedoprzędu w kompozycie. Gęstość dla 0° wynosiła 760 kg/m³, dla 45° wynosiła 770 kg/m³, a dla 90° wynosiła 865 kg/m³. Zatem zmiana gęstości od położenia 0° do 90° wynosiła 12%. Założono, iż dla nowych orientacji, czyli 8° (blisko 0°) i 82° (blisko 90°), gęstość kompozytów pozostanie taka sama. Dlatego, moduły ścinania, które

całkowicie zależą od gęstości, również pozostały takie same. Tabela 27 przedstawia gęstość i moduł ścinania (G12, G13, G23) dla każdej orientacji.

Tabela 28. Założone wartości gęstości oraz modułów ścinania

Orientacja	Gęstość [kg/m³]	G12(G13) [MPa]	G23 [MPa]
0°, 8°	760	3,88	1,5
45°	770	3,83	1,47
82°, 90°	865	3,55	1,37

 d) na podstawie badań eksperymentalnych (rozdział 5), opracowano wykres zależności wytrzymałości od orientacji niedoprzędu w kompozycie. Przedstawiono go na rysunku nr 88.



Rysunek 89. Zależność wytrzymałości od orientacji niedoprzędu w kompozycie

Z wykresu odczytano szacowane wartości wytrzymałości dla nowych orientacji, które przedstawiono w tabeli 28.

Tabela 29. Szacowane wartości wytrzymałości dla poszczególnych orientacji

Orientacja	Wytrzymałość
8°	120 MPa
82°	26 MPa

e) Założono, iż wytrzymałość kompozytu spada wraz ze wzrostem ilości warstw haftu, z powodu rosnącej ilości przeigłowań, które wpływają negatywnie na wytrzymałość haftu. Szacunkowo, dla 4-6 warstw spadek wyniesie 2 %, a dla 4-8 warstw spadek wyniesie 5 %. W tabeli 29 przedstawiono szacunkowe wartości wytrzymałości dla różnych ilości warstw.

Orientacja	4 warstwy	6 warstw	8 warstw	
0°	143 MPa	140 MPa	35 MPa	
8°	120 MPa	117 MPa	114 MPa	
45°	47 MPa	46 MPa	44 MPa	
82° 26 MPa		25 MPa	24 MPa	
90° 24 MPa		23 MPa	22 MPa	

Tabela 30. Założone wartości wytrzymałości próbek

f) Na podstawie powyższych założeń obliczono maksymalną siłę próbek. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 30.

Tabela 31. Szacowana siła maksymalna próbek

Orientacja	4 warstwy	6 warstw	8 warstw	
0°	8580 N	11727 N	15015 N	
8°	7200 N	9841 N	12600 N	
45°	2820 N	3854 N	4935 N	
82° 1560 N		2132 N 2730 N		
90° 1440 N		1968 N	2520 N	

W tabelach nr 31 i 32 zebrano wszystkie powyższe założenia dla 15 modeli wykonanych w ramach planu eksperymentu.

Lp	llość warstw, Orientacja [°], Długość ściegu [mm]	Wytrzymałość [MPa]	Siła maksymalna [N]
1	4, 8, 3	120	7200
2	4, 8, 7	120	7200

Tabela 32. Opracowane założenia dla 15 modeli numerycznych

3	4, 82, 3	26	1560	
4	4, 82, 7	26	1560	
5	4, 45, 5	47	2820	
6	8, 8, 3	114	12600	
7	8, 8, 7	114	12600	
8	8, 82, 3	24.7	2730	
9	8, 82, 7	24.7	2730	
10	8, 45, 5	44.65	4935	
11	6, 0, 5	140.14	11727	
12	6, 90, 5	23.52	1968	
13	6, 45. 2	46.06	3854	
14	6, 45, 8	46.06	3854	
15	6, 45, 5	46.06	3854	

Tabela 33. Opracowane założenia dla 15 modeli wirtualnych

Lp	E11	E22	G12(G13)	G23	Gęstość [kg/m³]	Grubość [m]
1	71.82e9	23e9	3.7e9	1.425e9	760	0.003
2	73.33e9	23.43e9	3.76e9	1.46e9	760	0.003
3	71.82e9	23e9	3.37e9	1.3e9	865	0.003
4	73.33e9	23.43e9	3.44e9	1.33e9	865	0.003
5	71.82e9	23e9	3.64e9	1.4e9	770	0.003
6	71.82e9	23e9	3.7e9	1.425e9	760	0.005
7	73.33e9	23.43e9	3.76e9	1.46e9	760	0.005
8	71.82e9	23e9	3.37e9	1.3e9	865	0.005
9	73.33e9	23.43e9	3.44e9	1.33e9	865	0.005
10	71.82e9	23e9	3.64e9	1.4e9	770	0.005
11	71.82e9	23e9	3.7e9	1.425e9	760	0.004
12	71.82e9	23e9	3.37e9	1.3e9	865	0.004
13	75.6e9	24.15e9	3.83e9	1.47e9	770	0.004
14	74.1e9	23.67e9	3.75e9	1.44e9	770	0.004
15	71.82e9	23e9	3.64e9	1.4e9	770	0.004

7.3.2. Przeprowadzenie symulacji

Wykonane modele numeryczne przedstawiono na rysunkach poniżej.

a) Wariant nr 1: 4 warstwy, 8°, 3 mm



Rysunek 90. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 1: 4 warstwy, 8°, 3 mm



Rysunek 91. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 1: 4 warstwy, 8°, 3 mm

Na rysunkach 89 oraz 90 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 1 o parametrach 4 warstwy, 8°, 3 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 2,28 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 120 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, jest ono najmniejsze przy brzegu, do którego nie była przyłożona siła i wzrasta stopniowo w kierunku przeciwległego brzegu. Największe wydłużenie można była zaobserwować na rogach próbki. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia koncentrowały się na rogach próbki oraz centralnie przy brzegu, gdzie przyłożono siłę rozciągającą. W centralnej części naprężenia miały niższą wartość.

b) Wariant nr 2: 4 warstwy, 8°, 7 mm



Rysunek 92. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 2: 4 warstwy, 8°, 7 mm



Rysunek 93. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 2: 4 warstwy, 8°, 7 mm

Na rysunkach 91 oraz 92 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 2 o parametrach 4 warstwy, 8°, 7 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 2,24 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 120 MPa. Tak samo jak w przypadku poprzedniego wariantu, wydłużenie zwiększało się stopniowo i było największe przy tych rogach, do których przyłożono siłę rozciągającą. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia koncentrowały się na rogach próbki oraz centralnie przy brzegu, gdzie przyłożono siłę rozciągającą. W centralnej części naprężenia miały niższe wartości.

c) Wariant nr 3: 4 warstwy, 82°, 3 mm



Rysunek 94. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 3: 4 warstwy, 82°, 3 mm



Rysunek 95. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 3: 4 warstwy, 82°, 3 mm

Na rysunkach 93 oraz 94 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 3 o parametrach 4 warstwy, 82°, 3 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 1,70 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 26 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, rosło ono równomiernie wzdłuż długości próbki, zwiększając swoją wartość przy rogach próbki. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia również skoncentrowały się tylko na brzegu próbki, gdzie przyłożono siłę rozciągającą. W pozostałej części próbki naprężenia były niższe i rozłożyły się równomiernie na całej powierzchni.

d) Wariant nr 4: 4 warstwy, 82°, 7 mm



Rysunek 96. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 4: 4 warstwy, 82°, 7 mm



Rysunek 97. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 4: 4 warstwy, 82°, 7 mm

Na rysunkach 95 oraz 96 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 4 o parametrach 4 warstwy, 82°, 7 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 1,55 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 26 MPa. Podczas przeprowadzonej symulacji, wariant ten zachował się niemal identycznie jak poprzedni. Nie ma pomiędzy nimi znaczących różnic.

e) Wariant nr 5: 4 warstwy, 45°, 5 mm



Rysunek 98. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 5: 4 warstwy, 45°, 5 mm



Rysunek 99. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 5: 4 warstwy, 45°, 5 mm

Na rysunkach 97 oraz 98 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 5 o parametrach 4 warstwy, 45°, 5 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 4,80 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 47 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, przy brzegu próbki, do którego nie była przyłożona siła rozciągająca, wydłużenie układało się w kształt łuku i wraz z długością próbki ulegało wyprostowaniu, przy jednoczesnym wzroście wartości. Największe wydłużenie można było zauważyć przy brzegu próbki, do którego przyłożono siłę. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia były najbardziej zauważalne na rogach próbki, układając się w kształt litery "X".

f) Wariant nr 6: 8 warstw, 8°, 3 mm



Rysunek 100. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 6: 8 warstw, 8°, 3 mm



Rysunek 101. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 6: 8 warstw, 8°, 3 mm

Na rysunkach 99 oraz 100 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 6 o parametrach 8 warstw, 8°, 3 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 2,40 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 114 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, jest ono najmniejsze przy brzegu, do którego nie była przyłożona siła i wzrasta stopniowo w kierunku przeciwległego brzegu. Największe wydłużenie można była zaobserwować na rogach próbki. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia koncentrowały się na rogach próbki oraz centralnie przy brzegu, gdzie przyłożono siłę rozciągającą. W centralnej części naprężenia miały niższą wartość.

g) Wariant nr 7: 8 warstw, 8°, 7 mm



Rysunek 102. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 7: 8 warstw, 8°, 7 mm



Rysunek 103. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 7: 8 warstw, 8°, 7 mm

Na rysunkach 101 oraz 102 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 7 o parametrach 8 warstw, 8°, 7 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 2,35 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 114 MPa. Podczas symulacji, próbka zachowywała się bardzo podobnie do wariantu nr 6. Nie są widoczne znaczące różnice pomiędzy tymi wariantami.

h) Wariant nr 8: 8 warstw, 82°, 3 mm



Rysunek 104. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 8: 8 warstw, 82°, 3 mm



Rysunek 105. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 8: 8 warstw, 82°, 3 mm

Na rysunkach 103 oraz 104 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 8 o parametrach 8 warstw, 82°, 3 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 1,66 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 25 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, jest ono najmniejsze przy brzegu, do którego nie była przyłożona siła i wzrasta stopniowo w kierunku przeciwległego brzegu. Największe wydłużenie można była zaobserwować na rogach próbki. W przypadku modelu wytrzymałości na rozciąganie, również naprężenia były największe głównie w rogach próbki, szczególnie przy tych, do których przyłożona była siła rozciągająca.

i) Wariant nr 9: 8 warstw, 82°, 7 mm



Rysunek 106. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 9: 8 warstw, 82°, 7 mm



Rysunek 107. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 9: 8 warstw, 82°, 7 mm

Na rysunkach 105 oraz 106 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 9 o parametrach 8 warstw, 82°, 7 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 1,63 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 25 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, jest ono najmniejsze przy brzegu, do którego nie była przyłożona siła i wzrasta stopniowo w kierunku przeciwległego brzegu. Największe wydłużenie można była zaobserwować na rogach próbki. W przypadku modelu wytrzymałości na rozciąganie, również naprężenia były największe głównie w rogach próbki, szczególnie przy tych, do których przyłożona była siła rozciągająca.
j) Wariant nr 10: 8 warstw, 45°, 5 mm



Rysunek 108. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 10: 8 warstw, 45°, 5 mm



Rysunek 109. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 10: 8 warstw, 45°, 5 mm

Na rysunkach 107 oraz 108 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 10 o parametrach 8 warstw, 45°, 5 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 5,04 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 45 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, przy brzegu próbki, do którego nie była przyłożona siła rozciągająca, wydłużenie układało się w kształt łuku i wraz z długością próbki ulegało wyprostowaniu, przy jednoczesnym wzroście wartości. Największe wydłużenie można było zauważyć przy brzegu próbki, do którego przyłożono siłę. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia były najbardziej zauważalne na rogach próbki, układając się w kształt litery "X".

k) Wariant nr 11: 6 warstw, 0°, 5 mm



Rysunek 110. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 11: 6 warstw, 0°, 5 mm



Rysunek 111. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 11: 6 warstw, 0°, 5 mm

Na rysunkach 109 oraz 110 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 11 o parametrach 6 warstw, 0°, 5 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 2,68 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 140 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, rosło ono stopniowo wzdłuż długości próbki, osiągając największą wartość przy krawędziach, do których przyłożono siłę rozciągającą. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia były najbardziej zauważalne na rogach próbki, do których przyłożono siłę.

1) Wariant nr 12: 6 warstw, 90°, 5 mm



Rysunek 112. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 12: 6 warstw, 90°, 5 mm



Rysunek 113. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 12: 6 warstw, 90°, 5 mm

Na rysunkach 111 oraz 112 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 12 o parametrach 6 warstw, 90°, 5 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 1,45 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 24 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, rosło ono stopniowo wzdłuż długości próbki, osiągając największą wartość przy krawędziach, do których przyłożono siłę rozciągającą. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia były najbardziej zauważalne na rogach próbki, do których przyłożono siłę, jednak były one prawie sześciokrotnie mniejsze od tych występujących w wariancie nr 11.

m) Wariant nr 13: 6 warstw, 45°, 2 mm



Rysunek 114. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 13: 6 warstw, 45°, 2 mm



Rysunek 115. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 13: 6 warstw, 45°, 2 mm

Na rysunkach 113 oraz 114 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 13 o parametrach 6 warstw, 45°, 2 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 4,65 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 46 MPa. W przypadku symulacji wydłużenia, przy brzegu próbki, do którego nie była przyłożona siła rozciągająca, wydłużenie układało się w kształt łuku i wraz z długością próbki ulegało wyprostowaniu, przy jednoczesnym wzroście wartości. Największe wydłużenie można było zauważyć przy brzegu próbki, do którego przyłożono siłę. Na modelu wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia były najbardziej zauważalne na rogach próbki, układając się w kształt litery "X".

n) Wariant nr 14: 6 warstw, 45°, 8 mm



Rysunek 116. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 14: 6 warstw, 45°, 8 mm



Rysunek 117. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 14: 6 warstw, 45°, 8 mm

Na rysunkach 115 oraz 116 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 14 o parametrach 6 warstw, 45°, 8 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 4,75 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 46 MPa. Model wirtualny nie różni się znacząco od wariantu nr 13 – odnotowano jedynie tutaj minimalnie większe wydłużenie.

o) Wariant nr 15: 6 warstw, 45°, 5 mm



Rysunek 118. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 15: 6 warstw, 45°, 5 mm



Rysunek 119. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 15: 6 warstw, 45°, 5 mm

Na rysunkach 117 oraz 118 przedstawiono modelowanie wirtualne wydłużenia oraz wytrzymałości na rozciąganie wariantu nr 15 o parametrach 6 warstw, 45°, 5 mm. Symulacja wykazała, iż próbka osiągała maksymalne wydłużenie na poziomie 4,75 %, natomiast maksymalna wytrzymałość wynosiła 46 MPa. Model wirtualny nie różni się znacząco od wariantów nr 13 oraz 14 – odnotowano jedynie tutaj minimalnie większe wydłużenie.

Wyniki z badań numerycznych zestawiono w tabeli 33 oraz na wykresach (rysunki 119 i 120).

LP	Liczba warstw	Orientacja [°]	Długość ściegu [mm]	Wydłużenie [%]	Wytrzymałość [MPa]
1	4	8	3	2.28	120
2	4	8	7	2.24	120
3	4	82	3	1.70	26
4	4	82	7	1.55	26
5	4	45	5	4.80	47
6	8	8	3	2.40	114
7	8	8	7	2.35	114
8	8	82	3	1.66	24,7
9	8	82	7	1.63	24,7
10	8	45	5	5.04	44,65
11	6	0	5	2.68	140,14
12	6	90	5	1.45	23,52
13	6	45	2	4.65	46,06
14	6	45	8	4.75	46,06
15	6	45	5	4.89	46,06

Tabela 34. Wydłużenie oraz wytrzymałość wykonanych modeli numerycznych



Rysunek 120. Wydłużenie 15 zamodelowanych wariantów kompozytów

Spośród 15 wykonanych modeli wirtualnych, największym wydłużeniem charakteryzowały się próbki o orientacji niedoprzędu pod katem 45° (rysunek 119). Jest to tożsame z badaniami eksperymentalnymi. Przy takim ułożeniu niedoprzędu, włókna najpierw ulegają "wyprostowaniu" czyli przechodzą z pozycji 45° do 0°. W przypadku włókien ułożonych pod kątem 82° oraz 90°, nie brały one praktycznie udziału w procesie rozciągania, dlatego wykazały się najmniejszym wydłużeniem.



Rysunek 121. Maksymalna wytrzymałość 15 zamodelowanych wariantów kompozytów

Zdecydowanie największymi wytrzymałościami charakteryzowały się kompozyty zawierające jako wzmocnienie włókna ułożone pod kątem 0° oraz 8° (rysunek 120). Ich wartości wytrzymałości były kilkukrotnie większe od pozostałych orientacji. Spośród orientacji 0° oraz 8°, największą wytrzymałość osiągnął wariant o długości ściegu 5 mm. Długości 3 oraz 7 mm miały do siebie zbliżone wartości, które jednak były mniejsze od wariantu 5 mm. W przypadku badań eksperymentalnych, największą wytrzymałością charakteryzowała się długość ściegu 4 mm, natomiast 2 mm oraz 8 mm były od niej mniej wytrzymałe. Zauważono zatem podobne zależności w przypadku modelowania.

7.3.3. Podsumowanie i wnioski

Dzięki przeprowadzonym badaniom numerycznych możliwe jest oszacowanie wyników wytrzymałościowych kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych, różniących się pomiędzy sobą ilością warstw, kierunkiem ułożenia niedoprzędu oraz długością ściegu, bez konieczności przeprowadzania faktycznego eksperymentu.

Spośród wykonanych modeli wirtualnych, wyróżnić można dwa warianty:

- w celu uzyskania wariantu o największym wydłużeniem, przy jednoczesnych najniższych kosztach produkcji, zalecałoby się wytworzenie kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft składający się z 4 warstw, o kącie ułożenia niedoprzędu 45° oraz długości ściegu 5 mm. Niższy koszt wynikałby z faktu, że wymagałby najmniejszej liczby warstw (najmniejszej ilości materiału), aby uzyskać takie samo wydłużenie jak próbka 8- lub 6-warstwowa.
- 2) w przypadku potrzeby wysokiej wytrzymałości przy jedoczesnym niezbyt wysokim wydłużeniu i niskich kosztach produkcji, zalecałoby się wytworzenie kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft składający się z 6 warstw, ułożonych pod kątem 0° o długości ściegu 5 mm. Próbka ta charakteryzowała się największą wytrzymałością, posiadając jednocześnie niezbyt wysokie wydłużenie (porównując do próbek z orientacjami 45°).

Podsumowując wybór najbardziej efektywnego i optymalnego wariantu z zaproponowanego planu to wariant składający się z 6 warstw, 0° oraz 5 mm.

Poprawność wykonanych modeli zbadano wykonując test wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu czterech wybranych wariantów, co przedstawiono w kolejnym rozdziale.

153

7.4. Analiza wyników z badań numerycznych

Przeprowadzono walidację wybranych modeli numerycznych poprzez porównanie ich wyników z wynikami badań eksperymentalnych. W tym celu wykonano próbki, które poddano testom rozciągania, a następnie porównano uzyskane wartości wytrzymałości i wydłużenia z wynikami symulacji numerycznych. Schemat badań zawartych w poniższym rozdziale przedstawiono na rysunku nr 121.



Rysunek 122. Schemat prowadzonych badań

7.4.1 Weryfikacja modelu numerycznego

Spośród opisanych we wcześniejszym rozdziale 6.3. zaproponowanych 15 modeli numerycznych wybrano cztery warianty i poddane je weryfikacji. Wybrane warianty przedstawiono w tabeli 34. Zdecydowano się na wybranie wariantu charakteryzującego się największym wydłużeniem, przy jednoczesnych najniższych kosztach produkcji (wariant 2), wariantu o wysokiej wytrzymałości przy jedoczesnym niezbyt wysokim wydłużeniu i niskich kosztach produkcji (wariant nr 4) oraz dwóch wariantów ze skrajnymi ilościami warstw, przy tej samej długości ściegu (warianty 1 oraz 3).

Wariant	Liczba warstw	Orientacja niedoprzędu [°]	Długość ściegu [mm]
1	4	8	3
2	4	45	5
3	8	82	3
4	6	0	5

Tabela 35. Wybrane warianty modeli wirtualnych poddane weryfikacji

Hafty oraz kompozyty zostały wykonane w ten sam sposób i z tych samych materiałów, co kompozyty przedstawione we wcześniejszych rozdziałach (rozdziały 3-5). Następnie

kompozyty zawierające jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych poddano badaniu wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu w oparciu o normę EN ISO 527-4:1997 [150]. Wyniki testów przedstawiono na wykresach (rysunki 122 i 123).



Rysunek 123. Wytrzymałość oraz wydłużenie kompozytów poddanych weryfikacji

Charakterystyka przebiegu wykresu liniowego (rysunek 122) jest zbliżona dla wariantów długości ściegu 5 mm, ułożonego pod kątem 0° w 6 warstwach (żółta linia) do wariantu 3 mm, 8°, 4 warstwy (niebieska linia). Zatem w podobnych ułożeniach niedoprzędu, próbki pod obciążeniem zachowują się w podobny sposób. Jednak wariant posiadający mniejszą długość ściegu oraz niedoprzęd nie ułożony dokładnie pod kątem 0° do działającej siły, wykazał się ostatecznie mniejszą wytrzymałością. Wynika z tego, iż już zaledwie kilkustopniowe odchylenie ułożenia niedoprzędu od 0° wpływa na zmniejszenie wytrzymałości kompozytu wzmocnionego haftem.

Wariant o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 82° (szara linia) wykazał się najmniejszą wytrzymałością. Jego początkowa charakterystyka była zbliżona do wariantu 5 mm, 45°, 4 warstwy (pomarańczowa linia), jednak osiągnął zdecydowanie mniejsze wydłużenie oraz prawie trzykrotnie mniejszą wytrzymałość.



Rysunek 124a i 123b. Maksymalna wytrzymałość oraz maksymalne wydłużenie kompozytów poddanych weryfikacji

Na rysunkach 123a i 123b zestawiono maksymalne wartości wytrzymałości i wydłużenia kompozytów poddanych weryfikacji.

Co zostało również udowodnione we wcześniejszych badaniach (rozdziały 3-5), największą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzują się kompozyty, w których włókna ułożone są jak najbardziej równolegle do działającej siły rozciągającej. Wariant składający się 6 warstw haftu o długości ściegu 5 mm, ułożonych pod kątem 0°, wykazał się zdecydowanie największą wytrzymałością. W przypadku, gdy włókna niedoprzędu ułożone były pod kątem 8°, a długość ściegu wynosiła 3 mm, kompozyt wykazał się o 30% mniejszą wytrzymałością. Zatem można stwierdzić, iż wytrzymałość kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych spada wraz ze zmniejszeniem długości ściegu oraz zwiększeniem kąta ułożenia włókien do kierunku działającej siły (w zakresie 0-90°).

W przypadku takiej samej długości ściegu (5 mm), ale ułożenia włókien pod kątem 45°, wytrzymałość kompozytu spada ponad trzykrotnie, w stosunku do ułożenia 0°. Jeśli chodzi o ułożenie pod kątem zbliżonym do 90°, wytrzymałość jest prawie 10-krotnie mniejsza. Wpływ na tak wysoką wytrzymałość próbek o kierunkach zbliżonych do 0° ma maksymalny udział włókien w procesie rozciągania. W przypadku włókien ułożonych pod kątem 45° działają najpierw siły ścinania, dopiero później rozciągania. Natomiast w przypadku kierunku zbliżonego do 90°, praktycznie żadne włókna nie biorą udziału w procesie rozciągania. Za przenoszenie obciążeń odpowiada wtedy jedynie nitka tworząca ścieg zyg-zag oraz żywica kompozytu. W przypadku orientacji w przedziale 45-90°, długość haftu nie ma znaczącego wpływu na wytrzymałość kompozytu. Natomiast w przypadku ułożenia niedoprzędu w kierunku zbliżonym do 0°, większą wytrzymałością

charakteryzował się dłuższy ścieg (5 mm). Zatem zbyt duża ilość przeigłowań wpływa na obniżenie wytrzymałości haftu.

Największym wydłużeniem charakteryzowała się próbka zawierająca haft ułożony pod kątem 45°. W takiej próbce, włókna ulegają najpierw wyprostowaniu do ułożenia 0°, a następnie poddawane są rozciąganiu. Z tego też powodu próbka o ułożeniu włókien pod kątem 0° wykazała się większym wydłużeniem od próbek 8° i 82°. Warianty o długości ściegu 5 mm wykazały się większym wydłużeniem od wariantów 3 mm. W przypadku większej długości ściegu, skok igły również jest większy, a co za tym idzie, ścieg zyg-zag jest ułożony pod mniejszym kątem do działającej siły.

W tabeli 35 porównano wartości wytrzymałościowe otrzymane w wyniku modelowania oraz podczas weryfikacji.

			Wytrzym	ałość [MPa]	Różnic a [%]	Wydłużenie [%]		Różnic a [%]	
Warian t	Liczba warst w	Orientacj a [°]	Długoś ć ściegu [mm]	Model wirtualn Y	Weryfikacj a		Model wirtualn Y	Weryfikacj a	
1	4	8	3	120,00	101,52	15,40	2,28	2,78	21,92
2	4	45	5	47,00	44,58	5,15	4,80	4,57	4,79
3	8	82	3	24,70	16,28	34,09	1,66	2,79	68,07
4	6	0	5	140,14	155,28	10,80	2,68	3,83	42,91

Tabela 36. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy rozciąganiu wybranych modeli numerycznych oraz wariantów poddanych weryfikacji

W większości przypadków wytrzymałości na rozciąganie, wyniki modelowania oraz weryfikacji były do siebie zbliżone. Różnice pomiędzy wartościami wynosiły od kilku do kilkunastu procent. W przypadku wydłużenia, różnice te były większe i wynosiły od kilku do kilkudziesięciu procent. Wyjątkiem był wariant nr 3 (8 warstw, 82°, 3 mm). Tutaj różnica wyniosła około 68 % w przypadku wydłużenia i około 35 % w przypadku wytrzymałości na rozciąganie. Przyczyną różnic mogą być zastosowane uproszczenia przyjęte podczas budowania modeli numerycznych.

7.4.2 Wnioski

Orientacja niedoprzędu wewnątrz kompozytu oraz liczba warstw miały istotny wpływ na właściwości mechaniczne próbek poddanych badaniu wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu. Kompozyty zawierające jako wzmocnienie niedoprzęd zorientowany bliżej 0° wykazywały wyższą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu z kompozytami o niedoprzędzie ułożonym pod większym kątem do kierunku wzdłużnego próbki.

Warianty z większą liczbą warstw zazwyczaj wykazywały większą wytrzymałość (jeśli jednocześnie ułożenie niedoprzędu było zbliżone lub równe 0°), ale mniejsze wydłużenie przy zerwaniu, co wskazuje na kompromis pomiędzy wytrzymałością a plastycznością.

Dłuższe ściegi haftu zazwyczaj prowadziły do wyższej wytrzymałości na rozciąganie, jednak nadmiernie długie ściegi mogą prowadzić do pogorszenia właściwości mechanicznych poprzez zmniejszenie udziału nitki mocującej w strukturze kompozytu, natomiast zbyt krótki ścieg może wpływać na zwiększenie ryzyka osłabienia struktury kompozytu poprzez zwiększoną liczbę przeigłowań.

Dzięki przeprowadzonemu modelowaniu możliwe jest oszacowanie wyników wytrzymałościowych kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych, różniących się pomiędzy sobą ilością warstw, kierunkiem ułożenia niedoprzędu oraz długością ściegu, bez konieczności przeprowadzania faktycznego eksperymentu.

Warianty kompozytów, które wykazały znacznie niższą wytrzymałość w weryfikacji modelu niż przewidywano, wymagają dalszej analizy i ewentualnej optymalizacji parametrów haftu oraz procesu produkcyjnego.

Dalsze badania powinny skupić się na identyfikacji optymalnych kombinacji parametrów haftu w celu osiągnięcia kompozytów o jak najwyższych właściwościach mechanicznych.

158

8. Środowiskowa Ocena Cyklu Życia (Life Cycle Assessment) 8.1. Metodyka badań

LCA, ang. Life Cycle Assessment, inaczej Środowiskowa Ocena Cyklu Życia, to narzędzie oceny wpływu danego wyrobu na środowisko. Ocenę wykonuje się na podstawie danych wejścia i wyjścia produktu na każdym etapie jego cyklu życia. Obejmuje to procesy m.in. od wydobycia surowców, przez produkcję, użytkowanie, aż po zarządzanie odpadami. LCA jest stosowane do produktów, projektów i systemów, oferując kompleksową ocenę wpływu na środowisko, która jest uznawana jako ocena "od kołyski do grobu". W skład LCA wchodzą cztery główne etapy: definicja celu i zakresu, analiza zbioru wejść i wyjść, ocena wpływu cyklu życia oraz interpretacja wyników. Wynikiem LCA są konkretne dane liczbowe określające wpływ danego produktu na środowisko [151].

Metoda LCA została ustandaryzowana przez International Organization for Standardization – jej założenia i procesy opisane są przez normę ISO 14040. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework [152].

Głównym celem LCA jest porównanie produktów (usług, systemów) w celu wyłonienia rozwiązania o najmniejszym negatywnym wpływie na środowisko. Dzięki LCA możemy również identyfikować kluczowe obszary, w których wprowadzenie zmian byłoby korzystne dla środowiska [153].

W przypadku przedstawionych poniżej badań, analizy wpływu na środowisko zostały wykonane przy użyciu oprogramowania SimaPro 7.3.0 i metody ReCiPe Endpoint (H), zgodnie z zaleceniami dla warunków europejskich (Europe ReCiPe H/A). Oceniono 22 kategorie wpływu oraz 3 kategorie punktów końcowych: zdrowie ludzkie, ekosystemy i zasoby.

Wpływ procesów przemysłowych na środowisko został określony za pomocą bazy danych Ecoinvent 2.2. W przypadku produkcji energii uwzględniono miks energetyczny 27 krajów Unii Europejskiej. Analizę niepewności parametrów wejściowych w modelu LCA przeprowadzono przy użyciu symulacji Monte Carlo, zakładając poziom ufności wynoszący 95%. Do poniższej analizy zastosowano trzy wskaźniki końcowe ReCiPe 2016, które pozwalają oszacować szkody dla zdrowia ludzkiego, wyrażane wskaźnikiem DALY, wymieraniem gatunków w ciągu roku, określanych jako "Species.yr", oraz wyczerpanie zasobów paliw kopalnych oraz surowców metalicznych podawane w dolarach amerykańskich (USD). W porównaniu z punktami pośrednimi, końcowe wskaźniki LCA uznaje się za mające wyższą niepewność wewnętrzną, ale również za prowadzące do bardziej zrozumiałych i łatwiejszych do komunikowania wyników.

Wskaźnik DALY (z ang. *disability adjusted life-years* – lata życia skorygowane niesprawnością) jest używany do oceny stanu zdrowia społeczeństwa. Odzwierciedla on sumę lat życia utraconych z powodu przedwczesnej śmierci oraz lat przeżytych z niesprawnością związaną z urazem lub chorobą. Wskaźnik ten oblicza się jako sumę lat utraconego życia i lat przeżytych z niepełnosprawnością. Jeden DALY odpowiada jednemu utraconemu rokowi zdrowego życia. Dzięki wskaźnikowi DALYs można oszacować całkowitą liczbę lat utraconych z powodu konkretnych przyczyn i czynników ryzyka. Wskaźnik ten jest wykorzystywany przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) oraz inne instytucje zajmujące się zdrowiem publicznym do oceny wpływu stanu zdrowia populacji na społeczne i ekonomiczne aspekty funkcjonowania społeczeństwa [154].

W poniższej analizie, wskaźnik DALY charakteryzuje następujące kategorie: powstawanie drobnych cząstek stałych; globalne ocieplenie; toksyczność rakotwórcza dla ludzi; toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi, promieniowanie jonizacyjne; tworzenie się ozonu; zubożenie ozonu stratosferycznego oraz zużycie wody wpływające na zdrowie ludzkie.

Nazwę wskaźnika "Species, yr" rozwinąć można do "Species yearly", co oznacza ilość gatunków wymierających w ciągu jednego roku. Wskaźnik ten odnosi się do kategorii takich jak: zanieczyszczenie wód słodkich; eutrofizacja wód słodkich; globalne ocieplenie mające wpływ na ekosystemy słodkowodne oraz lądowe; zagospodarowanie terenu; zanieczyszczenie wód morskich oraz ich eutrofizację; tworzenie się ozonu; zakwaszenie lądów; zanieczyszczenie lądów oraz zużycie wody mające wpływ na ekosystemy wodne oraz lądowe.

Wyczerpanie zasobów paliw kopalnych oraz surowców metalicznych wyrażane jest wskaźnikiem USD2013 i obejmuje kategorie "niedobór zasobów kopalnych" oraz "niedobór zasobów mineralnych".

8.2. Materiały

W przypadku niniejszej pracy, LCA posłużyło do oceny wpływu na środowisko produktu wykonanego przy wykorzystaniu technologii haftu technicznego wykonanego z włókien lnianych. Jako produkt przyjęto siodełko rowerowe, przedstawione na rysunku nr 124. W celu szerszej analizy, poddano ocenie LCA tożsamy wyrób, jednak wykonany z tkaniny lnianej, w celu wyłonienia wariantu o mniejszym ujemnym wpływie na środowisko.



Rysunek 125. Obraz siodełka rowerowego służącego do wykonania analizy LCA [155]

Wymiary siodełka to 182 x 277 mm. Powierzchnia siodełka wynosiła 280 cm².

W celu wykonania analizy LCA przyjęto następujące elementy składowe haftu technicznego (tożsame z haftami wykonanymi we wcześniejszych rozdziałach): włóknina poliestrowa o masie powierzchniowej 35 g/m², tkanina bawełniana o masie powierzchniowej 280 g/m², niedoprzęd lniany o masie liniowej 400 tex, monofilament poliamidowy o masie liniowej 11 tex. Tkanina posiadała masę powierzchniową wynoszącą 400 g/m², Wykonano ją z niedoprzędu lnianego o masie liniowej 400 tex (takiego samego, jak w przypadku haftu).

Dla potrzeb analizy przyjęto, iż długość ściegu zyg-zag wykonującego haft będzie wynosiła 4 mm, a sam haft będzie się składał z 4 warstw, ułożonych w kierunku 0°. W celu zachowania zbliżonych parametrów obu wyrobów, wzmocnienie wykonane z tkaniny również składało się z czterech warstw.

W tabeli nr 36 zebrano dane dotyczące zużycia materiałów podczas teoretycznej produkcji dwóch rodzajów wzmocnień kompozytów: haftu technicznego oraz tkaniny. Analizie LCA poddano wyroby do momentu wykonania samych wzmocnień. Nie poddano natomiast analizie procesu wykonywania kompozytów, ponieważ zarówno w przypadku wzmocnienia wykonanego za pomocą haftu technicznego, jak i przy wykorzystaniu tkaniny, proces ten przebiegałby w ten samym sposób. Chciano się zatem w pełni skupić na samym porównaniu technologii haftu technicznego oraz wykorzystaniu tkaniny do produkcji wzmocnień kompozytów.

	Haft	Tkanina
Włóknina poliestrowa	35 g/m²	-
Tkanina bawełniana	280 g/m ²	-
Włókna Iniane	886 g/m²	1600 g/m ²
Monofilament poliamidowy	26,7 g/m²	-
Odpad przy wykonaniu jednego elementu	0,496 m ² włókniny + 0,496 m ² tkaniny bawełnianej	0,496 m ² tkaniny

Tabela 37. Teoretyczne zużycie materiałów wykorzystanych do produkcji siodełka przy wykorzystaniu haftu technicznego oraz tkaniny

Odpad powstaje poprzez wycięcie kształtu siodełka z prostokątnego kawałka tkaniny. W przypadku haftu, włókna lniane są układane od razu w pożądany kształt. Odpadem jest zatem tylko włóknina oraz tkanina bawełniana, na której wykonany był haft.

W celu wykonania analizy przyjęto, iż produkty po zakończeniu fazy używania, będą utylizowane w spalarni odpadów.

8.3. Analiza wyników badań

Poszczególne wskaźniki charakteryzowania przedstawione są w tabeli nr 42 w załączniku nr 1. W tabeli nr 37 przedstawiono sumaryczne wskaźniki dla siodełka wykonanego z haftu oraz z tkaniny.

Kata and Andrea		Haft	Tkanina	
Kategoria wpływu	Jednostka	sumarycznie	sumarycznie	
Powstawanie drobnych cząstek stałych	DALY	9,9E-06	1,0E-05	
Niedobór zasobów kopalnych	USD2013	2,9E-01	3,3E-01	
Zanieczyszczenie wód słodkich	species.yr	2,9E-10	1,8E-10	
Eutrofizacja wód słodkich	species.yr	3,5E-09	4,2E-09	
Globalne ocieplenie, ekosystemy słodkowodne	species.yr	5,5E-13	4,3E-13	
Globalne ocieplenie, zdrowie ludzkie	DALY	6,7E-06	5,3E-06	
Globalne ocieplenie, ekosystemy lądowe	species.yr	2,0E-08	1,6E-08	
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	DALY	1,2E-06	8,5E-07	
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	DALY	1,3E-06	-1,7E-06	
Promieniowanie jonizacyjne	DALY	2,4E-09	1,8E-09	
Zagospodarowanie terenu	species.yr	2,4E-08	2,7E-08	
Zanieczyszczenie wód morskich	species.yr	4,7E-11	3,3E-11	
Eutrofizacja wód morskich	species.yr	3,3E-11	2,1E-11	
Niedobór zasobów mineralnych	USD2013	3,6E-03	4,5E-03	
Tworzenie się ozonu, zdrowie człowieka	DALY	2,0E-08	2,3E-08	
Tworzenie się ozonu, ekosystemy lądowe	species.yr	2,9E-09	3,4E-09	
Zubożenie ozonu stratosferycznego	DALY	1,9E-08	2,4E-08	
Zakwaszenie lądów	species.yr	1,2E-08	1,3E-08	
Zanieczyszczenie lądów	species.yr	1,8E-10	2,2E-10	
Zużycie wody, ekosystemy wodne	species.yr	1,2E-12	7,4E-13	
Zużycie wody, zdrowie ludzkie	DALY	4,6E-06	2,7E-06	
Zużycie wody, ekosystem lądowy	species.yr	2,8E-08	1,7E-08	

Tabela 38.	Wskażniki charakter	vzowania i	przedstawione sur	narvcznie dla	wvkon	vwania i	haftu c	oraz tkanınv

Na podstawie dostarczonych danych porównujących wpływ haftu i produkcji tkanin na różne kategorie środowiskowe i zdrowotne, można zauważyć następujące różnice w poszczególnych kategoriach:

• Wpływ na zdrowie ludzkie (DALY)

W przypadku powstawania drobnych cząstek stałych, oba procesy mają porównywalny wpływ, z niewielką negatywną przewagą tkaniny. Wytwarzanie haftu ma bardziej niekorzystny wpływ na globalne ocieplenie, toksyczność rakotwórczą i nie rakotwórczą

oraz promieniowanie jonizacyjne. Podczas całego procesu wytwarzania haftu zużywa się również większa ilość wody, niż przy produkcji tkaniny. Wytwarzanie tkaniny ma natomiast bardziej negatywny wpływ na zubożenie ozonu stratosferycznego oraz tworzenie się ozonu, co wpływa na zdrowie człowieka.

• Wpływ ekonomiczny (USD2013)

Produkcja tkaniny ma wpływ na większy niedobór zasobów kopalnych i mineralnych, niż produkcja haftu technicznego.

• Wpływ na ekosystemy (species.yr)

Haft ma większy wpływ na zanieczyszczenie wód słodkich, globalne ocieplenie wpływające na ekosystemy słodkowodne oraz lądowe, zanieczyszczenie wód morskich oraz ich eutrofizację. Proces wytwarzania tkaniny ma natomiast większy wpływ na eutrofizację wód słodkich, zagospodarowanie terenu, tworzenie się ozonu wpływającego na ekosystemy lądowe. zakwaszenie lądów oraz ich zanieczyszczenie.

W tabelach nr 38 oraz 39 zebrano sumaryczne wartości kolejnych procesów wytwarzania haftu oraz tkaniny dla poszczególnych punktów końcowych.

Punkty końcowe	Jednostka	Energia elektryczna	Włókno Iniane	Włóknina poliestrowa	Włókno poliamidowe	Tkanina bawełniana	Spalanie odpadów tekstylnych	Haft sumarycznie
Zdrowie	DALY	5,85E-06	4,62E-06	4,58E-07	4,40E-07	1,22E-05	1,76E-07	2,4E-05
Ekosystemy	species.yr	1,18E-08	2,02E-08	8,80E-10	1,10E-09	5,64E-08	4,62E-10	9,1E-08
Zasoby	USD2013	4,40E-02	7,06E-02	2,73E-02	1,91E-06	1,53E-01	1,91E-03	3,0E-01

Tabela 39. Wartości punktów końcowych dla procesu wytwarzania haftu

Tabela 40. Wartości punktów końcowych dla procesu wytwarzania tkaniny

Punkty końcowe	Jednostka	Włókno Iniane	Tkanina	Spalanie odpadów tekstylnych	Tkanina sumarycznie
Zdrowie	DALY	8,3E-06	8,3E-06	8,9E-07	1,8E-05
Ekosystemy	species.yr	3,7E-08	4,1E-08	2,3E-09	8,0E-08
Zasoby	USD2013	1,3E-01	2,0E-01	9,7E-03	3,3E-01

Haft ma tendencję do wyższego wpływu w kategoriach dotyczących zdrowia ludzkiego (takich jak globalne ocieplenie, toksyczność rakotwórcza i nie rakotwórcza oraz zużycie wody).

Produkcja tkanin zazwyczaj ma większy wpływ na aspekty ekonomiczne związane z niedoborem zasobów oraz na niektóre efekty środowiskowe, takie jak eutrofizacja wód słodkich i tworzenie się ozonu (ekosystemy lądowe).

Wpływ na środowisko haftu i produkcji tkanin różni się w poszczególnych kategoriach, przy czym żaden z tych procesów nie jest jednoznacznie lepszy ani gorszy. Wybór między nimi może zależeć od tego, które konkretne wpływy na środowisko lub zdrowie są priorytetowe.



Rysunek nr 125 przedstawia powyższe wartości w ujęciu procentowym.

Rysunek 126. Procentowe porównanie wartości punktów końcowych dla procesów wytwarzania haftu oraz tkaniny

Przyjmując, iż wartość punktu końcowego "zdrowia" dla haftu wynosi 100 %, wpływ tkaniny na ten aspekt jest o 26 % mniejszy. Podobnie sytuacja wygląda w przypadku wpływu na ekosystemy – tutaj tkanina ma o 12 % mniejszy wpływ niż haft. Jedynym parametrem, gdzie haft ma mniejszy wpływ, jest zużycie zasobów. Produkcja tkaniny pochłania o 11 % więcej zasobów, niż produkcja haftu technicznego.

Wpływ na środowisko technologii wytwarzania haftu technicznego okazał się wyższy dla dwóch kategorii szkód (zdrowie oraz ekosystemy), a niższy tylko dla jednej (zużycia zasobów). W największym stopniu przyczyniła się do tego produkcja tkaniny bawełnianej, na której wykonywany jest haft. Gdyby założyć zastosowanie tkaniny bawełnianej o masie powierzchniowej niższej o 25%, haft okazałby się lepszym środowiskowo rozwiązaniem.

Zastosowanie tkaniny bawełnianej do produkcji haftu nie jest obligatoryjne z punktu widzenia technologicznego. Jej udział wpływa na poprawę stabilności haftu, jednak może on być wykonany jedynie na podkładzie z włókniny poliestrowej. Z tego powodu zdecydowano się na przeprowadzenie ponownej analizy LCA, jednak eliminując z procesu tkaninę bawełnianą. Nowo otrzymane wartości wskaźników charakteryzowania przedstawiono sumarycznie w tabeli nr 40. Wartości dla poszczególnych procesów zestawiono w tabeli nr 43 w załączniku nr 1.

Katagoria watuwu	ladnastka	Haft	Tkanina
Kategoria wpływu	Jeunostka	sumarycznie	sumarycznie
Powstawanie drobnych cząstek stałych	DALY	5,3E-06	1,0E-05
Niedobór zasobów kopalnych	USD2013	1,4E-01	3,3E-01
Zanieczyszczenie wód słodkich	species.yr	1,4E-10	1,8E-10
Eutrofizacja wód słodkich	species.yr	2,1E-09	4,2E-09
Globalne ocieplenie, ekosystemy słodkowodne	species.yr	3,0E-13	4,3E-13
Globalne ocieplenie, zdrowie ludzkie	DALY	3,7E-06	5,3E-06
Globalne ocieplenie, ekosystemy lądowe	species.yr	1,1E-08	1,6E-08
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	DALY	8,3E-07	8,5E-07
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	DALY	4,2E-07	-1,7E-06
Promieniowanie jonizacyjne	DALY	8,9E-10	1,8E-09
Zagospodarowanie terenu	species.yr	5,6E-09	2,7E-08
Zanieczyszczenie wód morskich	species.yr	2,7E-11	3,3E-11
Eutrofizacja wód morskich	species.yr	7,8E-12	2,1E-11
Niedobór zasobów mineralnych	USD2013	2,0E-03	4,5E-03
Tworzenie się ozonu, zdrowie człoiweka	DALY	1,1E-08	2,3E-08
Tworzenie się ozonu, ekosystemy lądowe	species.yr	1,5E-09	3,4E-09
Zubożenie ozonu stratosferycznego	DALY	7,9E-09	2,4E-08
Zakwaszenie lądów	species.yr	6,7E-09	1,3E-08
Zanieczyszczenie lądów	species.yr	9,8E-11	2,2E-10
Zużycie wody, ekosystemy wodne	species.yr	3,1E-13	7,4E-13
Zużycie wody, zdrowie ludzkie	DALY	1,1E-06	2,7E-06
Zużycie wody, Ekosystem lądowy	species.yr	6,9E-09	1,7E-08

Tabela 41. Wskaźniki charakteryzowania przedstawione sumarycznie dla wykonywania haftu bez udziału tkaniny bawełnianej oraz tkaniny

Po wyeliminowaniu tkaniny bawełnianej z procesu powstawania haftu, wytwarzanie tkaniny lnianej jako wzmocnienie kompozytu charakteryzowało się większym wpływem we wszystkich kategoriach. Porównując do siebie wpływ na środowisko wytwarzania haftu z wykorzystaniem tkaniny i bez, opcja bez tkaniny osiągnęła w większości wskaźników dwa razy mniejszy wpływ na środowisko. Jednak w przypadku niektórych kategorii (jak np. toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi, zagospodarowanie terenu, eutrofizacja wód morskich czy zużycie wody) wpływ ten był około czterokrotnie mniejszy.

W tabeli nr 41 oraz na rysunku nr 115 przedstawiono sumaryczne wartości punktów końcowych dla procesów wytwarzania haftu technicznego z wykorzystaniem tkaniny bawełnianej, bez udziału tkaniny oraz procesu wytwarzania tkaniny lnianej.

Punkty końcowe	Jednostka	Haft sumarycznie	Haft bez tkaniny sumarycznie	Tkanina sumarycznie
Zdrowie	DALY	2,4E-05	1,1E-05	1,8E-05
Ekosystemy	species.yr	9,1E-08	3,4E-08	8,0E-08
Zasoby	USD2013	3,0E-01	1,4E-01	3,3E-01

Tabela 42. Wartości punktów końcowych dla procesu wytwarzania haftu bez udziału tkaniny bawełnianej

Po wyeliminowaniu tkaniny bawełnianej z procesu haftu, jego wpływ na zdrowie zmniejszył się ponad dwukrotnie do 1,1E-05 DALY. W porównaniu, wpływ tkaniny wynosi 1,8E-05 DALY, co oznacza, że tkanina wykazuje większy wpływ na zdrowie niż haft bez tkaniny bawełnianej.

Eliminacja tkaniny bawełnianej z procesu powstawania haftu technicznego znacząco redukuje wpływ haftu na ekosystemy (z 9,1E-08 do 3,4E-08 species.yr). Wpływ tkaniny wynosi 8,0E-08 species.yr, co jest prawie dwukrotnie wyższe niż wpływ haftu bez tkaniny bawełnianej.

Usunięcie tkaniny bawełnianej z procesu haftu obniża jego wpływ na zużycie zasobów z 0,30 USD2013 do 0,14 USD2013. Dla porównania, produkcja tkaniny wynosi 0,33 USD2013, co oznacza, że tkanina ma większy wpływ na zużycie zasobów niż haft bez tkaniny bawełnianej.

Po wyeliminowaniu tkaniny bawełnianej z procesu produkcji haftu, jego wpływ na zdrowie, ekosystemy oraz zasoby jest mniejszy niż wpływ tkaniny we wszystkich analizowanych kategoriach. Rysunek nr 126 przedstawia maksymalne wartości punktów końcowych dla haftu bez tkaniny bawełnianej oraz tkaniny lnianej w ujęciu procentowym.



Rysunek 127. Procentowe porównanie wartości punktów końcowych dla procesów wytwarzania haftu bez udziału tkaniny bawełnianej oraz tkaniny

Po wyeliminowaniu tkaniny bawełnianej z procesu powstawania haftu technicznego, wykonywanie haftu ma zdecydowanie mniejszy wpływ na środowisko, niż proces powstawania tkaniny. W przypadku kategorii "zdrowie", wpływ ten jest o 35 % niższy, natomiast w przypadku oddziaływania na ekosystemy oraz wykorzystanie zasobów, haft charakteryzował się o prawie 60 % mniejszym wpływem.

8.4. Wnioski

Haft wykonywany na tkaninie bawełnianej ma tendencję do wyższego wpływu na zdrowie ludzkie, szczególnie w kategoriach globalnego ocieplenia (zdrowie), toksyczności rakotwórczej i nie rakotwórczej oraz zużycia wody.

Produkcja tkanin zazwyczaj ma większy wpływ na aspekty ekonomiczne związane z niedoborem zasobów kopalnych i mineralnych oraz na niektóre efekty środowiskowe, takie jak eutrofizacja wód słodkich i tworzenie się ozonu w ekosystemach lądowych.

Nawet podczas wykonywania haftu na tkaninie bawełnianej, nadal ma on mniejszy wpływ na kategorię "zasoby", co pokazuje, że faktycznie technologia haftu technicznego wpływa na zminimalizowanie zużycia surowców oraz powstawania odpadów tekstylnych.

Wyeliminowanie tkaniny bawełnianej z procesu powstawania haftu technicznego (wykonywanie haftu jedynie na włókninie poliestrowej) skutkuje zmniejszeniem wpływu na środowisko przynajmniej dwukrotnie, a w przypadku niektórych kategorii (np. niezwykle istotnego zużycia wody) nawet czterokrotnie.

9. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w powyższej pracy badania miały na celu ocenę potencjał haftu technicznego jako innowacyjnego wzmocnienia dla kompozytów. Autorka pracy pragnęła przedstawić, jak różne parametry haftu wpływają na właściwości mechaniczne kompozytów oraz jak można zminimalizować negatywny wpływ produkcji kompozytów na środowisko. Aby osiągnąć zamierzone cele pracy, przeprowadzono szereg badań.

Przedstawione w rozdziale 3 badania wytrzymałości haftu technicznego udowodniły, iż układ włókien w hafcie ma istotny wpływ na jego wytrzymałość. Równoległe ułożenie włókien do kierunku działania siły zapewnia najwyższą wytrzymałość na rozciąganie, natomiast ułożenie włókien pod kątem 90° i 45° nie wpływa znacząco na wytrzymałość. Zwiększenie liczby warstw haftu nie prowadzi do proporcjonalnego wzrostu wytrzymałości, natomiast poprawia stabilność wyników badań.

Badania w rozdziale 4 skupiły się na analizie wytrzymałości kompozytów wzmocnionych siedmiowarstwowymi układami haftu z włókien lnianych. Celem było określenie, jak różne układy włókien wpływają na wytrzymałość i odkształcenie kompozytu.

Większość kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykazała większe wydłużenie niż typowe dla materiałów kruchych, co sugeruje pewną elastyczność tych materiałów. Kompozyty z większą ilością włókien ułożonych prostopadle do kierunku działania siły były bardziej kruche.

Włókna ułożone wzdłuż kierunku działania siły zwiększają wytrzymałość na rozciąganie kompozytu. Włókna ułożone pod kątem nie poprawiają znacząco wytrzymałości, a nawet mogą ją obniżyć ze względu na dodatkowe obciążenia.

W przypadku wytrzymałości na zginanie, im więcej włókien było ułożonych wzdłuż kierunku zginania, tym większa była wytrzymałość kompozytu na zginanie.

Włókna lniane mogą być skutecznym wzmocnieniem dla kompozytów, ale ich właściwości zależą od sposobu ułożenia włókien w kompozycie. Z tego powodu, wykorzystanie technologii haftu technicznego do produkcji wzmocnień kompozytowych

170

jest bardzo atrakcyjnym rozwiązaniem, ponieważ umożliwia ułożenie włókien pod ściśle określonym kątem.

Badania przedstawione w rozdziale 5 wykazały, iż zastosowanie haftu technicznego jako wzmocnienia w kompozytach ma wiele korzyści, w porównaniu do kompozytów zawierających jako wzmocnienie tkaninę oraz układy UD:

- Wyższa wytrzymałość na rozciąganie: Kompozyty z haftem, zwłaszcza przy ułożeniu włókien wzdłuż kierunku działania siły, są znacznie bardziej wytrzymałe niż kompozyty z tkaniną czy włóknami UD (unidirectional).
- Optymalna długość ściegu: Długość ściegu haftu ma istotny wpływ na wytrzymałość kompozytu. Najlepsze wyniki uzyskano przy długości 4 mm.
- Wpływ kąta ułożenia włókien: Hafty ułożone pod kątem 90° do kierunku działania siły obniżają wytrzymałość kompozytu.
- Jednolitość struktury: Haft zapewnia lepsze uporządkowanie włókien w kompozycie, co przekłada się na większą wytrzymałość.
- Wyższy moduł Younga: Kompozyty z lnianym haftem charakteryzują się większą sztywnością niż tradycyjne kompozyty szklano-epoksydowe.
- Optymalizacja parametrów haftu (długość ściegu, kąt ułożenia włókien) pozwala na uzyskanie kompozytów o pożądanych właściwościach.
- Kompozyty z haftem mogą znaleźć zastosowanie w wielu dziedzinach, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość i sztywność.

Przedstawione badania potwierdziły hipotezę, iż technologia haftu technicznego pozwala na tworzenie innowacyjnych materiałów kompozytowych o lepszych właściwościach mechanicznych niż tradycyjne rozwiązania.

Badania wykazały, że kompozyty wzmocnione haftem technicznym charakteryzują się znacznie większą wytrzymałością na ścinanie niż kompozyty z tkaniną lub materiałem UD (unidirectional). Największą wytrzymałością na ścinanie wykazał się kompozyt z haftem o długości ściegu 2 mm. Zwiększanie długości ściegu powodowało obniżenie wytrzymałości, co związane jest z mniejszą ilością monofilamentu tworzącego ścieg. Krótszy ścieg oznacza więcej włókien w przekroju, co zwiększa wytrzymałość kompozytu na ścinanie. Kompozyty z materiałem UD wykazywały najniższą wytrzymałość ze względu na nierównomierny układ włókien i większą podatność na delaminację. W kompozytach z haftem dominowały pęknięcia zginające i rozciągające, co świadczy

o lepszej wytrzymałości na ścinanie między warstwami. W kompozytach z tkaniną i materiałem UD częściej występowały pęknięcia ścinające między warstwami.

Przeprowadzone badania udowodniły, iż kompozyty wzmocnione haftem technicznym wykazują znacznie większą odporność na rozwarstwianie niż kompozyty z tkaniną lnianą lub układami UD. Kompozyty z tkaniny miały największe wartości rozwarcia szczelin, co świadczy o mniejszej odporności na rozwarstwianie. Kompozyty z włóknami UD również wykazywały niższą odporność na rozwarstwianie w porównaniu do kompozytów z haftem. Nitka wykonująca ścieg zyg-zag w hafcie tworzy barierę dla rozprzestrzeniania się pęknięć, co znacząco ograniczało proces rozwarstwiania.

Badania symulacyjne pozwoliły na przewidywanie właściwości wytrzymałościowych kompozytów z haftem lnianym bez konieczności przeprowadzania czasochłonnych eksperymentów. Badania numeryczne dostarczyły cennych informacji, które mogą być wykorzystane do projektowania kompozytów z haftem lnianym o optymalnych właściwościach. Dzięki symulacjom można szybko i efektywnie ocenić wpływ różnych parametrów haftu na wytrzymałość kompozytów, co pozwala na wybór najbardziej odpowiedniego rozwiązania dla konkretnego zastosowania.

Główne wnioski płynące z wykonanych badań numerycznych:

- Liczba warstw: Większa liczba warstw zazwyczaj zwiększa wytrzymałość, ale także koszty produkcji.
- Kąt ułożenia włókien: Kąt 0° zapewnia największą wytrzymałość, natomiast kąt 45° sprzyja większemu wydłużeniu.
- Długość ściegu: Długość ściegu wpływa na gęstość ułożenia włókien i w konsekwencji na wytrzymałość i sztywność kompozytu.

Przeprowadzone testy eksperymentalne potwierdziły poprawność wyników symulacji.

Środowiskowa Ocena Cyklu Życia wykazała, iż produkcja przedmiotu z haftu technicznego wykonanego na włókninie poliestrowej ma mniejszy ujemny wpływ na środowisko naturalne, niż produkcja przedmiotu z tkaniny lnianej. Szczególnie istotny jest tu wpływ na kategorię "zasoby" ukazujący, iż technologia haftu technicznego wpływa na zminimalizowanie zużycia surowców oraz powstawania odpadów tekstylnych. Na podstawie przeprowadzonej Środowiskowej Oceny Cyklu Życia potwierdzono hipotezę

iż produkcja kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju.

Na podstawie badań mikrotomografii komputerowej haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego i monofilamentu poliamidowego, można sformułować następujące wnioski:

- Ścieg zyg-zag ma zarówno pozytywny, jak i negatywny wpływ na strukturę haftu.
 Wzmacnia on strukturę haftu, zapobiegając przy tym powstawaniu rozwarstwiania, jednak jednocześnie może powodować uszkodzenia w włóknach i wpływać na odchylenia włókien od osi 0°.
- Długość ściegu jest kluczowym parametrem wpływającym na wytrzymałość haftu. Mniejszy ścieg oznacza większą gęstość włókien i wyższą wytrzymałość.
- Geometria haftu, kształtowana przez ścieg zyg-zag i długość ściegu, ma bezpośredni wpływ na jego właściwości mechaniczne.

Aby uzyskać optymalną wytrzymałość haftu technicznego, należy znależć równowagę między pozytywnym wpływem ściegu zyg-zag na spójność struktury a jego potencjalnym negatywnym wpływem na ciągłość włókien. Zrozumienie tych zależności jest kluczowe dla projektowania haftu o pożądanych właściwościach.

Przedstawione w powyższej pracy badania potwierdziły, że zastosowanie haftu technicznego jako wzmocnienia w kompozytach znacząco poprawia ich właściwości mechaniczne, jednoznacznie potwierdzając hipotezę, iż haft techniczny może z powodzeniem zastępować płaskie wyroby włókiennicze podczas wytwarzania kompozytów. W toku badań udowodniono, iż wzdłużne ułożenie oraz zwiększenie ilości warstw haftowanego medium wpływa na poprawę właściwości mechanicznych kompozytów zawierających układy haftowane jako wzmocnienie. Środowiskowa Ocena Cyklu Życia potwierdziła hipotezę, iż produkcja kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny przyczynia się do zmniejszenia powstawania odpadów podczas produkcji, czym wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju.

9.1. Perspektywy dalszych badań

Przedstawione w powyższej pracy badania otwierają nowe możliwości w dziedzinie materiałów kompozytowych i mogą przyczynić się do rozwoju bardziej zrównoważonych i wydajnych technologii. Na podstawie dotychczasowych badań nad kompozytami z haftem technicznym, można wyróżnić kilka obiecujących kierunków dalszych prac badawczych:

1. Optymalizacja parametrów haftu:

- Gęstość ściegu: Dokładniejsze zbadanie wpływu różnych gęstości ściegu na wytrzymałość i sztywność kompozytów.
- Rodzaj ściegu: Analiza innych rodzajów ściegów pod kątem ich wpływu na strukturę i właściwości mechaniczne haftu.

2. Wpływ rodzaju włókna:

- Naturalne włókna: badanie innych naturalnych włókien (np. konopie, len, bawełna) pod kątem ich przydatności do produkcji haftu technicznego.
- Włókna chemiczne: porównanie właściwości kompozytów z haftem wykonanym z innych rodzajów włókien, w szczególności włókien węglowych oraz szklanych.
- Włókna hybrydowe: badanie kompozytów z haftem wykonanym z mieszanki włókien naturalnych i syntetycznych.

3. Matryca kompozytu:

- Różne rodzaje żywic: badanie wpływu różnych rodzajów żywic na właściwości kompozytów z haftem.
- Nanomateriały: dodawanie nanomateriałów do żywicy w celu poprawy właściwości mechanicznych i funkcjonalnych kompozytów.

4. Modelowanie numeryczne:

- Symulacje komputerowe: rozwijanie zaawansowanych modeli numerycznych do przewidywania właściwości mechanicznych kompozytów z haftem.
- Optymalizacja konstrukcji: wykorzystanie symulacji komputerowych do optymalizacji konstrukcji kompozytów z haftem pod kątem konkretnych zastosowań.

5. Zastosowania:

- Przemysł motoryzacyjny: Zastosowanie kompozytów z haftem w produkcji elementów karoserii i wnętrz samochodów.
- Budownictwo: Wykorzystanie kompozytów z haftem w konstrukcjach budowlanych, takich jak panele ścienne i dachowe.
- Przemysł lotniczy: Zastosowanie kompozytów z haftem w produkcji lekkich i wytrzymałych elementów konstrukcyjnych samolotów.
- Sport: Wykorzystanie kompozytów z haftem w produkcji sprzętu sportowego, takiego jak rakiety tenisowe czy rowery.

Podsumowując, badania nad kompozytami z haftem technicznym otwierają szerokie perspektywy rozwoju nowych materiałów o unikalnych właściwościach. Dzięki dalszym badaniom można oczekiwać powstania innowacyjnych produktów, które znajdą zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu.

Kontynuacja badań w tych kierunkach pozwoli na:

- Optymalizację właściwości mechanicznych kompozytów poprzez precyzyjne dobranie parametrów haftu i matrycy.
- Rozszerzenie zakresu zastosowań kompozytów z haftem technicznym.
- Zwiększenie konkurencyjności produktów wykonanych z tych materiałów.
- Przyczynienie się do rozwoju zrównoważonej gospodarki poprzez wykorzystanie naturalnych włókien i minimalizację odpadów.

10. Bibliografia

[1] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, S. Zafar, A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades, Composites Part B: Engineering, 2021, Nr 215, 108768.

[2] P. Liu, C.Y. Barlow, Wind turbine blade waste in 2050, Waste Manag, 2017, Nr 62, s. 229–240.

[3] L. Yan, N. Chouw, K. Jayaraman, Flax fibre and its composites – a review. Composites Part B: Engineering, 2014, Nr 56, s. 296–317.

[4] Y.X. Yang, R. Boom, B. Irion, Recycling of composite materials, Chemical Engineering & Processing, 2012, Nr 51, s 53–68.

[5] A. Moudood, A. Rahman, A. Ochsner, M. Islam, G. Francucci, Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, Nr 38(7), s. 323–339.

[6] S. Monteiro, V. Candido, F. Braga, Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor. European Polymer Journal, 2016, Nr 78, s. 173–185.

[7] G. Cristaldi, A. Latteri, G. Recca, Composites based on natural fibre fabrics, W: P.D. Dubrovski, Woven fabric engineering, Rijeka: InTech, 2010, s. 317–342.

[8] U. Briedisa, A. Valisevskisa, M. Grecka, Development of a Smart Garment Prototype with Enuresis Alarm Using an Embroidery-Machine-Based Technique for the Integration of Electronic Components, Computer Science, 2017, Nr 104, s. 369 – 374.

[9] N. Agulio-Aguayo, P. Amann, P.P. Espineria, J. Petrasch, T. Bechtold, X-ray micro tomography of three-dimensional embroidered current collectors for lithium-ion batteries, Journal of Power Sources, 2016, Nr 306, s. 826-831.

[10] X. Liua, P.B. Lillehoja, Embroidered electrochemical sensors on gauze for rapid quantification of wound biomarkers, Biosensors and Bioelectronics, 2017, Nr 98, s. 189-194.

[11] M. Shanbeh, M.S. Johari, M. Zarrebini, M. Barburski, A. Komisarczyk, Analysis of shear characteristics of woven fabrics and their interaction with fabric integrated structural factors, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, Nr 14, s. 1–13.

[12] B. Vanleeuw, V. Carvelli, M. Barburski, S.V. Lomov, W. Aart van Vuure, Quasiunidirectional flax composite reinforcement: deformability and complex shape forming, Composites Science and Technology, 2015, Nr 110, s. 76–86.

[13] B. Vanleeuw, V. Carvelli, S.V. Lomov, M. Barburski, W. Aart van Vuure, Deformability of a flax reinforcement for composite materials, Key Engineering Materials, 2014, Nr 611-612, s. 257-264.

[14] M. Barburski, J. Masajtis, Modelling of the change of structure of woven fabric under mechanical loading, Fibres and Textiles Easter Europe, 2009, Nr 1(72), s. 39-45.

[15] A. Poniecka, M. Barburski, M. Urbaniak, Mechanical properties of composites reinforced with technical embroidery made of flax fibers, AUTEX Research Journal, 2021, Nr 22 (4)

[16] R. R. Nagavally, Composite materials - history, types, fabrication techniques, advantages, and applications, 29th IRF International Conference, 24th July, 2016, Bengaluru, India

[17] T. Kulhan, A. Kamboj, N. Kumar Gupta, N. Somani, Fabrication methods of glass fibre composites—a review, Functional Composites and Structures, 2022 Nr 4 (022001).

[18] K. N. Keya, N. A. Kona, F. A. Koly, K. M. Maraz, M. N. Islam, R. A. Khan, Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages and applications, Materials Engineering Research, 2019, Nr 1(2), s. 69-85.

[19] https://www.britannica.com/biography/Joseph-Monier [dostęp 13.08.2023]

[20] N. Uddin, Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering, Elsevier, 2013

[21] https://plasticshof.org/members/w-brandt-goldsworthy/ [dostep 15.08.2023]

[22] S. Rana. R. Fangueiro, Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, Springer, Singapore, 2016

[23] A. Kumar, K. Sharma, A.R. Dixit, Carbon nanotube- and graphene-reinforced multiphase polymeric composites: review on their properties and applications, Journal of Material Science, 2020, Nr 55, s. 2682–2724.

[24] A. Kumar, K. Sharma, A.R. Dixit, A review on the mechanical properties of polymer composites reinforced by carbon nanotubes and graphene, Carbon Letters, 2021, Nr 31, s. 149–165.

[25] F. L. Matthews, R. D. Rawlings, Composite materials: engineering and science, Woodhead Publishing, Londyn, 1999.

[26] A. May-Pa, A. Valadez-Gonzalez, P.J. Herrera-Franco, Effect of fiber surface treatments on the essential work of fracture of HDPE-continuous henequen fiber-reinforced composites, Polymer Testing, 2013, Nr 32(6), s. 1114-1122.

[27] M. Yasir Khalid, A. Al Rashid, Z. U. Arif, A. Waqas, H. Arshad, A. A. Zaidi, Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications, Results in Engineering, 2021, Nr 11 (100263).

[28] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/natural-fiber-compositesmarket-90779629.html [dostęp 02.09.2023]

[29] https://www.un.org.pl/ [dostęp 02.09.2023]

[30] M. Adamu, Applications of Sustainable Polymer Composites in Automobile and Aerospace Industry, Sustainable Polymer Composites, 2021, s. 185-207.

[31] M. A. Jabu, A.A. Alugongo, N.Z. Nkomo, The Use and Recycling of Natural and Synthetic Fibre-Reinforced Polymeric Composites in the Automotive Industry: A Review, International Journal of Engineering Trends and Technology, 2024, Nr 72 (4), s. 269-278.

[32] J. O. Ighalo, An Empirical Review of the Recent Advances in Treatment of Natural Fibers for Reinforced Plastic Composites, Composite Interfaces, 2021, Nr 28 (9), s. 925-960.

[33] K. Szeteiová, Automotive Materials Plastics in Automotive Markets Today, Engineering Materials Science, 2010, s. 27-33.

[34] E. Zini, M. Scandola, Green Composites: An Overview, Polymer Composites, 2011, Nr 32(12), s. 1905-1915.

[35] R., Kompozyty z włóknem lnianym zastępują węglowe, Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, 2023, s. 20-25.

[36] Ibidem

[37] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, A. Elharfi, Polymer composite materials: A comprehensive review, Composite Structures, 2021, Nr 262 (113640)

[38] A. Koniuszewska, K. Naplocha, J. Kaczmar, Zastosowanie lekkich elementów z kompozytów polimerowych i metalowych w budowie środków transportu, Technika, 2015, Nr 12, s. 2650.

[39] P. Kesarwani, S. Jahan, K. Kesarwani, Composites: Classification and its manufacturing process, International Journal of Applied Research, 2015, Nr 1(9), s. 352-358.

[40] M. K. Egbo, A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2021, Nr 33 (8), s. 557-568.

[41] M. M. Dawoud, H. M. Saleh, Introductory chapter: background on composite materials, W: H. El-Din Saleh, M. Koller. Characterizations of Some Composite Materials, IntechOpen, Londyn 2018

[42] A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, R. Rimašauskiene, Matrix materials used in composites: A comprehensive study, Materials Today: Proceedings, 2020, Nr 21, s. 1559–1562.

[43] S. Prashanth, K.M. Subbaya, K. Nithin, S. Sachhidananda, Fiber Reinforced Composites - A Review, Journal of Material Sciences & Engineering, 2017, Nr 6(3); (1000341).

[44] R. Kashyap, Glass compositions incorporating heavy ions (heavy metal oxides) of large polarizability have also been investigated, Fiber Bragg Gratings, Academic Press, Nowy Jork, 2012, s. 17–18.

[45] J. Zhang, V. S. Chevali, H. Wang, C-H. Wang, Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling, Composites: Part B, 2020, Nr 193 (108053).

[46] https://www.precedenceresearch.com/composites-market [dostep 12.09.2023]

[47] https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-composites-market reviewed [dostęp 15.09.2022]

[48] M. Priyadharshini, D. Balaji, V. Bhuvaneswari, L. Rajeshkumar, M. R. Sanjay, S. Siengchin, Fiber Reinforced Composite Manufacturing With the Aid of Artificial Intelligence – A State-of-the-Art Review, Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, Nr 29, s. 5511–5524.

[49] A. R. Bunsell, S. Joannès, A. Thionnet, Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials, CRC Press, Boca Raton, 2021, s. 12-13

[50] A. P. Lacerda, A. R. Xambre, H. M. Alvelos, Applying Value Stream Mapping to eliminate waste: a case study of an original equipment manufacturer for the automotive industry. International Journal of Production Research, 2015, Nr 54(6), s. 1708–1720.

[51] Q. Zhou, C. Meng, K. Yuen, J. Sheu, Remanufacturing authorization strategy for an original equipment manufacturer-contract manufacturer supply chain: Cooperation or competition?, International Journal of Production Economics, 2021, Nr 240 (108238).

[52] K. Kostur, M. Żmigrodzka, T. Balcerzak, J. Rajchel, N. Moch, A. Skwarski, P. Lubecki, I. Konieczny, R. Orłowski, Composites technology in aviation, Scientific Journal of Safety and Logistics, 2024, Nr 2(1).

[53] Q. Liu, M. Hughes. The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites, Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 2008, Nr 39, s. 1644–1652.

[54] F. Bensadoun, I. Verpoest, A. W. Vuure, Interlaminar fracture toughness of flax epoxy composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, Nr 36(2), s. 121–136.

[55] A. P. Mouritz, Review of z-pinned composite laminates, Composites Part A, 2007, Nr 38, s. 2383–2397.

[56] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Y. Liu, Z. W. Zhang, G. C. Yang, H. M. Zeng, Effect of stitching on in-plane and interlaminar properties of sisal/epoxy laminates, Journal of Composite Materials, 2001, Nr 36, s.1505–1526.

[57] A. P. Mouritz, M. K. Bannister, P. J. Falzon, K. H. Leong, Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites, Composites Part A, 1999, Nr 30, s. 1445–1461.

[58] S. L. Ogin, P. Potluri, Textile-reinforced composite materials. Handbook of technical textiles, Elsevier, Nowy Jork, 2016, s. 1-26.

[59] Y. S. Perera, R. Mudiyanselage, H. W. Muwanwella, P. R. Fernando, S. K. Fernando, T. S. S. Jayawardana, Evolution of 3D weaving and 3D woven fabric structures, Fashion and Textiles, 2021, Nr 8(11).

[60] H. Jamshaid, R. Mishra, Thermomechanical characteristics of basalt hybrid and nonhybrid woven fabric–reinforced epoxy composites. Polymer Composites, 2016, Nr 37(10), s. 2982–2994.

[61] G. Zhou, Q. Sun, D. Li, Z. Meng, Y. Peng, D. Zeng, X. Su X, Effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors in carbon/epoxy woven composites under multiaxial stress states. Polymer Testing, 2020, Nr 90, s. 1–11.

[62] M. Aghaei, M. M. Shokrieh, R. Mosalmani R, Effect of warp and fill-fiber volume fractions on mechanical properties of glass/epoxy woven fabric composites, Journal of Composite Materials, 2020, Nr 54(24), s. 3501–3513.

[63] H. Ozdemir H, B. M. Icten, The mechanical performance of plain and plain derivative woven fabrics reinforced composites: tensile and impact properties, The Journal of the Textile Institute, 2018, Nr 109(1), s. 133–145.

[64] J. K. Kim, M. L. Sham, Impact and delamination failure of woven-fabric composites, Composites Science and Technology, 2000, Nr 60(5), s. 745–761.

[65] J. Njuguna, Lightweight Composite Structures in Transport, Elsevier, Netherlands, 2016, s. 191-216.

[66] https://ctech-llc.com/en/products/cfrp-wrap/ [dostep 13.11.2023]

[67] C. Meola, S. Boccardi, G. M. Carlomagno, Infrared Thermography Evalution of Aerospace Composite Material, Woodhead Publishing, Cambridge, 2016, 1-24.

[68] U. Ahmed, A. Tariq, Y. Nawab, K. Shaker, Z. Khaliq, M. Umair, Comparison of Mechanical Behavior of Biaxial, Unidirectional and Standard Woven Fabric Reinforced Composites, Fibers and Polymers, 2020, Nr 21(6), s. 1308-1315,

[69] M. Hasan, A. Saifullah, H.N. Dhakal, S. Khandaker, F. Sarker, Improved mechanical performances of unidirectional jute fibre composites developed with new fibre architectures, RSC Advances, 2021, Nr 11, s. 23010–23022.

[70] A. P. Mouritz, Review of z-pinned laminates and sandwich composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, Nr 139(106128).

[71] X. T. Zheng, Experimental and Numerical Study on the Mode I Delamination Toughness of Z-Pinned Composite Laminates, W: Advances in Fracture and Damage Mechanics VIII. Trans Tech Publications Ltd, Bach, 2010 s. 185–188.

[72] J. Cheng, Y. Xu, W. Zhang, W. Liu, A review on the multi-scale simulation of Z-pinned composite laminates, Composite Structures, 2022, Nr 295(2022).

[73] D. D. R. Cartie, M. Troulis, I. K. Partridge, Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates, Composites Science and Technology, 2006, Nr 66, s. 855–861.

[74] A. P. Mouritz, B. N. Cox, A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, Nr 41, s. 709–728.

[75] D. A. Drake, R. W. Sullivan, A. E. Lovejoy, S. B. Clay, D. C. Jegley, Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials – A mechanistic review, Journal of Composite Materials, 2021, Nr 55(23), s. 3307-3321.

[76] A. P. Mouritz, B. N. Cox, A mechanistic approach to the properties of stitched laminates. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, Nr 31, s. 1–27.

[77]https://www.researchgate.net/publication/375962509_Automated_Fiber_Placement_i n_Automotive_Manufacturing [dostęp 22.03.2024]

[78] DH-J. Lukaszewicz, C. Ward, K. D. Potter, The engineering aspects of automated prepreg layup: history, present and future, Composites: Part B, 2012, Nr 43, s.997–1009.

[79] A. Spickenheuer, M. Schulz, K. Gliesche G. Heinrich, Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures, Plastics, Rubber and Composites, 2008, Nr 37(5/6), s. 227-232.

[80] T. Wright, T. Bechtold, A. Bernhard, A. P. Manian, M. Scheiderbauer, Tailored fibre placement of carbon fibre rovings for reinforced polypropylene composite part 1: PP infusion of carbon reinforcement, Composites Part B: Engineering, 2019, Nr 162, s. 703-711.

[81]K. Uhlig, M. Tosch, L. Bittrich, A. Leipprand, S. Dey, A. Spickenheuer, G. Heinrich, Meso-scaled finite element analysis of fiber reinforced plastics made by Tailored Fiber Placement, Composite Structures, 2016, Nr 143, s. 53–62.
[82] S. Radavičiene, M. Juciene, Z. Juchnevičiene, L. Čepukone, A. Viļumsone, U. Briedis, I. Baltiņa, Analysis of Shape Nonconformity between Embroidered Element, Materials Science, 2014, Nr 20(1), s. 84–89.

[83] https://www.zskmachines.com/technical/tailored-tube-laying-placement/ [dostęp 06.04.2024]

[84] W. Zhang, Application of Traditional Embroidery Techniques Aided by Image Design Software in Modern Clothing Design, 2020, Journal of Physics: Conference Series, Nr 1648 (032072).

[85] P.J. Crothers, K. Drechsler, D. Feltin, I. Herszberg, T. Kruckenberg, Tailored fibre placement to minimise stress concentrations, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1997, Nr 28(7), s. 619-625.

[86] L. Bittrich, A. Spickenheuer, J. Humberto, S. Almeida, S, Müller, L. Kroll, G. Heinrich, Optimizing Variable-Axial Fiber-Reinforced Composite Laminates: The Direct Fiber Path Optimization Concept, Mathematical Problems in Engineering, 2019, Nr 8260563.

[87] https://www.tailoredfiberplacement.com/ [dostęp 06.04.2024]

[88] https://www.jeccomposites.com/news/by-jec/cost-efficient-carbon-fibre-wheelarises-as-a-real-alternative-to-aluminium/ [dostęp 07.04.2024]

[89] https://www.zsk.de/en/industries-and-applications/technical-embroidery/tailored-fibre-placement.php [dostęp 07.04.2024]

[90] K. Gliesche, T. Hübner, H. Orawetz, Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an "open-hole" tension plate from carbon/ epoxy laminates, Composite Science and Technology, 2003, Nr 63, s. 81–88.

[91] K. Uhlig, A. Spickenheuer, K. Gliesche, I. Karb, Strength of CFRP open hole laminates made from NCF, TFP and braided preforms under cyclic tensile loading, Plastics, Rubber and Composites, 2010, Nr 39, s. 247–255.

[92] C. Linz, C. Kallmayer Kallmayer, R. Aschenbrenner, H. Reichl, Fully Integrated EKG Shirt based on Embroidered Electrical Interconnections with Conductive Yarn and Miniaturized Flexible Electronics, Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 2006, s. 2.

[93] R. H. Morris, G. McHale, T. Dias, M. I. Newton, Embroidered Coils for Magnetic Resonance Sensors, Electronics, 2013, Nr 2, s. 168-177.

[94] V. Mecnika, M. Hoerr, I. Krievins, S. Jockenhoevel, T. Gries, Technical Embroidery for Smart Textiles: Review, Materials Science Textile and Clothing Technology, 2014, Nr 9, s. 56-63.

[95] https://www.tfp-tech.com/en/electric-heating-elements/ [dostep 10.04.2024]

[96] https://www.tailoredfiberplacement.com/ [dostęp 10.04.2024]

[97] https://images.app.goo.gl/npoJoP54Vq1MX5yg7 [dostęp 10.04.2024]

[98] https://www.compositesworld.com/articles/tailored-fiber-placement-besting-metalin-volume-production [dostęp 10.04.2024] [99] https://retaildesignblog.net/2016/02/16/adidas-futurecraft-tailored-fibre-byalexander-taylor-studio/ [dostęp 10.04.2024]

[100] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, I. Verpoest, Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, Nr 83, s. 193-205.

[101] F. A. Almansour, H. N. Dhakal, Z. Y. Zhang, Effect of water absorption on Mode I interlaminar fracture toughness of flax/basalt reinforced vinyl ester hybrid composites, Composites Structures, 2017, Nr 168, s. 813–825.

[102] J. Periset, The natural, flax and hemp vegetation fibers of Europe, CELC, European Confederation of Flax and Hemp 2009

[103] S. Shahinur, M. Hasan, Natural Fiber and Synthetic Fiber Composites: Comparison of Properties, Performance, Cost and Environmental Benefits, W; Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2019, s. 794-802.

[104] M. Ravandi, W. S. Teo, L. Q. N. Tran, M. S. Yong, T. E. Tay, The effects of throughthe thickness stitching on the Mode I interlaminar fracture toughness of flax/epoxy composite laminates. Materials & Designs, 2016, Nr 109, s. 659–669.

[105] D. B. Dittenber, H. V. S. Gangarao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, Nr 43, s. 1419–1429.

[106] L. Yan, N. Chouw, K. Jayaraman, Flax fibre and its composites – a review, Composites Part B, 2014, Nr 56, s. 296–317.

[107] K. N. Keya, N. A. Kona, F. A. Koly, K. M. Maraz, M. N. Islam, R. A. Khan, Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages and applications, Materials Engineering Research, 2019, Nr 1(2), s. 69-85.

[108] M. A. Jabu, A. A. Alugongo, N. Z. Nkomo., The Use and Recycling of Natural and Synthetic Fibre-Reinforced Polymeric Composites in the Automotive Industry: A Review, International Journal of Engineering Trends and Technology, 2024, Nr 72(4), s. 269-278.

[109] M. Ramesh, R. Bhoopathi, C. Deepa, G. Sasikala G, Experimental investigation on morphological, physical and shear properties of hybrid composite laminates reinforced with fax and carbon fbers. Journal of the Chinese Advanced Materials Society, 2018, Nr 6(4), s. 640–654.

[110] J. E. Fernandez, Flax fiber reinforced concrete – A natural fiber biocomposite for sustainable building materials, High Performance Structures Materials, 2002, Nr 4, s. 193–207.

[111] C. Buksnowitz, R. Adusumalli, A. Pahler, H. Sixta, W. Gindl, Acoustical properties of Lyocell, hemp, and flax composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, Nr 29, s. 3149–3154.

[112] JEC Composite Magazine 2019, nr 127.

[113] P. Wambua, J. Ivens, I. Verpoest, Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?, Composites Science and Technology, 2003, Nr 63, s. 1259–1264.

[114] U. Kureemun, M. Ravandi, L. Q. N. Tran, W. S. Teo, T. E. Tay, H. P. Lee. Effects of hybridization and hybrid fibre dispersion on the mechanical properties of woven flax

carbon epoxy at low carbon fibre volume fractions, Composites Part B, 2018, Nr 134, s. 28–38.

[115] G. Koronis, A. Silva, M. Fontul, Green composites: a review of adequate materials for automotive applications, Composites Part B: Engineering, 2013, Nr 44, s. 120–127.

[116] F. M. Al-Oqla, S. M. Sapuan, Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry, Journal of Cleaner Production, 2014, Nr 66, s. 347–354.

[117] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, I. Verpoest, Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, Nr 83, s. 193–205.

[118] A. Moudood, A. Rahman, A. Ochsner, M. Islam, G. Francucci, Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, Nr 38(7), s. 323–339.

[119] M. Holmes, Recycled carbon fiber composites become a reality, Reinforced Plastics, 2018, Nr 62(3), s. 148-153.

[120] D. Borjan, Ž. Knez, M. Knez, Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Composites – Difficulties and Future Perspectives, Materials, 2021, Nr 14(15), 4191.

[121] S. Kumar, S. Krishnan, Recycling of carbon fiber with epoxy composites by chemical recycling for future perspective: a review, Chemical Papers, 2020, Nr 74, s. 3785–3807.

[122] P. Sormunen, T. Kärki, Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing, Journal of Building Engineering, 2019, Nr 24, s. 1-14.

[123] M. R. M. Asyraf, A. Syamsir, N. M. Zahari, A. B. M. Supian, M. R. Ishak, S M. Sapuan, S. Sharma, A. Rashedi, M. R. Razman, S. Z. S. Zakaria, Product Development of Natural Fibre-Composites for Various Applications: Design for Sustainability, Polymers, 2022, Nr 14(920).

[124] P. Peças, H. Carvalho, H. Salman, M. Leite, Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review, Journal of Composites Science, 2018, Nr 2(66).

[125] P. R. Sarika, P. Nancarrow, A. Khansaheb, T. Ibrahim, Bio-Based Alternatives to Phenol and Formaldehyde for the Production of Resins, Polymers, 2020, Nr 12(2237).

[126] H. Awais, Y. Nawab, A. Amjad, A. Anjang, H. Md Akil, M. S. Z. Abidin, Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review, Composites Part C, 2021, Nr 4(100082).

[127] A. Ding, J. Wang, A. Ni, S. Li, A new analytical solution for cure-induced spring-in of L-shaped composite parts, Composites Science and Technology, 2019, Nr 171, s. 1–12.

[128] N. Iremath, S. Young, H. Ghossein, D. Penumadu, U. Vaidya, M. Theodore, Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications, Composites Part B: Engineering, 2020, Nr 198, s. 108156.

[129] H. Albers, Recycling of wind turbine rotor blades - fact or Fiction?, DEWI Magazine, 2009, Nr 34, s. 32–41.

[130] https://www.rehva.eu/eu-policy/circular-economy-package [dostęp 15.06.2024]

[131] M. Y. Khalid, Z. U. Arif, M. Hossain, R. Umer, Recycling of wind turbine blades through modern recycling technologies: A road to zero waste, Renewable Energy Focus, 2023, Nr 44, s. 373-389.

[132] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, S. Zafar, A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades panel, Composites Part B: Engineering, 2021, Nr 215 (108768).

[133] https://kompozyty.net/rynek-kompozytow-na-bazie-wlokien-szklanych/ [dostęp 15.04.2024]

[134] C. V. Amaechi, C. O. Agbomerie, E. O. Orok, J. Ye, Economic Aspects of Fiber Reinforced Polymer Composite Recycling, W: Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, Elsevier, Oxford, 2020, s. 377–397.

[135] P. T. Mativenga, J. Agwa-Ejonb, C. Mbohwab, A, A. M. Sultana, N. A. Shuaiba, Procedia Circular Economy Ownership Models: A view from South Africa, Industry Manufacturing, 2017, Nr 8, s. 284 – 291.

[136] A. E. Krauklis, C. W. Karl, A. I. Gagani, J. K. Jørgensen, Composite Material Recycling Technology – State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s., Journal of Composites Science, 2021, Nr 5(28).

[137] Dane technologiczne firmy Safilin

[138] PN-EN ISO 13934-1 "Tekstylia. Właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska"

[139] PN-EN ISO 2062: 2010 "Tekstylia. Nitki w nawojach. Wyznaczanie siły zrywającej i wydłużenia przy zerwaniu odcinków nitki z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej o stałym przyroście wydłużenia (CRE)"

[140] PN-EN ISO 527-4. Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites

[141] BS EN ISO 14125:1998 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties.

[142] A. Boczkowska, S. Wojciechowski, Kompozyty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003, s. 23.

[143] PN-EN ISO 527-4:1997. Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites

[144] A. Bełzowski, Podstawowe wiadomości o próbach wytrzymałości materiałów kompozytowych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, Wrocław, 2007, s. 5.

[145] ASTM D2344/D2344M-00 Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

[146] Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites

[147] G. Mieczkowski, K. Molski, Współczynnik uwalniania energii jako parametr oceny odporności struktury dwufazowej stal–pmma na pękanie w złożonym stanie obciążenia, Acta mechanica et automatica, 2009, Nr 3(2) s.52-54.

[148] P. Ouagne, S. Renouard, D. Michel, E. Laine, Mechanical properties of flax and hemp yarns designed for the manufacturing of geotextiles improvement of the resistance to soil born microorganisms, Journal of Textile Engineering & Fashion Technology, 2017, Nr 1(5), s. 210-215.

[149] I. Verpoest, J. Baets, S. V. Lomov, Chapter III "Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry", JEC Composites, 2012, s. 61-70.

[150] EN ISO 527-4:1997; Plastics—Determination of Tensile Properties—Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre-Reinforced Plastic Composites

[151] V. G. Larsen, N. Tollin, P. A. Sattrup, M. Birkved, T. Holmboe, What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, Journal of Building Engineering, 2022, Nr 50, s. 3.

[152] International Organization for Standardization (2006a) ISO 14040— Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework

[153] S. Manzo, Y. Dong, S, Miraglia, K B. Salling, How the inclusion of life cycle impacts affects transport cost-benefit analysis, European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2018, Nr 18(4), s. 372-388.

[154] https://analizy.mz.gov.pl/html/zpa_sm/gbd.html [dostęp 21.12.2023]

[155] https://mrozbike.pl/siodelko-rowerowe-selle-royal-respiro-soft-moderate-p-2141.html [dostęp 20.11.2023]

Spis tabel

Tabela 1. Właściwości mechaniczne wybranych włókien

Tabela 2. Właściwości żywicy epoksydowej SR GreenPoxy 33

Tabela 3. Właściwości utwardzacza SD 4772

Tabela 4. Właściwości mechaniczne systemu żywica epoksydowa SR GreenPoxy 33 + utwardzacz SD 4772

Tabela 5. Właściwości niedoprzędu lnianego

Tabela 6. Parametry badań wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu haftów

Tabela 7. Parametry badań wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu niedoprzędu oraz nici mocującej

Tabela 8. Kierunek ułożenia niedoprzędu w kolejnych warstwach poszczególnych wariantów

Tabela 9. Właściwości żywicy użytej do wykonania kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych

Tabela 10. Parametry badania wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu sześciu wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów

Tabela 11. Parametry badania odporności na zginanie sześciu wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów

Tabela 12. Średnie wydłużenie oraz średnia maksymalna wytrzymałość kolejnych wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów

Tabela 13. Średnie wartości wytrzymałości na zginanie kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny

Tabela 14. Rodzaje wytworzonych wzmocnień

Tabela 15. Parametry testu wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu

Tabela 16. Warianty kompozytów poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie

Tabela 17. Parametry testu wytrzymałości na zginanie

Tabela 18. Rodzaje wytworzonych wzmocnień

Tabela 19. Parametry testu odporności na pękanie

Tabela 42. Parametry procesu skanowania haftu technicznego wykonanego z włókien lnianych

Tabela 20. Właściwości próbek użytych do wykonania modeli wirtualnych

Tabela 21. Właściwości warstw próbek haftu

Tabela 22. Porównanie wyników z badań numerycznych z wynikami z badań eksperymentalnych

Tabela 23. Właściwości warstw próbek kompozytu zawierającego jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych

Tabela 24. Zestawienie wyników z badań numerycznych z wynikami z badań eksperymentalnych

Tabela 25. Plan eksperymentu zestawy 15 modeli numerycznych

Tabela 26. Założenie zmiany wartości modułu sprężystości oraz ścinania wraz ze zwiększeniem długości ściegu haftu

Tabela 27. Założone wartości gęstości oraz modułów ścinania

Tabela 28. Szacowane wartości wytrzymałości dla poszczególnych orientacji

Tabela 29. Założone wartości wytrzymałości próbek

Tabela 30. Szacowana siła maksymalna próbek

Tabela 31. Opracowane założenia dla 15 modeli numerycznych

Tabela 32. Opracowane założenia dla 15 modeli wirtualnych

Tabela 33. Wydłużenie oraz wytrzymałość wykonanych modeli numerycznych

Tabela 34. Wybrane warianty modeli wirtualnych poddane weryfikacji

Tabela 35. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy rozciąganiu wybranych modeli numerycznych oraz wariantów poddanych weryfikacji

Tabela 36. Teoretyczne zużycie materiałów wykorzystanych do produkcji siodełka przy wykorzystaniu haftu technicznego oraz tkaniny

Tabela 37. Wskaźniki charakteryzowania przedstawione sumarycznie dla wykonywania haftu oraz tkaniny

Tabela 38. Wartości punktów końcowych dla procesu wytwarzania haftu

Tabela 39. Wartości punktów końcowych dla procesu wytwarzania tkaniny

Tabela 40. Wskaźniki charakteryzowania przedstawione sumarycznie dla wykonywania haftu bez udziału tkaniny bawełnianej oraz tkaniny

Tabela 41. Wartości punktów końcowych dla procesu wytwarzania haftu bez udziału tkaniny bawełnianej

Spis ilustracji

- Rysunek 1. Schemat prac badawczych zawartych w pracy
- Rysunek 2. Podział kompozytów ze względu na rodzaj wzmocnienia: a) cząstkami, b) włóknami krótkimi, c) włóknami długimi, d) tkaniną, e) warstwami (laminat)
- Rysunek 3. Materiał ud wykonany z włókien węglowych
- Rysunek 4. Przykład kompozytów wzmocnionych z-pinami
- Rysunek 5. Schemat technologii Automated Fibre Placement
- Rysunek 6. Hafciarka komputerowa firmy ZSK, model JCZA 0109-550
- Rysunek 7. Technologia haftu technicznego
- Rysunek 8. Przymocowanie rurki silikonowej za pomocą haftu technicznego
- Rysunek 9. Przykład możliwości ułożenia włókien w hafcie technicznym
- Rysunek 10a i 10b. Widok felgi samochodowej wykonanej za pomocą haftu technicznego
- Rysunek 11. Koszulka z haftowanymi elektrodami i przewodnikami
- Rysunek 12. Cewka wykonana przy pomocy haftu technicznego
- Rysunek 13. Mata grzewcza wykonana przy pomocy haftu technicznego
- Rysunek 14. Orteza wykonana przy pomocy haftu technicznego
- Rysunek 15. Siodełko rowerowe wykonane technologią haftu technicznego
- Rysunek 16. Element silnika wykonany przy pomocy haftu technicznego
- Rysunek 17a i 17b. Produkcja butów sportowych przy wykorzystaniu haftu technicznego
- Rysunek 18. Schemat prac badawczych
- Rysunek 19. Sposób ułożenia niedoprzędu pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki
- Rysunek 20. Sposób ułożenia niedoprzędu pod kątem 90° do kierunku wzdłużnego próbki
- Rysunek 21. Sposób ułożenia niedoprzędu pod kątem 45° do kierunku wzdłużnego próbki
- Rysunek 22. Haft techniczny o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki
- Rysunek 23. Haft techniczny o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 90° do kierunku wzdłużnego próbki
- Rysunek 24. Haft techniczny o ułożeniu niedoprzędu pod kątem 45° do kierunku wzdłużnego próbki
- Rysunek 25. Haft techniczny składający się z trzech warstw o kierunkach ułożenia niedoprzędu pod kątem kolejno 0°, 90°, 0° do kierunku wzdłużnego próbki
- Rysunek 26. Maszyna wytrzymałościowa Shimadzu

- Rysunek 27. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od wydłużenia przy rozciąganiu haftów jednowarstwowych oraz trójwarstwowego haftu
- Rysunek 28. Średnia maksymalna wytrzymałość na rozciąganie haftów jedno- oraz trzywarstwowych
- Rysunek 29. Średnie maksymalne wydłużenie przy rozciąganiu haftów jedno- oraz trzywarstwowych
- Rysunek 30. Siła zrywająca oraz wydłużenie niedoprzędu lnianego użytego do wykonania haftu technicznego
- Rysunek 31. Siła zrywająca oraz wydłużenie przy rozciąganiu nitki poliestrowej użytej do wykonania haftu technicznego
- Rysunek 32. Schemat prowadzonych badań

Rysunek 33. Haft techniczny z włókien lnianych

Rysunek 34. Wytworzony kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft techniczny wykonany z włókien lnianych

Rysunek 35. Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie wyprodukowanych kompozytów

- Rysunek 36a i 36b. Średnie wydłużenie oraz średnia maksymalna wytrzymałość kolejnych wariantów kompozytów zawierających jako wzmocnienie siedmiowarstwowe układy haftów
- Rysunek 37. Średnie wartości wytrzymałości na zginanie kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny
- Rysunek 38. Wytrzymałość na zginanie oraz ugięcie wyprodukowanych kompozytów
- Rysunek 39. Schemat prowadzonych badań
- Rysunek 40. Wizualizacja użytych długości ściegu zyg-zag
- Rysunek 41. Po lewej: jedna warstwa haftu. Po prawej: materiał UD
- Rysunek 42. Tkanina lniana wykorzystana do wykonania kompozytów
- Rysunek 43. Maksymalne wartości wytrzymałości na rozciąganie
- Rysunek 44. Widok kompozytu zawierającego jako wzmocnienie materiał UD wykonany na hafciarce komputerowej.
- Rysunek 45. Maksymalne wydłużenie badanych kompozytów
- Rysunek 46. Wykres zależność wytrzymałości od wydłużenia wariantów 0°
- Rysunek 47. Widok próbek o układzie niedoprzędu 0° po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie
- Rysunek 48. Wytrzymałość oraz wydłużenie wariantów 90°

- Rysunek 49. Widok próbek o układzie niedoprzędu 90° po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie
- Rysunek 49. Widok próbek o układzie niedoprzędu 90° po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie
- Rysunek 50. Wytrzymałość oraz wydłużenie wariantów ±45°
- Rysunek 51. Widok próbek o układzie niedoprzędu ±45° po wykonaniu testu wytrzymałości na rozciąganie
- Rysunek 52. Moduł Younga testowanych kompozytów
- Rysunek 53. Wytrzymałość na ścinanie wyprodukowanych kompozytów
- Rysunek 54. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft o długości ściegu 8 mm, z pęknięciem typu zginanie
- Rysunek 55. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę, z pęknięciem typu ścinanie między warstwowe
- Rysunek 56. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie materiał UD, z pęknięciem typu ścinanie między warstwowe
- Rysunek 57. Umiejscowienie folii oraz tkaniny teflonowej podczas wykonywania haftu technicznego służącego jako wzmocnienie kompozytu
- Rysunek 58. Widok wykonanej próbki
- Rysunek 59. Widok próbki przygotowanej do badania dcb
- Rysunek 60. Wykres zależności siły od wielkości rozwarcia próbek kompozytów zawierających jako wzmocnienie haft techniczny
- Rysunek 61. Wykres zależności siły od wielkości rozwarcia próbek kompozytów zawierających jako wzmocnienie materiał UD oraz tkaninę
- Rysunek 62. Maksymalna wartość współczynnika uwalniania energii badanych kompozytów
- Rysunek 63. Maksymalna wartość siły badanych kompozytów
- Rysunek 64. Maksymalna wartość rozwarcia szczelin badanych kompozytów
- Rysunek 65. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie haft techniczny o długości ściegu 2 mm, podczas przeprowadzenia badania.
- Rysunek 66. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie tkaninę, podczas przeprowadzania badania.
- Rysunek 67. Kompozyt zawierający jako wzmocnienie materiał UD, podczas przeprowadzania badania.
- Rysunek 68. Schemat prowadzonych badań

- Rysunek 69. Mikrotomograf komputerowy (micro-CT) model SkyScan 1272 wyprodukowany przez firmę Bruker (Belgia)
- Rysunek 70. Obraz 3D haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego oraz monofilamentu poliamidowego o długości ściegu 2 mm
- Rysunek 71. Obraz 3D haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego oraz monofilamentu poliamidowego o długości ściegu 4 mm
- Rysunek 72. Obraz 3D haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego oraz monofilamentu poliamidowego o długości ściegu 8 mm
- Rysunek 73a i 73b. Haft o długości ściegu 2 mm z zaznaczonymi charakterystycznymi miejscami wkłucia igły
- Rysunek 74. Haft o długości ściegu 4 mm z zaznaczonymi charakterystycznymi miejscami wkłucia igły
- Rysunek 75. Haft o długości ściegu 2 mm
- Rysunek 76. Haft o długości ściegu 4 mm
- Rysunek 77. Haft o długości ściegu 8 mm
- Rysunek 78. Schemat prowadzonych badań
- Rysunek 79. Schemat blokowy etapów badań numerycznych dla haftu technicznego wykonanego z niedoprzędu lnianego
- Rysunek 80. Model geometryczny haftu technicznego
- Rysunek 81. Siatka modelu
- Rysunek 82. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 1: 1 warstwa, 0°, siła: 633 N
- Rysunek 83. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 2: 3 warstwy, 0°/90°/0°, siła: 1400 N
- Rysunek 84. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 3: 1 warstwa, 45°, siła: 220 N
- Rysunek 85. Symulacja numeryczna próbki nr 1: 0°, siła: 8580 N
- Rysunek 86. Symulacja numeryczna próbki nr 2: 90°, siła: 1440 N
- Rysunek 87. Symulacja numeryczna próbki nr 3: ±45°, siła: 2820 N
- Rysunek 88. Zależność wytrzymałości od orientacji niedoprzędu w kompozycie
- Rysunek 89. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 1: 4 warstwy, 8°, 3 mm
- rysunek 90. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 1: 4 warstwy, 8°, 3 mm
- Rysunek 91. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 2: 4 warstwy, 8°, 7 mm
- Rysunek 92. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 2: 4 warstwy, 8°, 7 mm

Rysunek 93. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 3: 4 warstwy, 82°, 3 mm

- Rysunek 94. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 3: 4 warstwy, 82°, 3 mm
- Rysunek 95. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 4: 4 warstwy, 82°, 7 mm
- Rysunek 96. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 4: 4 warstwy, 82°, 7 mm
- Rysunek 97. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 5: 4 warstwy, 45°, 5 mm
- Rysunek 98. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 5: 4 warstwy, 45°, 5 mm
- Rysunek 99. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 6: 8 warstw, 8°, 3 mm
- Rysunek 100. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 6: 8 warstw, 8°, 3 mm
- Rysunek 101. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 7: 8 warstw, 8°, 7 mm
- Rysunek 102. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 7: 8 warstw, 8°, 7 mm
- Rysunek 103. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 8: 8 warstw, 82°, 3 mm
- Rysunek 104. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 8: 8 warstw, 82°, 3 mm
- Rysunek 105. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 9: 8 warstw, 82°, 7 mm
- Rysunek 106. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 9: 8 warstw, 82°, 7 mm
- Rysunek 107. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 10: 8 warstw, 45°, 5 mm
- Rysunek 108. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 10: 8 warstw, 45°, 5 mm
- Rysunek 109. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 11: 6 warstw, 0°, 5 mm
- Rysunek 110. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 11: 6 warstw, 0°, 5 mm
- Rysunek 111. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 12: 6 warstw, 90°, 5 mm
- Rysunek 112. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 12: 6 warstw, 90°, 5 mm
- Rysunek 113. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 13: 6 warstw, 45°, 2 mm
- Rysunek 114. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 13: 6 warstw, 45°, 2 mm
- Rysunek 115. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 14: 6 warstw, 45°, 8 mm

- Rysunek 116. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 14: 6 warstw, 45°, 8 mm
- Rysunek 117. Symulacja numeryczna wydłużenia próbki nr 15: 6 warstw, 45°, 5 mm
- Rysunek 118. Symulacja numeryczna wytrzymałości na rozciąganie próbki nr 15: 6 warstw, 45°, 5 mm
- Rysunek 119. Wydłużenie 15 zamodelowanych wariantów kompozytów
- Rysunek 120. Maksymalna wytrzymałość 15 zamodelowanych wariantów kompozytów
- Rysunek 121. Schemat prowadzonych badań
- Rysunek 122. Wytrzymałość oraz wydłużenie kompozytów poddanych weryfikacji
- Rysunek 123a i 123b. Maksymalna wytrzymałość oraz maksymalne wydłużenie kompozytów poddanych weryfikacji
- Rysunek 124. Obraz siodełka rowerowego służącego do wykonania analizy LCA
- Rysunek 125. Procentowe porównanie wartości punktów końcowych dla procesów wytwarzania haftu oraz tkaniny
- Rysunek 126. Procentowe porównanie wartości punktów końcowych dla procesów wytwarzania haftu bez udziału tkaniny bawełnianej oraz tkaniny

Załącznik 1

Tabela 42. Poszczególne wskaźniki charakteryzowania dla wykonywania haftu oraz tkaniny

	Proces											
Kategoria wpływu	Jednostka	Energia elektrycz na	Włókno Iniane	Flizelina poliestr owa	Włókno poliamid owe	Tkanina bawełni ana	Spalanie odpadó w tekstyln ych	Haft sumaryc znie	Włókno Iniane	Tkanina	Spalanie odpadó w tekstyln ych	Tkanina sumaryc znie
Powstawanie drobnych cząstek stałych	DALY	2,4E-06	2,6E-06	1,9E-07	1,6E-07	4,5E-06	4,5E-08	9,9E-06	4,7E-06	5,5E-06	2,3E-07	1,0E-05
Niedobór zasobów kopalnych	USD2013	4,4E-02	6,9E-02	2,7E-02		1,5E-01	1,9E-03	2,9E-01	1,2E-01	1,9E-01	9,6E-03	3,3E-01
Zanieczyszczenie wód słodkich	species.yr	9,3E-11	4,4E-11	5,2E-12	1,2E-14	1,4E-10	1,6E-12	2,9E-10	7,9E-11	9,3E-11	8,2E-12	1,8E-10
Eutrofizacja wód słodkich	species.yr	1,8E-09	2,3E-10	3,5E-11	1,2E-13	1,4E-09	1,6E-12	3,5E-09	4,2E-10	3,8E-09	8,1E-12	4,2E-09
Globalne ocieplenie, ekosystemy słodkowodne	species.yr	1,6E-13	1,0E-13	1,5E-14	2,3E-14	2,4E-13	9,4E-15	5,5E-13	1,9E-13	2,0E-13	4,7E-14	4,3E-13
Globalne ocieplenie, zdrowie ludzkie	DALY	1,9E-06	1,2E-06	1,8E-07	2,8E-07	2,9E-06	1,1E-07	6,7E-06	2,3E-06	2,4E-06	5,8E-07	5,3E-06
Globalne ocieplenie, ekosystemy lądowe	species.yr	5,9E-09	3,8E-09	5,4E-10	8,4E-10	8,9E-09	3,4E-10	2,0E-08	6,8E-09	7,3E-09	1,7E-09	1,6E-08
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	DALY	5,8E-07	2,0E-07	4,6E-08	5,2E-10	4,1E-07	3,4E-09	1,2E-06	3,6E-07	4,7E-07	1,7E-08	8,5E-07
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	DALY	8,0E-07	-4,2E-07	4,1E-08	6,6E-10	8,9E-07	1,1E-08	1,3E-06	-7,6E-07	-1,0E-06	5,7E-08	-1,7E-06
Promieniowanie jonizujące	DALY	4,4E-10	2,8E-10	9,4E-11	8,4E-11	1,5E-09	2,0E-12	2,4E-09	5,0E-10	1,3E-09	1,0E-11	1,8E-09

Zagospodarowanie terenu	species.yr	2,5E-10	5,3E-09	4,7E-11		1,8E-08	7,4E-13	2,4E-08	9,5E-09	1,8E-08	3,8E-12	2,7E-08
Zanieczyszczenie wód morskich	species.yr	1,9E-11	7,6E-12	1,1E-12	2,0E-14	2,0E-11	3,2E-13	4,7E-11	1,4E-11	1,8E-11	1,6E-12	3,3E-11
Eutrofizacja wód morskich	species.yr	2,8E-13	7,5E-12	2,9E-14	8,9E-15	2,6E-11	6,2E-14	3,3E-11	1,4E-11	7,2E-12	3,1E-13	2,1E-11
Niedobór zasobów mineralnych	USD2013	4,0E-04	1,3E-03	2,0E-04	1,9E-06	1,6E-03	2,4E-05	3,6E-03	2,4E-03	2,0E-03	1,2E-04	4,5E-03
Tworzenie się ozonu, zdrowie człoiweka	DALY	3,9E-09	5,6E-09	4,4E-10	5,7E-10	8,9E-09	4,5E-10	2,0E-08	1,0E-08	1,1E-08	2,3E-09	2,3E-08
Tworzenie się ozonu, ekosystemy lądowe	species.yr	5,5E-10	8,1E-10	6,8E-11	8,3E-11	1,3E-09	6,4E-11	2,9E-09	1,5E-09	1,6E-09	3,3E-10	3,4E-09
Zubożenie ozonu stratosferycznego	DALY	2,3E-10	6,8E-09	4,1E-10	4,1E-10	9,8E-09	9,7E-10	1,9E-08	1,2E-08	6,5E-09	4,9E-09	2,4E-08
Zakwaszenie lądów	species.yr	2,3E-09	4,1E-09	1,4E-10	1,7E-10	5,4E-09	4,8E-11	1,2E-08	7,4E-09	5,0E-09	2,4E-10	1,3E-08
Zanieczyszczenie lądów	species.yr	3,4E-11	5,5E-11	8,3E-12	4,7E-13	8,2E-11	2,7E-13	1,8E-10	9,9E-11	1,2E-10	1,4E-12	2,2E-10
Zużycie wody, ekosystemy wodne	species.yr	3,9E-14	2,7E-13	1,4E-15	1,8E-16	9,4E-13	1,3E-16	1,2E-12	4,8E-13	2,6E-13	6,8E-16	7,4E-13
Zużycie wody, zdrowie ludzkie	DALY	1,4E-07	9,8E-07	5,3E-09	6,5E-10	3,4E-06	4,9E-10	4,6E-06	1,8E-06	9,5E-07	2,5E-09	2,7E-06
Zużycie wody, Ekosystem Iądowy	species.yr	8,8E-10	6,0E-09	3,2E-11	3,9E-12	2,1E-08	3,0E-12	2,8E-08	1,1E-08	5,8E-09	1,5E-11	1,7E-08

Tabela 43. Wskaźniki charakteryzowania dla wykonywania haftu bez udziału tkaniny bawełnianej

Kategoria wpływu	Jednostka	Energia elektryczna	Włókno Iniane	Flizelina poliestrowa	Włókno poliamidowe	Spalanie odpadów tekstylnych	Haft sumarycznie
Powstawanie drobnych cząstek stałych	DALY	2,4E-06	2,6E-06	1,9E-07	1,6E-07	5,0E-09	5,3E-06
Niedobór zasobów kopalnych	USD2013	4,4E-02	6,9E-02	2,7E-02		2,1E-04	1,4E-01
Zanieczyszczenie wód słodkich	species.yr	9,3E-11	4,4E-11	5,2E-12	1,2E-14	1,8E-13	1,4E-10
Eutrofizacja wód słodkich	species.yr	1,8E-09	2,3E-10	3,5E-11	1,2E-13	1,8E-13	2,1E-09
Globalne ocieplenie, ekosystemy słodkowodne	species.yr	1,6E-13	1,0E-13	1,5E-14	2,3E-14	1,0E-15	3,0E-13
Globalne ocieplenie, zdrowie ludzkie	DALY	1,9E-06	1,2E-06	1,8E-07	2,8E-07	1,3E-08	3,7E-06
Globalne ocieplenie, ekosystemy lądowe	species.yr	5,9E-09	3,8E-09	5,4E-10	8,4E-10	3,8E-11	1,1E-08
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	DALY	5,8E-07	2,0E-07	4,6E-08	5,2E-10	3,8E-10	8,3E-07
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	DALY	8,0E-07	-4,2E-07	4,1E-08	6,6E-10	1,3E-09	4,2E-07
Promieniowanie jonizujące	DALY	4,4E-10	2,8E-10	9,4E-11	8,4E-11	2,2E-13	8,9E-10
Zagospodarowanie terenu	species.yr	2,5E-10	5,3E-09	4,7E-11		8,2E-14	5,6E-09
Zanieczyszczenie wód morskich	species.yr	1,9E-11	7,6E-12	1,1E-12	2,0E-14	3,6E-14	2,7E-11
Eutrofizacja wód morskich	species.yr	2,8E-13	7,5E-12	2,9E-14	8,9E-15	6,9E-15	7,8E-12

Niedobór zasobów mineralnych	USD2013	4,0E-04	1,3E-03	2,0E-04	1,9E-06	2,6E-06	2,0E-03
Tworzenie się ozonu, zdrowie człoiweka	DALY	3,9E-09	5,6E-09	4,4E-10	5,7E-10	5,0E-11	1,1E-08
Tworzenie się ozonu, ekosystemy lądowe	species.yr	5,5E-10	8,1E-10	6,8E-11	8,3E-11	7,1E-12	1,5E-09
Zubożenie ozonu stratosferycznego	DALY	2,3E-10	6,8E-09	4,1E-10	4,1E-10	1,1E-10	7,9E-09
Zakwaszenie lądów	species.yr	2,3E-09	4,1E-09	1,4E-10	1,7E-10	5,3E-12	6,7E-09
Zanieczyszczenie lądów	species.yr	3,4E-11	5,5E-11	8,3E-12	4,7E-13	3,0E-14	9,8E-11
Zużycie wody, ekosystemy wodne	species.yr	3,9E-14	2,7E-13	1,4E-15	1,8E-16	1,5E-17	3,1E-13
Zużycie wody, zdrowie ludzkie	DALY	1,4E-07	9,8E-07	5,3E-09	6,5E-10	5,5E-11	1,1E-06
Zużycie wody, Ekosystem lądowy	species.yr	8,8E-10	6,0E-09	3,2E-11	3,9E-12	3,3E-13	6,9E-09