DESIGN AND DEVELOPMENT OF 3D WOVEN SPACER FABRICS FOR STRUCTURAL COMPOSITES

GHANSHYAM SURYAKANT NEJE

DEPARTMENT OF TEXTILE TECHNOLOGY
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
OCTOBER 2018

DESIGN AND DEVELOPMENT OF 3D WOVEN SPACER FABRICS FOR STRUCTURAL COMPOSITES

by

GHANSHYAM SURYAKANT NEJE

Department of Textile Technology

Submitted

in fulfillment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy

to the

DEPARTMENT OF TEXTILE TECHNOLOGY

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2018

Dedicated

To

My Parents

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Design and development of 3D woven spacer fabrics for structural composites"** being submitted by **Mr. Ghanshyam Suryakant Neje** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of bona fide research work carried out by him. Mr. Ghanshyam Suryakant Neje has worked under my guidance and supervision and fulfilled the requirements for submission of the thesis. The results contained in thesis have not been submitted, in part or full, to any other university for the award of any degree or diploma.

Prof. B. K. Behera

Department of Textile Technology

Indian Institute of Technology Delhi,

New Delhi- 110016.

ACKNOWLEDGEMENTS

Words of appreciation and gratitude fall short to acknowledge the inspiring guidance, valuable suggestions, constant encouragement and liberty provided by Prof. B. K. Behera at every stage of this research. I enjoyed working under him throughout my Ph.D.

I gratefully acknowledge the help and suggestions by my SRC members Prof. R. Alagirusamy, Prof. Samrat Mukhopadhyay, Prof. S. P. Singh (Department of Mechanical Engineering), and other faculty members of the department. I also wish to thank ex-Heads of the Department, Prof. Kushal Sen and Prof. R. Chattopadhyay for their encouragement and support.

I gratefully acknowledge the help and support of Dr. Elif Ozden Yenigun, Dr. Hulya Cebeci, and Mr. Firat Turgut from Istanbul Technical University, Turkey.

I acknowledge the help & cooperation of the lab staff members especially Mr. M. Kundu, Mr. M. Singh, Mr. B. Biswal, and Mr. Vikas Khatkar.

I am thankful to Mr. Jeevan Pandey and Mr. T. H. Ansari for their help and support.

I am thankful to all my friends especially Mr. Rahul Gadkari, Mr. Vijay Goud, Ms. Sanchi Arora, Ms. Swati Sharma, Mr. Zunjar Kambale, Mr. Ashwini Dash, and Mr. Manjunath for their help, support and encouragement.

I thank all my M.Tech batch mates for their help and support.

I wish thank to my parents, brother and sisters for their help, support and understanding.

Date: Ghanshyam Suryakant Neje

Place:

Abstract

The demand for lightweight materials has increased the quest for new structures to be used in various fields like automobiles, aviation, marine, railways, etc. The textile reinforced light-weight composite structures mainly utilize hollow fibrous preforms made from various textile manufacturing processes. Out of various textile manufacturing processes, weaving is the most commonly used method for the manufacturing of reinforcement fabrics. The weaving process is capable of producing 3D structures that can have different fibre architectures, fabric structures, and geometrical shapes. The type of 3D fabric to be used as reinforcement is decided based on the end use requirement. For the production of light-weight sandwich structures, 3D woven spacer structures woven from high-performance fibres are used as reinforcements. This thesis focuses on the manufacturing of lightweight sandwich structures from 3D woven spacer structures connected with woven cross-links and having hollow tunnels of simple geometrical shapes formed along the weft direction and comparison of the mechanical properties of composites manufactured from them having different geometrical configurations.

The manufacturing of 3D woven spacer structures requires specially designed weaving machine. Therefore, a customized weaving machine with a linear type of take-up system and a negative let-off system capable of handling eight beams were designed and fabricated. These systems were then attached to a manual rapier weaving machine equipped with 16 shafts electronically controlled shedding device.

The next step in the production of spacer fabric structures is the weave design creation. Generalized mathematical relationships for cell geometrical parameters and the cross-sectional representations were used to create weave design for each of the spacer structures with specific cell geometrical shape and parameters, and the corresponding structures were woven on the fabricated weaving machine. A 600 tex multifilament E-glass fibre tow was used to produce all the spacer structures, and the spacer fabrics had hollow tunnels of trapezoidal, triangular and rectangular shapes aligned in weft direction. The different fabric structures developed in this research consisted of trapezoidal structures with different cell wall opening angles (between 45° to 65°), triangular structures with different cell wall opening angles (between 35° to 47°), rectangular spacer structures with different cell widths (varying from 33 mm to 63 mm) at almost constant height and with different cell heights (varying from 21 mm to 47.5 mm) at almost constant width, trapezoidal double level structures with varying cell wall opening angles (between 45° to 65°), and one structure each for rectangular, trapezoidal and triangular structures with thickened face sheets. Additionally, one spacer structure connected with core piles was also produced for the comparison of its mechanical properties with other structures.

The produced fabrics were then converted to their composites using vacuum assisted resin transfer moulding. Wooden blocks of appropriate size and shape were used to keep the fabric in its 3D shape during resin impregnation and curing stages. These composite structures were then characterized for their compressive properties and flexural properties. Rectangular spacer structure with double layer wall construction (RECTDL) sustained higher specific compressive load than spacer structure connected with core piles (SPY), while the absorbed energy/volume in compression for these two structures was almost the same. In case of structures with single layer wall constructions, the specific compressive load and the absorbed energy/volume in compression were in the order of rectangular > triangular > trapezoidal structure. The SPY structure had lowest flexural stress compared to spacer structures with any cell geometry and wall constructions.

The comparison of performance of spacer composites with different cell geometrical parameters revealed that the rectangular spacer structures with the smallest cell width (among the different width samples) found to have the highest specific compressive load, absorbed energy/volume in compression, the highest specific bending load, and flexural stress. These properties decreased with an increase in the cell width of the rectangular structures. Similar trend was observed in case of rectangular spacer structures with different cell heights, i.e., rectangular spacer structures with the smallest cell height (among different height samples) had the highest specific compressive load and absorbed energy/volume in compression, the highest specific bending load, and flexural stress. These properties decreased with an increase in the cell height of the rectangular structures. The compressive load, specific compressive load, the absorbed energy/volume in compression, specific bending load and flexural stress increased with increase in the cell wall opening angles for trapezoidal spacer structures. The compressive load, specific compressive load, specific bending load and flexural stress of triangular structures increased with the increase in cell wall opening angle. But, the absorbed energy/volume in compression was observed to be the highest for the triangular structure with 42.5° cell wall opening angle than the other triangular structures.

The effect of face sheet thickening increased the bending load for these structures, but the specific bending load decreased due to increased mass of the specimen due to the additional face sheets. The absorbed energy/volume in compression and the flexural stress were observed to be lower for thickened face sheet structures compared to their corresponding single layer face sheets structures. The comparison of single level and double level trapezoidal spacer structures demonstrated that the compressive load and specific compressive loads decreased for double level trapezoidal structures compared to their single level counterparts, whereas the bending load and specific bending load were observed to be higher for double level structures.

The possibility of growing aligned carbon nanotubes (CNTs) on selected 3D preforms made from glass fibres, with the use of chemical vapour deposition (CVD) process was explored. The radially aligned CNTs were successfully grown on the glass tows but when the same procedure was followed for 3D preforms the alignment of CNTs was observed to be random. Still, the treatment of CNTs increased the electrical conductivity of the treated glass tows, 3D preforms (I beam) and their composites compared to their neat counterparts.

To conclude, it may be stated that the mechanical performance of the spacer sandwich composites depends on the load-bearing cell wall thickness, the angle between the wall and loading axis, and the configuration in which the walls are integrating with face sheets (at a line as in TR or with some space as in TPZ structure). The findings of this study can help in designing the light-weight sandwich composites, as it encompasses the detailed investigation on the effect of different cell geometrical shapes and cell geometrical parameters of the spacer architecture on the mechanical properties of their composites.

सार

हल्के पदार्थों की मांग ने ऑटोमोबाइल, विमानन, समुद्री, रेलवे इत्यादि जैसे विभिन्न क्षेत्रों में नई संरचनाओं के खोज में वृद्धि की है। कपड़ा प्रबलित हल्के वजन की कम्पोजिट संरचनाएं मुख्य रूप से विभिन्न वस्त्र निर्माण प्रक्रियाओं से बने खोखले फाइब्रस प्रीफॉर्म का उपयोग करती हैं। विभिन्न वस्त्र निर्माण प्रक्रियाओं में से, बुनाई (विव्हिंग) सुदृढीकरण के कपड़े के निर्माण के लिए सबसे अधिक उपयोग की जाने वाली विधि है। बुनाई प्रक्रिया थ्रीडी संरचनाओं का उत्पादन करने में सक्षम है जिसमें विभिन्न फाइबर आर्किटेक्चर, कपड़े संरचनाएं, और ज्यामितीय आकार हो सकते हैं। सुदृढीकरण के रूप में उपयोग किए जाने वाले थ्रीडी कपड़े का प्रकार अंतिम उपयोग व आवश्यकता के आधार पर तय किया जाता है। हल्के वजन वाले सैंडविच संरचनाओं के उत्पादन के लिए, उच्च प्रदर्शन वाले रेशे से बुने हुए थ्रीडी बुने हुए स्पेसर संरचनाओं को मजबूती के रूप में उपयोग किया जाता है। यह शोध प्रबंध बुने हुए क्रॉस-लिंक से जुड़े थ्रीडी बुने हुए स्पेसर संरचनाओं से हल्के सैंडविच संरचनाओं के निर्माण पर केंद्रित है और विभिन्न ज्यामितीय आकृतियों और विन्यासों के खोखले सुरंगों के साथ निर्मित कम्पोजिट के यांत्रिक गुणों की तुलना में केंद्रित है।

थ्रीडी बुने हुए स्पेसर संरचनाओं के निर्माण के लिए विशेष रूप से डिज़ाइन की गई बुनाई मशीन की आवश्यकता होती है। इसके लिए, रैखिक प्रकार की टेक-अप प्रणाली और आठ बीमों को संभालने में सक्षम लेट-ऑफ सिस्टम वाली मशीन डिज़ाइन की और बनाई। इन प्रणालियों को १६ शाफ्ट इलेक्ट्रॉनिक नियंत्रित शेडिंग डिवाइस से सुसज्जित मैनुअल रैपिअर बुनाई (विव्हिंग) मशीन से जोड़ा गया था।

स्पेसर कपड़े संरचनाओं के उत्पादन में अगला कदम बुनाई डिजाइन का निर्माण है। सेल ज्यामितीय पैरामीटर के लिए सामान्यीकृत गणितीय संबंध, और क्रॉस-सेक्शनल प्रस्तुतियों का उपयोग विशिष्ट सेल ज्यामितीय आकार और पैरामीटर के साथ प्रत्येक स्पेसर संरचनाओं के लिए बुनाई डिजाइन बनाने के लिए किया गया था, और संबंधित संरचनाएं डिजाइन किए गये बुनाई मशीन पर बुने गए थे। सभी स्पेसर संरचनाओं के उत्पादन के लिए ६00 टेक्स मल्टीफिलामेंट ई-ग्लास फाइबर टॉव का उपयोग किया गया है, और स्पेसर कपड़ों में समलम्बाकार, त्रिकोणीय और आयताकार आकार के खोखले सुरंग वेफ्ट की दिशा में होते थे। समलम्बाकार, त्रिकोणीय आकार के खोखले सुरंग वाले कपडे विभिन्न क्रॉसलिंक कोण (४५° - ६५°) के साथ बनाए गए थे। आयताकार स्पेसर कपडे विभिन्न सेल ऊंचाइयों (२१ मिमी से ४७.५ मिमी) के साथ लगभग स्थिर चौड़ाई पर और विभिन्न सेल चौड़ाई (३३ मिमी से ६३ मिमी) के साथ लगभग स्थिर ऊंचाई रखकर बनाए गए थे। एक संरचना प्रत्येक आयताकार, समलम्बाकार और त्रिकोणीय संरचनाओं के लिए मोटे फेसशीट के साथ बनाए गए थे। इसके अतिरिक्त, पाइल धागो के साथ बना हुआ एक स्पेसर कपड़ा अन्य संरचनाओं के साथ तुलना के लिए बनाया गया था।

उत्पादित कपड़ो को वैक्यूम सहायक रेजिन स्थानांतरण मोल्डिंग का उपयोग करके कंपोजिट में परिवर्तित कर दिए गए। उचित आकार के लकड़ी के ब्लॉक का उपयोग रेजिन संसेचन और जमने के दौरान कपड़े को अपने थ्रीडी आकार में रखने के लिए किया जाता था । बनाए गए कम्पोजिट संरचनाओं का उनके कम्प्रेशन और फ्लेक्सुरल गुणों के लिए परिक्षण किया गया।

दोहरी क्रॉसलिंक वाले आयताकार संरचना वाले कम्पोजिट का विशिष्ट कम्प्रेशन भार पाइल धागो वाले स्पेसर कपडे से अधिक था, जबकि इन दो संरचनाओं के लिए कम्प्रेशन में अवशोषित ऊर्जा प्रति इकाई आयतन लगभग समान थी। एकल क्रॉसलिंक के साथ संरचनाओं के मामले में विशिष्ट कम्प्रेशन भार और कम्प्रेशन में अवशोषित ऊर्जा प्रति इकाई आयतन आयताकार > त्रिभुज > समलम्बाकार संरचना के क्रमानुसार था। किसी भी सेल ज्यामिति और क्रॉसलिंक के साथ स्पेसर संरचनाओं की तुलना में पाइल धागो वाली स्पेसर संरचना का फ्लेक्सुरल स्ट्रेस सबसे कम था।

विभिन्न सेल ज्यामितीय पैरामीटर के साथ बने स्पेसर कंपोजिट्स के प्रदर्शन की तुलना से पता चला कि छोटे सेल चौड़ाई के आयताकार स्पेसर संरचनाओं में उच्चतम विशिष्ट कम्प्रेशन भार, कम्प्रेशन में अवशोषित ऊर्जा प्रति इकाई आयतन, उच्चतम विशिष्ट बेन्डिंग भार, और फ्लेक्सुरल स्ट्रेस पाए गये। उपरोक्त गुण आयताकार संरचनाओं के सेल चौड़ाई में वृद्धि के साथ कम होते है। इसी तरह की प्रवृत्ति विभिन्न सेल ऊंचाइयों वाले आयताकार स्पेसर संरचनाओं में देखी गई थी, जैसे की, आयताकार स्पेसर संरचनाओं को छोटी सेल ऊंचाई के साथ उच्चतम विशिष्ट कम्प्रेशन भार, कम्प्रेशन में अवशोषित ऊर्जा प्रति इकाई आयतन, उच्चतम विशिष्ट बेन्डिंग भार, और फ्लेक्सुरल स्ट्रेस पाए गये। उपरोक्त गुण आयताकार संरचनाओं के सेल चौड़ाई में वृद्धि के साथ कम पाए गये। कम्प्रेशन भार, विशिष्ट कम्प्रेशन भार, कम्प्रेशन में अवशोषित ऊर्जा प्रति इकाई आयतन, विशिष्ट बेन्डिंग भार, और फ्लेक्सुरल स्ट्रेस समलम्बाकार स्पेसर संरचनाओं के लिए क्रॉसलिंक कोण में वृद्धि के साथ बढ़ गये है। कम्प्रेशन भार, विशिष्ट कम्प्रेशन भार, विशिष्ट बेन्डिंग भार, और फ्लेक्सुरल स्ट्रेस त्रिभुज संरचनाओं में क्रॉसलिंक कोण में वृद्धि के साथ बढ़ गये। लेकिन, कम्प्रेशन में अवशोषित ऊर्जा प्रति इकाई आयतन क्रॉसलिंक कोण ४२.५° त्रिकोणीय संरचना के साथ उच्चतम पाया गया।

फेसशीट के मोटाई के प्रभाव ने इन संरचनाओं के बेन्डिंग भार में वृद्धि हुई, लेकिन फेसशीट की मोटाई के कारण संरचना के बढ़ते द्रव्यमान के कारण विशिष्ट बेन्डिंग भार घट गया। मोटी फेसशीट की संरचनाओं में कम्प्रेशन में अवशोषित ऊर्जा प्रति इकाई आयतन और फ्लेक्सुरल स्ट्रेस उनके समान एकल फेसशीट की संरचनाओं की तुलना में कम पाया गया। सिंगल लेवल और डबल लेवल समलम्बाकार स्पेसर संरचना की तुलना ने दर्शाया कि कम्प्रेशन भार और विशिष्ट कम्प्रेशन भार उनके एकल स्तर के समकक्षों की तुलना में डबल लेवल समलम्बाकार संरचनाओं के लिए कम हो गया, जबकि बेन्डिंग भार और विशिष्ट बेन्डिंग भार डबल लेवल संरचनाओं के लिए उच्च पाया गया।

रासायनिक वाष्प जमावट (सीवीडी) प्रक्रिया के उपयोग के साथ, ग्लास फाइबर से बने चयनित थ्रीडी प्रीफॉर्म पर कार्बन नैनोट्यूब (सीएनटी) उगाने की संभावना का पता लगाया गया। मूल रूप से सीएनटी ग्लास टॉव्स पर सफलतापूर्वक उगाए गए थे, लेकिन जब थ्रीडी प्रीफॉर्म के लिए उसी प्रक्रिया का पालन किया गया तो सीएनटी का संरेखण यादृच्छिक पाया गया। फिर भी, सीएनटी की ग्लास टॉव्स पर जमावट से, थ्रीडी प्रीफॉर्म (आई बीम) और उनके कंपोजिट की विद्युत चालकता में साफ समकक्षों की तुलना में वृद्धि पायी गयी।

उपरोक्त अध्ययन से यह कहा जा सकता है की स्पेसर सैंडविच कंपोजिट्स का यांत्रिक प्रदर्शन क्रॉसलिंक की मोटाई, क्रॉसलिंक और लोडिंग अक्ष के बीच के कोण, और किस तरह से क्रॉसलिंक्स फेस शीट्स के साथ एकीकृत होती हैं इस पर निर्भर करता है। इस अध्ययन के निष्कर्ष, हल्के वजन वाले सैंडविच कंपोजिट्स को डिजाइन करने में मदद कर सकते हैं, क्योंकि इसमें विभिन्न ज्यामितीय आकारों और स्पेसर आर्किटेक्चर के विभिन्न सेल ज्यामितीय पैरामीटर के साथ बने हुए कंपोजिट्स के यांत्रिक गुणों पर विस्तृत जांच व विवरण शामिल हैं।

Contents

List of Figures

List of Tables

Abbreviations

Abbreviation	Description
RECT	Rectangular spacer structure(s)
TPZ	Trapezoidal spacer structure(s)
TR	Triangular spacer structure(s)
TDL	Trapezoidal double level spacer structure(s)
SPY	Spacer structure connected with core piles
RECTWn	Rectangular spacer structure with cell width variation (n = 1 to 4)
RECTHn	Rectangular spacer structure with cell height variation (n = 1 to 4)
TPZ$\boldsymbol{\theta}$°	Trapezoidal spacer structure with $\boldsymbol{\theta}$° cell wall opening angle
TR$\boldsymbol{\theta}$°	Triangular spacer structure with $\boldsymbol{\theta}$° cell wall opening angle
TDL$\boldsymbol{\theta}$°	Trapezoidal double level spacer structure with $\boldsymbol{\theta}$° cell wall opening angle
RECTTF	Rectangular structure with thickened face sheets
TPZTF	Trapezoidal spacer structure with thickened face sheets
TRTF	Triangular spacer structure with thickened face sheets
FVF	Fibre volume fraction
VARIM	Vacuum assisted resin infusion moulding
CNTs	Carbon nanotubes
CVD	Chemical vapour deposition