

dr. **Claudia Herzberg**, univ. dipl. inž.
dr. **Sybille Krzywinski**, univ. dipl. inž.
prof. dr. **Hartmut Rödel**, univ. dipl. inž.
Technische Universität Dresden, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik,
D-01062 Dresden, Nemčija; e-pošta: herzberg@itbh6.mw.tu-dresden.de;
e-pošta: krz@itbh6.mw.tu-dresden.de; e-pošta: roedel@itbh6.mw.tu-dresden.de

Obremenitvam prilagojena 3D ojačitev tekstilnih šablon

Empirično preučevanje in eksperimenti, ki so bili izvedeni na kompozitih tekstila in plastike, spojenih s šivanjem, so pokazali, da se da s tehnologijo šivanja močno povečati medplastno trdnost za uporabo obremenitvi prilagojene ojačitve. Možno je izdelati sklop kompleksnih tekstilnih šablon in jih nato nadalje oblikovati. To bo omogočilo odpiranje novih trgov za tekstilno in oblačilno industrijo. Ti ojačani materiali bodo našli aplikacijo tudi v avtomobilski industriji in strojogradnji, saj bodo ti proizvodi postali lažji, bolj odporni, bolj varni in s tem tudi bolj gospodarni.

Ključne besede: 3D ojačitev, termoplastični kompoziti, tekstilni model, proces konfekcioniranja

Load-Adapted 3D-Reinforcement by Means of Function-Adjusted Ready-Making Process

The empirical examinations together with the experiments carried out on the textile and plastic composites, which are joined by sewing, impressively showed that the sewing technology is an excellent means to noticeably increase the interlaminary strength for the application of load-adapted z-reinforcement arrangement. The textile assembly of complex textile preforms and their further plastics processing is possible. The research work will be carried on, which will open new markets for new products to the textile and clothing industry. These textile-reinforced synthetic materials will make vehicles and machines lighter, more resistant, safer and, as a result, more economic in the future.

Keywords: 3D-reinforcement, thermoplastic composites, textile preform, ready-made clothing process

1.0 UVOD

Pri kompleksnih materialih, namenjenih za visoko tehnološko uporabo, se vse bolj zahtevajo hibridne konstrukcije materiala z lastnostmi, ki so prilagojene vrsti obremenitve. S tekstilom ojačene večplastne kompozitne konstrukcije so zlasti primerne za izdelavo sestavnih delov pri optimiranih lahkih konstrukcijah. V primeru obremenitve pa lahko pride do pojavnosti razslojevanja med posamičnimi plastmi zaradi majhne medplastne strižne trdnosti.

Ustrezne tehnike in stroji, ki se uporabljajo v procesu konfekcioniranja, omogočajo šivanje tekstilnih polproizvodov v tridimenzionalno ojačeno večplastno

kompozitno konstrukcijo in pridobitev lastnosti, ki so prilagojene obremenitvam, kar dosegamo s spreminjanjem parametrov šivanja. S tehnologijo šivanja spajamo posamezne sestavne dele polizdelkov, kar omogoča funkcijo »pritrjevanja« pri združevanju kompozitov.

V okviru raziskovalne skupine »Tekstilne ojačitve visoko zmogljivih rotorjev za kompleksne uporabe«, ki jo podpira nemška raziskovalna skupnost (DFG), so bile sestavljene rotacijsko simetrične ojačitvene konstrukcije v obliki rotorjev, ki so bile nato plastično obdelane.

Projekt je bil sestavljen iz naslednjih osmih podprojektov:

- ogljikova in termoplastična hibridna preja,
- predenje zelo fine PEEK filamentne preje,

- tekstilne tkanine s spremenljivimi osmi za rotacijske obremenitve,
- uporaba postopkov in strojev, ki se uporabljajo v tekstilni industriji za izdelavo in sestavljanje tekstilnih šablon,
- izračuni na osnovi parametrov materiala,
- eksperimentalno testiranje prototipov na rotor-skem preizkuševalniku,
- vgraditev senzorskih delov v rotorje,
- uporaba kinematskega orodja za izdelavo modelov.

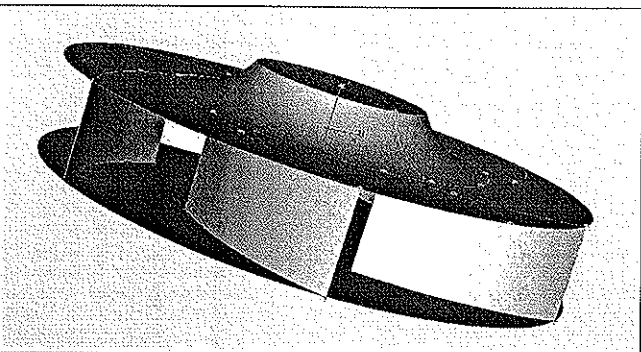
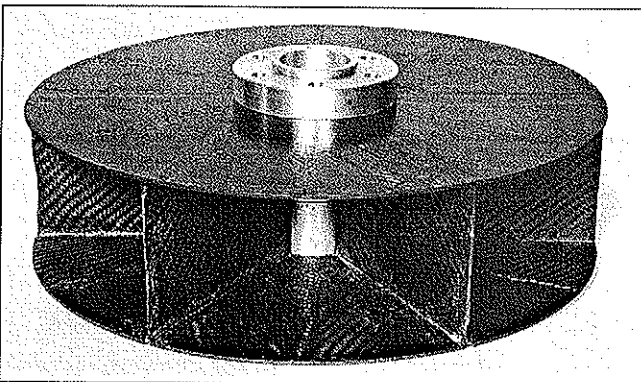
Zanimivo je, da se pri tem uporablja termoplastična matrica, ki se uvaja v kompozit prek tekstilne šablone z dosledno uporabo hibridnih prej. Proces plastičnosti se izvaja z uporabo tehnologije avtoklava za izdelavo kompleksnih sestavnih delov.

Tehnologija avtoklava, to je vulkanizacija laminata v podtlaku pod pritiskom in vročino, še vedno zahteva precej ročnega dela.

Oblikovalsko orodje, prilagojeno sestavnemu delu, je potrebno za stabiliziranje izdelane tekstilne šablone. V avtoklavu se geometrija sestavnega dela izpostavi homogenemu pritisku. Torej bi bilo idealno, če bi bilo orodje raztegljivo znotraj sestavnega dela.

2.0 IZDELAVA ŠABLON V PROCESU KONFEKCIONIRANJA

Testi so bili izvedeni na visoko zmogljivih rotorjih s premerom 500 mm, z lopaticami, razporejenimi med dvema diskoma. Ti rotorji se lahko uporabijo za cen-



Slika 1: Model rotorja 1 in model rotorja 2

trifugalno ločevanje snovi za obdelovalno, kemično in laboratorijsko tehnologijo ali kot vztrajniki za zelo visoke hitrosti.

Diska na modelu rotorja 1 (slika 1) sta še ravna, na modelu rotorja 2 pa je eden od diskov že hiperbolično oblikovan.

Za izdelavo tekstilne šablone s kompleksno oblikovanimi sestavnimi deli so potrebni naslednji koraki:

- izdelava kroja v skladu z obnašanjem materiala,
- krojenje,
- zlaganje,
- predhodna izdelava in namestitev z-ojačitve,
- sestavljanje 3D šablone.

Tehnični postopki in stroji so izbrani z upoštevanjem gospodarnosti. Zaradi velikega števila izjemno debelih kosov (do 20 mm) je potrebna natančnost šivanja. Prav tako se zahtevata natančnost in ponovljivost procesa izdelave.

2.1 Izdelava kroja ob upoštevanju obnašanja materiala

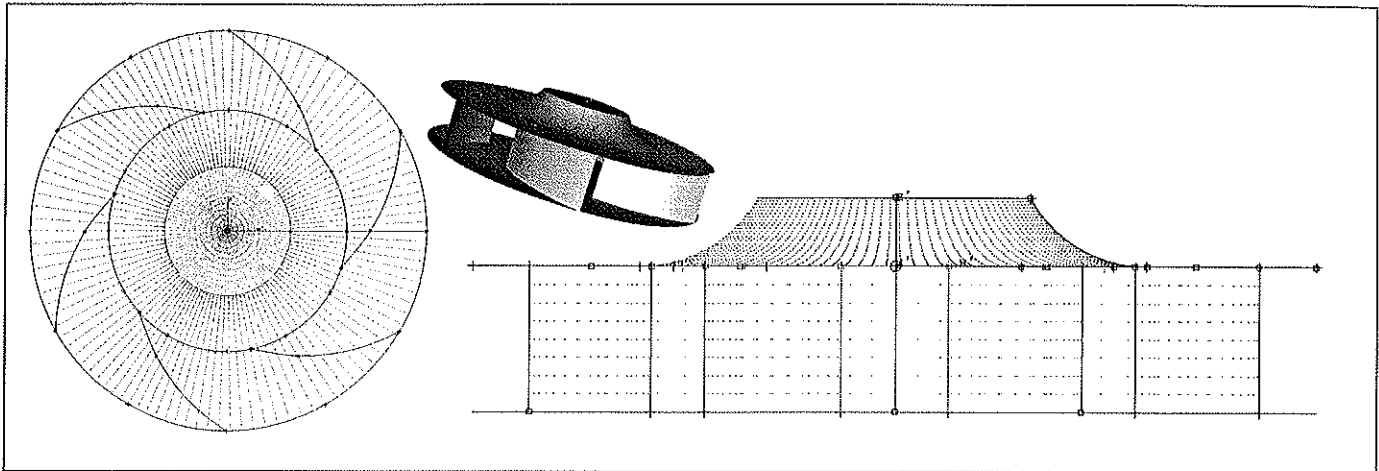
Če obrise prostorskega elementa lahkih tekstilnih konstrukcij pokrijemo z ojačitveno tekstiljo nepravilne oblike, se lahko mehanske lastnosti sestavnega dela poslabšajo. Kroje je treba razvijati v želeno 3D obliko glede na zahtevano obremenitev neposredno na predmetu, na katerem se bodo uporabile ojačitvene konstrukcije, saj se le tako izognemo ponovnemu delu.

Za oblikovanje kompleksnih sestavnih delov se v glavnem uporabljajo tridimenzionalni CAD programi (AUTOCAD 2000, Pro Engineer, Thinkdesign 4.0, CATIA ...). Podatki, dobljeni z naštetimi programi, se lahko prenesejo na simulacijske programe prek ustreznih vmesnikov (IGES-Initial Graphics Exchange Specification, VDAFS - vmesnik, primeren za izmenjavo prostih oblik in krivulj). Tudi obrisi sestavnih delov in/ali oblikovalsko orodje se lahko enako dobro izdelajo neposredno s simulacijskimi programi 3D Concept, ki pa niso tako primerni za uporabo (slika 2).

Tekstilna in upogljiva šablona (z majhno upogibno trdnostjo) bi morala kar se da natančno ustrezati geometriji zelene sestavnega dela.

Pri površinah proste oblike je treba tkanino skrojiti tako, da jo lahko pozneje oblikujemo brez nepravilnih gub. S podobno problematiko se srečujemo v oblačilni industriji pri oblikovanju tesno prilagajajočih se oblačil, kjer so ključni dejavniki, ki vplivajo na obnašanje pri oblikovanju, napetost, raztezek in strižna deformacija uporabljenega materiala.

Po izdelavi krojev glede na funkcionalne zahteve izdelka z uporabo tridimenzionalnega modela, lahko s pomočjo učinkovitega programskega orodja (3D Concept) izdelamo površino in razvijemo dvodimenzional-



Slika 2: Geometrija 3D sestavnega dela v simulacijskem programu

ne kroje. Programsko orodje 3D Concept temelji na metodi NURBS (*Non-Uniform-Rational-B-Splines*), ki danes velja za najbolj sodobno računsko metodo za oblikovanje kompleksnih mnogokotnih površin.

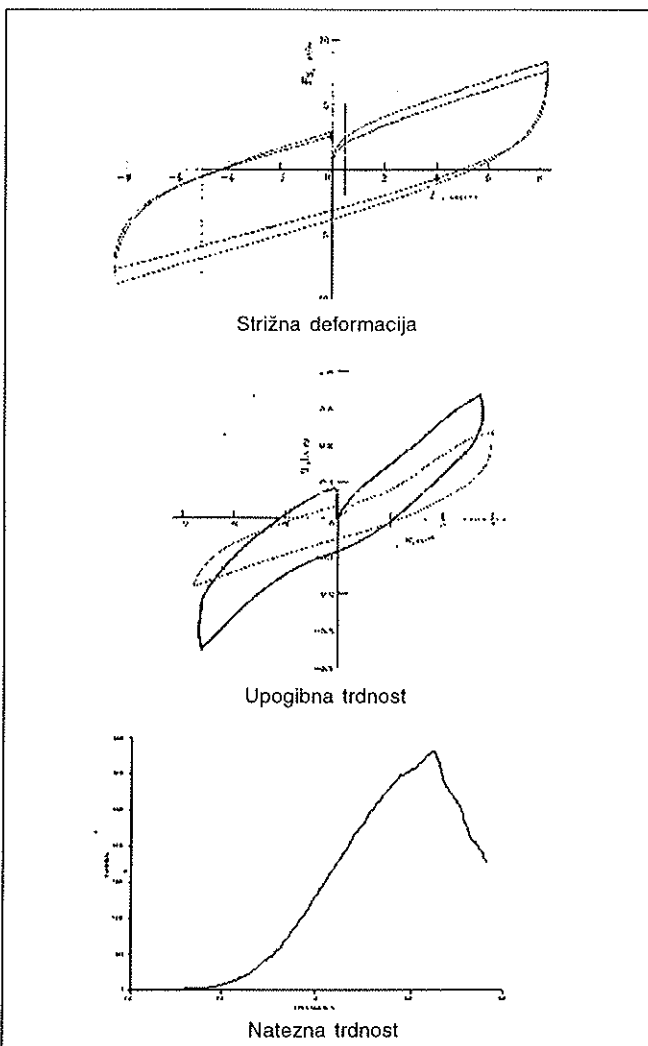
Z analiziranjem strižne deformacije v kroju, natezne obremenitve in razteznosti, dobi oblikovalec informacije, ki mu omogočajo, da izdelava ustrezne kroje ojači-

tvenega tekstilnega materiala. Zato je nujno potrebno poznati mehanske lastnosti materialov načrtovane ojačitvene konstrukcije. V ta namen se lahko uporabi merilni sistem KES-FB, ki omogoča merjenje kompresije, debeline površine, upogibne deformacije, strižne deformacije in natezne trdnosti (slika 3). V nekaterih primerih se lahko tudi uporabijo splošne, standardizirane testne metode.

Kot termoplastični matrični materiali se lahko uporabijo: polipropilen (PP), poliamid (PA) in polietilenteftalat (PET) ter celo visokozmogljivi plastični materiali, kakršen je denimo polietereketon (PEEK). Zahvaljujoč uporabi prepletenih prej v obliki termoplastičnih hibridnih prej za izdelavo vmesnega tekstilnega materiala v obliki tkanin in/ali nekodravih tkanin, dodaten matrični sestavni del, ki spremeni obnašanje tekstilne površine pri oblikovanju, ni potreben.

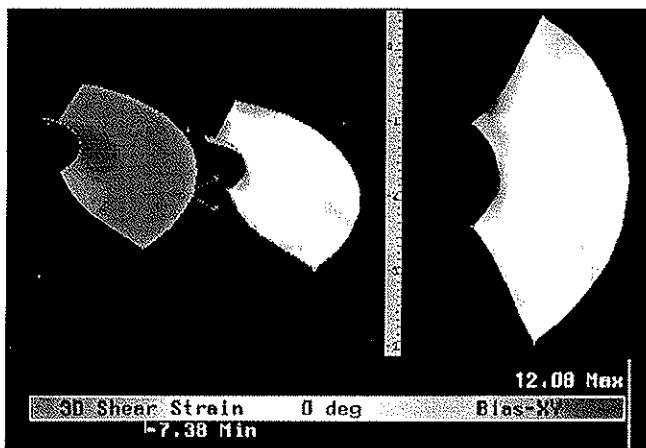
Podatki o strižni deformaciji materiala, njegovi natezni obremenitvi in obnašanju pri raztezanju, se lahko dobijo s skeniranjem merilnih krivulj in naknadnim »skaliranjem« oziroma s pomočjo podatkovne datoteke v ASCII formatu. To preučevanje se za večino tkanin, ki so bile do zdaj testirane, začne pri ortotropni konstrukciji. Pri obdelavi ogljikove preje z visokim modulom (E modul $> 650,00 \text{ N/mm}^2$) je možna deformacija med dvodimenzionalnim krojenjem in večplastno upognjeno površino sestavnega dela, ki je lahko posledica strižne deformacije.

Probleme, za katere so značilne velike deformacije, lahko opišemo z ustreznimi formulacijami, s katerimi določimo stanje deformacije in natezne obremenitve. V ta namen na površini sestavnega dela, ki ga bomo oblikovali, izdelamo mrežo. Mrežo lahko izdelamo avtomatsko ali ročno. Natančnost izračuna je odvisna od dimenzij trikotnika. Mreži pripišemo obnašanje materiala, da lahko glede na vrsto materiala simuliramo razvoj na dvodimenzionalni ravni. Po končanem izračunu lahko odčitamo strižno deformacijo, ki nastane v oblikovanih modelih. Primerjava s kritičnim strižnim kotom, ki pokaže, do katere meje se lahko niti ovija-



Slika 3: Preučevanje mehanskih parametrov tkanine

jo/stiskajo, ne da bi prišlo do gubanja, pomaga oblikovalcu, da lažje presodi, ali skrojeni model ustreza površini sestavnega dela (slika 4).



Slika 4: Vzorčni rotor s stožčasto lupino, simulacija plašča iz 3D v 2D

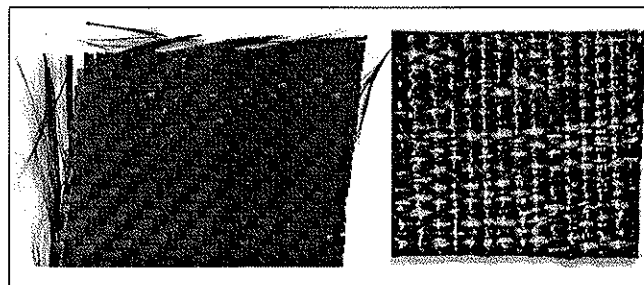
Preglednica 1: Programska oprema

Funkcija	3D Concept
3D oblikovanje	ne preveč udobno
3D digitalizator	naprave se lahko priključijo za kontaktno digitaliziranje
oblikovni modeli	se lahko implementirajo
podatki o materialu	podatkovne točke ali podatkovni grafi se lahko odčitajo z merilnega sistema KES-FB ali drugih testnih instrumentov za natezne obremenitve ter deformacije pri raztezanju in strigu
ravnina plašča 1. izdelava mreže a. avtomatska b. ročna 2. ravnina plašča a. geometrija b. s podatki o materialu	razvoj dvodimenzionalnih modelov iz delov, konstruiranih tridimenzionalno na oblikovnih modelih
izmenjava podatkov	npr. DXF, IGES ...

2.3 Proces krojenja

Izdelavi kroja sledi proces krojenja. Krojenje več slojev hkrati geometrijsko identičnega modela pogosto ni izvedljivo, saj lahko pride do spremembe razporeditve niti v tkanini. Poleg klasičnih tehnik krojenja s krojilnim nožem, se danes zelo uspešno uporabljajo tudi druge metode, kot je krojenje z vodnim curkom in laserskim žarkom (slika 5).

Če je blago, ki ga nameravamo krojiti, izdelano iz 100-odstotnih steklenih vlaken, dobljena kakovost odrezanih robov ni zadovoljiva. Robna vlakna bodo uhajala oziroma izpadala iz blaga med postopkom zla-



Slika 5: Videz tkanine po krojenju s konvencionalno tehniko krojenja (levo) in krojenju z laserskim žarkom (desno)

ganja in konfekcioniranja. Pri uporabi termoplastične hibridne preje bomo z uporabo laserskega rezalnika (1.000 W) dobili kompakten odrezani rob, kar pozitivno vpliva na natančnost nadaljnega konfekcioniranja, ne vpliva pa na nadaljnjo sposobnost oblikovanja blaga. Termoplastično fiksiranje učinkuje od 1 mm do 2 mm v tkanino.

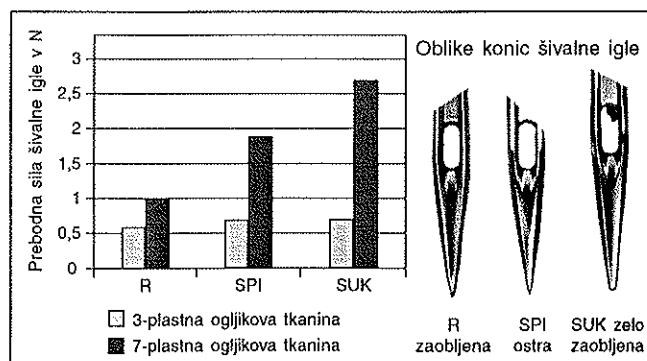
3.0 PROCES ŠIVANJA

Za oblikovanje in spajanje se uporabijo šivalni stroji. Zaradi izjemno velikega števila plasti, geometrije delov in šablon, ojačitev s prešivanjem, je potreben nadaljnji razvoj tehnologije šivanja.

CNC šivanje je predpogoj za ponovljivost in natančnost izdelave, ki se zahteva na področjih strojnega inženiringa in avtomobilske industrije. Dodatni problem pri tem predstavljajo tudi izjemno občutljivi materiali, iz katerih so izdelani šivalni sukanca. S pravilno izbiro parametrov: tipa vboda, geometrije šivalne igle, vrste šivalnega sukanca, enakomernosti šivalnega sukanca, dolžine vboda ter koraka in smeri vboda, lahko zagotovimo zahtevane lastnosti šivov.

3.1 Prebodna sila

Prebodna sila šivalne igle je bila eden izmed analiziranih dejavnikov pri raziskavah tehnik šivanja večplastnih, s tekstilom ojačenih polizdelkov skupne debeline



Slika 6: Prebodna sila šivalne igle v odvisnosti od geometrije šivalne igle in števila plasti

do 20 mm. Pri tem smo preučevali vpliv oblike igelne konice (slika 6), vrtilne hitrosti glavne gredi in števila plasti na prebodno silo. Dinamični postopek je izveden glede na kot zasuka glavne gredi šivalnega stroja.

3.2 Posledice prebadanja materiala

Prebadanje šivalne igle skozi plasti s tekstilom ojačnega materiala povzroči oslabilitev materiala. Pomembna vplivna dejavnika sta pri tem poleg geometrije šivalne igle še dolžina in gostota vbodov. Stopnja oslabilite zaradi prebadanja se določa s testiranjem natezne trdnosti ojačitvenih tekstilnih plasti, ki so delno prebodene v procesu šivanja prečno na smer obremenitve.

3.3 Zmanjšanje trdnosti šiva

Na kakovost šivanja vpliva tudi finost šivalnega sukance. Močnejši (in torej debelejši) šivalni sukanci, izdelani iz enakega materiala, lahko dejansko povečajo trdnost in zanesljivost procesa šivanja, vendar pa zahtevajo uporabo debelejših šivalnih igel, ki povzročijo večje vbodne odprtine na površini tekstilnega materiala. Posledice zmanjšanja trdnosti je težko oceniti. Pri tem si lahko pomagamo s primerjavo maksimalne natezne trdnosti zašitih in nezašitih sukancev z uporabo ustreznih testnih naprav.

3.4 Izbira tipa vboda

Za šivanje s tekstilom ojačanih polizdelkov je zlasti primeren dvojni prešivni vbod. Z ta tip vboda je značilno, da se preplet igelnega in lovilčevega sukance običajno nahaja v sredini šivanca, kar vpliva na oslabilitev občutljivih šivalnih sukancev, izdelanih iz steklenih ali ogljikovih vlaken. V primeru upogibno obremenjenih tekstilno-plastičnih kompozitov se maksimalna medplastna strižna obremenitev namreč podobno pojavi v sredini kompozita, medtem ko se v primeru sestavljenih, s tekstilom ojačenih konstrukcijskih elementov, kot so prekrivni spoji, v tej točki pojavijo maksimalne z-standardne napetosti. S spreminjanjem napetosti igelnega in lovilčevega sukance je možno preplet obeh sukancev prestaviti proti zgornji ali spodnji strani šivanca, s čimer se izognemo šibki točki.

3.5 Napetost sukance

Večplastni, ojačitveni material se v procesu šivanja kompozitnega materiala stisne na del začetne debeline, s čimer dobimo kompaktno kompozitno strukturo. Povečanje napetosti igelnega in lovilčevega sukance ter vpliv pritiskne sile šivalne tačke lahko povzroči stisnjenje večplastnega ojačitvenega materiala.

Z razpoložljivim tehnološkim znanjem o procesnih parametrih, strojih in tehnikah tekstilne izdelave, je

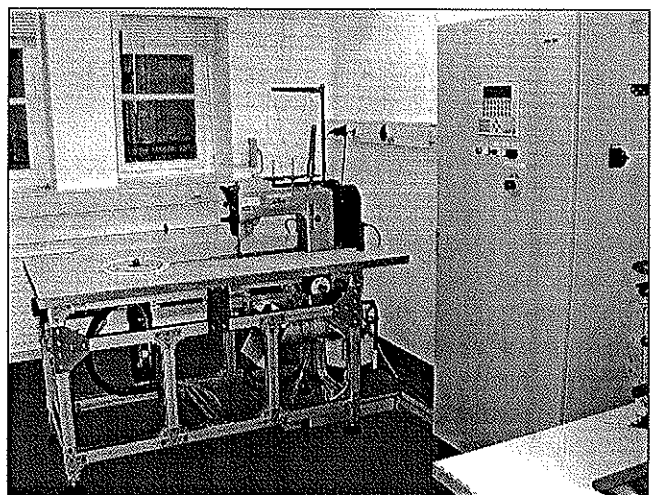
danes možno izdelati kompleksne tekstilne šablone za visoko zmogljive rotorje.

3.6 Predizdelava rotorskih diskov

Disk je sestavljen iz več ojačitvenih tekstilnih delov, ki jim lahko še dodamo posebej oblikovane dele. Šivalni stroj mora z izdelavo pozicijskih šivov zagotoviti določeno večplastnost ojačitvenih tekstilnih delov. Glede na konkretne obremenitve je potrebno uporabiti ustrezne ojačitvene šive. Večsmernemu šivanju se je treba večinoma izogibati, saj so ogljikovi multifilamenti oziroma ogljikovi/termoplastični multifilamenti in/ali predivna preja, ki se lahko uporabijo kot šivalni sukanci, izjemno težavni za delo zaradi velike krhkosti ogljikovih vlaken.

Šivi potekajo v obliki koncentričnih krogov in spiral, kjer je z variranjem premera, dolžine vboda kot tudi začetnega kota v polarnem koordinatnem sistemu omogočeno, da tekstilni kompoziti pridobijo zahtevane lastnosti.

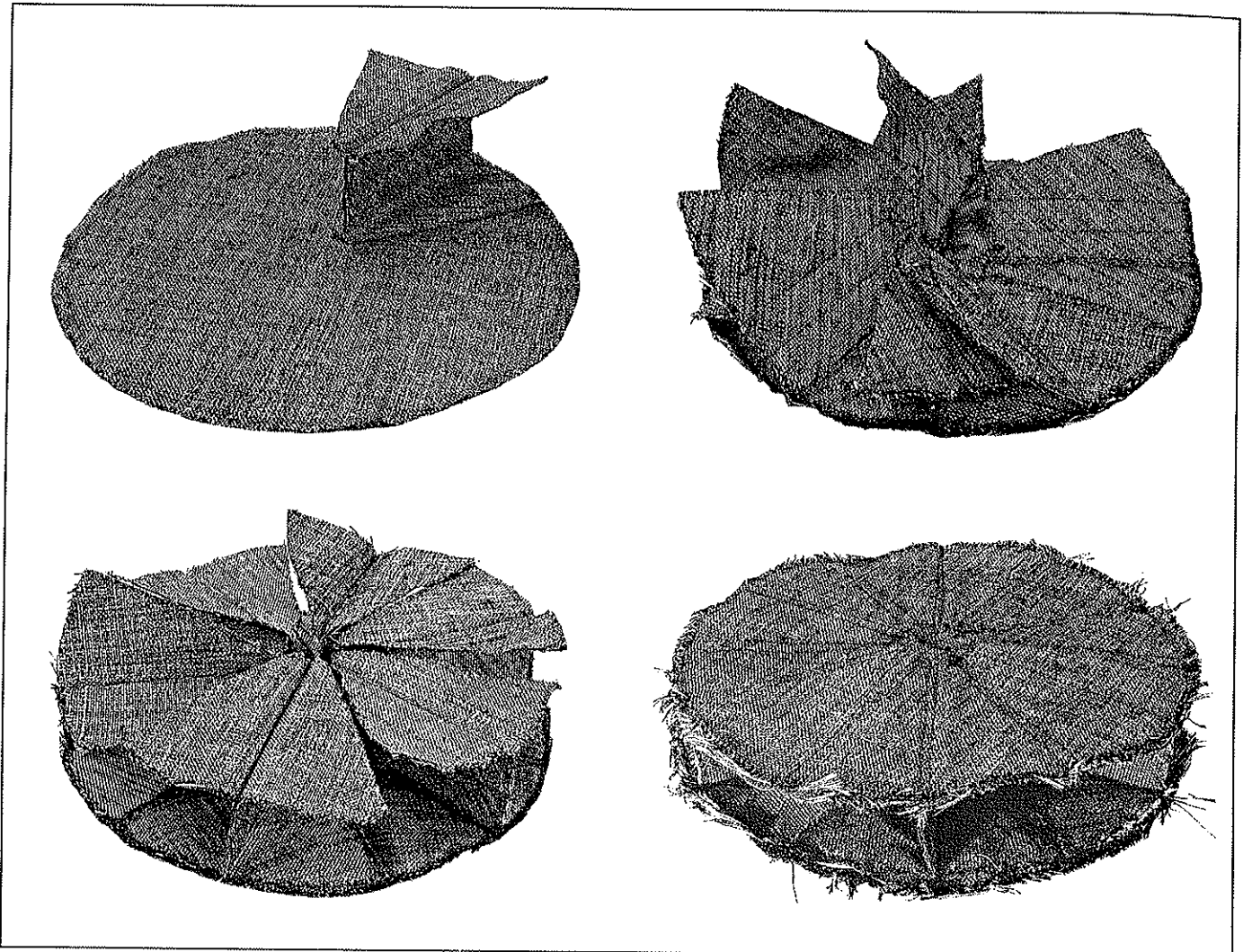
Uporabljena šivalna enota (slika 7) ima konvencionalno šivalno glavo. Oprema za transport materiala je posebej skonstruirana (CETEX Chemnitzer Textilmaschinenentwicklung GmbH.), medtem ko se upravljanje in pogon izvajata s pomočjo CNC tehnologije podjetja Siemens AG.



Slika 7: Šivalna enota za predizdelavo rotorskega diska

3.8 Sestavljanje 3D šablone

Kompleksnih geometrij sestavnih delov pogosto ni moč sešiti v enem samem koraku. Kompleksno šablono lahko izdelamo šele, ko spojimo posamične tekstilne dele v dveh ali več podkorakih. Šivanje, ki se uporablja tukaj, je montažno šivanje, odvisno od geometrije sestavnih delov pa ima tudi ojačitveno funkcijo v združenem sestavnem delu. Slika 8 prikazuje različne stopnje v izdelavi rotorja.



Slika 8: Faze izdelave rotorja

Montažno šivanje se lahko izvaja pravokotno na površino, s specialno tehnologijo šivanja pa tudi pod različnim kotom glede na površino, da dobimo ustrezno obliko oziroma ojačitev.

Proces šivanja je uporabljen tudi pri vgraditvi senzorjev v tekstilne šablone. Ti senzori so potrebni za merjenje polja razteznosti, ki nastane kot posledica obremenitev med uporabo.

Geometrija sestavnih delov določa obliko in dimenzije tekstilnih skrojjenih delov, katerih konture se razvijajo s pomočjo industrijsko uporabljenih CAD sistemov. Skrojeni deli se razporedijo na ravne konstrukcije in skrojijo s pomočjo najsodobnejših CNC avtomatskih krojilnih sistemov.

Viri:

[1] OFFERMANN, P., DIESTEL, O. in CHOI, BD. Commingled CF/PEEK hybrid yarns for use in textile reinforced high performance rotors : Introduction. V *12th International Conference on Composite Materials – Paris, July 1999*.

[2] OFFERMANN, P., CHOI, BD. in LEOPOLD, TH. Herstellung variabelaxialer Verstärkungshalbzeuge aus CF/PEEK-Commingling-Hybridgarnen. *Mitteilungen, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik der TU Dresden*, 1999, no. 2, p. 10–13.

[3] HUFENBACH, W. *Textile Verstärkungen für Hochleistungsrotoren in komplexen Anwendungen : Zwischenbericht der DFG-Forscherguppe FOR 278*. Dresden : Technische Universität Dresden, November 1999.

Prispelo/Received: 06-2001; sprejeto/accepted: 11-2001

Prevod: Marinka Mrak