



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Strojništvo
Modul: Orodjarstvo

INFUZIJA KOMPOZITNIH CEVASTIH PROFILOV

Mentor: Mag. Slavko Božič
Lektorica: Zala Podkrižnik, dipl. slov. in germ

Kandidat: Jure Berk

Ljubljana, junij 2026

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju mag. Slavku Božiču za pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

IZJAVA

Študent, Jure Berk, izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Slavka Božiča.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole in v institucionalnem oz. nacionalnem repozitoriju (COBISS).

Dne: 1. 6. 2026_____

Podpis: _____

POVZETEK

Diplomsko delo opisuje tehnologijo, ki se uporablja pri izdelavi komponent iz ogljikovih vlaken s pomočjo vakuumske infuzije epoksi smole. Delo obravnava podroben postopek izdelave votlih oz. cevastih komponent, torej infuzijo kompozitnih cevastih profilov. Glavna težava pri tovrstni tehnologiji je zagotovitev pogojev za ustrezno impregnacijo laminata, sestavljenega iz več slojev tkanine iz ogljikovih vlaken, z epoksidno smolo, pri čemer je uspešnost postopka močno odvisna od geometrije izdelka. V delu so predstavljeni različni načini in pristopi za uspešno izvedbo tehnologije ter prednosti in slabosti posameznih metod. Ključno vlogo pri tehnologiji ima t. i. permeabilnost laminata, ki se močno razlikuje glede na izdelek, zato je za uspešno uporabo tehnologije potrebno najprej definirati ustrezen pristop. Predstavljeni bodo trije možni pristopi, ki jih je glede na sestavo in zahteve izdelka mogoče uporabiti, pri čemer je izbira odvisna od tega, ali je cilj doseči najnižjo maso laminata ali največjo možno togost. Pomembno vlogo imajo tudi uporabljena orodja oziroma kalupi, ki bistveno vplivajo na izvedbo procesa.

KLJUČNE BESEDE

- Ogljikova vlakna
- Epoksi smola
- Tehnologija
- Vakuum
- Infuzija

SUMMARY

The thesis describes the technology used in the production of components made of carbon fibre using vacuum infusion of epoxy resin. It focuses in more detail on the process of manufacturing hollow or tubular components, i.e., the infusion of composite tubular profiles. The main challenge associated with this technology is ensuring appropriate conditions so that the laminate, which consists of several layers of carbon fabric, is properly impregnated with epoxy resin. The outcome also strongly depends on the shape of the product being manufactured. Different methods and approaches for the successful implementation of this technology are presented, along with their respective advantages and disadvantages. A key factor in this process is the so-called permeability of the laminate, which varies significantly depending on the product. For the effective application of this technology, it is therefore necessary to first determine the most suitable approach. Three possible approaches are presented, which can be applied depending on the composition and requirements of the product. The selection primarily depends on whether the objective is to achieve the lightest laminate or to ensure maximum stiffness. Additionally, the choice of tools or moulds used in the process also plays an important role.

KEYWORDS

- Carbon fibre
- Epoxy resin
- Technology
- Vacuum infusion
- Laminate permeability

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitve problema	1
1.2	Cilji naloge	2
1.3	Predstavitve okolja.....	3
1.4	Predpostavke in omejitve.....	3
1.5	Metode dela	4
2	TEORETIČNE OSNOVE	5
2.1	Ogljikova vlakna.....	5
2.2	Vakuumska infuzija.....	10
3	NAČRTOVANJE TEHNOLOGIJE ZA IZDELAVO CEVASTIH PROFILOV	13
3.1	Posnetek stanja	13
3.2	Kritična analiza	14
4	RAZLIČNE VRSTE TEHNOLOGIJ ZA IZDELAVO CEVASTIH PROFILOV S POMOČJO INFUZIJE	16
4.1	Infuzija brez medija za prenos smole po tkanini	18
4.2	Infuzija smole s pomočjo spiralne cevi	20
4.3	Infuzija smole z mrežo iz polipropilena	24
4.4	Izdelava cevastih profilov s prepreg ogljikovimi vlakni.....	25
5	DEFINICIJA PRIMERNE TEHNOLOGIJE	26
5.1	Permeabilnost smole s posameznimi mediji za prenos smole	26
5.2	Postopki utrjevanja izdelka	27
5.4	Alternativne tehnologije	31
5.5	Obdelava kompozitnih izdelkov	34
6	ZAKLJUČEK	37
7	LITERATURA IN VIRI	38
	PRILOGA	39

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer surovine v zabojnikih, shranjeno mora biti pri $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$	2
Slika 2: Ogljikova vlakna na kolutu.....	5
Slika 3: Kolesarski sedež iz ogljikovih vlaken	8
Slika 4: Kolesarski sedež, prikaz strukture iz ogljikovih vlaken in Innegre	9
Slika 5: Prikaz sedeža izdelanega iz enega kosa in iz več različnih modulov ogljikovih vlaken	10
Slika 6: Kalup iz ogljikovih vlaken za izdelavo komponent iz ogljikovih vlaken.....	12
Slika 7: Diolenska vlakna	14
Slika 8: Prikaz mešalnega razmerja epoksi smole in trdilca	17
Slika 9: Kalup za izdelavo iz ogljikovih vlaken po postopku vakuumске infuzije	18
Slika 10: Ogljikova vlakna v kalupu brez medija za prenos smole.....	20
Slika 11: Ogljikova vlakna v kalupu s spiralno cevjo za prenos epoksi smole po izdelku.....	21
Slika 12: Graf poti smole v mm glede na temperaturo	22
Slika 14: Postopek vakuumске infuzije cevastega profila.....	23
Slika 15: Ogljikova vlakna v kalupu s spiralno cevjo in polipropilensko mrežo za prenos epoksi smole po izdelku.....	24
Slika 16: Prikaz poti smole v mm z različnimi mediji za prenos pri različnih temperaturnih pogojih	26
Slika 17: Primer temperaturnega utrjevanja v peči	28
Slika 18: Uporaba SolidWorks programa za izdelavo modela	29
Slika 19: Izdelava aluminijastih kalupov za sedežno školjko	30
Slika 20: Primer kalupa iz aluminija 7075	31
Slika 21: Primer izdelanega notranjika s postopkom prešanja kompozita	32
Slika 22: Primer kolesarskega čevlja z jedrom iz spenjenega epoksija	33
Slika 23: Uporaba robota za obrezovanje kompozitnega izdelka	35
Slika 24: Peskalna komora.....	36

KAZALO TABEL

Tabela 1: Prikaz modularnosti ogljikovih vlaken	6
Tabela 2: Prikaz srednjega modula ogljikovih vlaken	6
Tabela 3: Prikaz visokega modula ogljikovih vlaken	7

POJMOVNIK

Fiber-print: fraza, ki se uporablja pri kompozitih, predstavlja reliefni odtis tkanine.

Odprti čas: izraz, ki se uporablja pri kompozitih za mešanico smole in trdilca, koliko časa imamo na uporabo, preden se začne postopek polimerizacije.

Permeabilnost: sposobnost omogočanja prehoda, zlasti tekočinam; prepustnost.

Polimerizacija: nepovratna kemijska reakcija.

Prepreg: tkanine, ki so predhodno impregnirane z epoksi smolo.

Vakuumska infuzija: proces, ki se uporablja pri izdelavi iz ogljikovih vlaken, kjer s pomočjo vakuuma v izdelek vnesemo epoksi smolo.

KRATICE IN AKRONIMI

CFRP:	carbon fiber reinforced polymer (polimer, ojačan z ogljikovimi vlakni)
PAN:	poliakrilonitril
RTM:	Resin transfer moulding (prenos smole po orodju)

1 UVOD

Cilj je pridobljeno znanje čim bolje izkoristiti za predstavitev novo razvite tehnologije, ki se uporablja pri izdelavi komponent iz ogljikovih vlaken. Vsi eksperimenti in razvoj tehnologije so rezultat raziskovalnega dela v podjetju, ki je potekalo tekom študija ter temeljilo na pridobljenem znanju in razumevanju strojniških postopkov.

Gre za zapleten postopek, pri katerem je potrebno dobro razumevanje različnih postopkov pri izdelavi komponent iz ogljikovih vlaken. Izdelke iz ogljikovih vlaken sestavljajo različni materiali; v našem primeru ogljikova vlakna, ki se med seboj razlikujejo glede na vrsto vlaken, gostoto in način pletenja. V kombinaciji z epoksidnimi smolami tvorijo tog končni izdelek. Tehnologija se za vsak posamezni izdelek na novo definira, saj vsak izdelek zaradi svojih geometrijskih značilnosti zahteva drugačen pristop.

1.1 Predstavitev problema

V želji po izdelavi lastnih komponent iz ogljikovih vlaken se je pojavil izziv, ki je zahteval izdelavo nove tehnologije. Ključno vprašanje je, kako se lotiti izdelave in kakšen je ustrezen proizvodni proces.

Gre za specifično industrijo, kjer je konkurenca zelo velika, surovine in sami postopki pa so zelo dragi. Iskana je bila optimalna rešitev za izdelavo kompozitnega cevastega profila, ki je izdelan s pomočjo vakuumske infuzije. Izbrana je uporaba vakuumske infuzije in ne t. i. prepreg ogljikovih vlaken (predhodno prepojenih z epoksi smolo).

Prepreg ima v primerjavi z vakuumsko infuzijo več slabosti pri maloserijski izdelavi, saj ima kratek rok uporabe, zahteva shranjevanje pri temperaturi -18 °C in ima tudi v teh pogojih omejeno trajnost. Temperatura pod lediščem zgolj upočasni polimerizacijo epoksi smole, pri čemer se lastnosti surovine spreminjajo glede na čas shranjevanja, starost materiala in izpostavljenost temperaturnim vplivom že med rokovanjem. Pri vakuumski infuziji suha vlakna nimajo roka uporabe, epoksi smola pa se shranjuje ločeno, torej smola in trdilec posebej, zato ne pride do polimerizacije.



*Slika 1: Primer surovine v zabojnikih, shranjeno mora biti pri $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$
(Lastni vir)*

Pri prepregu sta smola in katalizator oz. trdilec že združena in tako nanešena na ogljikova vlakna v obliki tkanine. Tehnologija infuzije kompozitnih cevastih profilov je nastala kot plod lastnega raziskovanja v podjetju in se tudi uporablja v sami proizvodnji.

Zaradi širokega nabora različnih materialov, ki se med seboj razlikujejo tako po tehničnih lastnostih kot tudi po načinu uporabe, smo se odločili za izbiro materialov, ki jih že uporabljamo v naši proizvodnji. Z uvajanjem novih, nam neznanih materialov bi se zahtevnost projekta še dodatno povečala.

1.2 Cilji naloge

Cilj naloge je izdelava kompozitnega izdelka cevaste oblike, kar predstavlja posebnost, saj se tehnologija infuzije običajno uporablja pri večjih odprtih površinah. Najpogosteje se uporablja v ladjedelništvu, mi pa jo v nasprotju s splošnim prepričanjem, da je tehnologija bolj primerna za večje izdelke, uporabljamo za manjše kose in v večjih serijah. Cilj je ugotoviti pravi postopek za izdelavo cevastih profilov, natančneje za cevi kolesarskega okvirja in komponent (cevi s premerom od 10 do 50 mm). Cilj je doseči optimalno impregnacijo laminata in odpraviti težave

s permeabilnostjo tkanin, ki tvorijo laminat.

Obenem moramo pri razvoju nove tehnologije neprestano upoštevati tudi izvedljivost in uporabnost, saj je tehnologija smiselna zgolj, če jo lahko implementiramo v proizvodnjo. Pri tem moramo upoštevati omejitve, kot so razpoložljiva strojna oprema, znanje delavcev v proizvodnji oziroma morebitno dodatno usposabljanje kadra, če to nova tehnologija zahteva. V tej industriji gre za zelo specifičen pristop, kjer praktično vsak izdelek zahteva točno določen način izdelave in tehnologijo, ki ju je težko prenašati z enega izdelka na drugega, čeprav so si lahko na videz zelo podobni.

1.3 Predstavitev okolja

Tehnologija je bila razvita v podjetju Berk-Vehovar Kompoziti d. o. o., manjšem podjetju s sedmimi zaposlenimi, ki je v svetu kolesarstva poznano predvsem po izdelavi ultralahkih kolesarskih sedežev. Izdelujejo najlažje kolesarske sedeže na trgu, ki so standardizirani po postopku ISO 4210 in premorejo nosilnost do 100 kg.

Pri izdelavi kolesarskih sedežev se uporablja tehnologija vakuumske infuzije, pri čemer ima sedež v primerjavi s cevastimi profili povsem drugačno obliko, saj je sestavljen iz dveh ločenih elementov, ki nista votla. S pomočjo delovnega okolja, ki je specializiran za izdelavo komponent iz ogljikovih vlaken, je bilo mogoče razviti svojo novo lastno tehnologijo za ustvarjanje votlih profilov s pomočjo vakuumske infuzije.

Podjetje je specializirano za izdelke, pri katerih se uporabljajo različne tehnologije, med drugim tudi izdelava komponent iz prepreg karbonskih vlaken. Prepreg je primeren za večje serije, saj ima specifične lastnosti, hkrati pa tudi omejitve glede shranjevanja, kar vodi do odstopanj pri ponovljivosti. Rok uporabe tovrstnih materialov je običajno zgolj 12 mesecev, vendar se material že iz meseca v mesec nekoliko drugače obnaša. Shranjevanje v zamrzovalnikih namreč le upočasni polimerizacijo, ne pa je popolnoma zaustavi. Posledično prihaja do počasne polimerizacije tudi v zamrzovalniku, zaradi česar material postopoma spreminja svoje lastnosti, kar se lahko odraža tudi na končnem izdelku. Lahko pride do razlik v površini izdelka, če uporabimo svež material v primerjavi s starejšim. S časom je material težje odzračiti, ujeti zrak med sloji pa se med postopkom toplotne obdelave težje odstrani.

1.4 Predpostavke in omejitve

Predpostavljamo, da se bomo na podlagi izkušenj najbolj ukvarjali s permeabilnostjo laminata, kar lahko rešimo z različnimi spremembami v procesu izdelave. Tudi laminacija poteka ročno in ponavljivost je povsem odvisna od ročnega delovnega procesa.

Postavlja se vprašanje, kateri pristop je najprimernejši in zakaj. Iščemo optimalno rešitev za premagovanje permeabilnosti, vprašati se moramo tudi, ali je tehnologija ekonomsko

upravičena in ali jo bomo lahko uvedli v naše okolje. Poleg tega je treba upoštevati tudi trajnostni vidik, vključno z ravnanjem z odpadki, dobavo materialov ter varnostjo pri delu, saj uporabljeni materiali vsebujejo hlapne in jedke snovi.

Ko izdelamo izdelek iz ogljikovih vlaken, je pomembno, da ne vsebuje prevelikega deleža epoksi smole, ki predstavlja vezivo, ogljikova vlakna pa so armatura v konstrukciji. Cilj je doseči razmerje, kjer ogljikova vlakna predstavljajo več kot polovico mase končnega laminata. Če uporabimo 100 g ogljikovih vlaken, želimo izdelek z manj kot 100 g epoksi smole in končni izdelek, ki vsebuje 100 g ogljikovih vlaken ne presega teže 200 g.

Na podlagi izkušenj je znano, da se pri postopku izdelave porabi več epoksi smole, saj njen del ostane v medijih za prenos, dovodnih ceveh in vakuumski vreči, pri čemer je potrebno glede na velikost projekta oceniti ustrezno količino smole za začetek infuzije.

1.5 Metode dela

Metoda dela, ki jo uporabimo pri raziskovanju, je induktivno-deduktivna, saj je takšna metoda najbolj primerna za opis tehnološkega procesa. Na podlagi izkušenj je mogoče sklepati določene stvari, ki jih tekom raziskave tudi preverimo, prav tako pa lahko izhajamo tudi že iz splošno znanih dejstev.

V industriji kompozitnih izdelkov je posebnost tudi to, da je vsak izdelek specifičen in zahteva individualno obravnavo. Induktivno-deduktivni pristop je zato stalna praksa pri odpravljanju težav in definiranju ustreznega tehnološkega procesa za vsak izdelek posebej. Med izdelki sicer lahko prihaja do podobnosti, vendar je potrebno vsak izdelek obravnavati kot nov projekt, saj lahko že različna postavitve vlaken spremeni celoten potek dela in vodi do različnih rezultatov, predvsem zaradi razlik v permeabilnosti. Izdelki so praviloma sestavljeni iz več različnih slojev; za doseganje ustrezne debeline laminata uporabimo vsaj tri sloje, pri nekaterih komponentah pa tudi več kot dvanajst različnih slojev karbonskih tkanin. Že sprememba zaporedja posameznih slojev lahko vpliva na permeabilnost. V nekaterih primerih je treba paziti, da se skupaj ne polagajo tkanine, ki ustvarijo preveč zaprto strukturo, skozi katero bi bilo težko odstraniti morebitne zračne mehurčke.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Ogljikova vlakna

Ogljikova vlakna (s tujko tudi karbonska vlakna) spadajo v skupino kompozitnih materialov. Tovrstni materiali se uporabljajo povsod, kjer sta potrebni izredna togost in majhna teža.

Zaradi svojih specifičnih lastnosti se ogljikova vlakna vse pogosteje uporabljajo tudi v gradbeništvu. Poleg tega se že vrsto let uporabljajo pri izdelavi športne opreme, v motošportu, transportu in vojaški industriji. Ena izmed lastnosti ogljikovih vlaken je tudi električna prevodnost, zaradi česar se uporabljajo tudi za izdelavo anten, vendar lahko to predstavlja tudi določeno nevarnost. Za odpravljanje prevodnosti lahko uporabimo steklena vlakna, ki prekinajo tokokrog (Menczel in Prime, 2009).



Slika 2: Ogljikova vlakna na kolotu
(Lastni vir)

V našem podjetju uporabljamo različna vlakna, vse je odvisno od tega, kaj želimo izdelati.

Ogljikova vlakna v osnovi kot surovino delimo na PAN in pitch vlakna. Pri PAN gre za vlakna, ki so izdelana iz poliakrilonitrila, gre za surovino iz akrilnih vlaken. Pitch pa so ogljikova vlakna na osnovi katranske smole.

Ogljikova vlakna na osnovi PAN so na splošno boljša pri trdnosti, medtem ko ogljikova vlakna

na osnovi pitcha nudijo višji modul elastičnosti. Prednost kompozitov je v možnosti uporabe različnih vlaken za doseganje želenih lastnosti, pri čemer gre za kompleksen inženirski proces zaradi velikega števila razpoložljivih modulov ogljikovih vlaken (Wikipedija, 2020).

V podjetju uporabljamo PAN vlakna, večinoma od proizvajalca Toray, ki je eno vodilnih podjetij, ki izdeluje ogljikova vlakna.

Poznamo več modularnosti ogljikovih vlaken, za lažjo predstavo prikaz najpogosteje uporabljenih vlaken v naši proizvodnji, gre za vlakni T300 in T700S.

Vrsta vlaken	Natezna trdnost* (ksi)	Natezna trdnost* (MPa)	Natezni modul* (Msi)	Natezni modul (GPa)
T300	512	3530	33,4	230
T700S	711	4900	33,4	230

Tabela 1: Prikaz modularnosti ogljikovih vlaken
(Vir: prirejeno po Toray Composite Materials America, b. l.)

Osnovne modularnosti ogljikovih vlaken zasledimo v veliki večini izdelkov, saj so med bolj dostopnimi in tudi zelo dobavljivi v primerjavi z višje modularnimi tkaninami.

Poleg osnovne modularnosti ogljikovih vlaken ločimo tudi ogljikova vlakna srednjega in visokega modula. Za lažjo predstavo še graf tkanin srednjega modula:

Vrsta vlaken	Natezna trdnost* (ksi)	Natezna trdnost* (MPa)	Natezni modul* (Msi)	Natezni modul (GPa)
T800H	796	5490	42,7	294
T800S	853	5880	42,7	294
T1100S	924	7000	47	324

Tabela 2: Prikaz srednjega modula ogljikovih vlaken
(Vir: prirejeno po Toray Composite Materials America, b. l.)

Uporabljajo se tudi vlakna z visoko modularnostjo, ki so težje dostopna in dražja, vendar se v laminatu uporabljajo v manjšem deležu, saj bi izključna uporaba teh vlaken zmanjšala prožnost izdelka in povečala tveganje za zlom. V laminatu vedno načrtujemo optimalno prožnost in togost.

Vlakna visoke modularnosti pa so nujna, če želimo izdelati optimalno lahek izdelek, s čim

boljšimi lastnostmi, ves čas pa se moramo dobro zavedati, kaj želimo od samega izdelka in ali so tovrstna vlakna potrebna.

Vrsta vlaken	Natezna trdnost* (ksi)	Natezna trdnost* (MPa)	Natezni modul* (Msi)	Natezni modul (GPa)
M40J	640	4400	54,7	377
M46J	609	4200	63,3	436
M55J	583	4020	78,2	540
M60J	554	3820	85,3	588

Tabela 3: Prikaz visokega modula ogljikovih vlaken
(Vir: prirejeno po Toray Composite Materials America, b. l.)

Opisana so vlakna, ki se uporabljajo v proizvodnji, potrebno je izpostaviti, da je tovrstnih vlaken in variacij še mnogo več. Za sestavo globalno konkurenčnega izdelka, pa zadoščajo našeta vlakna. Pri konstruiranju izdelka vedno izhajamo iz natezne trdnosti, saj so ogljikova vlakna znana po izjemno dobrih nateznih lastnosti. Na drugi strani pa nikakor niso primerna oz. optimalna za izdelke, ki so tlačno obremenjeni. Tam veljajo spet drugačna pravila in usmerjenost vlaken igra pomembno vlogo, odvisno od vsakega posameznega izdelka. Lastnosti izdelka določa njegova geometrija, pri čemer je treba upoštevati tudi obremenitve, koncentracije sil, potek silnic ter ustrezno zasnovo laminata na kritičnih in bolj prožnih segmentih.

V podjetju v večini izdelujemo kolesarske sedeže, kjer gre za izdelek, ki je sestavljen iz dveh elementov, kot je prikazano na Sliki 3. Zgoraj je sedežna školjka, kjer za zagotavljanje udobja želimo več prožnosti, medtem ko morajo sedežna vodila prenesti vse tresljaje, vpetje na sedežno oporo in seveda celotno težo kolesarja, tudi ob nepredvidljivih situacijah, kot so nepravilnosti na cestišču ali morebitni padci.



Slika 3: Kolesarski sedež iz ogljikovih vlaken
(Berk-Vehovar kompoziti, b. l.)

Sedežna vodila so v celoti izdelana iz ogljikovih vlaken in niso votla, temveč so vlakna prisotna po celotnem preseku. Gre za elipsasto obliko, ki meri 9 mm v višino in 7 mm v širino, kar zadostuje, da tak izdelek nosi kolesarja do teže 100 kg. Izdelek je ustrezno certificiran in primeren za normalno uporabo, tako pri rekreativnih kot tudi tekmovalnih kolesarjih.

Sedežna školjka je naknadno pritrjena na sedežna vodila s posebnimi lepili, t. i. MMA-lepili (metil metakrilat). Po naših testiranjih so tovrstna lepila zdržala tudi ob obremenitvah do 200 kg/cm²; v primeru strukturne porušitve prej pride do razslojevanja kot do popustitve lepila.



*Slika 4: Kolesarski sedež, prikaz strukture iz ogljikovih vlaken in Innegre
(Vir: Berk-Vehovar kompoziti, b. l.)*

Izdelki morajo biti certificirani po protokolu ISO 4210, tudi v primeru padca oz. preobremenitve mora izdelek ostati v enem kosu, saj bi v primeru zloma predstavljal nevarnost. Zlomljeni kompozitni kosi predstavljajo nevarnost za soudeležene, zato so narejeni predpisi, kjer mora proizvajalec v primeru zloma izdelka jamčiti, da bo vse skupaj ostalo v enem kosu, podobno kot vetrobransko steklo.

V te namene se v ogljikovo strukturo dodaja tkanine, kot so kevlar, diolen ali Innegra (vrsta polipropilena). Slednji materiali preprečujejo, da bi se sam izdelek fizično razdelil na več elementov. Kljub porušitvi strukture ogljikovih vlaken in epoksi smole izdelek vlakna, kot so kevlar, diolen ali Innegra, še vedno drži v enem kosu.

Primer uporabe več različnih modulov v enem izdelku, kjer polimerizacija poteka v celoti integrirano z različnimi moduli tkanin, je prikazan na spodnjem izdelku. Pri tovrstni konstrukciji moramo biti pazljivi, da s prehodom obeh modulov ne ustvarjamo šibkih točk in da se glede na zahteve različnih tkanin karbonska vlakna primerno prepletajo in prekrivajo.



*Slika 5: Prikaz sedeža izdelanega iz enega kosa in iz več različnih modulov ogljikovih vlaken
(Vir: (Berk-Vehovar kompoziti, b. l.)*

2.2 Vakuumska infuzija

Vakuumska infuzija je tehnologija, ki jo moramo prilagoditi glede na zahtevnost samega izdelka. Običajno je potrebno za vsako obliko ali nov izdelek prilagoditi tehnologijo ali na novo razviti. V osnovi gre za proces, kjer s pomočjo vakuuma odstranjujemo zrak v laminatu, ki ga nadomesti epoksi smola (Alan Harper Composites, b. l.).

S pomočjo vakuumske črpalke ustvarimo podtlak. Črpalka, ki jo uporabljamo, ima zmogljivost 0,003 mbar in pretok 170 L/min.

Vsi kalupi in izdelki, ki jih želimo izdelati z vakuumsko infuzijo, so po opravljeni laminaciji zaprti v vakuumske vreče. S pomočjo tesnilnih trakov in varjenja folije, moramo zagotoviti nepredušno zaprto okolje, saj zrak v sistemu po temperaturni obdelavi predstavlja velik problem, saj bi nam narastel tlak. Tekom procesa infuzije moramo zagotoviti, da je celoten laminat dobro pritisnjen ob kalup, kar dosežemo s pomočjo vakuuma. Tudi po procesu infuzije moramo zadržati določen podtlak v sistemu. Pri procesu polimerizacije gre za eksotermno reakcijo. Epoksi smola v osnovi nekoliko ekspandira in temperatura po naših meritvah doseže tudi do 75 °C, kljub temu da se tovrstni izdelek lahko zamreži že pri sobni temperaturi.

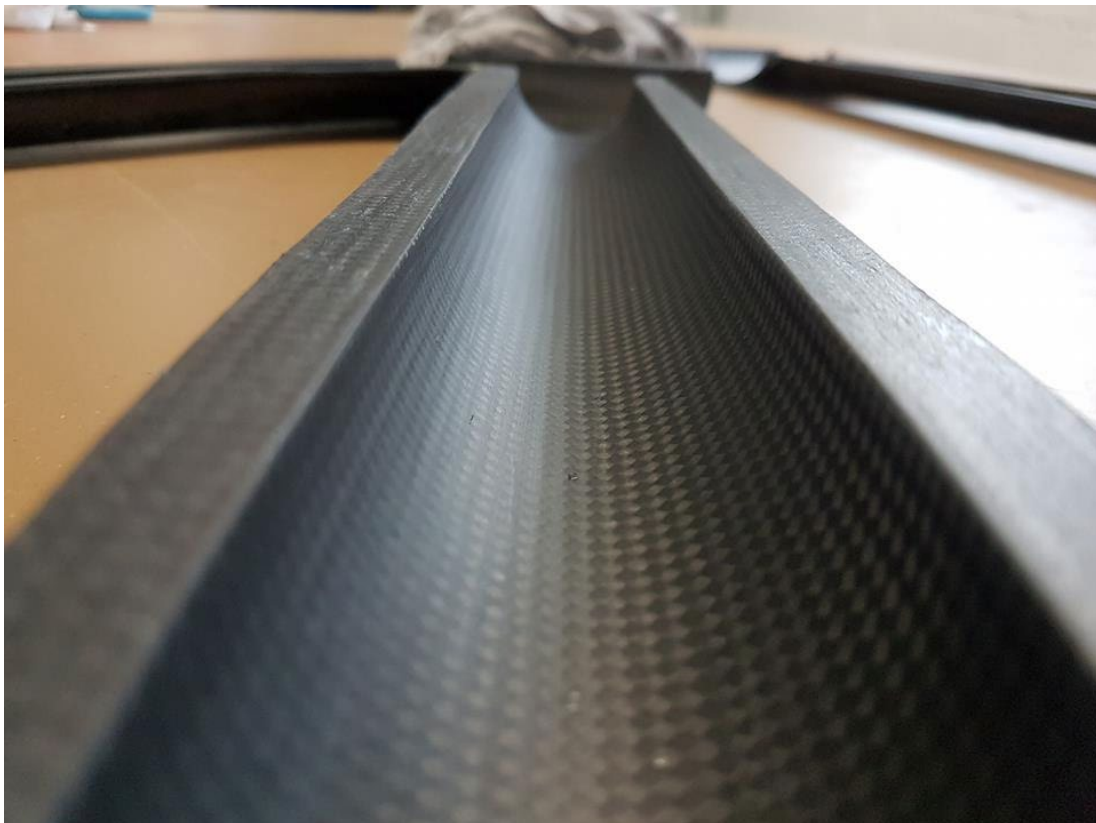
Poleg vakuumske infuzije poznamo tudi proces RTM (resin transfer moulding), kjer gre za postopek vbrizgavanja smole s pomočjo tlaka, podobno kot pri brizganju plastike. Gre za postopek, kjer so suha ogljikova vlakna predhodno položena v kalupe, nato pa se skozi dovode

vbrizga epoksi smolo, obenem pa se lahko tudi uporablja vakuum za odzračevanje samih tkanin, ki so zaprta v kalupih (Goodship, 2004).

Vakuumska infuzija se praviloma uporablja pri izdelavi večjih komponent, kot so elementi za vetrne elektrarne, ladje in komponente v avtomobilski industriji. Velik poudarek je na avtomatizaciji, ki pa je pri kompozitih zelo specifična, saj moramo tudi v primeru RTM postopka predhodno ročno vstaviti ogljikova vlakna v obliki pletenin (Hexcel Corporation, b. l.). Zgolj z dodajanjem sekancev v smolo (podoben princip kot pri brizganju plastike) ne bi dosegli želene strukturne togosti, ki jo v največji meri zagotavljajo pravilno postavljena vlakna v laminatu.

2.3 Kalupi za izdelavo komponent iz ogljikovih vlaken

Kalupi za izdelavo vseh komponent so v našem podjetju pri procesu vakuumske infuzije prav tako izdelana iz ogljikovih vlaken, saj se je slednje izkazalo za cenovno najbolj ekonomično. Lahko jih izdelamo sami iz ostankov samih ogljikovih vlaken iz proizvodnje, prav tako pa ogljikova vlakna v našem postopku utrjevanja skoraj nimajo dilatacij (deformacije in spremembe kalupov zaradi temperaturnih sprememb), ki so v primerjavi z aluminijem ali jeklom skoraj nične. Slednja lastnost nam je omogočila nemoten postopek utrjevanja oz. polimerizacije epoksidne smole in nemoteno odstranjevanje surovcev (neobdelan izdelek) iz kalupov pri sobni temperaturi.



*Slika 6: Kalup iz ogljikovih vlaken za izdelavo komponent iz ogljikovih vlaken
(Lastni vir)*

Kalupi iz kovin so seveda prav tako primerni, imajo pa svoje značilnosti. Poleg temperaturnih raztezkov in večjih stroškov, moramo upoštevati tudi odstranjevanje izdelka iz kalupov. Izdelka iz ogljikovih vlaken ni dobro vzeti iz kalupa pri visoki temperaturi, saj se lahko pri tem procesu deformira zaradi meje plastičnosti izdelkov.

Poleg tega pa se pri kalupih, ki so izdelani iz kovin, srečamo tudi s težavo pri rokovanju, odvisno od velikosti izdelka, dodatno težavo pa predstavlja tudi ohlajanje, ki je pri ogljikovih vlaknih izredno hitro.

Specifika s katero se srečujemo v kompozitih je tudi t. i. fiber-print, gre za reliefni odtis tkanine. Do takšne površinske napake lahko pride zaradi neprimerno izdelanega kalupa, ali pa neprimernega postopka polimerizacije oz. toplotnega utrjevanja samega izdelka. Pri kompozitnih orodjih hitreje pride do obrabe, ki je predvsem pogojena z ravnanjem in rokovanjem. Tu je zelo pomembna previdnost, saj vsaka poškodba kalupa predstavlja napako na končnem izdelku, kar posledično pomeni več naknadne obdelave, daljši čas izdelave in višje stroške. Kompozitna orodja je sicer mogoče tudi popraviti; tako kot vsi kompozitni izdelki so ob ustreznem znanju popravljiva. Kljub temu je treba vedno presoditi smiselnost popravila, torej ali gre za zelo zahteven poseg ali pa je bolj smiselna izdelava novih kalupov.

3 NAČRTOVANJE TEHNOLOGIJE ZA IZDELAVO CEVASTIH PROFILOV

Tako kot v marsikaterem segmentu strojništva, je tudi pri kompozitih ključno vprašanje konkurenčnosti za tovrstno proizvodnjo v domačem okolju. Soočamo se s težavo dobavljivosti in proizvodnje surovin, ki je pri nas ni. Zato je pomembno, da že z izbiro tehnologije preprečimo morebitne nevšečnosti, ki so lahko pogojene s dobavljivostjo, shranjevanjem, trajnostjo in navsezadnje ekonomsko upravičiti izbiro tehnologije in njen razvoj. Pomembna je tudi standardizacija izdelka, kjer moramo pazljivo navesti, katere materiale bomo uporabljali in se teh surovin tudi držati tekom proizvodnje. Kakršnakoli sprememba pri surovinah bi pomenila nov proces standardizacije izdelka. Po začetni odločitvi se moramo strogo držati postopka in izbire materialov, ki so standardizirani skupaj z izdelkom.

Vsaka sprememba zahteva ponovno testiranje in standardizacijo izdelka. Pri razvoju je treba upoštevati tudi morebitne nepredvidljive spremembe; v našem primeru gre pogosto za materiale, ki so ekološko sporni. Pomembno je, da se že v začetnih fazah soočimo s tovrstnimi vprašanji in jih upoštevamo pri uporabi tehnologije, saj je potreben določen čas, da se razvoj vsaj delno amortizira. Zaradi napačnih odločitev lahko šele z leti ugotovimo, da izdelek ni več konkurenčen. Zato je nujna dobra seznanjenost z dejanskim stanjem, pogosto pa tudi manjša prototipna proizvodnja, saj se marsikatera napaka pokaže šele pri izdelavi več enakih komponent. Takrat pride do odstopanj, ki jih moramo upoštevati pri uvajanju novih tehnologij v proizvodnjo.

3.1 Posnetek stanja

Ker smo v podjetju, ki se je specializiralo za izdelavo komponent iz ogljikovih vlaken, je najbolj smiselno, da nadgrajujemo obstoječe tehnologije. Uvedba novih tehnologij bi pomenila večjo negotovost in finančno tveganje. Razpolagamo z najboljšimi materiali na trgu in z znanjem, kako uporabiti posamezna vlakna in postopke izdelave, a z omejenimi sredstvi.

Obstoječe tehnologije lahko na podlagi dosedanjih izkušenj nadgradimo pri izdelavi novih komponent. Obstoječe proizvodnje se običajno ne nadgrajuje sproti, temveč to zahteva celostni pristop. Ko se odkrijejo izboljšave, se hkrati pogosto posodobi tudi celoten izdelek, ki je lahko tako tudi vizualno nekoliko drugačen, nova tehnologija pa lahko predstavlja konkurenčno prednost. Z vidika podjetja je zelo pomembna tudi predstavitev trgu, pri čemer moramo paziti, da ne razkrijemo preveč, saj gre pogosto za poslovne skrivnosti, ki jih poznajo le ključni zaposleni. Zaradi izjemne globalne konkurence je zaščita znanja in tehnologije nujna.

3.2 Kritična analiza

Šibka točka lastnega razvoja so stroški in omejitve okolice, predvsem kar se tiče trajnosti in dobavljivosti komponent in surovin. Poleg slednjih omejitev je potrebno tudi smiselno raziskovati področja, kje smo lahko kot evropska delovna sila še konkurenčni, kritična presoja svojega znanja in zmožnosti prodora na trg. Poleg tehničnih omejitev za smiselnost razvoja in za obstoj podjetja ne smemo spregledati tudi ekonomičnih, geopolitičnih in ekoloških vidikov.

Kompoziti so v našem primeru kombinacija ogljikovih vlaken in epoksi smole, kjer ponekod dodajamo tudi aramide v obliki kevlarja, Innegre in diolena. Po procesu polimerizacije materialov ne moremo povrniti v prvotno stanje in reciklaža je dandanes še zelo nedodelana. Obstajajo procesi, kjer s pomočjo temperature obdelave lahko iz recikliranega izdelka pridobijo suha vlakna, a gre v tem primeru za izgorevanje epoksi smole, kar je vprašljivo z vidika ekologije. Trenutno se v večini poslužujemo recikliranja v obliki mletja kompozitnih izdelkov. Takšen prah oz. sekanci pa se dodajajo v plastiko. Tako imenovan CFRP (carbon reinforced plastic) se že zasledi v vsakodnevni uporabi, gre za plastiko s primesmi ogljikovih vlaken, veliko se uporablja v avtomobilizmu in športni industriji.



*Slika 7: Diolenska vlakna
(Lastni vir)*

Ogljikova vlakna so tudi dober električni prevodnik, zato se tovrstne zmesi uporabljajo tudi za izdelavo talnih oblog v proizvodnih obratih (dodajajo se sekanci tudi z namenom ojačitve), kjer je potrebna konduktivnost. Prav tako se suha vlakna dodaja v gasilska oblačila za preprečevanje statike ipd.

Kritično je treba oceniti tudi delovno silo, saj gre za specifično industrijo, kjer je v večini primerov potrebno lastno usposabljanje. Ker tovrstna industrija širši javnosti ni dobro poznana, prihaja do težav pri pridobivanju ustreznih kadrov. Primanjkuje tehnično spretnih posameznikov, obenem pa lahko opazimo, da šolski sistem daje premalo poudarka tehničnim znanjem in ročnim spretnostim. To se močno odraža pri iskanju novih sodelavcev. V našem podjetju je povprečna starost okoli 50 let, kar odpira vprašanja, kako in na kakšen način pridobiti nov kader, ki bo sposoben in motiviran za tovrstno delo.

4 RAZLIČNE VRSTE TEHNOLOGIJ ZA IZDELAVO CEVASTIH PROFILOV S POMOČJO INFUZIJE

Izdelujemo komponente s pomočjo vakuumske infuzije, kjer je največja težava permeabilnost laminata. Slednjo težavo rešujemo z različno temperaturo epoksi smole, ki jo uporabljamo v procesu, saj zvišanje temperature zmanjša viskoznost. Prav tako moramo za prenos epoksi smole uporabljati različne materiale, ki definirajo tehnologijo.

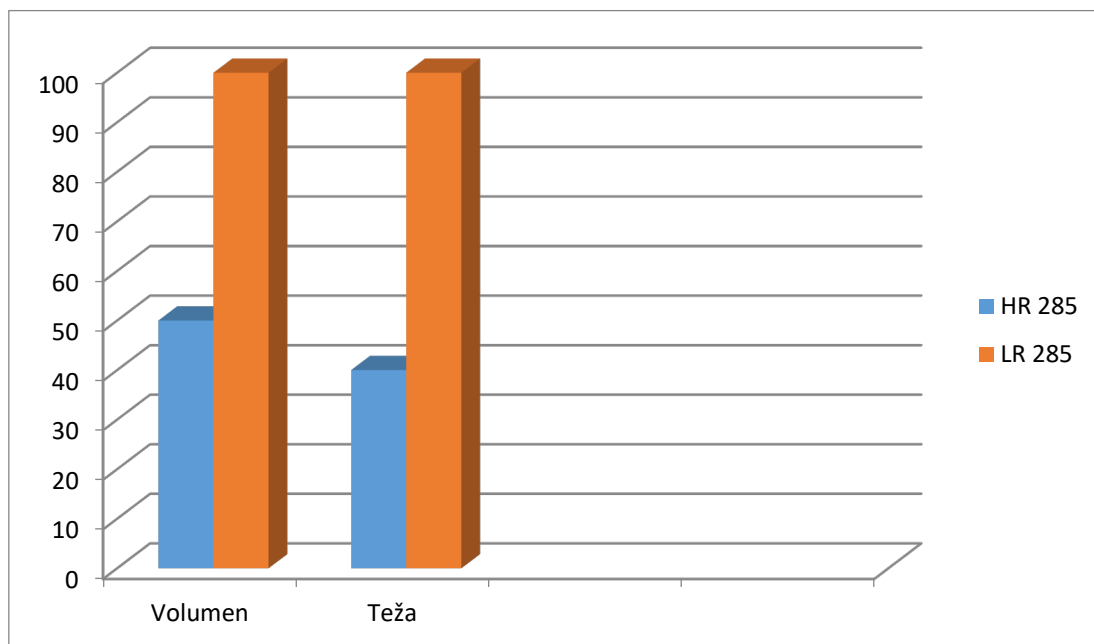
Z večanjem temperature epoksi smole, v našem primeru gre za smolo EPIKOTETM Resin MGS® LR 285, se viskoznost zmanjša, kot je razvidno tudi v tehničnih listih (glej Prilogo). Kot katalizator uporabljamo LH 285.

Previdni pa moramo biti, saj je tudi ne smemo preveč segrevati, saj v tem primeru lahko pride do prehitre polimerizacije. Po priporočilu proizvajalca se smolo uporablja pri temperaturi med 20 °C in 45 °C. Za doseganje manjše viskoznosti vedno segrevamo epoksi smolo, ne pa tudi trdilca, ki deluje kot katalizator in skrbno upoštevamo vsa varnostna navodila proizvajalca. Tehnične lastnosti smole:

Gostota: 1,18–1,23 [g/cm³]

Viskoznost: 600–900 [mPas]

Mešalno razmerje se glede na volumen ali težo razlikuje, kot je razvidno na Sliki 8.



Slika 8: Prikaz mešalnega razmerja epoksi smole in trdilca
(Lastni vir)

Mešalno razmerje po teži: 100 : 40 ± 2

Mešalno razmerje po volumnu: 100 : 50 ± 2

Pri segrevanju smole do 45 °C imamo na voljo t. i. odprtega časa od 45 do 60 minut, preden steče polimerizacija in smola po tem času ni več primerna za postopek infuzije. Infuzija poteka v različnem časovnem obdobju, saj je predvsem odvisno od debeline laminata in seveda velikosti izdelka in tudi odvisno koliko dovodov smole imamo. Podobno kot pri brizganju plastike imamo tudi pri kompozitih dovode armature, v našem primeru epoksi smole.



*Slika 9: Kalup za izdelavo iz ogljikovih vlaken po postopku vakuumske infuzije
(Lastni vir)*

Po opravljenem postopku vakuumske infuzije je dovod smole in cev, kjer smo s pomočjo vakuumske črpalke opravljali vakuum, zaprt. Naposled so tkanine v notranjosti povsem brez zraka. Po postopku infuzije mora vse skupaj v peč in na toplotno utrjevanje, kjer izdelek utrjujemo pri temperaturah od 75 °C in vse do 130 °C. Zrak v sistemu bi torej pomenil izdelek z napako.

Z različnimi postopki toplotnega utrjevanja se spreminjajo tudi lastnosti izdelka. Do razlik pride že, če izdelek dlje časa obdelujemo pri določeni temperaturi ali pa temperaturo zvišamo. Za dobro ponovljivost v proizvodnji je ključno, da natančno upoštevamo tako čas kot temperaturo utrjevanja. Če želimo izboljšati togost ali temperaturno obstojnost izdelka, ga moramo ustrezno drugače temperaturno obdelati. Na splošno velja, da daljše utrjevanje pri višjih temperaturah poveča togost izdelka. V določenih primerih je to prednost, v našem primeru pa lahko predstavlja slabost, saj pri izdelavi sedežev iščemo optimalno prožnost sedežne školjke. Prekomerno utrjen izdelek bi bil pretrd in posledično manj udoben.

4.1 Infuzija brez medija za prenos smole po tkanini

S preizkušanjem je bilo ugotovljeno, da lahko laminat s presekom debeline od 0,24 mm do 2 mm prepojimo s smolo tudi povsem brez medija, a le do določene dolžine laminata. Če ne impregniramo celotne tkanine, bi nam v zaprtem sistemu ostal zrak, kar pa se ne sme zgoditi,

saj v postopku polimerizacije temperatura naraste. Splošna plinska enačba (Kraut, 1997) potrjuje spremembo v tlaku glede na temperaturo.

$$pV=nRT$$

V tem primeru bi tlak narasel in izničil vakuum, ki ga moramo obdržati do konca polimerizacije. Zato smo hitro ugotovili, da je lahko infuzija brez medija za prenos smole zaradi slabe permeabilnosti tkanine zelo specifična in bi se to tehnologijo lahko uporabilo zgolj pri nekaterih izdelkih, kjer debelino omejuje že kalup. To pa pri votlih profilih seveda ni možno, saj iz notranjosti ne moremo odstraniti kalupa.

Ugotovimo, da je infuzija brez posebnega medija za prenos smole možna zgolj pri izdelkih, ki so geometrijsko omejeni s kalupom z vseh strani. Če so ogljikova vlakna v vakuumu v vakuumski foliji in želimo izdelati votel profil, potem je potrebno uporabiti tudi t. i. rokave iz folije (slika 9). Na fotografiji so razvidna zelena jedra oz. folija v obliki rokava. Zaradi permeabilnosti ta pristop ni primeren, saj je kljub povečani temperaturi smola impregnirala zgolj 31 mm tkanine.

Določene parametre bi lahko prilagajali tudi z dovajanjem toplote od zunaj (npr. z industrijskim fenom), vendar je tak postopek težko ponovljiv, zato se mu izogibamo. Prav tako obstaja nevarnost, da presežemo kritično temperaturo, saj lahko previsoka temperatura pospeši polimerizacijo epoksidne smole do te mere, da reakcija postane tako burna, da lahko pride do vžiga.



*Slika 10: Ogljikova vlakna v kalupu brez medija za prenos smole
(Lastni vir)*

4.2 Infuzija smole s pomočjo spiralne cevi

Zaradi omejitve s prenosom smole brez medija smo dodali v izdelek spiralno cev, s pomočjo katere dovajamo epoksi smolo v laminat.

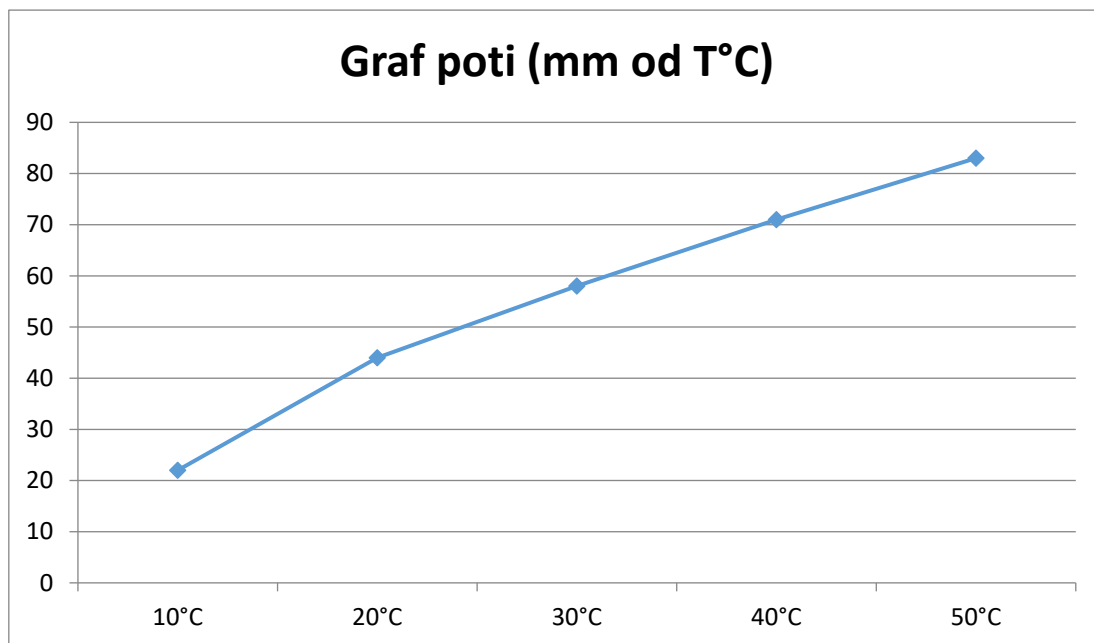


*Slika 11: Ogljikova vlakna v kalupu s spiralno cevjo za prenos epoksi smole po izdelku
(Lastni vir)*

Na fotografiji je razvidna namestitev spiralne cevi, za prenos epoksi smole v ogljikova vlakna.

Na podlagi eksperimentov je bilo ugotovljeno, da smola brez medija za prenos omogoča samo 82 mm impregnacije, torej lahko na ta način izdelujemo profile, ki imajo obseg do 82 mm, ali pa bi morali dodajati dodatne spirale v razmiku največ 164 mm (torej od vsakega dovoda smole je laminat ustrezno prepojen v širino 82 mm od spirale). Vse eksperimente smo izvajali pri segreti smoli na 45 °C, kar je še najvišja zaželena temperatura za dovolj t. i. odprtega časa, ki je potreben pri postopku infuzije.

Graf na Sliki 12 prikazuje permeabilnosti smole v dolžino laminata od 0 mm do 90 mm pri različnih temperaturah. Na abscisi so navedene temperature epoksi smole, ordinata pa prikazuje pot v milimetrih, ki jo je smola v laminatu opravila.



Slika 12: Graf poti smole v mm glede na temperaturo (Lastni vir)

Ker naš izdelek cevaste oblike nima obsega, večjega od 82 mm, je postopek impregnacije suhe tkanine ogljikovih vlaken uspešen.



*Slika 13: Postopek vakuumske infuzije cevastega profila
(Lastni vir)*

Izdelek na zunanji strani omejujeta zgornji in spodnji del kalupa. Da je notranjost votla, moramo tudi v notranjosti napeljati vakuumsko vrečo, v našem primeru zavarjeno vakuumsko vrečo v obliki rokava, ki sega v notranjost votle strukture. Ko izdelek polimerizira sprva odstranimo zunanjo vakuumsko vrečo, izdelek odstranimo iz kalupov in nato iz samega izdelka odstranimo še vakuumski rokav, ki je bil prej v notranjosti. Rokav nam je zagotavljal dobro kompresijo samega laminata in posameznih slojev.

Izdelek mora biti zasnovan tako, da je mogoče odstraniti notranje rokave. Teh ne puščamo v izdelku, saj predstavljajo dodatno težo, obenem pa se lahko s časom odlepijo od notranjih sten in povzročajo nezaželene zvoke. Rokavi so izdelani iz posebne plastike, ki jo je mogoče

reciklirati, in se tudi v proizvodnji ustrezno ločujejo. Za zagotavljanje tesnosti se pri vsakem izdelku uporabi nova vakuumska vreča in novi notranji rokavi.

4.3 Infuzija smole z mrežo iz polipropilena

Zadnja metoda, ki smo jo preizkusili, pa za prenos epoksi smole po izdelku vključuje tudi mrežo iz polipropilena. Slabost te mreže je nekoliko več dodatne teže, saj vse skupaj ostane v notranjosti. Polipropilen je primeren material za prenos smole, saj ga jedkost epoksi smole ne uničuje, obenem pa v primeru zloma laminat drži skupaj. Polipropilen se v izdelke dodaja tudi zaradi varnosti, saj so ogljikova vlakna v primeru zloma zelo ostra, polipropilen pa ima drugačne lastnosti in se ne zlomi, tako da izdelek drži skupaj, kar je tudi zahtevano s strani standarda ISO 4210, ki ga moramo pridobiti v športni industriji (ISO, 2023).



*Slika 14: Ogljikova vlakna v kalupu s spiralno cevjo in polipropilensko mrežo za prenos epoksi smole po izdelku
(Lastni vir)*

Ugotovljeno je bilo, da lahko s pomočjo mreže in brez spiralne cevi izdelujemo preseke cevastih profilov, ki merijo do dolžine 422 mm. Spiralna cev za določene izdelke do dolžine 422 mm ni potrebna, zgolj dovod smole moramo pripeljati do mreže, ta pa je nato dovolj

permeabilna, da lahko epoksi smolo ustrezno prenese do dolžine 422 mm, ne glede na debelino laminata, ki jo uporabljamo (preizkušali smo od 0,24 mm do 2 mm).

Mreža iz polipropilena je primerna za uporabo, saj je zaradi načina pletenja raztegljiva v vse smeri in jo lahko natančno položimo med sloje karbonskih vlaken. Pri uporabi je treba upoštevati njene lastnosti, zlasti temperaturno obstojnost, saj ne smemo preseči tališča polipropilena. Pomembno je tudi razumevanje permeabilnosti in dovajanja epoksidne smole skozi spiralne cevi, ki morajo biti predhodno raztegnjene, da omogočajo ustrezen pretok smole.

Pri polaganju mreže se za lažje delo uporabljajo lepila v spreju, običajno namenjena lepljenju papirja. Pri postavitvi suhih vlaken pa uporabljamo lepila, ki jih epoksidna smola razgradi. Ker je smola v kombinaciji s trdilcem kemično aktivna, lahko določena lepila razžre. V našem primeru želimo, da lepilo služi le začasni fiksaciji, medtem ko se ob impregnaciji razgradi. Uporaba neustreznega lepila bi lahko negativno vplivala na strukturo kompozita in povzročila razslojevanje.

4.4 Izdelava cevastih profilov s prepreg ogljikovimi vlakni

Zelo pogosta tehnologija izdelave cevastih profilov je uporaba prepreg tkanin. Gre za ogljikova vlakna, ki so predhodno prepojena s smolo. Ker ima postopek precej slabosti za maloserijsko izdelavo se nismo preveč poglobljali v tovrstno tehnologijo, čeprav jo kot podjetje pri nekaterih izdelkih uporabljamo. Na podlagi izkušenj smo se odločili, da ta tehnologija v danem primeru ni optimalna.

Gre za časovno zamuden proces, saj je že sam razrez tovrstnih tkanin zelo zahteven in zahteva tudi dodatno strojno opremo. V primeru večje serije je vsekakor smiselno razmišljati o tovrstni proizvodnji, ampak za potrebe manjše serije tu nismo prepoznali večjega potenciala. Gre tudi za tehnologijo, kjer je ogromno konkurence, saj veliko industrije uporablja tovrsten pristop k izdelavi votlih profilov. Če pa želimo biti konkurenčni pa moramo postopek narediti tudi tržno bolj zanimiv. Torej postopek poenostaviti, pohitriti in na splošno izdelati ceneje in enako kvalitetno. Poleg strojne opreme, ki je potrebna za razrez prepreg tkanin, je potrebna tudi posebna peč, imenovana avtoklav. Gre za peč, ki poleg temperature ustvari tudi pritisk, ter tako zagotavlja da so posamezni sloji preprega primerno stisnjeni med seboj in da vmes ni ujet zrak. Tovrstne opreme v podjetju nimamo in tudi ocenjujemo, da je primerna zgolj za večje serije in za izdelke, ki specifično zahtevajo uporabo avtoklava.

Uporaba avtoklava je tudi energetsko zelo neučinkovita in posledično manj konkurenčna, saj je poleg začetne investicije v strojno opremo drago tudi vzdrževanje in pa samo obratovanje peči.

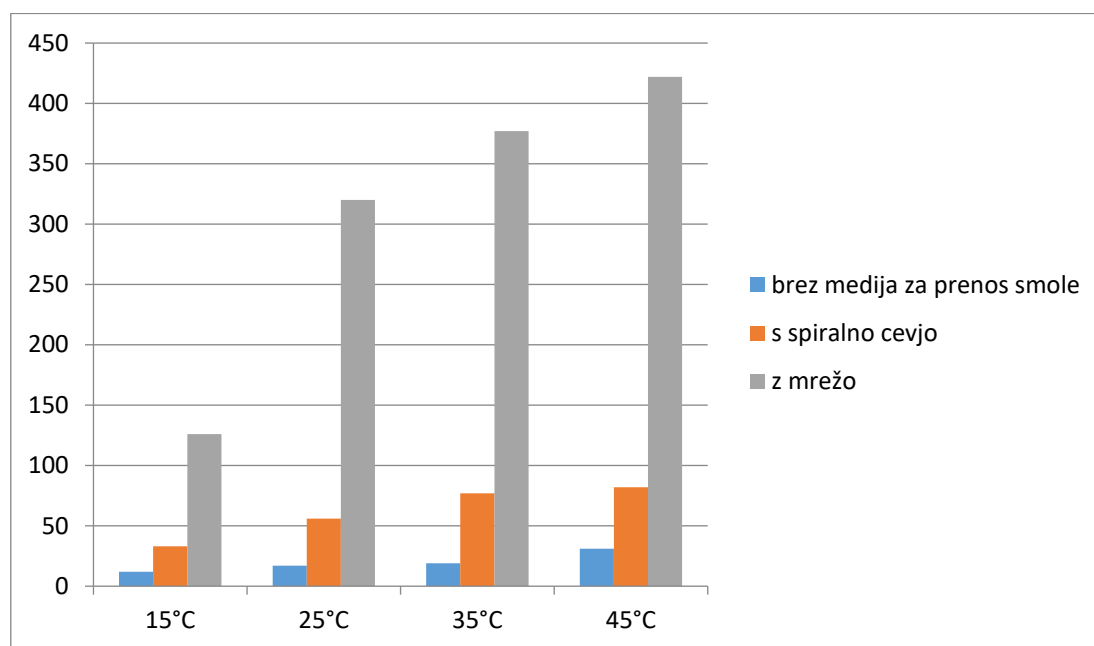
5 DEFINICIJA PRIMERNE TEHNOLOGIJE

Na podlagi različnih preizkusov smo pridobili dragocene informacije za definicijo tehnologije, ki je potrebna za izdelavo kompozitnih cevastih profilov s pomočjo infuzije. Za vse poskuse je bil uporabljen enak laminat, enaka epoksi smola in enak postopek utrjevanja. Prav tako smo eksperimente večkrat ponovili in se tako prepričali, da gre za prave rezultate.

5.1 Permeabilnost smole s posameznimi mediji za prenos smole

Različna temperatura zelo vpliva na permeabilnost epoksi smole v tkanino, po priporočilu proizvajalca je bilo odločeno, da bomo smolo segrevali na 45 °C. Za boljše razumevanje kako se obnaša epoksi smola, pa so bili izvedeni preizkusi tudi pri nižjih temperaturah, in sicer pri 15 °C, 25 °C in 35 °C.

Preizkus je bil izveden z vsemi tremi metodami na enakem vzorcu, torej preizkus brez medija za prenos smole, s spiralno cevjo in z mrežo iz polipropilena.



Slika 15: Prikaz poti smole v mm z različnimi mediji za prenos pri različnih temperaturnih pogojih
(Lastni vir)

Na grafu vidimo razdaljo, ki jo je epoksi smola lahko primerno impregnirala (v najboljšem primeru 422 mm s pomočjo mreže).

Iz grafov je torej zelo razvidno, da je ena metoda bistveno boljša od ostalih dveh, čeprav sta tudi slednji metodi lahko primerni za določene izdelke.

Metoda z mrežo je sicer najdražja, ampak je najbolj vsestransko uporabna, obenem pa kvadratni meter tovrstne mreže ne predstavlja velik strošek, saj se cena na trgu trenutno giblje okrog sedem evrov na kvadratni meter. Dobra lastnost te mreže je tudi možnost reciklaže, saj pri izdelavi določenih krojev pride do določenega izmeta, ki se lahko uporabi pri izdelavi manjših kosov, lahko pa se ga tudi reciklira, saj gre za dokaj vsestransko uporaben material. Mreže so na trgu zelo dostopne, saj imajo zelo širok spekter uporabe, je pa zelo pomembno, da preverimo tehnične lastnosti določene mreže in slednje upoštevamo pri temperaturni obdelavi.

Če presežemo tališče mreže, se bodo na izdelku poznale nepravilnosti, saj ob taljenju polipropilena pride do mešanja z epoksidno smolo in običajno se to najbolj pozna zaradi različnih temperaturnih raztezkov. Ko se kos ohladi, pride do opaznih nepravilnosti zaradi spremembe lastnosti materialov.

5.2 Postopki utrjevanja izdelka

Po končanem postopku vakuumske infuzije je potrebna tudi toplotna obdelava, odvisno od samih zahtev, ampak pri kompozitih se vedno srečujemo s t. i. post-curingom, torej toplotno obdelavo po prvotni fazi polimerizacije. Gre torej za korak v procesu, ko je izdelek že odstranjen iz kalupa. Gre na naknadno toplotno obdelavo.

Z višanjem temperature pri naknadni temperaturni obdelavi izdelku izboljšujemo tehnične lastnosti, predvsem pa odpornost pri izpostavljanju na temperaturi. Pri nekaterih izdelkih lahko zasledimo, da so na račun zniževanja stroškov pri proizvodnji takšne procese izpustili. Za lažje razumevanje, gre za podoben korak kot ga bolj poznamo pri kovinah in kaljenju. Z višanjem temperature dosežemo boljše lastnosti. Ker je bil uporabljen polipropilen, se moramo zavedati omejitev pri tem materialu. Tališče polipropilena je pri 160 °C, kar povsem ustreza našim zahtevam, saj sami tehnični listi epoksi smole EPIKOTETM Resin MGS® LR 285, ki smo jo uporabili pri razvoju tehnologije, zahtevajo utrjevanje pri 80 °C (glej Prilogo).

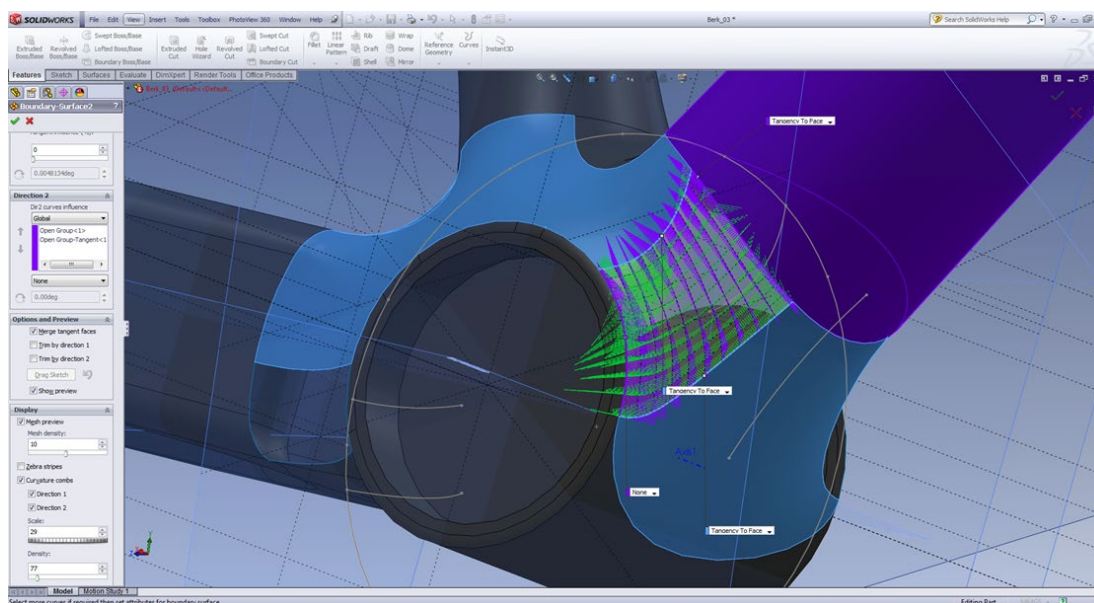
Pri izdelavi večjih komponent sta zelo pomembni tudi konstantna temperatura po celotnem izdelku (primerna ventilacija) in postavitvev izdelka v peč. Predvsem pri votlih je previdnost ključna, saj se zaradi votlih struktur lahko določeni deli izolirajo pred temperaturo, ki jo nudi peč. V tem primeru je nujno predhodno meriti temperaturne razlike na samem izdelku in temu primerno prilagoditi cikel in postavitev med toplotnim utrjevanjem.



*Slika 16: Primer temperaturnega utrjevanja v peči
(Lastni vir)*

5.3 Konstruiranje izdelka

Pri razvoju tehnologije so bili uporabljeni kalupi in izdelki, ki smo jih že imeli na razpolago v podjetju. Gre torej za kalupe cevi in cevastih izdelkov. Za konstruiranje tovrstnih izdelkov se uporablja programske opreme kot so SolidWorks.



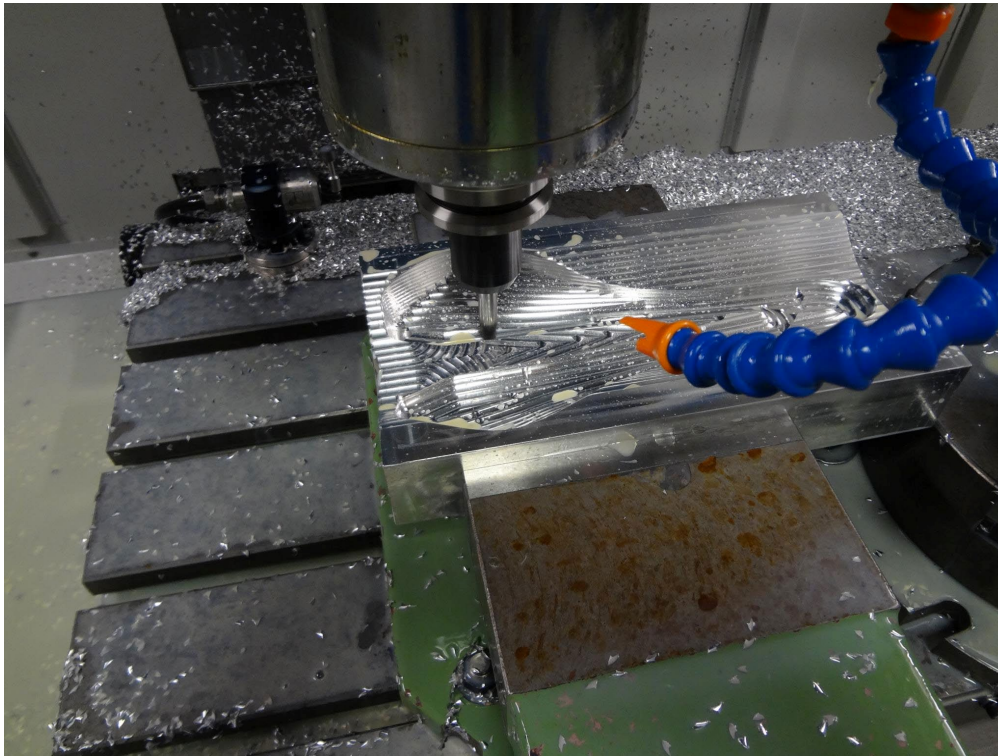
Slika 17: Uporaba SolidWorks programa za izdelavo modela
(Lastni vir)

Pri konstruiranju, kjer bomo potrebovali kalupe iz ogljikovih vlaken, ni potrebno upoštevati skrčkov oz. dilatacij. Moramo pa biti pozorni na izdelek, iz katerega potem naredimo kalupe iz kompozita. Kompozitnih orodij ne moremo rezkati, ampak so zmeraj rezultat odtisa, torej nečesa, kar imamo v fizični obliki. V tem primeru moramo biti pozorni na lastnosti izdelka, iz katerega jemljemo kompozitni kalup. V tem primeru moramo upoštevati različne parametre za doseganje natančnih kompozitnih kalupov.

Konstruiranje zahteva razumevanje celotnih postopkov. Poznati moramo tehnologije in zmogljivosti CNC-strojov; praviloma gre za kalupe, ki jih lahko izdelamo že s 3-osnim CNC-strojem, medtem ko bi 5-osni CNC lahko izdelal tudi negativne kote, ki lahko preprečujejo razkalupljenje izdelka. Prav tako moramo imeti razumevanje in znanje o tem, kako poteka 3D-tiskanje osnov, iz katerih lahko izdelujemo kompozitne kalupe. Gre torej za zelo širok segment, kjer je nujno dobro razumevanje vseh faz, saj mora biti projekt uporaben v praksi; ni dovolj, da je izdelek zgolj tehnično dovršen ali vizualno všečen. Lažje se je prilagoditi določenim omejitvam že v začetni fazi konstruiranja izdelka, kot pa pozneje prilagajati orodja oblikam, ki so se sprva morda zdele zanimive, a se kasneje izkažejo za neizvedljive ali zelo drage za izdelavo.

Pri 3D-tisku smo ugotovili ustrezne parametre. Večinoma uporabljamo PETG filament, ki se je najbolje izkazal v kombinaciji z epoksidno smolo, saj ta material ni občutljiv na njeno jedkost. Ob zadostnem deležu polnila je tudi dovolj konstrukcijsko trden, da zdrži postopek vakuumske infuzije. Za primeren model je treba uporabiti vsaj 60 % polnila; v nasprotnem primeru lahko

pride do porušitve zaradi vakuuma v vreči. Prav tako je pomembna ustrezna debelina stene 3D-tiskanega elementa.



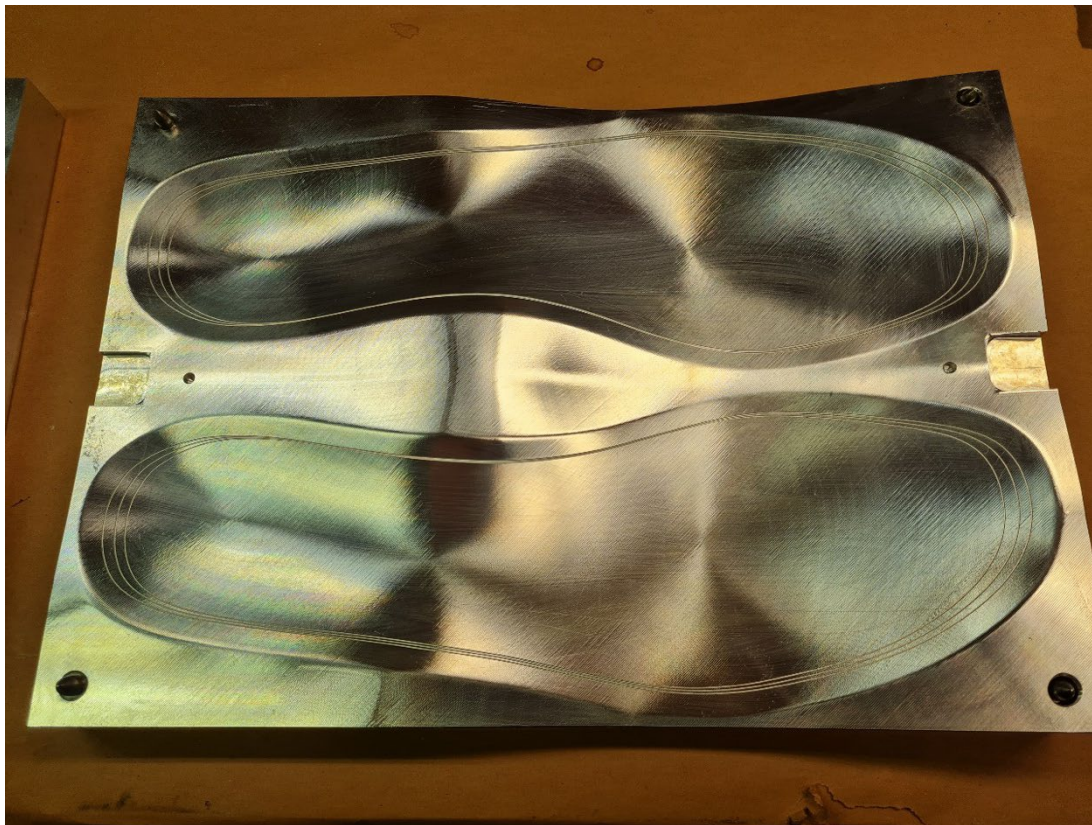
*Slika 18: Izdelava aluminijastih kalupov za sedežno školjko
(Lastni vir)*

Za vsak izdelek v podjetju najprej naredimo prvi kos iz aluminija EN AW 7075, nato pa izdelamo kompozitni pozitiv, za izdelavo nadaljnjih kompozitnih kalupov. Na enak način lahko sami izdelamo več kalupov, kar bistveno pohitri proizvodnjo, prav tako so kalupi iz ogljikovih vlaken zelo enostavni za rokovanje, običajno kalup, ki je narejen iz aluminija, tehta več kot 10-krat več v primerjavi s kompozitnim kalupom. Kot omenjeno pa ogljikovi kalupi pri naši temperaturni obdelavi praktično nimajo raztezka, kjer pa bi se pri aluminiju že pojavile težave.

Kljub višji ceni tovrstnih orodij se pogosto odločimo za izdelavo prvih kalupov s pomočjo CNC-stroja, saj ta omogoča doseganje zelenih toleranc. Dobra alternativa je tudi 3D-tisk, ki ga lahko uporabimo za izdelavo modelov, kjer tolerance niso tako pomembne. Hkrati se 3D-tiskalniki iz leta v leto tehnološko izpopolnjujejo; tudi v našem podjetju jih uporabljamo za izdelavo prototipov, s čimer bistveno pospešimo in pocenimo začetne faze razvoja. Pogosto je 3D-tiskan pozitiv dovolj kakovosten za izdelavo kompozitnih kalupov, tudi za manjše serije.

5.4 Alternativne tehnologije

Obstajajo pa tudi tehnologije, kjer so kompozitni kalupi neprimerni – gre za stiskanje na preši. Ogljikova vlakna tlaka ne prenašajo najbolje, v slednjem primeru moramo uporabiti kalupe iz aluminija.



*Slika 19: Primer kalupa iz aluminija 7075
(Lastni vir)*

Primer takšnega izdelka je notranjik za športno obutev, kjer se tkanine (prepreg) brez vakuuma samo preša v kalupe.



*Slika 20: Primer izdelanega notranjika s postopkom prešanja kompozita
(Lastni vir)*

Pri kalupu za izdelavo kompozita s pomočjo preše se srečujemo z novimi izzivi, kot so visoki stroški izdelave kalupov (ti morajo imeti tudi integrirane grelce za postopek polimerizacije). Uporabiti moramo t. i. prepreg ogljikova vlakna, ki so primerna predvsem v proizvodnjah, kjer se srečujemo z večjimi serijami.

Tovrstna tehnologija je povsem neprimerna za izdelavo cevastih konstrukcij in gre predvsem za enostavnejše izdelke, ki so na trgu manj zaželeni, saj za izdelavo takšnih izdelkov ni potrebna visoka raven znanja v primerjavi s komponento, ki je votla, oz. ima cevasti profil. Za tovrstno tehnologijo se večinoma uporabljajo prepreg karbonska vlakna, ki imajo za to aplikacijo posebej razvito epoksidno smolo, saj ta polimerizira bistveno hitreje kot običajne. Ker gre za postopek, pri katerem je zaželen hiter čas utrjevanja, je tudi sama surovina precej bolj občutljiva; kljub skladiščenju v zamrzovalnikih njen rok trajanja običajno znaša le približno en mesec.

Gre torej za izdelke, pri katerih je zaradi same narave uporabe potrebna večja količina surovine. V takšnem obratu se hitro pojavijo tudi logistični izzivi, saj je pravočasna uporaba materiala ključnega pomena. Surovina je navadno dobavljena v rolah, kjer je površina

karbonskih vlaken od približno 25 m² do 100 m². V našem primeru bi lahko iz ene manjše role (25 m²) izdelali več kot 1000 notranjnikov.

Tovrstne smole se utrjujejo pri višjih temperaturah, popolna polimerizacija pa je lahko dosežena že v zelo kratkem času, v nekaj minutah. Gre torej za izdelek, ki bi ga bilo do določene mere mogoče avtomatizirati, vendar to zaradi razmeroma nizke dodane vrednosti pogosto ni smiselno.



*Slika 21: Primer kolesarskega čevlja z jedrom iz spenjenega epoksija
(Lastni vir)*

Kadar želimo izdelek izdelati s pomočjo preše, vendar presek ni enakomeren po celotni površini, lahko v notranjost dodamo t. i. jedra; v našem primeru uporabljamo plošče iz

spenjenega epoksija. Gre za specifičen postopek, ki je tehnično zahtevnejši in ne omogoča tako hitre izdelave, kot je to mogoče pri izdelavi notranjnikov.

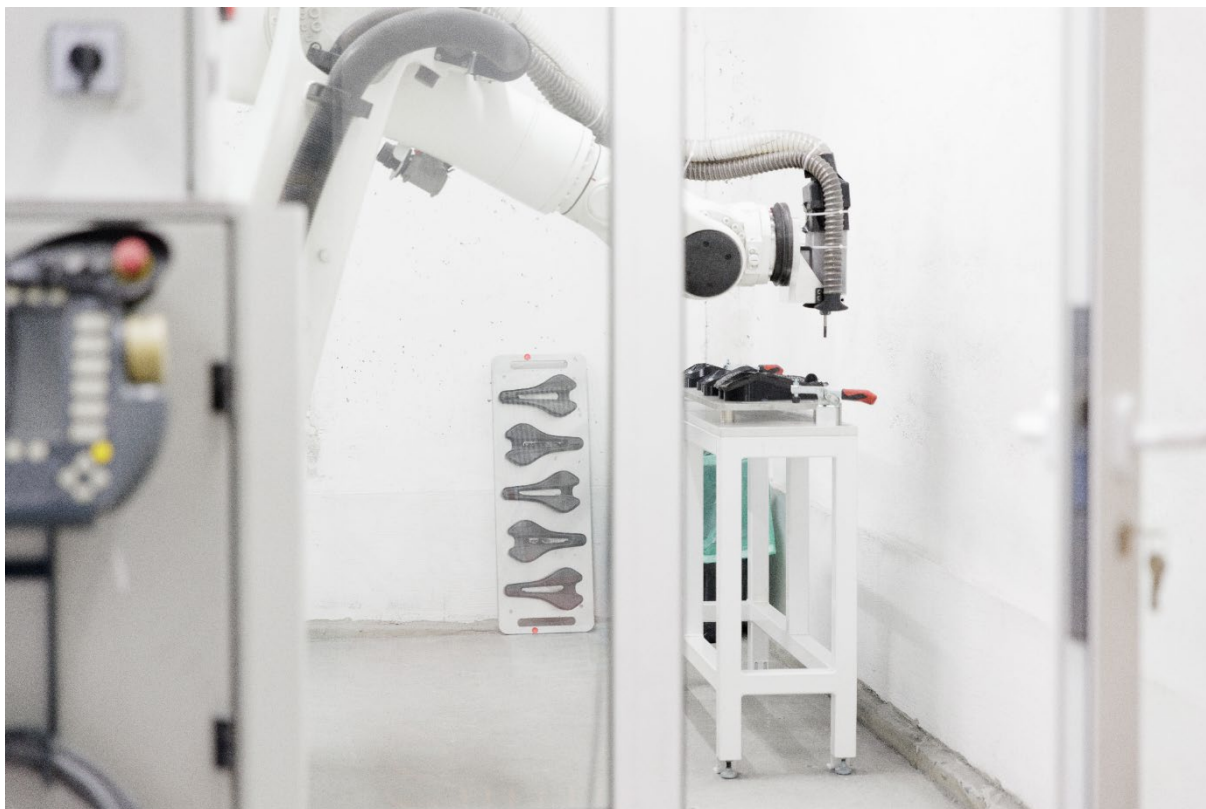
Kot je razvidno na fotografiji, gre za kompozitni izdelek z neenakomernim presekom. Tovrstna orodja so prav tako draga, zato je za njihovo uspešno amortizacijo potrebna določena serija izdelkov, kar je lahko za manjše podjetje tudi tvegano.

5.5 Obdelava kompozitnih izdelkov

Velikokrat spregledan, vendar zelo pomemben proces je tudi obdelava kompozitnih izdelkov. Gre za postopke obdelave površine, kot so peskanje, ročno brušenje in obrezovanje.

Pri maloserijskih izdelkih je večina korakov obdelave izvedena ročno, torej gre predvsem za ročno obrezovanje in brušenje. Pri izdelkih, ki se izdelujejo serijsko, pa je smiselno uvesti določeno stopnjo avtomatizacije, kolikor je to mogoče.

V našem podjetju uporabljamo obrezovanje s pomočjo robota KUKA KR200, ki obdeluje kompozitne izdelke. Izdelki so vedno zasnovani tako, da vsebujejo določen presežek materiala, ki ga je treba naknadno odstraniti. Na ta način dobimo enakomerne in kakovostne robove, ki niso odvisni zgolj od natančnosti posameznika. Karbonskih vlaken namreč ni mogoče polagati povsem natančno do robov, saj so tkanine zelo občutljive in bi v takem primeru skoraj zagotovo prišlo do odstopanj. Temu se izognemo tako, da uporabljamo kroje, ki so nekoliko večji od dejanskega izdelka, končni izdelek pa nato obrežemo na zahtevano konturo.



*Slika 22: Uporaba robota za obrezovanje kompozitnega izdelka
(Berk-Vehovar kompoziti, 2010)*

Maloserijske izdelke se v večini obrezuje ročno, saj bi stroški pritrdišč in priprave za avtomatizirano obrezovanje presegli stroške ročne obdelave v določeni seriji. Vedno moramo računati celotno serijo in na podlagi količine se lažje odločimo, kakšen pristop je najbolj primeren.

Za potrebe površinske obdelave se poleg ročnega brušenja uporablja tudi peskanje. Tu je zelo pomembna uporaba primerne medija za peskanje, saj so kompoziti dokaj občutljivi na peskanje. Slednje se uporablja zgolj za pripravo površine na lakiranje.



*Slika 23: Peskalna komora
(Lastni vir)*

Pri peskanju je pomembno uporabiti primeren tlak, saj želimo površino le rahlo nahrapiti. Tako obdelana površina je nujna za nadaljnje faze lakiranja, ki so ključne za dober videz končnega izdelka in hkrati zagotavljajo UV-zaščito. Epoksidna smola je namreč občutljiva na zunanje vplive; pod vplivom UV-sevanja lahko sčasoma porumeni, kar je vizualno zelo moteče. Zato se kompozitni izdelki praviloma lakirajo, s čimer dodatno poudarimo tudi njihov značilen videz ogljikovih vlaken.

Površina ogljikovih vlaken ima določene posebnosti; podobno kot pri lesu gre za material z manjšimi nepravilnostmi. Postopek lakiranja običajno poteka v več fazah: najprej brušenje, nato nanos laka v več slojih. Praviloma se najprej nanese osnovni sloj laka, s katerim zapolnimo manjše nepravilnosti na površini. Sledi fino brušenje, nato pa ponovno lakiranje. Gre za zamuden proces, ki ga je težko avtomatizirati, saj ima vsak izdelek svoje specifične, za odpravo vseh nepravilnosti pa je nujna natančnost in ročno delo. Prav zaradi velikega deleža ročnih postopkov so komponente iz ogljikovih vlaken razmeroma drage.

6 ZAKLJUČEK

Z razvojem tehnologije infuzije kompozitnih cevastih profilov smo naleteli na vrsto zaprek in kompromisov.

Eno glavnih vprašanj ostaja uporaba polipropilenske mreže, ki se je izkazala kot nujen medij za prenos smole, obenem pa nam nudi tudi varnostni faktor, saj v primeru zloma kompozitni kos drži skupaj v enem delu.

Če pa se srečujemo z izdelkom, kjer želimo doseči čim nižjo težo, pa slednje lahko predstavlja težavo, saj poveča težo izdelka. Mreža iz polipropilena ne predstavlja veliko teže, ampak epoksi smola, ki jo mreža zadrži, lahko predstavlja neželjeno dodatno težo. S pomočjo mreže smo lahko izdelali kvaliteten votel izdelek s pomočjo vakuumske infuzije. Drugi načini so se izkazali za manj uspešne, so pa prav tako lahko uporabni v specifičnih primerih, predvsem ko gre za manjše izdelke. Tu je bilo ugotovljeno, da poseben medij za prenos epoksi smole in odzračevanje ogljikovih vlaken ni potreben, predvsem če smo uporabljali segrevanje epoksi smole.

Vse skupaj bi lahko izboljšali, če bi izdelali dovod smole, kjer bi lahko uravnavali tudi tlak. S tem bi lahko izboljšali permeabilnost v tkanini, bi pa slednje pomenilo več izračunov – kakšen tlak epoksi smole se lahko uporablja v sistemu, ki je zaprt in meri 0,003 mbar. Vse skupaj bi projekt in razvoj tehnologije zelo podražilo in podaljšalo, vse zgolj zaradi nekoliko nižje teže končnega izdelka. Tudi če bi izdelek bil brez mreže in bi ga želeli standardizirati, bi morali dodati vrsto aramidne tkanine, za doseganje varnostnih standardov, vsaj v kolesarski industriji se srečujemo z zahtevnimi standardi. In dodajanje tovrstnih materialov bi pomenilo, da smo se ponovno približali teži, ki smo jo dosegli z našo tehnologijo.

Po opravljeni raziskavi je mogoče sklepati, da je izbira tehnologije močno odvisna od izdelka, pri čemer se končni rezultati vrednotijo v gramih ter prilagajajo zahtevam in ciljni uporabi. V prvi vrsti želimo z razvojem novih tehnologij ohraniti konkurenčnost na nasičenem trgu, kar je z neobičajnim pristopom možno, a samo za določen čas, dokler se na trgu ne pojavijo nove zahteve, bodisi ekonomske ali trajnostne.

Poleg sprememb na trgu je treba upoštevati tudi tehnično zahtevnost izdelka ter usposobljenost kadra, ki opravlja tovrstna dela. Pomemben vidik je tudi varovanje intelektualne lastnine, ki je ključno za ohranjanje konkurenčnosti na globalnem trgu. Veliko rešitev se zato raje ohranja kot poslovna skrivnost, saj bi jih v primeru patentiranja neposredno razkrili širši javnosti, ker ima vpogled v patente lahko vsakdo.

Prav drobni detajli, ki jih ne razkrivamo v celoti, pogosto igrajo ključno vlogo, zato številni postopki ostajajo skrbno varovani. Hkrati pa se v industriji žal dogaja, da se nekateri postopki z izmenjavo generacij postopoma izgubijo.

7 LITERATURA IN VIRI

Alan Harper Composites Ltd. (b. l.). *Welcome to the Future of Composites*. Pridobljeno 28. 12. 2025 z naslova <https://alanharpercomposites.com/>

Berk-Vehovar kompoziti. (b. l.). *Lupina Short 150*. Pridobljeno 4. 1. 2026 z naslova <https://www.berk-composites.com/sl/product/lupina-short-150/>

Berk-Vehovar kompoziti. (2010). *Uporaba robota za obrezovanje kompozitnega izdelka*. Interni dokument.

Goodship, V. (ur.). (2004). *Practical Guide to Injection Moulding*. Shawbury: Rapra Technology Limited.

Hexcel Corporation. (b. l.). Carbon Fiber – *The Key Building Block of Advanced Composites*. Pridobljeno 4. 1. 2026 z naslova <https://www.hexcel.com/Resources/carbonfiberbuildingblock>

International Organization for Standardization ISO Central Secretariat. (2023). *ISO 4210-1:2023 Cycles — Safety requirements for bicycles — Part 1: Vocabulary*. Pridobljeno 4. 1. 2026 z naslova <https://www.iso.org/standard/78075.html>

Kraut, B. (1997). *Krautov strojniški priročnik*. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije

Menczel, J. D. in Prime, B. (2009). *Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Toray Composite Materials America. (b. l.). *Data Sheets*. Pridobljeno 4. 1. 2026 z naslova <https://www.toraycma.com/resources/data-sheets/>

Wikipedija. (2020). *Ogljikovo vlakno*. Pridobljeno 5. 1. 2026 z naslova https://sl.wikipedia.org/wiki/Ogljikovo_vlakno

PRILOGA

Priloga 1: Tehnični list epoksi smole 285

EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285

EPIKURE™ Curing Agent MGS® LH 285, 286, 287

	page	Content
Characteristics	10	
Application	11	
Specification	12	
Processing details	12	
Mixing ratios	13	
Temperature development	13	
Gel time	13	
DMA	14	
T _g conditioned	14	
Development of T _g	15	
Mechanical data	16	

Approval	German Federal Aviation Authority
Application	production of gliders, motor gliders and motor planes, boat and shipbuilding, sports equipment, model airplanes, moulds and tools
Operational temperature	-60 °C up to +50 °C (-76 °F up to 122 °F) without heat treatment -60 °C up to +80 °C (-76 °F up to 176 °F) after heat treatment
Processing	at temperatures between 10 °C and 50 °C (50-122 °F) all usual processing methods
Features	extremely good physiological compatibility, good mechanic and thermic properties, pot life of approx. 45 min. to approx. 4 hours
Special modifications	LR 285 T: thixotropic LR 285 W: white
Storage	shelf life of 24 month in originally sealed containers

Characteristics

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.

Am Ostkai 21/22
 70327 Stuttgart
 Germany
 Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
 Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
 www.hexionchem.com

March, 2010

May, 2006



Technical Information
Epoxy and Phenolic Resins Division
Epoxy Resins

1.1 - 11

EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285

Laminating resin system approved by the **GERMAN FEDERAL AVIATION AUTHORITY** with different pot lives for processing of glass, carbon and aramide fibres, featuring high static and dynamic loadability.

After heat treatment at 50 - 55 °C (122-131 °F), the system meets the standards for gliders and motor gliders (operational temperatures -60°C (-76°F) to +54°C (129 °F). In order to meet the standards for motor planes (operational temperatures -60°C (-76 °F) to +72 °C (161 °F), heat treatment at 80 °C (176 °F) is necessary.

The range of pot lives is between approx. 45 min and 4 h. The hardeners have the same mixing ratio and can be mixed among themselves in any ratio. This permits a selection of the optimum system for all processing methods. After initial curing at room temperature, the components manufactured are workable and demouldable. You will receive high-gloss and non-tacky surfaces, even with unfavourable precuring conditions, e. g. lower temperatures or high humidities.

The mixing viscosity guarantees fast and complete impregnation of the reinforcement fibres; however, the resin will not spill out of the fabrics on vertical surfaces. In order to obtain special properties, it is also possible to add fillers to the mixture of resin/hardener, such as Aerosil, microballoons, cotton flakes, metal powder, etc.

If high heat resistance or aircraft approval are not necessary, hardener LH 285 can also be used without heat treatment afterwards. However, the indicated properties will only be obtained after heat treatment at temperatures over 50 °C (122 °F).

As a matter of experience LR 285 can be combined with suitable gelcoats on UP, PU and EP basis.

Although our resin systems are very unlikely to crystallize at low temperatures, storage conditions of 15-30 °C (59-86 °F) and low humidity are recommended. After dispensing material, the containers must again be closed carefully, to avoid contamination or absorption of water. All amine hardeners show a chemical reaction when exposed to air, known as „blushing“. This reaction is visible as white carbamide crystals, which could make the materials unusable.

Crystallization is visible as a clouding or solidification of the contents of the container. If crystallisation of either component should be observed, it can be removed by warming up. Slow warming up to approx. 50-60 °C (122-140 °F) in a water bath or oven and stirring or shaking will clarify the contents of the container without any loss of quality. Use only completely transparent products. Before warming up, open containers slightly to permit equalization of pressure. Caution during warm-up! Do not warm up over an open flame! While stirring up use safety equipment (gloves, eyeglasses, gas mask).

Since the approval of laminating resin LR 285 in 1985, it has been used by nearly all manufacturers of planes and gliders and - especially because of the extremely good physiological compatibility - it is the most commonly used system in the aircraft industry today. It often happens that workers who have experienced problems with some epoxy resins concerning allergies or skin irritation are able to process laminating resin LR 285.

The relevant industrial safety regulations for the handling of epoxy resins and hardeners and our instructions for safe processing are to be observed.

Application

March, 2010

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.
May, 2006

Am Ostkai 21/22
70327 Stuttgart
Germany
Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
www.hexionchem.com



Technical Information
Epoxy and Phenolic Resins Division
Epoxy Resins

1.1 - 12

EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285

		Laminating resin LR 285
Density	[g/cm ³]	1,18 - 1,23
Viscosity	[mPas]	600 - 900
Epoxy equivalent	[g/ equivalent]	155 - 170
Epoxy value	[equivalent /100g]	0,59 - 0,65
Refractory index		1,525 - 1,5300

Specification

Measuring conditions:
measured at 25 °C / 77 °F

		Hardener LH 285	Hardener LH 286	Hardener LH 287
Density	[g/cm ³]	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viscosity	[mPas]	50 - 100	60 - 100	80 - 120
Amine value	[mg KOH/g]	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Refractory index		1,5020 - 1,5500	1,4995 - 1,5100	1,4950 - 1,4990

Measuring conditions:
measured at 25 °C / 77 °F

	Resin LR 285	Hardener LH 285	Hardener LH 286	Hardener LH 287
Average EP - Value	0,62	-	-	-
Average amine equivalent		64	64	64

Processing details

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.

Am Ostkai 21/22
70327 Stuttgart
Germany
Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
www.hexionchem.com

March, 2010

May, 2006

EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285

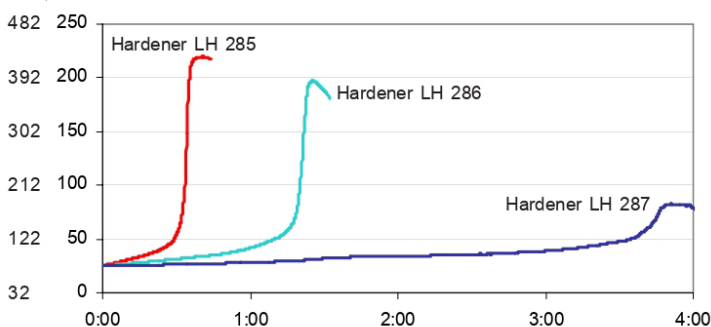
Laminating resin LR 285: Hardeners LH 285, 286, 287	
Parts by weight	100 : 40 ± 2
Parts by volume	100 : 50 ± 2

Mixing ratios

The mixing ratio stated must be observed carefully. Adding more or less hardener will not result in a faster or slower cure, but in incomplete curing with limited performance, that can not be corrected in any way.

Resin and hardener must be mixed carefully. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Special attention must be paid to the walls and bottom of the mixing container.

[°F] [°C] Temperature



Sample: 100 g / 20 °C (70 °F)

Time [h]

Temperature development

The optimum processing temperature is in the range between 20 and 40°C. Higher processing temperatures are possible, but will shorten pot life. An increase in temperature of 10°C will halve the pot life. Water (for example very high humidity or contained in fabrics or fillers) causes an acceleration of the resin / hardener reaction. Different temperatures and humidities during processing have no significant effect on the mechanical properties of the cured product.

	Resin LR 285 Hardener LH 285	Resin LR 285 Hardener LH 286	Resin LR 285 Hardener LH 287
68 - 77 °F 20 - 25 °C	app. 2-3 hours	app. 3-4 hours	app. 5-6 hours
104 - 113 °F 40 - 45 °C	app. 45-60 min	app. 60-90 min	app. 80-120 min

Gel time

Film thickness 1 mm at different temperatures

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.

Am Ostkai 21/22
70327 Stuttgart
Germany
Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
www.hexionchem.com

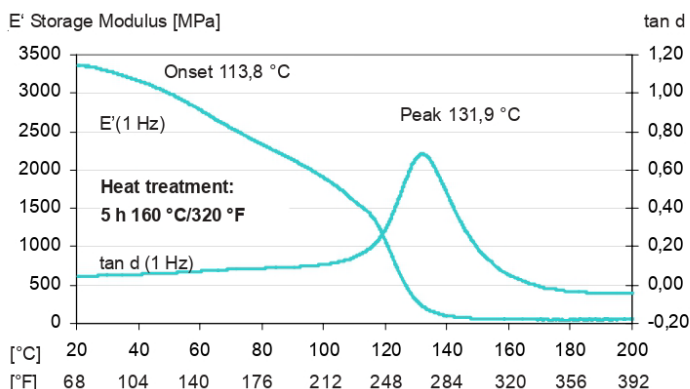
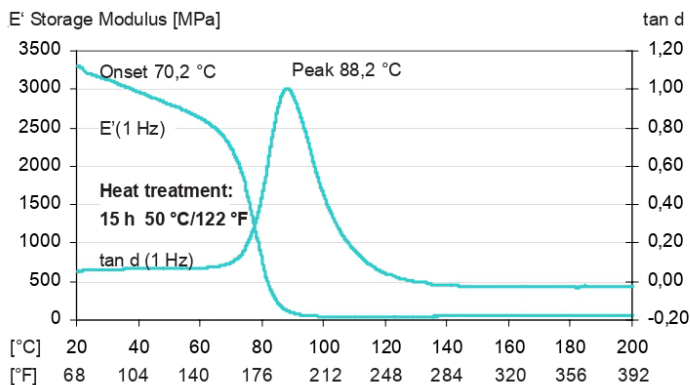
March, 2010

May, 2006

EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285

DMA - T_g (peak) tan delta laminating resin LR 285 with hardener LH 286 measuring after heat treatment

DMA



Measurement conditions

Coupon thickness: 2 mm
Heating rate: 2 K/min
Frequency: 1 Hz

	Hardener LH 285	Hardener LH 286	Hardener LH 287
unconditioned	176-185 °F 80-85 °C	185-194 °F 85-90 °C	194-203 °F 90-95 °C
conditioned	149-158 °F 65-70 °C	172-179 °F 78-82 °C	181-190 °C 83-88 °C

T_g conditioned

Sample preparation:

Conditioned at 40 °C (104°F) 90 % rel. humidity

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use. May, 2006

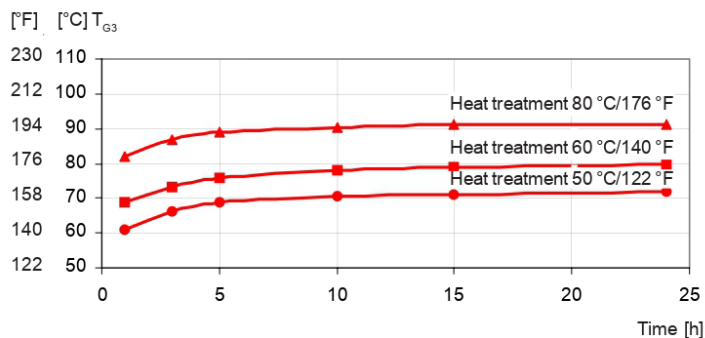
Am Ostkai 21/22
70327 Stuttgart
Germany
Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
www.hexionchem.com

March, 2010

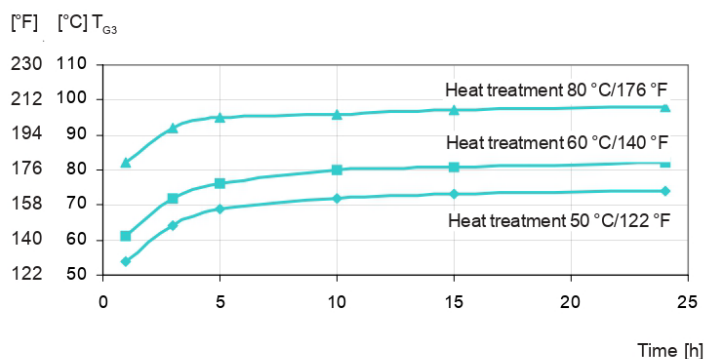
EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285

Laminating resin LR 285 Hardener LH 285

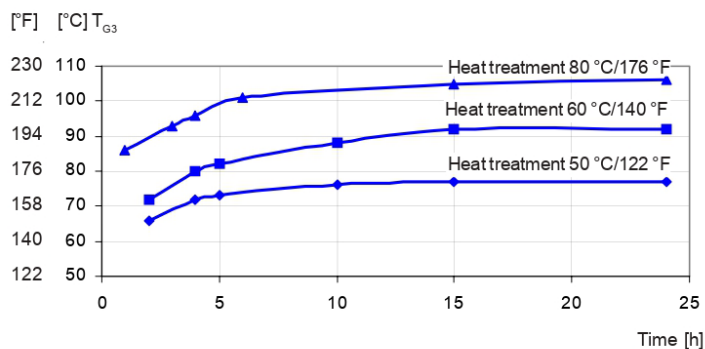
Development of T_g



Laminating resin LR 285 Hardener LH 286



Laminating resin LR 285 Hardener LH 287



Sample preparation:

Initial curing before heat treatment 24 h at room temperature

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.

Am Ostkai 21/22
70327 Stuttgart
Germany
Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
www.hexionchem.com

March, 2010

May, 2006

EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285

Mechanical data of neat resin		
Density	[g/cm ³]	1,18 - 1,20
Flexural strength	[N/mm ²]	110 - 120
Modulus of elasticity	[kN/mm ²]	3,0 - 3,3
Tensile strength	[N/mm ²]	70 - 80
Compressive strength	[N/mm ²]	120 - 140
Elongation of break	[%]	5,0 - 6,5
Impact strength	[KJ/m ²]	45 - 55
Water absorption at 23°C	24 h [%]	0,20 - 0,30
	7 d [%]	0,60 - 0,80
Fatigue strength under reversed bending stresses acc. to DLR Brunsw.	10 %	> 2 x 10 ⁴
	90 %	> 2 x 10 ⁵
Curing: 24 h at 23 °C (74 °F) + 15 h at 60 °C (140 °F)		
Typical data according to WL 5.3203 Parts 1 and 2 of the German Aviation Materials Manual.		

Mechanical data

Advice:

Mechanical data are typical for the combination of laminating resin LR 285 with hardener LH 287. Data can differ in other applications.

March, 2010

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.

Am Ostkai 21/22
 70327 Stuttgart
 Germany
 Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
 Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
 www.hexionchem.com

May, 2006

EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285
Data of reinforced resin
Static tests in standard climate
Mechanical data

Reinforced with		GRC Glass fibre	CRC Carbon fibre	SRC Aramide fibre
Flexural strength	[N/mm ²]	510 - 560	720 - 770	350 - 380
Tensile strength	[N/mm ²]	460 - 500	510 - 550	400 - 480
Compressive strength	[N/mm ²]	410 - 440	460 - 510	140 - 160
Interlaminar shear strength	[N/mm ²]	42 - 46	47 - 55	29 - 34
Modulus of elasticity	[kN/mm ²]	20 - 24	40 - 45	16 - 19
GRC samples: 16 layers of glass fabric, 8H satin, 296 g/m ² (8.5 oz/sq.yd.), 4 mm (0.16 in) thick CRC samples: 8 layers of carbon fabric, plain, 200 g/m ² (5.9 oz/sq.yd.) 2 mm (0.08 in) thick SRC samples: 15 layers of aramide fabric, 4H satin, 170 g/m ² (5.0 oz/sq.yd.), 4 mm (0.16 in) thick Fibre content of samples during processing/testing: 40 - 45 vol% Data calculated for fibre content of 43 vol% Typical data according to WL 5.3203 Parts 1 and 2 of the GERMAN AVIATION MATERIALS MANUAL				

Measuring conditions:

Curing: 24 h at 23 °C (74 °F)
 + 15 h at 80 °C (176 °F)

March, 2010

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications, and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.

Am Ostkai 21/22
 70327 Stuttgart
 Germany
 Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00
 Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011
 www.hexionchem.com

May, 2006