

Možnosti integrace senzorů do kompozitních laminátů

Bc. Tomáš Ošťádal

Diplomová práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Ošťádal**
Osobní číslo: **T19512**
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Studijní obor: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Možnosti integrace senzorů do kompozitních laminátů**

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku výroby kompozitu.
2. Možnosti integrace senzorů do kompozitní struktury, význam, výhody a limity.
3. Návrh experimentu pro výrobu kompozitních materiálů s integrovaným senzorem.
4. Návrh možností zabudování senzorů do kompozitní struktury a vyhodnocení vlivu integrace na mechanické vlastnosti.
5. Závěr a význam pro aplikační sféru.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.
- ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8.
- ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.
- EHRENSTEIN G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Praha, SCIENTIA v Praze, 351s, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
- LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konstrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
- STRONG, A., B.: Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Application, Society of Manufacturing Engineers, 1989.
- SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo –diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Aplikace senzorů pro kontrolu či monitorování kompozitních laminátů je velmi zajímavá, ovšem ne dostatečně probádaná část této průmyslové oblasti. Zvláště, jedná-li se o přímou integraci senzorů do materiálové struktury kompozitů. Předchozí studie zkoumaly změny klíčových vlastností kompozitních výrobků pomocí optických FBG senzorů. V jiných studiích bylo pozorováno vytvrzování kompozitní struktury během vakuové infuze pomocí Fresnel senzorů a mikrotermočlánků. Tato práce shrnuje studium, týkající se vytvrzování kompozitních laminátů, popisuje metody výroby kompozitů se zaměřením na technologii vakuové infuze. Další část této práce zpracovává analýzu k posouzení toho, v jaké míře ovlivňuje zabudovaný prvek (senzor) mechanické vlastnosti vlastní struktury kompozitu. Následně je zpracován experiment s dvěma typy fóliových tenzometrů. Jeden integrovaný do struktury a druhý aplikovaný na povrchu kompozitního zkušebního tělíska. Byly provedeny zkoušky tahem a vyhodnoceny výsledky.

Klíčová slova: vytvrzování kompozitů, senzor, integrace, tenzometr, vakuová infuze

ABSTRACT

Application of sensors for monitoring of composite laminates is a greatly interesting but insufficiently researched part of this industry. Especially when it comes to integrating a special sensors directly into the material structure of the composite. In previous studies have been examined changes in key characteristics of composites under their loading through FBG sensors. In another studies have been observed curing state of composite structure through Fresnel reflection sensor and micro-thermocouples during vacuum infusion process. This thesis summarizes the study of curing of composite laminates and describes production methods of them with a focus on Vacuum-Assisted Resin Infusion (VARI). The next part of this thesis processes analysis to assess how much the embedded element (sensor) affect the mechanical properties of the main structure of composite. An experiment with two types of strain gauges was prepared. One of them was integrated into the structure and the other was applied to the surface of the test specimen. Mechanical tensile tests were performed and the results were evaluated.

Keywords: composites curing, sensor, integration, strain gauge, vacuum infusion process

Tímto děkuji své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a trpělivost při řešení této práce. Děkuji také Ing. Petrovi Krejčímu, Ph.D. za pomoc při měření a zapojení tenzometrů.

Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za jejich podporu během celého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITNÍ STRUKTURY A JEJICH VYTVRZOVÁNÍ	11
1.1 TYPY MATRICE	11
1.2 TYPY PLNIV	12
1.3 VYTVRZOVÁNÍ KOMPOZITŮ S POLYMERNÍ MATRICÍ	12
1.3.1 Vytvrzování matric z reaktivních pryskyřic	13
1.4 ZVLÁŠTNÍ PARAMETRY KOMPOZITNÍCH STRUKTUR	16
2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ	21
2.1 RUČNÍ LAMINACE	21
2.2 VAKUOVÁ INFUZE	22
2.2.1 Příprava formy a vyztužující tkaniny	24
2.2.2 Příprava pomocných materiálů formy	24
2.2.3 Vakuování a proces infuze	27
2.3 STRÍKÁNÍ	28
2.4 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ	28
2.5 TAŽENÍ	28
2.6 NAVÍJENÍ	29
2.7 LISOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	29
3 APLIKACE SENZORŮ V KOMPOZITNÍ STRUKTUŘE	30
3.1 SPECIFICKÁ KRITÉRIA PRO INTEGRACI SENZORŮ	30
3.2 MONITOROVÁNÍ TOKU PRYSKYŘICE V PRŮBĚHU INFUZE	31
3.3 SNÍMÁNÍ NAPĚTÍ, DEFORMACE A TEPLIT	35
3.3.1 Vláknové optické senzory	36
3.3.2 Dispergace kovových plniv v matrici	38
3.3.3 Tenzometrické odporové senzory	39
3.3.4 Návrh fixace senzoru mezi vrstvami kompozitu	44
II PRAKTICKÁ ČÁST	48
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	49
5 OVĚŘENÍ STRUKTURÁLNÍ INTEGRITY KOMPOZITU	50
5.1 NÁVRH EXPERIMENTU S PODÉLNÝM INTEGROVANÝM DRÁTEM	50
5.1.1 Technologické materiály pro experiment	50
5.1.2 Pomocné materiály a zařízení pro vakuovou infuzi	52
5.1.3 Výroba kompozitu pro zkušební tělíska s podélným drátem	57
5.2 NÁVRH EXPERIMENTU S INTEGROVANÝM INSERTEM	62
5.2.1 Technologické materiály pro experiment	62

5.2.2	Výroba kompozitu pro zkušební tělíska s integrovaným insertem	64
5.3	STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍ STRUKTURY	66
5.3.1	Vyhodnocení změn integrity kompozitní struktury s podélným drátem	66
5.3.2	Vyhodnocení změn integrity kompozitní struktury s insertem	71
6	INTEGRACE SENZORU DO STRUKTURY A OVĚŘENÍ JEHO FUNKČNOSTI.....	77
6.1	NÁVRH EXPERIMENTU S INTEGROVANÝM SENZOREM.....	77
6.1.1	Integrovaný fóliový tenzometr LI66.....	78
6.1.2	Výroba kompozitu pro zkušební tělíska s tenzometrem	79
6.1.3	Instalace vnějšího tenzometru LY21 a průběh experimentu.....	81
6.2	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI TENZOMETRU A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	84
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	92
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	94
	SEZNAM TABULEK	98
	SEZNAM PŘÍLOH	99

ÚVOD

Pro aplikace v leteckém, automobilovém, námořním i kosmickém průmyslu se stále častěji nahrazují konvenční materiály kriticky namáhaných součástí polymerními kompozitními lamináty. Tento trend častějšího využívání kompozitů lze přičíst jejich výhodnému poměru požadované pevnosti k nízké hmotnosti, dlouhé životnosti a vcelku vysoké odolnosti proti korozi. Uplatnění senzorů, jakožto prostředků pro monitorování napětí, deformací nebo teplotních změn, lze využít při montáži na povrchu kritických úseků zatěžovaných kompozitních součástí obdobně, jako u výrobků z konvenčních ocelových materiálů.

U kompozitů je ovšem možné s výhodami využít jejich jedinečné skladby vrstvených vyztužujících tkanin a integrovat senzory přímo do jejich struktury. Stávají se tak jejich trvalou součástí a tyto senzory poté mohou monitorovat *in situ* a v reálném čase kritické vlastnosti výrobků, kontrolovat překročení mezních stavů jejich konstrukce a tím zamezit jejich případné porušení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ STRUKTURY A JEJICH VYTVRZOVÁNÍ

Kompozitní materiály (z lat. composita = složený) jsou tvořeny ze dvou a více složek, ze kterých je alespoň jedna označena jako matrice, která je kontinuální, spojitá a prakticky drží kompozit pohromadě. Druhou složkou je plnivo, které by mělo být v matrici dostatečně a rovnoměrně dispergováno. Právě spojení těchto dvou základních složek, které mají samostatně zcela odlišné původní vlastnosti, vytvoří jednotnou strukturu, která je schopna plnit požadavky, které se od kompozitů, jako konstrukčních materiálů očekávají. I přesto, že pro okolí takto kombinované materiálové složky působí v součinnosti, stále si zachovávají svoji vlastní identitu. Mezi složkami se tak nachází rozhraní. [1]

Jako hybridní kompozity se označují takové materiály, které jsou složené ze třech a více složek. Tento výsledný materiál může obsahovat hybridní matrici, tvořenou dvěma typy polymerů nebo hybridní plnivo, vytvořené např. ze dvou materiálů vyztužujících tkanin. Další přísady, používané při přípravě kompozitních struktur mohou být retardéry hoření, stabilizátory nebo nukleační činidla, které zlepšují fyzikální nebo zpracovatelské vlastnosti. [1; 2]

1.1 Typy matrice

Typy matric, které ve velké míře ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu mohou být nejen polymerní, ale také kovové, keramické a uhlíkové. Nejrozšířenější polymerní kompozitní materiály se vyznačují jednoduchostí výroby a zároveň i jejich recyklací, která bývá u všech druhů kompozitů velmi složitým procesem. Kromě toho vynikají oproti kovovým a keramickým kompozitům nízkou hustotou, vysokou specifickou pevností nebo např. odolností proti korozi. [1]

Mezi používané polymerní materiály matric se řadí běžné typy termoplastů a reaktoplastů i konstrukční polymery s vysokou tepelnou odolností, dále elastomery a biopolymery. Z důvodu již zmiňované problematické recyklovatelnosti kompozitů se ve výrobě zvyšuje podíl použitých biodegradovatelných polymerů. Z hlediska lepšího využití v praxi mají dominantní postavení na trhu kompozitní výrobky s reaktoplastovou matricí, zejména z epoxidové nebo vinylesterové pryskyřice. Jako termoplastové matrice jsou nejčastěji využívány polyolefiny, polyamidy nebo polyvinylchloridy. [1]

Při pohledu na jiné požadované klíčové vlastnosti, jako je odolnost vůči vysokým teplotám, vynikají kompozity s keramickou a kovovou matricí. Vysokou pevností,

zachovanou při extrémně vysokých teplotách se vyznačují zase materiály s obsahem uhlíkových vláken. Kompozity s kovovou maticí nemění své mechanické vlastnosti přibližně do 500 °C. Keramické materiály poté asi do 1000 °C. Tepelná odolnost polymerních kompozitů, které tvoří matrice z běžných komoditních plastů, je cca do 200 °C. [1]

1.2 Typy plniv

Jako plniva kompozitních výrobků se používá organických i anorganických materiálů. Mezi organická plniva patří uhlík ve formě vláken, nanovláken a nanotubic. Dále pak celulózová vlákna, dřevěné piliny a dřevní moučka či bavlna nebo sisal. Dále se využívají, zejména ve formě vláken, aromatické polyamidy, polyestery nebo vysoce pevná polyetylenová vlákna. Mezi anorganická plniva můžeme zařadit některé oxidy. Oxid hořečnatý, oxid hlinitý, ale zejména oxid křemičitý a z něj vyráběná a velmi hojně používaná vyztužující skelná vlákna a skelné tkaniny. Dále se jako plniva kompozitů používají sloučeniny jako např. uhličitan vápenatý, síran vápenatý, hydroxid hlinitý nebo hydroxid hořečnatý. Jako kovová plniva se využívá boru, oceli a různé feromagnetické materiály ve formě prášku. [1]

Důležitým faktorem pro změny vlastností kompozitů má rovněž i tvar plniva, které se rozdělují na částicové a vláknové. Kompozitní materiály na bázi částicových plniv se v minulosti začali využívat obzvláště z ekonomického hlediska, kdy se "dražší" polymerní matrice plnila "levnějšími" částicovými plnivými. Možnosti snížení ceny a spotřeby polymeru byla však na úkor zhoršení některých mechanických vlastností. Zlepšení vlastností výsledné kompozitní struktury s vláknovými plnivými, zde označovanými jako výztuže, závisí na mnoha faktorech. Mezi ty nejvýznamnější patří fyzikální vlastnosti vláken a matrice, množství neboli obsah samotných vláken ve struktuře, orientace a délka vláken a v neposlední řadě technologie výroby kompozitu. [1; 2]

1.3 Vytvrzování kompozitů s polymerní maticí

U kompozitů s polymerní maticí, konkrétně maticí na bázi termoplastů a reaktoplastů, je několik důležitých charakteristických vlastností a parametrů, které je nutné sledovat a které ovlivňují jak samotný zpracovatelský proces, tak i výsledné vlastnosti kompozitní struktury. [3]

V případě termoplastických matric je nutné materiál zpracovávat ve formě taveniny, kdy má i přes vysokou zpracovatelskou teplotu, viskozitu až tisícinásobně vyšší, než matrice z reaktoplastů. Tyto materiály, běžněji označované jako plněné termoplasty, se při jejich zpracování vytvrzují pouze ztuhnutím matrice - zchladnutím na okolní či požadovanou teplotu. Neprobíhá v nich tedy chemický proces. Rovněž je u kompozitů s termoplastickou matricí větší problém s prosycením vláken než u reaktoplastů. [3]

1.3.1 Vytvrzování matric z reaktivních pryskyřic

Epoxidové, nenasycené polyesterové, vinylesterové nebo fenolické pryskyřice patří do skupiny reaktivních pryskyřic, které jsou známé také jako licí, prosycovací nebo laminační. Tyto látky tvoří skupinu termosetů, která se v dnešní době nejčastěji využívá jako matrice u velkého množství kompozitních aplikací. Díky jejich nižší viskozitě oproti tavenině termoplastů, dobré zatékavosti a celkově jejich lepším zpracovatelským vlastnostem jsou tyto pryskyřice vhodnými materiály pro matrice kompozitních struktur, vyrobených metodou vakuové infuze a dalšími technologiemi. [3]

U reaktivních pryskyřic, které jsou při pokojové teplotě v kapalném stavu, začíná chemický proces vytvrzování po přimísení tvrdidla (též tužidla, síťovacího činidla), případně urychlovače. [3; 4]

Nenasycené polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyestery se vyrábějí kondenzační reakcí organických kyselin (anhydrid kyseliny maleinové a ftalové) s ethylenem nebo propylenglykolem za vzniku esterů. Typ a podíl kyselin používaných při výrobě polyesteru ovlivňuje výslednou reaktivitu pryskyřice. Kyseliny se dělí podle počtu vazeb. S jednoduchými vazbami se označují jako nasycené, kyseliny obsahující dvojné vazby se označují jako nenasycené. Se zvětšujícím se podílem nenasycených kyselin roste potenciační hodnota pevnosti a teplota skelného přechodu T_g pryskyřice. [4]

V případě nenasycené polyesterové pryskyřice je vytvrzování zahájeno přimícháním katalyzátoru polymerace (iniciátorem). Těmito látkami jsou ve valné většině organické peroxidy, které aktivují právě výše zmíněné dvojné vazby nenasycené kyseliny. Při reakci se styrenovými můstky je poté tvořena prostorová síť. Peroxidy se za zvýšené teploty rozkládají na radikály. Teplota, při které se radikály tvoří, záleží na tepelné stabilitě použitého peroxidu. [4]

Na trhu jsou organické peroxidy, které se rozkládají při různých teplotách. Od peroxidů s rozkladem při teplotě okolí až po ty, které se rozkládají nad 150 °C. První zmiňovaná skupina peroxidů je nestabilní a musí být přepravována a skladována v chladných podmínkách, což ztěžuje použitelnost.

Peroxidy, které mají teplotní interval rozkladu mezi 50 °C a 150 °C, poskytují užitečnou kombinaci stability a rychlého rozkladu, a tudíž i rychlého vytvrzování. [4]

Při vytvrzování za studena, resp. při teplotách pod 50 °C je však vyžadováno přidání redukčních činidel, která urychlují rozklad organických peroxidů a označují se jako urychlovače. Úkolem urychlovače je snížit aktivační energii samotného iniciátoru, aby proces vytvrzování při nižších teplotách mohl vůbec začít. Urychlovače jsou přizpůsobeny konkrétním organickým peroxidům. Jako příklad je možné uvést terciární aromatické aminy, které se používají s benzoylperoxy a kobaltové soli, používané s ketonperoxydem. [4]

Epoxidové pryskyřice

Standardní epoxidové systémy jsou produkty alkalické stupňovité polymerace, konkrétně polykondenzace epichlorhydrinu a bisfenolu A, tvořící DGEBA (diglycidylether bisfenolu A). Běžně se prodávají jako samostatná složka, do které musí být pro zahájení vytvrzovacího procesu též přidáno tvrdidlo neboli síťovací činidlo. K dispozici je široká škála tvrdidel, které propůjčují pryskyřici různé jak zpracovatelské, tak výsledné vlastnosti. Existují tři hlavní chemické reakce, resp. typy tvrdidel, které lze k vytvrzení epoxidů použít:

- Amino/epoxidová reakce
- Anhydrido/epoxidová reakce
- Epoxidová homopolymerace katalyzovaná Lewis kyselinou

Amino/epoxidová reakce je velmi flexibilní, což umožňuje upravit a vytvrdit pryskyřici pro širokou škálu vlastností. V závislosti na konkrétním typu aminu lze pryskyřici vytvrzovat v teplotním rozsahu od 20 °C do 200 °C s dobou zpracovatelnosti až do 8 hodin. Aminová (alifatická nebo aromatická) tvrdidla jsou k dispozici v kapalné i pevné formě a výběr je dán nejen zvoleným plánem postupu vytvrzování a fyzikálními vlastnostmi, ale také obtížností, s jakou lze tvrdidlo udržovat v disperzi. Vlastní vytvrzovací - síťovací chování probíhá díky diaminové reakci s koncovými epoxidovými

skupinami. To má za následek snížení pohybu molekul a s tím spojený nárůst viskozity, dokud se systém při reakční teplotě nestane sklovitým. [4]

Anhydridová reakce je složitější a používá se výhradně pro vytvrzování při zvýšené teplotě. Při pokojové teplotě tak poskytuje extrémně dlouhou dobu zpracovatelnosti, kterou je nutné regulovat přidáním urychlovače, jako je např. benzyldimethylamin. Anhydridové tvrdidlo je hygroskopické a nadměrné vystavení vzdušné vlhkosti může mít vážný dopad na kvalitu vytvrzeného kompozitu. [4]

Reakce pomocí Lewisovy kyseliny, nejběžněji se jedná o typ tvrdidla, založený na fluoridu boritém, nabízí dlouhou dobu zpracovatelnosti při zvýšené teplotě. Umožňuje také dosáhnout dlouhé doby skladovatelnosti s minimální degradací. [4]

Výběr pryskyřice a tvrdidla závisí na zvoleném procesu výroby kompozitu, aplikace a s tím souvisejících požadovaných vlastnostech. S některými tvrdidly se manipuluje relativně obtížně, jiné mohou představovat při nedůsledném zacházení zdravotní riziko. Podrobnosti o formulacích pro specifické použití spolu s údaji o bezpečné manipulaci lze pokaždé získat od dodavatelů. Zároveň i např. nedodržení přesně daného poměru epoxidové pryskyřice a tvrdidla by znamenalo podstatné zhoršení výsledných vlastností vytvrzené matrice. [3; 4]

Epoxidy vynikají oproti běžným nenasyceným polyesterům především vyšší pevností a lepší lomovou houževnatostí. Mají obecně při vytvrzování asi 3% objemového smrštění, ve srovnání s 8 % u polyesterů a s tím související i nižší reziduální napětí. [4]

Obecně stojí epoxidové pryskyřice asi čtyřikrát tolik než polyesterové pryskyřice pro všeobecné použití a asi dvakrát tolik co pryskyřice vinylesterové. [4]

Vytvrzování kompozitů s matricemi z reaktivních pryskyřic tedy může probíhat za studena nebo za zvýšených teplot ve speciálních pecích či autoklávech. Ačkoliv nyní existují některé rychle reagující systémy, většině epoxidových pryskyřic trvá vytvrzení podstatně déle, než polyesterovým. U epoxidových pryskyřic vytvrzovaných za studena se počítá s časem úplného vytvrzení do několika hodin. Za působení tepla může ovšem systém reagovat a vytvrdit v řádech minut. Pro epoxidové pryskyřice, nejčastěji používané u technologie vakuové infuze probíhá vytvrzování při běžné teplotě okolí. [3; 4]

Vinylesterové pryskyřice

Polymerové matrice na bázi vinylesterové pryskyřice se podobají jak polyesterům, tak epoxidům. Jedná se obvykle o styrenem zředěné kapalné termosety, iniciované volnými radikály. Vyrábí se reakcí epoxidových pryskyřic s kyselinami, zakončenými vinylem a následným přidáním reaktivního monomeru, jako je styren. Hlavní řetězec molekulové struktury tvoří bisfenol A s reaktivními vinylovými skupinami na koncích. Vzhledem k omezenému zesíťování těchto reaktivních skupin je vinylester ze své podstaty houževnatý, což se připisuje elastickým změnám řetězce při mechanickém nebo tepelném působení. Chemická struktura této pryskyřice činí jeho kompozity odolné proti korozi. Také obecně vyniká lepšími mechanickými vlastnostmi a tepelnou odolností než nenasyčená polyesterová pryskyřice. Kromě toho poskytují hydroxylové skupiny, přítomné v molekule vinylesteru dobrou vazbu a adhezi k povrchu skleněných vláken. [4]

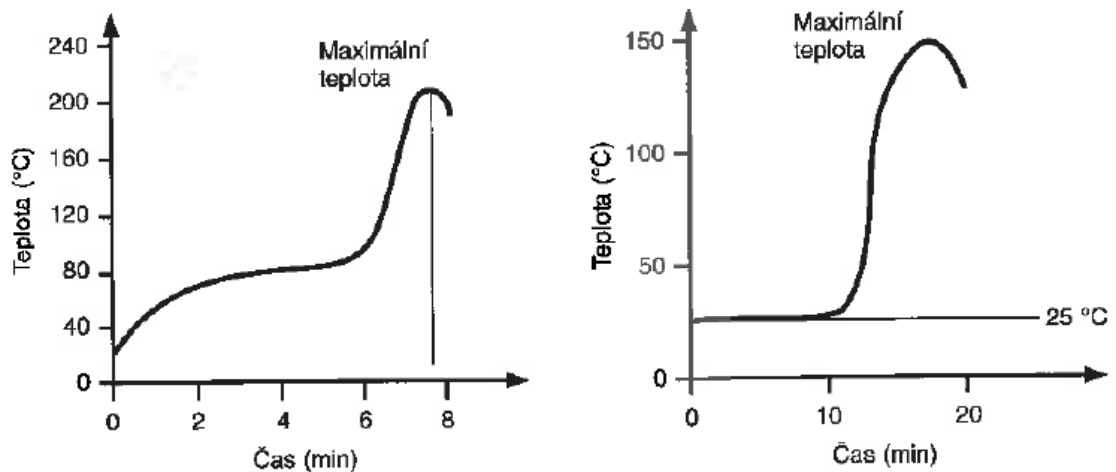
Vinylesterové pryskyřice lze zpracovávat velmi podobným způsobem jako polyesterové, a to díky přítomnosti styrenového monomeru. Zpracovatelské teploty a dobu gelace lze tak upravit vhodným výběrem iniciačního systému, zahrnujícího řadu vytvrzujících organických peroxidů a urychlovačů. [4]

1.4 Zvláštní parametry kompozitních struktur

Pochopení principů fungování jednotlivých základních kroků vytvrzování pryskyřic je důležité pro bezpečnou a efektivní výrobu kvalitních kompozitních materiálů.

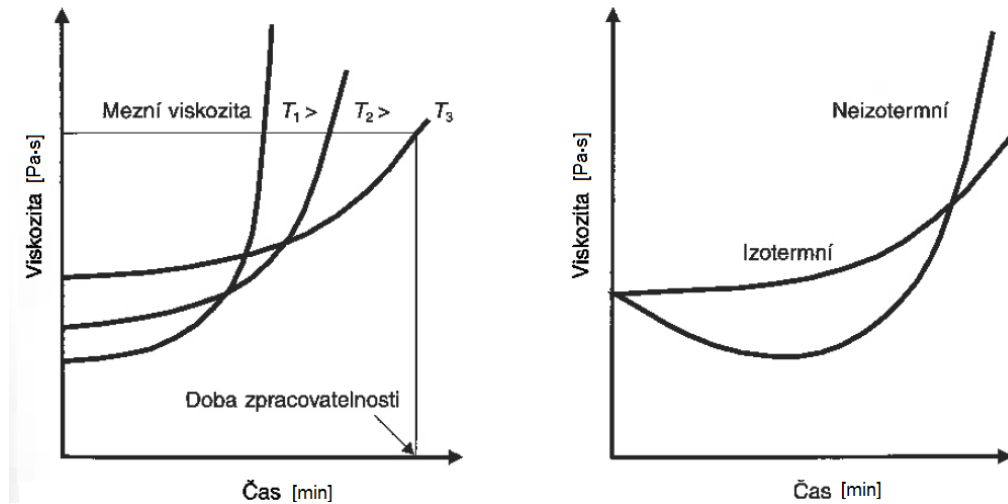
Čas, potřebný pro přeměnu směsi pryskyřice a potřebných přísad z kapalného stavu do pevného, se nazývá doba vytvrzení. Smícháním pryskyřice a vytvrzovacích činidel začíná doba zpracovatelnosti. Při vytvrzování pryskyřice prochází želatinací (gelací). Tento stav počíná bodem gelace, kdy vzniká při vytvrzování první molekula s nekonečně vysokou molární hmotností. Od tohoto bodu již pryskyřice není rozpustná v rozpouštědlech, končí doba zpracovatelnosti a se směsí se nedá nadále manipulovat jako s tekutou hmotou. [5]

Jedním z faktorů, ovlivňujících zpracovatelský proces výroby kompozitních struktur je nárůst viskozity pryskyřice při vytvrzování. Tento nárůst je v případě ideálního izotermního vytvrzování exponenciální. Chemická síťovací reakce, tedy tvorba vazeb mezi molekulami je ovšem děj exotermní. Experimentálně se tento nárůst teploty při vytvrzování určuje pomocí termočlánku ve zkumavce se zkoumanou pryskyřicí. Počátečním bodem je moment, kdy je smíchána pryskyřice s tvrdidly a urychlovači. Průběh síťovacího procesu zobrazuje tzv. křivka vytvrzovací charakteristiky. [5]



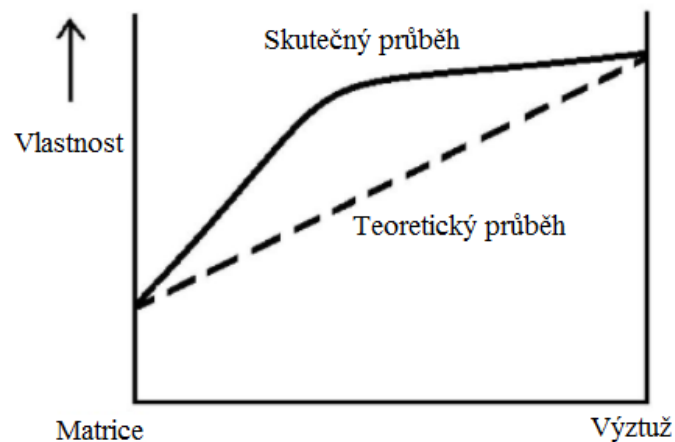
Obr. 1 Křivky vytvrzovací charakteristiky nenasyčené polyesterové pryskyřice za studena (vlevo); za tepla (vpravo), dle [3]

V případě, kdy není zajištěno dokonalé odvádění vzniklého tepla, dojde během vytvrzování nejprve k mírnému poklesu viskozity. Poté je tento jev překonán síťovací reakcí a dochází opět k nárůstu viskozity. V některých případech silnostěnných vyráběných profilů, kdy není exotermní reakce řádně kontrolována a regulována, může mít prudký nárůst teploty uvnitř kompozitu za následek změnu barvy pryskyřice. V krajních případech může dojít ke vzniku kouře či dokonce k zahoření materiálu. V polyesterových pryskyřicích se zvýšením obsahu styrenu sníží viskozita, což usnadní zpracovatelnost, ale také se zvýší reakční teplo a s ním spojené komplikace. Pokud se však stejné množství pryskyřice rozprostře do tenké vrstvy, exotermické teplo se rozptýlí a doba vytvrzení kompozitní struktury je poté určována teplotou okolí. Čím je vrstva vytvrzující pryskyřice tenčí, tím méně je tímto vzniklým teplem ovlivněna. [5]



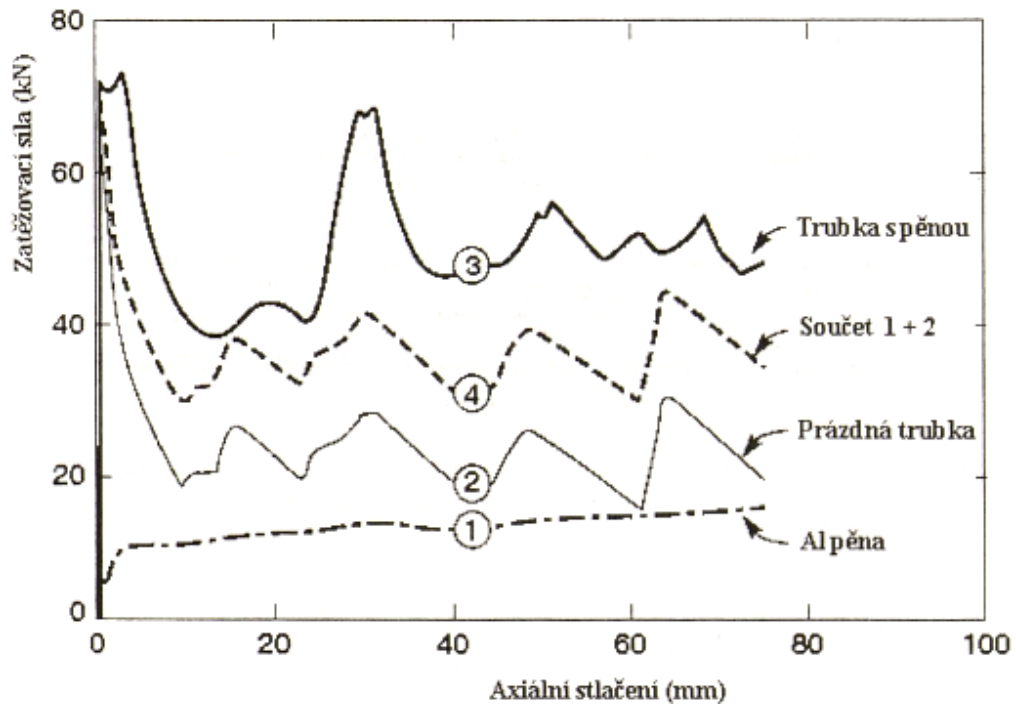
Obr. 2 Průběh viskozity epoxidové pryskyřice pro různé teploty za izotermních podmínek (vlevo); pro vybranou teplotu se srovnáním izotermního a neizotermního průběhu (vpravo), dle [3].

Dalším jevem, kterého je možné si povšimnout u velké většiny kompozitů s matricí, plněnou za hlavním účelem zlepšení pozitivních klíčových vlastností, je synergický efekt. Při synergickém efektu se kombinace těchto vlastností jeví ve výsledku tak, že přesahuje prostý součet jednotlivých použitých složek. Na Obr. 3 je zjednodušená grafická interpretace synergického efektu obecného kompozitního materiálu. Celkovou snahou je vytvářet kompozitní struktury s co nejvýhodnějším využitím tohoto efektu, a to právě těch nejžádanějších vlastností, které je možné při výrobě všemi známými dostupnými metodami ovlivnit. [6]



Obr. 3 Zjednodušená grafické interpretace synergického efektu v kompozitní struktuře, dle [6]

Konkrétnější případ z praxe, kde je porovnávána zatěžující síla se závislostí na axiálním stlačením nejprve samostatné hliníkové pěny, hliníkové trubky, jejich teoretického poměrného součtu a skutečného výsledku kompozitní struktury trubky plněné pěnou, ukazuje výhodného využití synergického efektu Obr. 4. [6]



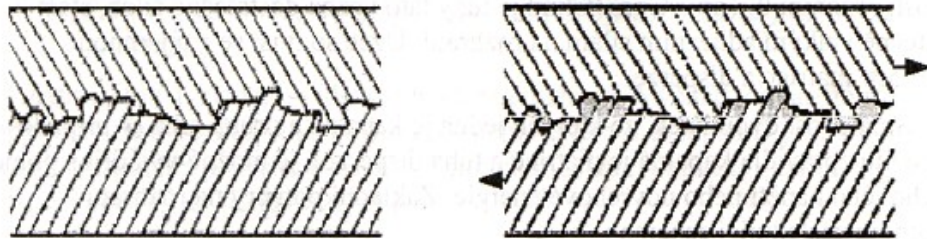
Obr. 4 Grafická interpretace závislosti zatěžující síly na axiálním stlačením jednotlivých příkladů složek kompozitní struktury hliníkové pěny a trubky, dle [6]

Faktor, který je zásadní pro zhotovení výrobku z kompozitního materiálu požadovaných kvalit, je adheze. Z celého kompozitu tvoří matrice komplexní spojitou fázi. Plnivo nebo výztuž je dispergovaná v objemu jako nespojitá fáze a její vzájemné působení a splynutí s matricí se odvíjí od kvality a velikosti adhezních sil na rozhraní těchto dvou fází. Existují tři možnosti vzniku adhezních sil:

- mechanické zaklínění
- fyzikální vliv
- chemický a fyzikální vliv

U charakteristiky vzniku adhezních sil mechanickým zaklíněním je nutné mít na paměti, že plocha na rozhraní fází matrice a výztuže není nikdy ideálně rovinná. V každém případě obsahují obě plochy výčnělky a prohlubně. Vliv mechanického zaklínění je tím lepší, čím

větší tyto povrchové výčnělky na rozhraní jsou a čím lepší je vzájemný styk obou ploch. Z důvodu různých tuhostí obou materiálů mohou při jejich vzájemném pohybu a vzniklých třecích silách tento mechanický účinek ovlivnit také značné tlakové síly, vzniklé na hranicích mezi maticí a výztuží. Další okolností, která zásadně ovlivňuje působení mechanického zaklínění je přítomnost mikropórů, jak na povrchu vláken či částic výztuže, tak také uvnitř vytvrzené matrice. [6]



Obr. 5 Rozhraní matrice a výztuže a jejich vzájemné zaklínění bez zatížení (vlevo); se zatížením (vpravo), dle [6]

Fyzikální vliv adheze u kompozitů souvisí s Van der Waalsovou vazbou mezi molekulami matrice a výztuže. Ta je úzce spojena se smáčivostí jednotlivých látek, vycházející z povrchového napětí. Jelikož mají vyztužující vlákna v kompozitech, především uhlíková a skleněná, obecně nízkou adhezi k matrici, je nutné provést předúpravu vlákna přidáním apretury (lubrikace vlákna). Tato apretura obsahuje vazebný prostředek, který vytvoří vrstvu mezi povrchem vlákna a maticí, pojmenovanou jako mezní vrstva nebo mezifáze. [6]

Vzniknou-li mezi molekulami matrice a vláken chemické vazby, dojde k vyvolání vazebné adhezní síly s daleko větším účinkem. Tento vznik je možný za určitých podmínek, a to, pokud mezi těmito látkami probíhá vzájemná difuze. Tímto vytvořená difuzní vrstva vyvolá silnou adhezi. Dalším případem může být společná chemická reakce matrice a plniva, při které se vytvoří spojující chemická sloučenina. Tyto chemické i difuzní mezivrstvy ale mohou přinášet i negativní jevy, kdy může docházet k porušení kompozitní struktury v důsledku křehkosti těchto mezivrstev. [6]

2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ

Vzhledem k povaze jednotlivých použitých složek vláknových kompozitů a zejména vzájemnému synergickému působení při jejich spojení jsou výsledné vlastnosti polotovaru nebo již hotového výrobku definovány až při samotném procesu výroby. Proto je volba vhodné výrobní technologie velmi podstatná, jak z důvodu požadovaných kvalit výrobku, tak také z ekonomického hlediska. [7]

Důležitými faktory, kterými je nutné se při volbě technologie řídit, jsou zejména:

- počet vyráběných kusů
- rozměry a složitost konstrukce
- jakost povrchu
- požadavky na mechanické vlastnosti v souvislosti s hmotností výrobku
- ekonomické náklady na výrobu

Ve většině případů je nutnost rozhodnout o určitém kompromisním řešení při návrhu výrobního procesu tak, aby bylo vyhověno nejdůležitějším požadavkům zákazníka. [7]

Při rozhodování v závislosti na požadovaném počtu výrobků je tento faktor jedním z nejdůležitějších. Při velkých sériích nejspíše nebude vhodné volit technologii ruční laminace, a naopak při výrobě malého počtu kusů nebude příliš ekonomické použití nákladných strojních technologií. [7]

V této kapitole budou popsány metody výroby kompozitů nejvíce používané v průmyslové praxi se zaměřením na ruční laminaci a především na technologii vakuové infuze.

2.1 Ruční laminace

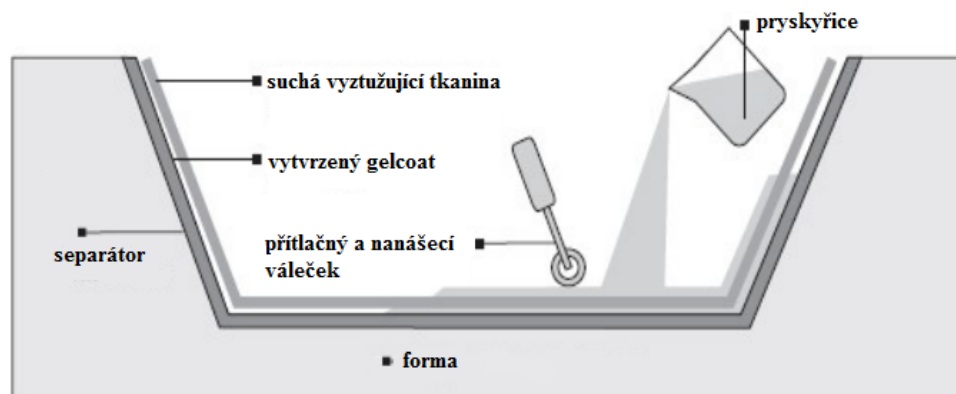
Jedná se o nejstarší a nejjednodušší metodu výroby kompozitů, která patří mezi nejpoužívanější při výrobě dílců s jednoduchou konstrukcí v malých sériích. Řadí se mezi tzv. otevřené technologie. Forma výrobku je nejprve opatřena separačním prostředkem na bázi tekutého PVA či kombinací se separačním voskem. [7; 8]

Dále je možné na formu aplikovat gelcoat. Ten se používá u požadavků na vytvoření vysoce kvalitní povrchové úpravy s estetickým vzhledem a pro ochranu povrchu výrobku proti povětrnostním vlivům, některým chemickým agresivním látkám nebo UV záření. Jedná se o modifikované nenasyčené polyesterové nebo epoxidové pryskyřice, nanášené na

formu v tekutém stavu. Kromě pigmentu, pro dosažení požadovaného povrchového zbarvení, může gelcoat v případě potřeby obsahovat také tixotropní přísady, které upravují přilnavost a další vlastnosti, potřebné pro bezproblémové nanášení a vytvrzování na svislých částech tvarové formy. U těchto materiálů je vyžadována velká trvanlivost a odolnost, aby byl u výrobků zachován požadovaný estetický vzhled po působení mechanického a tepelného namáhání, ke kterému dochází při vytvrzování kompozitů i při jejich odformování. [7; 8]

Na předpřipravenou formu jsou pokládány jednotlivé vrstvy tkaniny, na které je postupně válečkem nebo štětcem nanášena pryskyřice. Nakonec jsou vrstvy tkaniny dodatečně prosyceny působením rýhovaného válečku, kterým se také vytlačí nadbytečná pryskyřice a vzduchové kapsy. [7]

Kompozitní struktura se většinou vytvrzuje za okolní teploty bez vnějšího působení tlaku. Pro zajištění rovnoměrnější tloušťky výrobku a dosažení menší pórovitosti je možné metodu ruční laminace modifikovat použitím následného dotlaku na nevytvrzený kompozit, zajištěného odsátím vzduchu pod vakuovou fólií. Při této metodě dojde k vytlačení a případnému odsátí nadbytečné pryskyřice a zkvalitnění struktury výsledného produktu. Tímto se z běžné otevřené metody ruční laminace stává metoda uzavřená, a tím nedochází k uvolňování škodlivých látek při vytvrzování pryskyřice do okolí. [7]



Obr. 6 Schéma metody ruční laminace; dle [7]

2.2 Vakuová infuze

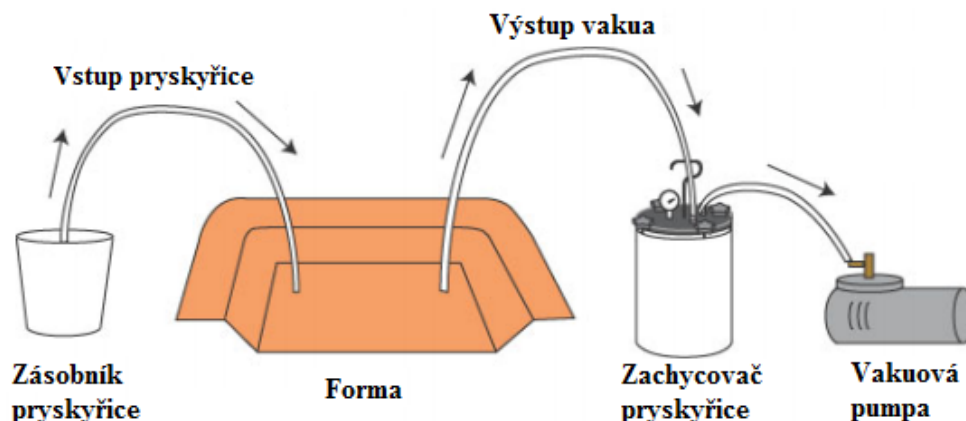
V oblasti výroby kompozitních struktur je infuze pryskyřice za pomoci vakua procesem, při kterém je evakuovaný prostor mezi částicovou či vláknovou výztuží vyplněn kapalnou pryskyřicí. Po vytvrzení a kompletním ztuhnutí matrice dojde k pevnému svázání materiálu do sjednocené kompozitní struktury. Výztuží může být jakýkoliv porézní materiál

kompatibilní s pryskyřicí. Proces infuze je efektivní způsob výroby vysoce kvalitních a pevných kompozitních dílů, ovšem v relativně malém vyráběném množství kusů na formu. Tato metoda je vhodná pro rozměrné dílce, které by byly obtížné nebo neúnosně nákladné vyrábět jakoukoliv jinou metodou. [9]

Mezi výhody patří např. snadná manipulace s výztužnými materiály za sucha. Proces se provádí v uzavřeném systému evakuovaného prostoru mezi formou a vakuovou fólií. Tím je sníženo nebezpečí vystavení pracovníků případným těkavým látkám reagující pryskyřice. S tím souvisí i nižší náklady na odvětrávání celého pracoviště, oproti např. procesům stříkání pryskyřice spolu s řezanými vlákny. Při vytvrzování pod pružnou fólií používá tato metoda minimální množství pryskyřice k vyplnění dutin suché výztuže, což vede také ke snížení nákladů na výrobu. [9; 10]

V současné fázi vývoje má ovšem vakuová infuze i některá omezení. Co se týče přípravy samotné technologie se jedná o relativně pomalý výrobní proces, u kterého se nedá uvažovat o aplikacích, vyžadujících vysokou rychlost velkosériové výroby, kde by bylo možné jiné výrobní řešení. V neposlední řadě se u velkých dílů musí počítat se značným objemem odpadu, a to z důvodu využití většího množství pomocných materiálů, které jsou použitelné pouze jednorázově. Jedná se zejména o použité vakuové fólie, trubice pro přívod pryskyřice nebo odtrhové a odsávací tkaniny. [9; 10]

Při přípravě experimentu metodou vakuové infuze je důležité porozumět některým obecným pojmům, specifickým materiálům a jednotlivým uspořádáním použitých komponentů. Je důležité mít na paměti, že každý jeden projekt, včetně jeho přípravy, je svým způsobem specifický.



Obr. 7 Zjednodušené schéma metody vakuové infuze; dle [11]

2.2.1 Příprava formy a vyztužující tkaniny

Příprava povrchu formy obsahuje obdobné kroky, jaké jsou popsány v kapitole ruční laminace. Naseparovaná forma může, ale nemusí být opatřena vrstvou gelcoatu. V každém případě by měl být povrch formy v takové kvalitě, v jaké je očekáván povrch samotného výrobku z funkční, nebo spíše pohledové strany. [11]

Zvolený materiál výztuže, ať se jedná o tkaninu s uhlíkovými, skelnými nebo aramidovými vlákny, je nutné připravit a nastříhat na rozměry požadovaného výrobku. Jednotlivé vrstvy se pokládají na sebe pro docílení požadované tloušťky. Při práci s formami složitějšího tvaru se může stát, že na sobě budou jednotlivé vrstvy suché výztuže klouzat a manipulace s nimi bude obtížná. V takových případech je možné použít sprejové lepidlo, kterým lze lokálně zajistit dostatečnou přilnavost suché tkaniny. Při mírném použití nijak negativně neovlivňuje prosycení tkaniny pryskyřicí ani její následné vytvrzení. [11]

2.2.2 Příprava pomocných materiálů formy

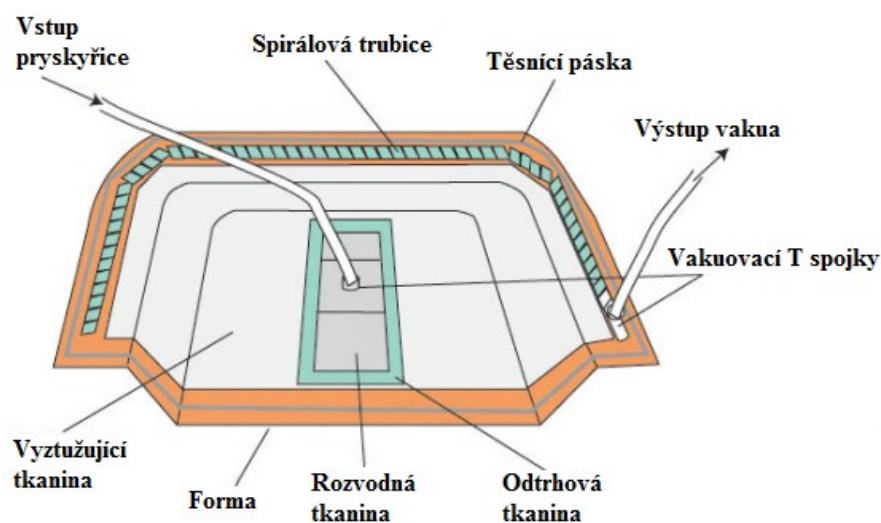
Na připravené vrstvy vyztužující tkaniny je další vrstvou odtrhová tkanina. Pro vakuovou infuzi, stejně tak i pro ostatní technologie výroby kompozitů, se vyrábí celá řada těchto tkanin. Prioritním úkolem bývá oddělení vrstev pomocných materiálů od vytvrzeného výrobku. Jedná se o pevné soudržné materiály, které se při odloupávání od výrobku sami neroztrhnou. Přebytečná pryskyřice může prosáknout touto tkaninou napovrch a po vytvrzení ji lze odstranit. Na výrobku zanechá strukturovaný povrch, který není ve většině případů třeba nijak dále opracovávat. [11]

Další vrstvou, nezbytnou pro správné prosycení tkanin je rozvodná síťka nebo tkanina. Ta se aplikuje s přibližně stejným rozměrem, jako je rozměr vyztužující tkaniny. U technologie vakuové infuze obvykle vstupuje pryskyřice, není-li proces modifikován jinak, do systému v jednom bodě. Před začátkem prosycování musí být tok pryskyřice usměrňován co nejefektivněji. Pryskyřice se bude vždy pohybovat cestou nejmenšího odporu. Vrstvy vyztužujících tkanin ale bohužel poskytují značný odpor proti toku skrz. Použití rozvodné sítěky s vysokou pórovitostí umožní dobré proudění nejprve samotného vzduchu při evakuaci. Poté je přes ni zajištěn rozvod pryskyřice nejprve po celé ploše předlisku. Až poté, působením podtlaku, dochází k postupnému prosycování všech jednotlivých tkanin. [11]

U dalších metod výroby kompozitu, kdy je použito vytvořené vakuum pro lisování vrstev předem nasycených tkanin, tedy bez použití infuze pryskyřice z vnějšku, se jako další

vrstva používá odsávací tkanina. Ta slouží k absorpci vytlačené pryskyřice ovšem v menším množství, než je tomu u infuze. Dále napomáhá rovnoměrnému rozložení tlaku na celý povrch kompozitu a také umožňuje odvedení plynů, uvolněných během vytvrzování.

V případě infuze pro odvod vzduchu, případné přebytečné pryskyřice a vytvoření podtlaku co nejefektivněji na celé ploše předlisku slouží spirálová trubice. Jedná se o plastovou stuhu, stočenou do podoby tvarovatelné trubice, do které může díky své konstrukci vzduch nebo pryskyřice vstoupit po celé její délce. U standardního uspořádání je přívod pryskyřice umístěn do středu systému, spirálové trubice by měly být obvykle umístěny kolem celého systému. Pro lepší usazení a zajištění polohy trubice bývá použita těsnící páska. [11]

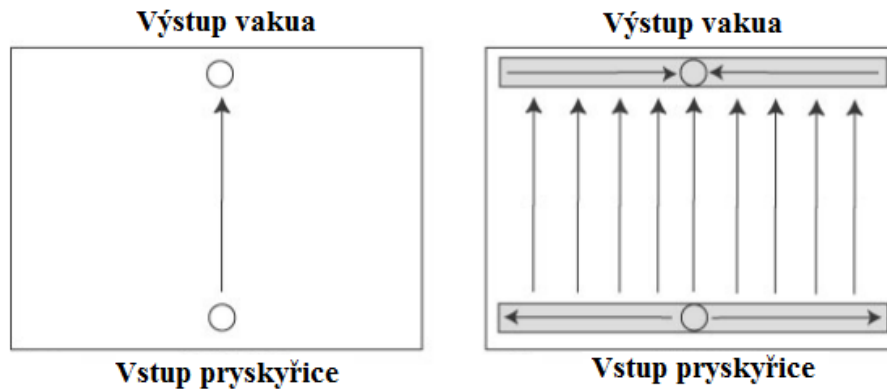


Obr. 8 Standardní rozložení vstupů a výstupů infuzního systému a pomocných materiálů; dle [11]

Je potřeba si uvědomit, že neexistuje jediný správný způsob, jak sestavit celý infuzní systém pro zdařilý výrobek. Při pochopení základních principů infuze skrze evakuovaný prostor vzniká několik způsobů, jak uspořádat sestavu pro efektivní průchod pryskyřice celým systémem. Při snaze vytvořit rovnoměrné čelo pryskyřice, která smáčí celý laminát, je nutné uvažovat tyto dvě vlastnosti toku:

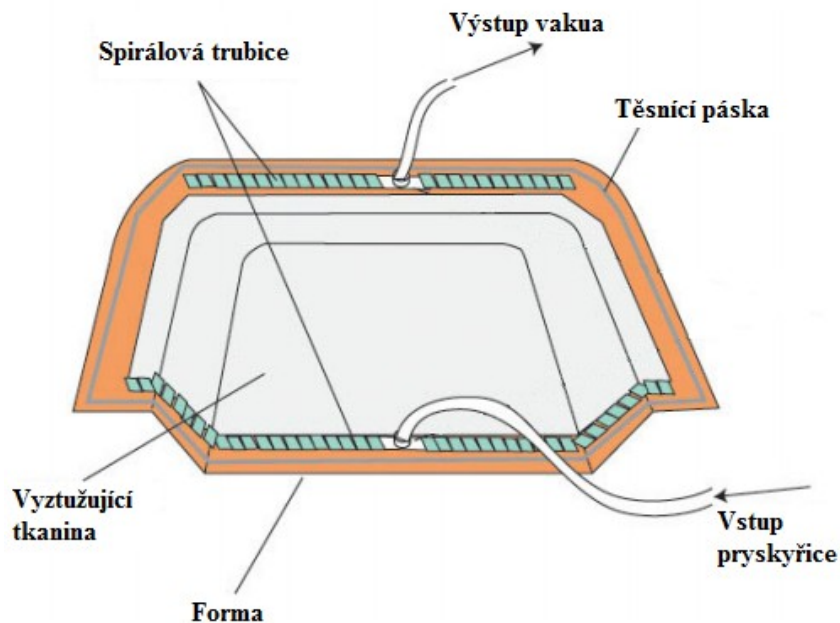
- Pryskyřice chce vyplnit prázdné prostory, vytvořené vakuem
- Pryskyřice putuje v celém systému cestou nejmenšího odporu

S využitím těchto dvou myšlenek je možné manipulovat s tokem napříč celým laminátem s pouhým jedním vstupem pryskyřice a jedním výstupem vakua. Spočívá to v prodloužení těchto přírodních a výstupních linek, aby se vytvořilo jednotné rovnoměrné čelo. [11]



Obr. 9 Modifikace toku pryskyřice; dle [11]

Na Obr. 9 (vlevo) jsou konce infuzního vedení bez přidání jakýchkoliv nástavců či prodloužení. Pryskyřice bude v tomto případě postupovat v zásadě z jednoho bodu do druhého a nebude zaručeno dostatečné a kvalitní prosycení všech vrstev tkaniny po celé ploše. Je možné, že zde zůstanou po vytvrzení suchá místa a kompozit bude nekvalitní. Na Obr. 9 (vpravo) jsou prodloužena vstupní i výstupní vedení. V tomto případě se pryskyřice nejprve rychle naplní do rozšířeného vedení pro přívod a poté vytvoří jednotné čelo. Tím budou rovnoměrně prosycovány vrstvy tkaniny po celé ploše, jak je naznačeno šipkami. [11]



Obr. 10 Schematické znázornění modifikace vstupů a výstupů infuzního systému; dle [11]

2.2.3 Vakuování a proces infuze

Jakmile jsou připraveny materiály na svém místě, přichází na řadu příprava pružné vakuovací fólie a vnějšího infuzního systému. Vakuovací fólie by měla být utěsněna pomocí těsnicí pásky a zároveň by měla mít větší rozměry než všechny pomocné materiály, aby těsně doléhala po celém povrchu i případně tvarově složitější formy. To je dosaženo vytvořením utěsněných záhybů na obvodu fólie. Dalším krokem je připojení hadic pro přívod pryskyřice i výstup vakua. Hadice, stejně tak jako spirálové trubice, jsou připojeny pomocí vakuovacích spojek ve tvaru T nebo obdobných speciálních spojovacích prvků či koncovek. Všechny spoje je nutné pečlivě utěsnit těsnicí páskou. [11]

Ve směru výstupu vakua je systém propojený hadicí nejprve k zachycovací pryskyřice. Jedná se o vzduchotěsnou nádobu, umístěnou mezi formou a vakuovou pumpou, určenou pro zachycení přebytečné pryskyřice. Ta by se mohla dostat působením podtlaku až k pumpě a tím ji zničit. [11]

Před zahájením samotné infuze je nutné zajistit těsnost a evakuovat prostor pod pružnou vakuovací fólií. Jelikož je vakuum nasáváno před zavedením přívodu k připravené pryskyřici, bude konec přívodní hadice působit jako dočasný "únik" a je potřeba jej také utěsnit. Po vytvoření podtlaku na požadovanou hodnotu, kontrolovanou na manometru pumpy, je možné zahájit infuzi uvolněním přívodní hadice a ponořením do připravené pryskyřice. Při špatné manipulaci s přívodem pryskyřice při infuzi a nasátím vzduchu může způsobit vnik bublin až do prostoru kompozitní struktury, čímž by se výrobek mohl znehodnotit. Jakmile je systém zcela nasycen a ze zásobníku již žádná pryskyřice neodchází, je infuze dokončena a je možné přívodní hadici uzavřít pomocnou svěrkou. Čerpadlo by ovšem mělo být v provozu, aby bylo zajištěno konstantního podtlaku, alespoň dokud nedojde ke zgelovatění pryskyřice, jinak by mohlo dojít k předčasném vniknutí vzduchu. [11]

Po úplném vytvrzení je možné odstranit vakuovou fólii, všechny trubice a spolu s opatrným odstraněním odtrhové tkaniny od výrobku i všechny ostatní pomocné vrstvy a materiály. Díky správnému prvotnímu použití separačních prostředků lze poté např. za pomoci klínku postupně vyjmout hotový výrobek z formy.

2.3 Stříkání

Jedná se o částečně strojní technologii, při které je dopravována iniciovaná pryskyřice pod tlakem do stříkací pistole. Současně je do pistole přiváděno vlákno, které je sekáno na požadovanou délku a spolu s matricí nanášeno na formu. Tato technologie je prováděna většinou ručně, lze ji ale i automatizovat. Touto technologií se vyrábějí ne příliš mechanicky namáhané objemné dílce, jako jsou vany nebo nádrže. Stříkání je rovněž otevřená technologie, u které jsou kladeny vysoké nároky na odvětrávaná pracoviště a osobní ochranné pomůcky. Hlavními důvody jsou blízký kontakt pracovníka s procesem sekání rovingu přímo v pistoli, při kterém se do prostředí uvolňují malé částice vláken, a také z důvodu primárního použití polyesterových pryskyřic, ze kterých se během procesu uvolňuje styren. [7; 12]

2.4 Vysokotlaké vstříkování

vysokotlaké vstříkování neboli RTM (z angl. Resin Transfer Molding) je velmi produktivní technologie, která je hojně využívána u výrobků ve velkých sériích. Základem je robustní forma, konstruovaná pro odolání vysokým vnitřním tlakům, do které je vkládána suchá vyztužující tkanina. Po uzavření vrchním dílem je do formy skrz vstříkovací otvor z vysokotlakého čerpadla přiváděno pojivo s iniciátorem. Pojivo je vstříkováno s vypočítaným objemem, ovšem kvůli možnému nedotečení či nedostatečnému prosycení je přiváděno až do doby, kdy začne vytékat z kontrolních otvorů. Vytvrzování probíhá díky exotermické reakci a systém je volen tak, aby došlo k dostatečnému vytvrzení zhruba do 20 minut. [7; 12]

Jako modifikaci RTM za účelem snížení nákladů je možné zmínit technologii LRTM neboli Lehké RTM. U této metody se pryskyřice s iniciátorem vstříkuje nižším tlakem, než u běžného RTM. Z tohoto důvodu zde vstupuje možnost použití méně pevné horní části formy, kde se namísto kovových materiálů používá kompozitu nebo pružné fólie. Kromě vstříkovacího tlaku se pro prosycení výztuže využívá aplikace vakua. Forma je méně robustní, levnější, ale kvůli nižším tlakům jsou vyráběny dílce s menší pevností. [7; 12]

2.5 Tažení

Tato metoda je založena na kontinuálním tažení svazků vyztužujících vláken nebo tkanin, které procházejí přes vodící prvky a organizují se do profilů přibližného požadovaného tvaru. Dále jsou pramence vedeny přes lázeň iniciované pryskyřice, ve které dochází k

jejich prosycení. Dalším procesem je ždímání přebytečné pryskyřice. Struktura svůj finální tvar dostane při průchodu do vytvrzovacích průvlaků neboli forem. Následně je vytvrzený profil odtahován, a nakonec dělen na požadované rozměry. Výhodou této technologie jsou velmi dobré vlastnosti vyráběných kompozitů, vysoká produktivita a vysoký stupeň automatizace. Nevýhodou jsou vysoké náklady na výrobní linku a složitost prvotního spuštění výrobního cyklu. [7; 12]

2.6 Navíjení

Navíjení je jednou z nejproduktivnějších technologií, využívanou pro výrobu dutých kompozitních dílců. Při ní se výztuž ve formě vlákněných pramenců impregnovaných pojivem navíjejí na rotující jádro. Touto metodou je možné dosažení velké tuhosti rotačních výrobků, jelikož není omezena tloušťka navíjené stěny. Kvalita vnitřního povrchu se odvíjí od kvality navíjecího trnu. Při výrobním procesu se vzájemně kombinuje rotační pohyb trnu s posuvným pohybem navíjecí hlavy. Mezi výhody této technologie patří velká produktivita s možností automatizace nebo výborné mechanické vlastnosti výrobku. Nevýhodami jsou vyšší náklady na navíjecí ústrojí. Díky rozebíratelným trnům složených konstrukcí je možné vyrábět, kromě válcovitých trubek i komplexnější tlakové nádoby. [7; 12]

2.7 Lisování v autoklávu

Výchozím materiálem jsou pro plné využití potenciálu autoklávu ve většině případů prepregy. Jedná se o předimpregnované tkaniny nejčastěji epoxidovou pryskyřicí, vyžadující vytvrzování za zvýšené teploty, přibližně od 120 do 200 °C. Skladba jednotlivých vrstev je obdobná, jako u lisování pomocí vakua. Vrstvy prepregu, pokládané ve formě pod pružnou fólií se umístí do vyhřátého autoklávu, kde je ze struktury nejprve evakuován vzduch, čímž se odstraní přebytečná pryskyřice a následně je na formu uvnitř autoklávu působen přetlak po dobu i několika hodin. Tato technologie se využívá pro nejvíce náročné výrobky velkých rozměrů, využívaných v leteckém, automobilovém nebo kosmickém průmyslu. [7; 12]

3 APLIKACE SENZORŮ V KOMPOZITNÍ STRUKTUŘE

Přesná znalost deformačních změn v materiálech, ve smyslu např. hledání meze únavy, je při praktickém využití u vláknových kompozitů stejně důležitá, jako u ostatních materiálů. S ohledem na záruční garanci výrobců je stále důležitější mít technologii pro snímání strukturních změn uvnitř výrobků specificky přizpůsobenou vlastnostem tohoto materiálu, která bude použita pro analýzu zatížení a monitorování komponentů během provozu. Speciální konstrukce komponentů vláknových kompozitů, kdy jsou na sobě ukládány jednotlivé vrstvy, umožňuje během výroby zabudování různých druhů senzorů. Motivace k integraci senzorů přímo do struktury kompozitů, nikoliv na povrch, se často liší a je specifická s ohledem na požadavky na výrobek a jeho konkrétní aplikaci. [13]

3.1 Specifická kritéria pro integraci senzorů

Upřednostnění integrace tenzometrů do struktury před jejich aplikací na povrch se např. doporučuje, je-li deformace výrobku v ohybu extrémní a povrchový senzor by se v tomto případě mohl poškodit. Správnou volbou integrační hloubky lze přizpůsobit míru deformace výrobku k úrovni deformace tenzometru, respektive jeho měřicího rozsahu. S přibližující se vzdáleností tenzometru k neutrální ose např. zatěžovaného nosníku se snižuje také mechanické napětí přenášené na elektrickou měřicí mřížku tenzometru. [13]

Senzory lze také instalovat během výroby do takových míst konkrétního výrobku, která už nejsou pro standardní vnější lepené snímací zařízení po následné montáži přístupná. Tím se rozšiřuje rozsah použitelnosti integrovaných senzorů a umožňuje tak provádět měření na konstrukčně složitějších návrzích s dutými součástmi nebo lepenými spoji. [13]

Postup integrace senzorů do struktury se u jednotlivých typů výrobních technologií liší podle toho, v jakém stavu jsou vyztužující materiály kompozitu při jejich aplikaci. U výrobních technologií jako např. ruční laminace, vakuová infuze nebo vysokotlaké vstřikování se při přípravě materiálů pracuje s vrstvami suchých vyztužujících tkanin, které se postupně kladou na sebe podle požadované tloušťky výrobku. Ve stejném smyslu je myšleno i pokládání jednotlivých vrstev prepregů, byť se nejedná přímo o suché tkaniny. U těchto technologií se bude pracovní postup při integrování senzorů patrně lišit od postupu, kdy bude senzor integrován do výrobku, připraveného metodou nanášených vyztužujících vláken např. stříkáním.

Počet aplikovaných senzorů, integrační hloubka nebo směr a způsob, jakým budou vyvedeny vodiče kontaktů z materiálů jsou stěžejní aspekty, na které musí být při návrhu metodiky integrace brán zřetel. Vždy je nutné zohlednit i např. rozměry samotného vloženého senzoru. Jak bude blíže popsáno v konkrétním experimentu [23], v případě, že by mohl integrovaný senzor svými rozměry narušovat rovnoměrnost vrstev a tím i celistvost povrchu výrobku, je nutné tyto vrstvy výztuže, popřípadě vrstvy dalších pomocných materiálů upravit prostřihnutím, ohybem apod. V následujících kapitolách budou charakterizovány způsoby a možnosti aplikací senzorů v konkrétních případech, kdy je studován např. tok pryskyřice při procesu infuze ve výrobní metodě za asistence vakua nebo je pomocí integrovaných senzorů zkoumáno chování výrobků či zkušebních těles při jejich zatěžování. [13; 23]

3.2 Monitorování toku pryskyřice v průběhu infuze

Jako alternativní technologie k procesům kladení prepregů nebo vysokotlakému vstřikování RTM při výrobě kompozitních struktur jsou používány zejména procesy, založené na infuzi pryskyřice pomocí vakua. Jsou považovány za efektivnější, jak z pohledu vstupních nákladů, tak i kvůli jednoduchosti použitých komponentů celé výrobní sestavy. Jedním z hlavních rozdílů technologie RTM a procesu vakuové infuze je využití nižšího tlaku přiváděné pryskyřice. U rozměrných dílů složitějších konstrukcí je monitorování a řízení toku pryskyřice při prosycování výztužných tkanin důležitým faktorem. [14]

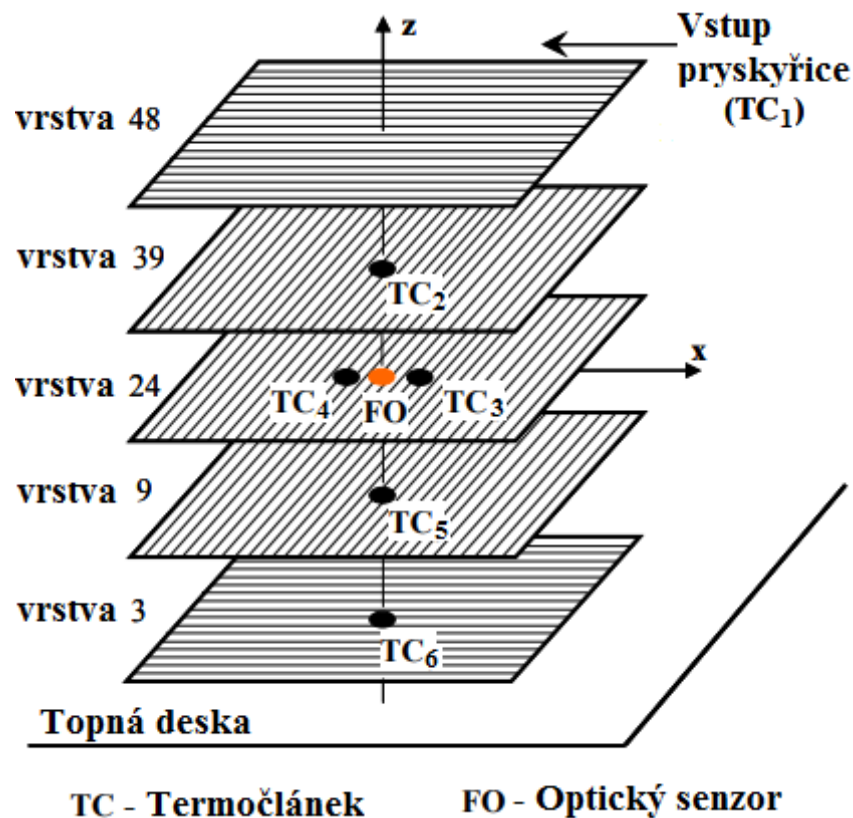
Experimentální techniky, zabývající se charakterizací přední části neboli čela toku přiváděné pryskyřice, lze nalézt především v literatuře, týkající se problematiky měření propustnosti. Stanovení propustnosti v rovině předlisku, můžeme-li tak nazvat zaformované vrstvy suché tkaniny pomocí vakua pod pružnou fólií, bylo v minulosti intenzivně studováno měřením jednorozměrných radiálních toků u procesů vstřikování pryskyřice. Ve srovnání s měřením průtoku v rovině, je detekce příčného toku považována za mnohem obtížnější. Po zdokonalení měřících prvků, jako jsou termočláňkové sondy, tlakové senzory nebo optická vlákna, používané *in-situ*, tedy přímo ve struktuře vyráběného kompozitu, se i monitorování těchto procesů značně zdokonalilo. [14]

V experimentu [14], ve kterém je zkoumána právě problematika monitorování procesu infuze pryskyřice, je kladen důraz na snížení složitosti měření a zároveň snaha, dosáhnout co nejpřesnější výsledky, použitím mikro-termočláňků a optických vláknových senzorů.

Ukázalo se, že tyto dva typy senzorů mohou nejen překonat nevýhody stávajících technik, používaných v našich průmyslových podmínkách, ale dále také charakterizovat polohu čela toku pryskyřice, dobu plnění, dobu vytvrzování a teplotu předlisku. Toto lze považovat za klíčové parametry, které přímo souvisí s kontrolou kvality dílu, vyráběného infuzní technologií. Ve studii byly použity mikro-termočlánky typu K, jelikož se jedná o běžné termočlánky, využívané v průmyslové praxi. Tento typ dobře vyhovuje prostředí, pro integraci do struktury kompozitu a nabízí široký rozsah měření teploty (od $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$). Jeden termočlánek se skládá ze dvou vodičů z materiálu chrom/hliníku o průměru $79\text{ }\mu\text{m}$. Integrace senzoru takového rozměru by mělo způsobit jen velmi malé narušení struktury kompozitu. Měřicí frekvence 20 hodnot za sekundu a rozlišení měřené teploty $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou dostačující parametry pro monitorování procesu infuze. K přesné detekci čela pryskyřice a ověření výsledků, které jsou odvozeny z nepřímých měření termočlánků, se používají senzory z optických vláken, založených na Fresnelově odrazu. Díky nim lze sledovat index odrazu světla na čele toku pryskyřice a tím monitorovat jeho polohu při prosycování a vlivem změny viskozity i související stupeň vytvrzení. [14]

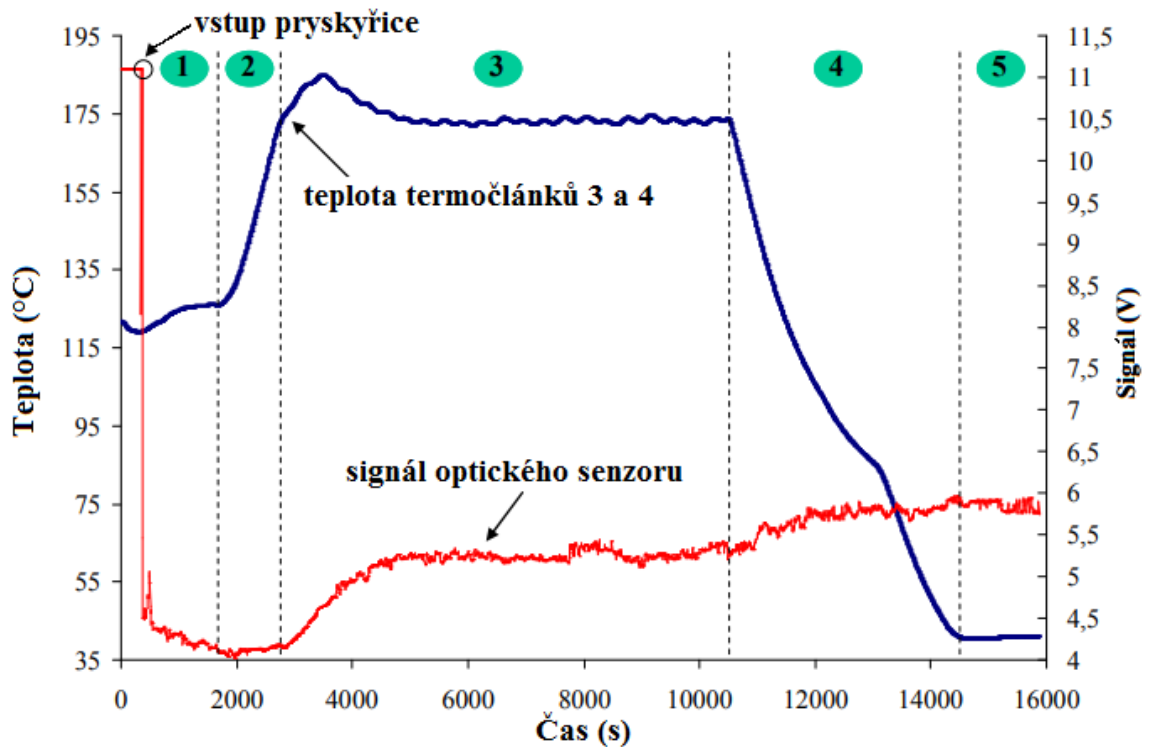
Experiment byl rozdělen na více částí s různými variantami procesních podmínek, kdy jedna varianta představovala infuzi s vyhřívanou dolní částí formy, v druhé variantě byl předlisk při infuzi uzavřen horní částí formy pro rovnoměrný ohřev. V poslední variantě byl celý systém vytvrzován v temperační peci. [14]

Při analýze první z vyjmenovaných variant byl experiment prováděn s 48 vrstvami jednosměrné uhlíkové tkaniny a epoxidovou pryskyřicí, předehřátou na $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Topná deska, umístěna pod formou, temperovala v průběhu procesu celý infuzní systém. Za účelem současného detekování teplotních změn a indexu lomu na čele toku pryskyřic byly vrstvy vybavené jedním optickým senzorem a šesti termočlánky. Rozložení senzorů mezi vrstvami schematicky zobrazeno na *Obr. 11*. [14]



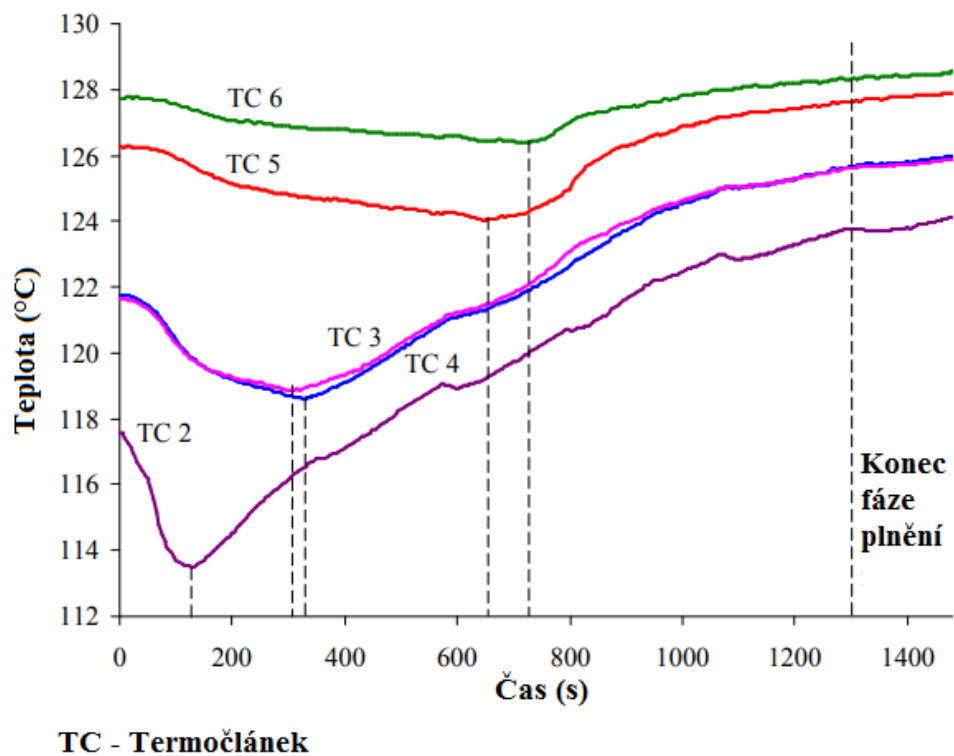
Obr. 11 Schematické znázornění umístění termočláneků a optických senzorů mezi vrstvami kompozitní desky, dle [14]

Pět termočláneků bylo umístěno napříč vrstvami. Termočlánek 3, 4 a jeden optický senzor jsou zabudovány ve středu desky, mezi 24. a 25. vrstvou. Termočlánek 1 byl vložen do systému pro monitorování teploty na vstupu pryskyřice. V grafu (*Obr. 12*) je znázorněn průběh teplot, zaznamenaných termočlánekem 3 a 4 spolu s průběhem zaznamenaného signálu optického vláknového senzoru v průběhu prosycování vrstev přiváděnou pryskyřicí. Vývoj teploty, měřené termočlánekem 3 se přesně shoduje s vývojem teploty na termočlánekem 4. Pozornost je možné věnovat zóně 1, označující fázi plnění, kde po vstupu pryskyřice do systému došlo k náhlému poklesu signálu optického senzoru. Po interakci čela pryskyřice s koncem optického senzoru a nárůstu teploty, signál začínal narůstat. Zóna 3 odpovídá fázi vytvrzování, kdy se teplota izotermicky ustálila. Při vytvrzování se kapalná fáze pryskyřice transformovala na pevnou látku, což zahrnovalo zvýšení hustoty a s tím přímo související změny intenzity signálu optického senzoru. Jakmile se signál ustálil, lze předpokládat, že byla fáze vytvrzování ukončena. Skutečnost, že není křivka signálu optického senzoru vyhlazena, je dána nehomogenitou pryskyřice, obsahující drobné bublinky. Na konci procesu, kdy byla pryskyřice vytvrzena, se stabilizovala jak křivka teploty na termočláncích, tak signál optického senzoru. [14]



Obr. 12 Závislost teploty pryskyřice u termočlánků 3 a 4 a signálu optického senzoru na čase, dle [14]

Graf na Obr. 13 zobrazuje závislost teploty jednotlivých termočlánků, rozmístěných ve struktuře kompozitu na čase v průběhu infuze. Všech pět křivek má obdobnou charakteristiku průběhu. Čas 0 odpovídá začátku procesu infuze. V bodech nárůstu teplot u křivek jednotlivých termočlánků lze přesně určit příchod čela toku pryskyřice a tím i znázornit časovou charakteristiku prosycení jednotlivých vrstev kompozitní struktury. Když pryskyřice dosáhla prosycení do spodních vrstev, mohlo dojít k mírnému zkreslení teplotních křivek vlivem kondukce od topné desky. [14]



Obr. 13 Závislost teploty pryskyřice u jednotlivých termočláneků na čase, dle [14]

3.3 Snímání napětí, deformace a teplot

Pokud je kompozit, jakožto i jakýkoliv jiný materiál vystaven napětí, deformaci nebo gradientu teploty, mění se některé jeho materiálové vlastnosti. Mezi nedestruktivní metody zkoumání těchto změn může patřit zabudování senzorů do struktury kompozitu a umožnění průchodu celým výrobním postupem. Snímání může probíhat na základě mnoha fyzikálních zákonů. Jako příklad je možné uvést měření pomocí vláknových optických senzorů, tenzometrických odporových senzorů nebo zkoumání zbytkového napětí v kompozitech pomocí dispergovaných kovových částic. [15]

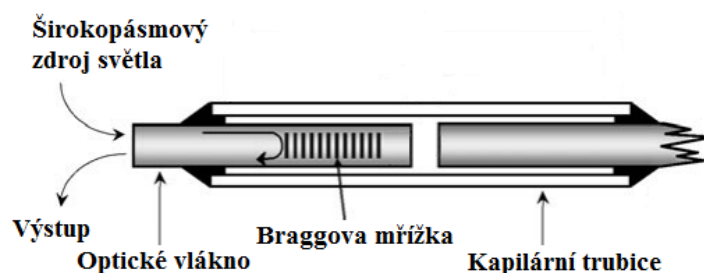
Zabudované tenzometry v termosetových kompozitech poskytují přesné výsledky při procesu generování tepla v důsledku exotermní reakce při vytvrzování i při jejich chlazení. Ovšem vzhledem k vysokým teplotám při zpracování kompozitů s termoplastickou maticí jsou některé typy tenzometrů pro tuto oblast materiálů nepoužitelné. [15]

Monitorování teplotního zatížení v průběhu výrobního procesu kompozitu je významné z hlediska indikace stupně vytvrzení a popisu celého vytvrzovacího cyklu, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách. Při monitorování toku pryskyřice, kde je předmětem zkoumání čas, kdy čelo pryskyřice dorazí na určité místo ve struktuře kompozitu, stejně tak k celé řadě dalších aplikací patří termočlánek nebo termoelektrické články,

k nejrozšířenějším kontaktním čidlům. Jejich princip se zakládá na termoelektrickém jevu, a to pomocí dvou vodičů z odlišných materiálů. Spoje těchto materiálů mají různou teplotu a mezi materiály tak vzniká rozdílný elektrický potenciál s vznikem termoelektrického napětí, které je potom možné měřit. Pro použití v kompozitech se podle zvolené výrobní technologie používají vodiče termočlánků s izolací. Například v případě vytvrzování kompozitu v peci či autoklávu nebo při použití v chemicky agresivnějším prostředí je nutné použít senzory s izolací ze sklotextilu nebo PTFE. Podle rozsahu teplotních odolností vodičů termočlánku se dělí na několik typů s písemným označením. V běžném průmyslu se používají nejčastěji termočlánky typu J, K a S. [16]

3.3.1 Vlákňové optické senzory

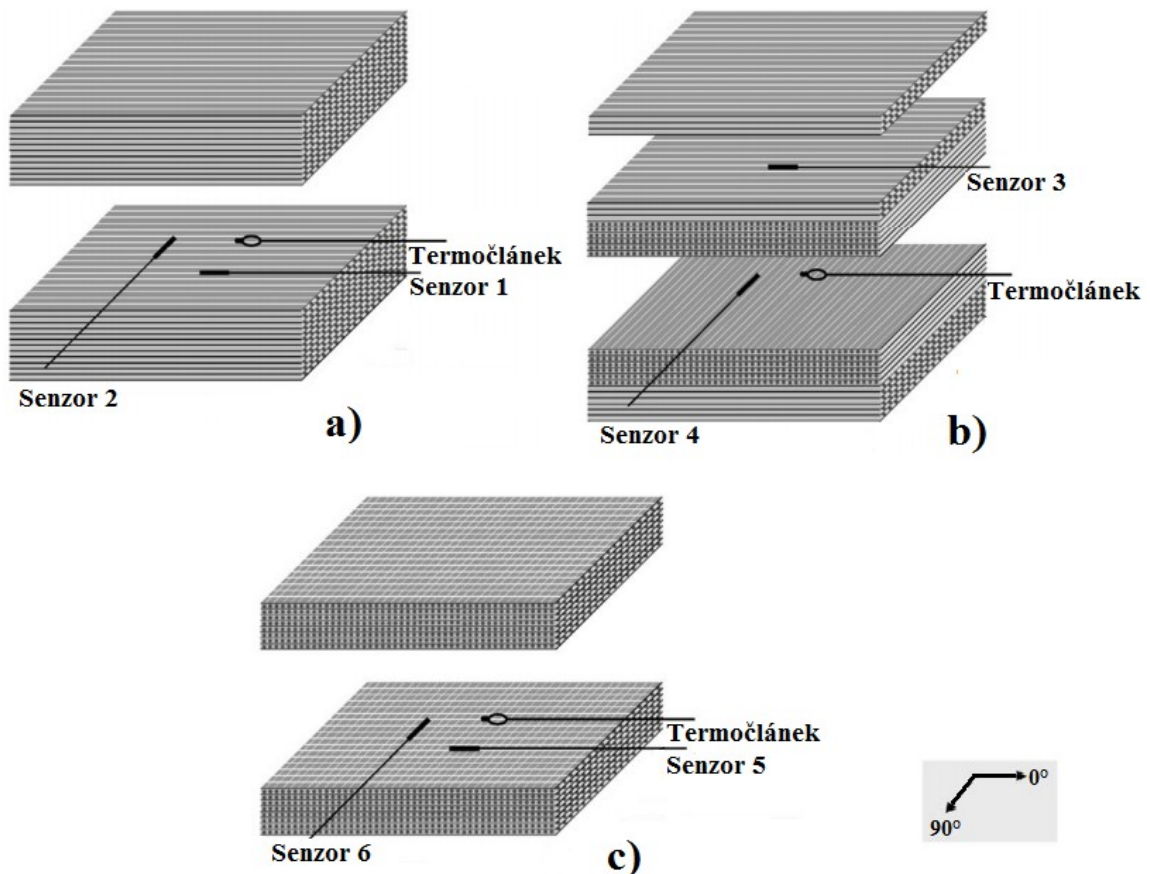
Nedávný vývoj ukazuje, že vlákňové optické senzory (FOS z angl. Fibre Optical Sensors) lze použít jako vnitřní "tenzometry", které sledují vývoj napětí uvnitř kompozitních materiálů, a to i při zpracování za vyšších teplot, potřebných pro termoplastické polymerové matrice. Aplikace těchto senzorů byly nalezeny jak u jednosměrně vyztužených kompozitů, tak i u vrstev, pokládaných pod různými úhly. Existuje celá řada různých senzorů z optických vláken, z nichž pro sledování napětí v laminátech se nejčastěji používají vlákňové senzory s Braggovou mřížkou (FBG z angl. Fibre Bragg Grating) a vnější Fabry-Perotovy interferometrické senzory (EFPI z angl. Extrinsic Fabry-Perot Interferometric). Senzor EFPI měří napětí prostřednictvím změny délky dutiny, která přímo souvisí s fázovou změnou mezi vstupními a výstupními signály a odrazem optických vláken. Pro speciální monitorování procesů jsou vyvíjeny i hybridní varianty těchto typů senzorů. Nevýhodou těchto senzorů je jejich dutinový tvar s poměrně velkým průměrem, v důsledku čehož mohou v laminátu vznikat v jeho okolí koncentrace napětí a tím narušovat celkovou jeho integritu. Kromě toho bylo zjištěno, že tento vlákňový optický senzor nepodává spolehlivé výsledky, pokud v případě použití v termoplastických kompozitech, matrice dokonale nezatuhne. [17]



Obr. 14 Schéma hybridního FBG/EFPI senzoru, dle [18]

V experimentu [18] bylo provedeno simultánní monitorování vývoje deformace a teploty během vytvrzování kompozitu právě pomocí hybridních senzorů FBG/EFPI. Do každého ze tří typů vyráběných termosetových laminátů typu uhlík/epoxid, vytvrzovaných v autoklávu, byly vloženy dva optické senzory s termočlánkem ve dvou vzájemně kolmých směrech. Jednosměrné kompozitní vrstvy vykazovaly velké tlakové napětí v příčném směru při malých napětích ve směru vyztužujících vláken. Na druhou stranu, zbytková napětí laminátů, které byly vyztuženy ve dvou ortogonálních směrech, byla navzájem podobná. Rovněž byla tato napětí větší, než napětí ve směru vyztužujících vláken a menší než napětí v příčném směru jednosměrného laminátu. Teploty, měřené senzory optických vláken ukazují dobrou shodu s teplotou, měřenou termočlánkem. Z experimentálních výsledků je možné zjistit, že metoda použití vláknových optických senzorů je schopna monitorovat několik parametrů, jako je napětí a teplota a lze ji použít k nalezení optimálních podmínek vytvrzování. [18]

Na *Obr. 15* je schematicky znázorněno rozmístění zabudovaných optických senzorů a termočlánků mezi vrstvy jednosměrné laminátové desky, příčně vyztužené desky ve dvou kolmých osách a desky s tkaninovou výztuží. Senzory 1 a 2 byly zabudovány do středu laminátu mezi 12. a 13. vrstvou. Senzor 1 byl vložen paralelně a senzor 2 byl vložen kolmo na vyztužující vlákna. Senzor 3 byl vložen mezi 21. a 22. vrstvou a senzor 4 mezi vrstvou 12. a 13. tak, aby byly oba senzory rovnoběžně s vyztužujícími vlákny laminátu, aby působily co nejméně rušivě mezi jednotlivými vrstvami a neoslabovaly tak celkovou integritu laminátové desky dopadem na mechanické vlastnosti. Senzory 5 a 6 byly vloženy do středu desky laminátu s tkaninovou výztuží mezi 8. a 9. vrstvou. Do každé desky byly zabudovány termočlánky typu K, které řídily teplotu během vytvrzování a sloužily jako referenční zdroje teploty pro celý proces. [18]



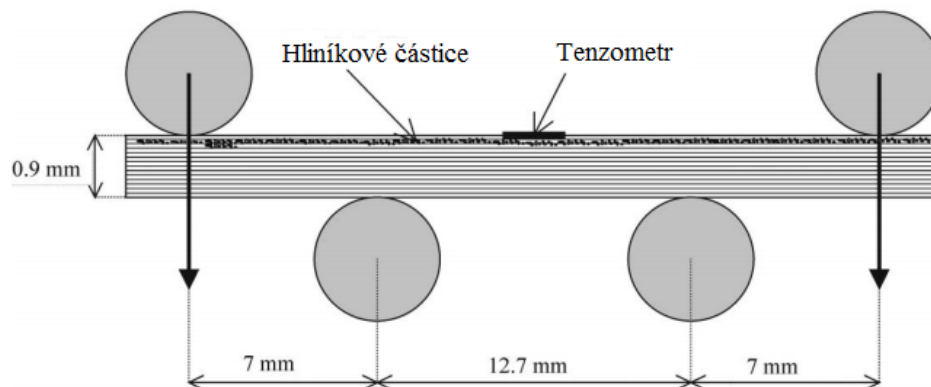
Obr. 15 Schematické znázornění umístění a směrů optických senzorů a termočláneků v jednosměrném laminátu (a); příčném laminátu (b); tkaninovém laminátu (c); dle [18]

3.3.2 Dispergace kovových plniv v matrici

Při měření zbytkového napětí po vytvrzení kompozitní struktury bývá používána metoda rentgenové difrakce, při použití rozptýlených částic kovového plniva do matrice. V experimentech [19; 20] autoři pracovali s částicemi hliníku, mědi a stříbra. Ačkoliv uvádí, že velikost částic kovového plniva je srovnatelná s průměry vláknových výztuží, problém spočívá v distribuci částic v celkovém objemu kompozitu. Následné negativní ovlivnění mechanických vlastností kompozitu je globálního hlediska, oproti lokálnímu narušení struktury v případě metody jednoho zabudovaného senzoru. Kromě toho je pro získání relevantních výsledků potřeba důkladné korelace vztahu mezi zbytkovým napětím a výsledky rentgenové difrakce. Využitím Braggova zákona toto souvisí se změnou rozestupu krystalické mřížky, vyvolané zbytkovým napětím. Z toho vycházející deformace může souviset s napětím v polymerní matrici dle Hookeova zákona. [15; 19; 20]

V experimentu [19] bylo zjištěno, že nejvyšší přesnost poskytovalo použití pravidelných hliníkových částic. Pro měření stavu napjatosti uvnitř částic byl použit postup, kdy byly

vzorky namontovány do čtyřbodového ohýbacího přípravku a následně vloženy a zatěžovány uvnitř difraktometru Siemens D500. [19]

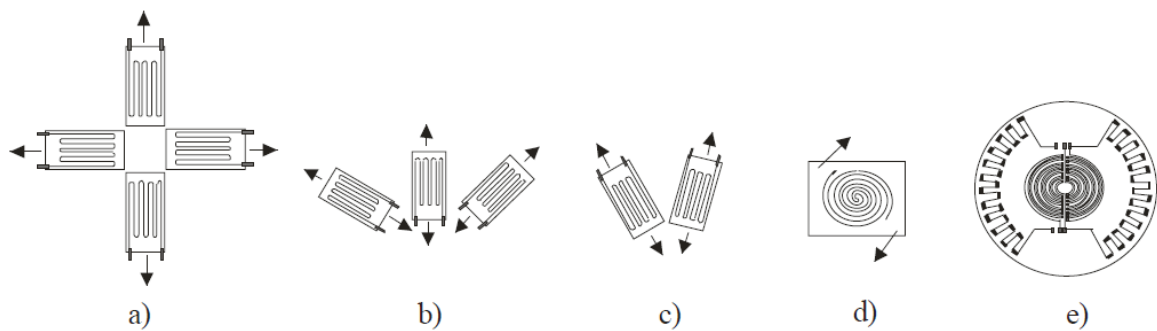


Obr. 16 Konfigurace vzorku kompozitu s hliníkovou inkluzí při čtyřbodovém ohybu na rentgenovém difraktometru Siemens D500, dle [19]

Výsledkem byla možnost jak měření interlaminární, tak intralaminární napjatosti u jednosměrně vyztužených kompozitů. V hliníkových částicích bylo napětí vlivem rentgenového záření pozorováno jako lineárně závislé na aplikovaném axiální zatížení ve vzorcích, způsobeném čtyřbodovým ohybem. Tento typ experimentu se provádí především u kompozitů s termosetovou maticí, jelikož tato matrice nemá krystalickou strukturu, která by se měnila v reakci na rentgenové záření. Hlavní nevýhodou této techniky je, že poskytuje informace pouze o povrchových vlastnostech zkoumaných vzorků. [19; 20]

3.3.3 Tenzometrické odporové senzory

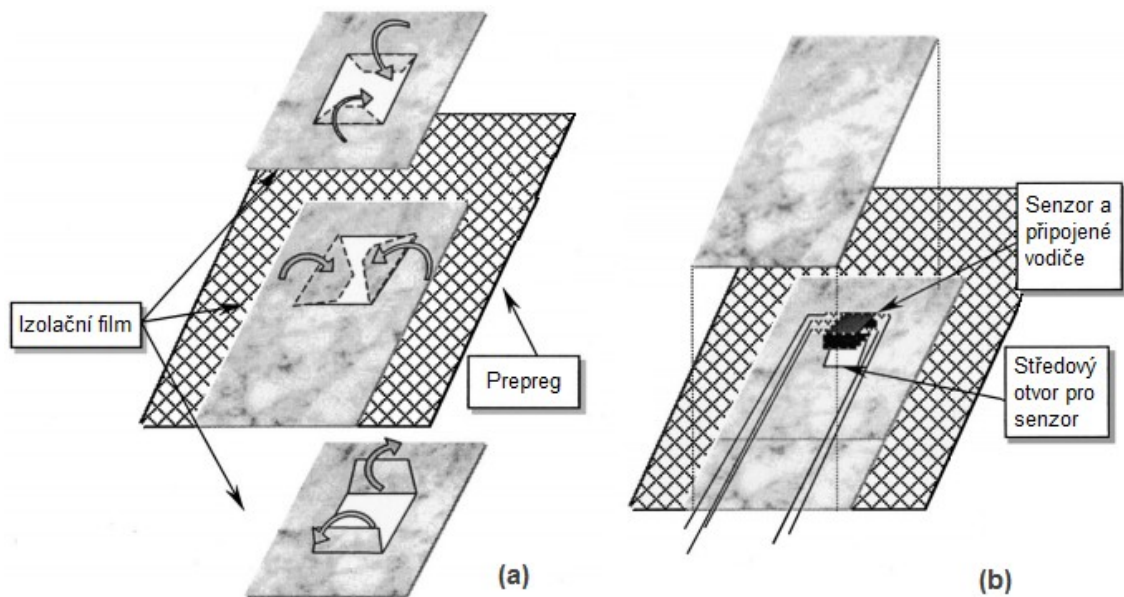
Reakce tenzometrických senzorů na mechanické napětí či změny tlaku se projevuje svojí deformací a s ní spojenou změnou elektrického odporu. Pro prostorové tlakové změny nebo pro zkoumání prodloužení v důsledku mechanického napětí v podélném směru jsou v praxi využívány tenzometry až do 1000 MPa. Jsou zde využívány zákonitosti délkového prodloužení či zkrácení. Obvykle se tenzometry využívají pro měření deformací v jenom směru. Tyto tenzometry jsou vyráběny jako kovové drátové, fóliové, membránové, ale také vyrobené z pásů z polovodičů. U náročnějších požadavků na měření lze také tenzometry kombinovat v různých směrech pod různými úhly. Ve strojírenské praxi jsou používána provedení umístěných a zapojených tenzometrů podle *Obr. 17*. [21]



Obr. 17 Realizace umístění více tenzometrů pro napětí v rovině ve dvou kolmých osách (a); šikmo ve třech osách (b); šikmo ve dvou osách (c); jako spirála (d); růžicové zapojení se čtyřmi tenzometry (e), dle [21]

Jako kovové materiály se používá ocel, platina, nikl nebo různé slitiny chromu. Mezi materiály polovodičových tenzometrů se řadí monokrystaly křemíku nebo germania, difundované či v případě polykrystalických polovodičů naprašované do substrátu. Deformační citlivost těchto tenzometrů je nelineární a značně ji ovlivňuje teplota. Tenzometry mohou snímat deformace na základě změny tlaku, tahu či při namáhání krutem. Tyto senzory o rozměrech několika milimetrů bývají instalovány nejčastěji lepením na podklad termoplastickými nebo reaktoplastickými lepidly či tmely na bázi keramiky, a to jednak podle teplot a typu prostředí, ve kterém se budou senzory používat a také podle druhu materiálu, na kterém budou připevněny. Nežádoucí ovlivňování měření teplotními změnami je možné odstranit použitím kompenzačního tenzometru nebo ve spojení tenzometru spolu s termočlánkem. [21]

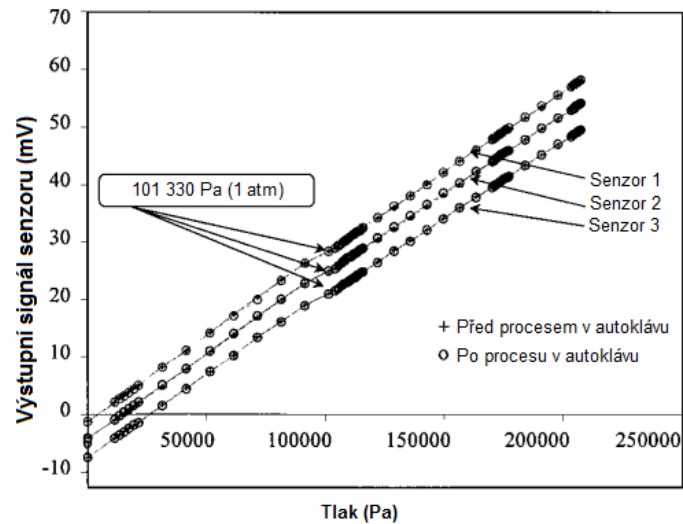
Ve výzkumném projektu [22] se autoři soustředili na zabudování senzorů tlaku a teploty do kompozitních laminátů z uhlíkových vláken. Konkrétně se jednalo o návrh výrobního postupu pro zabudování komerčně dostupných MEMS senzorů tlaku a teploty pro povrchovou montáž do struktury kompozitu, lisovaného z prepregu pomocí autoklávy. Důležitým krokem bylo odizolování vodivých částí obou typů senzorů od uhlíkových vláken. Toho bylo docíleno použitím speciálního adhezního filmu s kaptonovou vrstvou. Jedná se o tenkou polyimidovou fólii s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi a dobrou chemickou odolností. V několika vrstvách této fólie byl prostříhnut otvor a zhotoveny záhyby pro vytvoření dostatečné izolační vrstvy na hranicích výřezu, jak je znázorněno na Obr. 18.



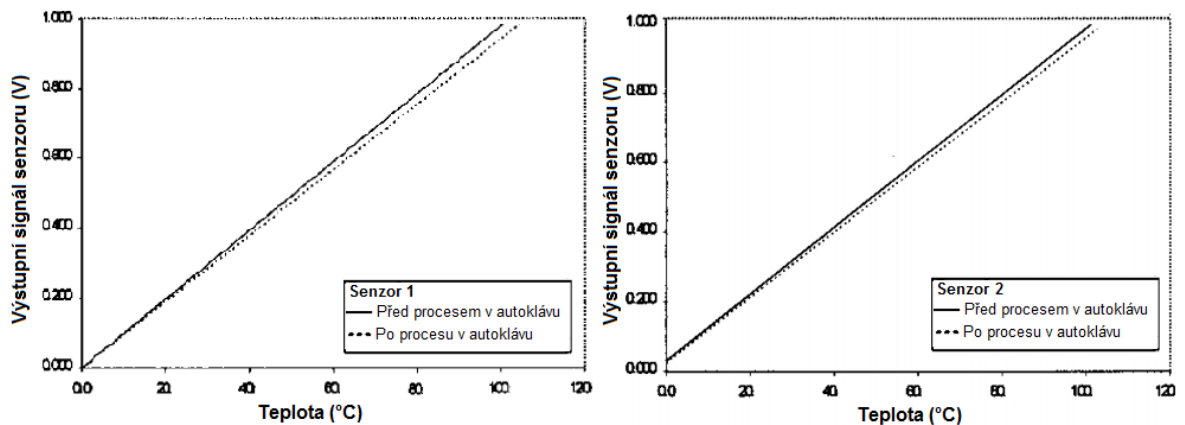
Obr. 18 Příprava a vrstvení izolační fólie (a); vložení senzoru do otvoru (b); dle [22]

Další neméně důležitou úpravu bylo nutné provést u připojení vodičů jednotlivých senzorů. Běžně dostupné senzory jsou vyráběny s kontakty připojovacích vodičů ohnutými s úhlem 90° . Taková konfigurace vodičových kontaktů může vést, díky tlaku během vytvrzovacího cyklu v autoklávu, k propíchnutí izolační fólie nebo poškození senzoru samotného. Aby se tomuto předešlo, byly tyto kontakty jednoduše narovnané. Pro prodloužení vodičů a vyvedení do požadované délky je možné připojení běžných izolovaných krytých vodičů nebo termoplastické lepicí vodivé fólie. Pro integraci do kompozitního laminátu, který bude pravděpodobně vystaven únavovému zatížení, je více vhodná a také byla v tomto případě použita termoplastická fólie, jelikož tento materiál prokázal v předchozích studiích vynikající strukturní i elektrickou integritu právě při únavovém zatížení.

Předmětem této studie bylo ověření spolehlivosti těchto integrovaných snímacích komponentů ve struktuře, a to pořízením výstupních charakteristik těchto tlakových a teplotních senzorů před a po působení účinků vytvrzovacích cyklů v autoklávu.



Obr. 19 Grafické zobrazení výstupních signálů tlakových senzorů a kontrola jejich linearity před a po vytvrzovacím cyklu v autoklávu; dle [22]



Obr. 20 Grafické zobrazení výstupního signálu teplotního senzoru 1 a 2 a kontrola jejich linearity před a po vytvrzovacím cyklu v autoklávu; dle [22]

Signál tlakových senzorů byl nejprve zaznamenán při postupném zvyšování tlakového zatížení nejprve ve zkušební tlakové komoře pomocí digitálního multimetru. Se stejným tlakovým průběhem byl poté vzorek vystaven působení vnitřního přetlaku při vytvrzovacím cyklu v autoklávu. Výsledky byly vyneseny do grafu (Obr. 19). Z výsledných hodnot je zřejmé, že se průběh napětí při zatěžování vytvrzovacím cyklem v autoklávu zcela neliší od prvotního tlakového zatížení ve zkušební komoře. Dále je pozorováno, že se během vytvrzování rovněž nemění linearita signálu senzoru. Také byly před a po vytvrzovacím cyklu pořízeny mikroskopové snímky tlakové membrány, na kterých nebyly po srovnání pozorovány žádné známky fyzického poškození. [22]

Pro měření teploty z odpovídajících výstupů senzorů a sběr dat byl k temperačnímu zařízení použit počítačový systém LabView. Následně byly výsledky srovnány s hodnotami při různých teplotách v rozsahu od 0 do 100 °C při vytvrzovacím cyklu v autoklávu. Podle porovnání výsledných signálů nedošlo u žádného senzoru ke změně linearity. U senzorů 1 a 2 je ovšem možné na *Obr. 20* pozorovat mírnou změnu sklonu výsledných křivek po vytvrzovacím cyklu. U senzoru 2 je navíc patrné nulové posunutí výstupu. Tyto jevy by bylo možné korigovat pečlivou kalibrací senzorů před samotným použitím. Nakonec je nutné poznamenat, že dlouhodobou spolehlivost všech senzorů při jejich určených aplikacích by měl zajišťovat výrobce důkladnou kalibrací před uvedením na trh. [22]

Vhodnost integrace tenzometru do struktury výrobku je na individuálním posouzení dané aplikace. V laboratorním prostředí je nutné otestovat, zda je pro konkrétní kompozitní výrobek integrovaný tenzometr vhodný. Ve specifickém případě zabudovaného tenzometru je žádoucí, aby deformace, dosažená integrovaným senzorem byla docela blízká deformaci, vyhodnocené běžným, povrchově vázaným senzorem. V takovém případě lze získané hodnoty skutečně využít pro nepřetržité monitorování zatížení v běžném provozu výrobku. [23]

V experimentu [23] byla vyrobena tělíska pro zkoušku třibodového ohybu. Při této zkoušce bylo monitorováno provozní zatížení integrovaným, komerčně dostupným tenzometrem LI66-10/350, který je výrobcem přímo určený pro kompozitní struktury. Podstatou bylo srovnání metrologické odezvy signálu tohoto integrovaného tenzometru s odezvou, získanou použitím klasického tenzometru na povrchu zkušebního tělesa. Při použití integrovaného tenzometru výrobce uvádí několik slibných výsledků při zkoumání únavové životnosti a interlaminární smykové odolnosti. To je dáno i kompaktními rozměry samotného senzoru. Ve výsledku bylo pozorováno jen mírný náznak snížení houževnatosti. Naopak došlo k mírnému nárůstu ohybové tuhosti. To mohlo být zapříčiněno, dle analýzy autorů, přítomností svislých kontaktních čepů, kolmých na rovinu senzoru, které je pro připojení vodičů nutné vyvést na povrch vzorků. Tyto parametry by měli mít přímou souvislost se zvolenou integrační hloubkou senzoru ve struktuře kompozitu. Když vyzdvihneme srovnatelnou odezvu obou senzorů na způsobené deformace při zatěžování, které bylo cílem dosáhnout, je nutné také zmínit vytvořenou ochranu integrovaného senzoru proti poškození, poskytovanou hostitelskou strukturou kompozitu. [23]

3.3.4 Návrh fixace senzoru mezi vrstvami kompozitu

V případě senzorů pro měření deformací, např. fóliových tenzometrů je přesné umístění polohy a vyrovnání velmi důležité. Při instalaci na povrch hotové součásti lze tenzometr zarovnat např. pomocí pravítek nebo dalších pomocných úhlových přípravků. V případě integrace je tenzometr umístěn a zarovnán na příslušné vrstvě tkaniny a následně je s ní v průběhu výroby spojen. V případech, kdy není na tyto místa možné značit pozice pomocí rysek, úhloměřů a pravítek, je nutné přistoupit k alternativním způsobům orientování. U konstrukčně složitějších výrobků nebo při integraci většího množství tenzometrů je možné zpracovat instalační šablonu, která může tyto přípravné práce značně ulehčit. U výrobků velkých rozměrů je také jednou z možností pro zarovnání senzorů použití nití nebo lanek, napnutých na povrchu dané vrstvy tkaniny. Další, modernější a sofistikovanější možností je využití laserových projektorů, které zobrazí přesný nárys vodících linek a tím označí přesnou polohu pro umístění senzorů. [24]



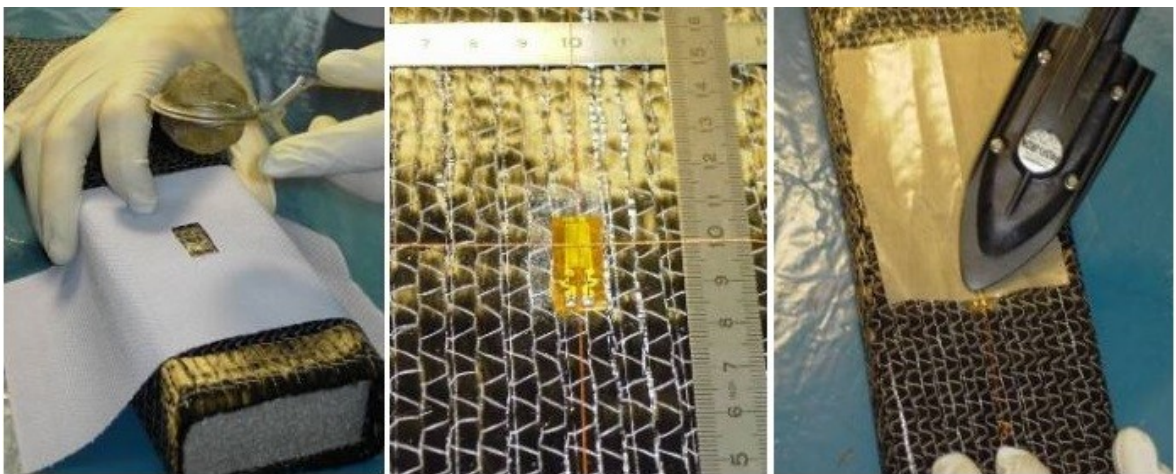
Obr. 21 Vyrovnání tenzometru do formy pomocí instalační šablony; dle [24]

Jak je patrné z předchozích kapitol, ke každé individuální aplikaci s různým typem senzorů je třeba přistupovat odlišně. Svůj specifický přístup integrace tenzometru do vlastní konstrukce výrobku popsal i autor článku [24] ze společnosti HBM, která vyvíjí široké spektrum senzorů a snímacích zařízení pro průmyslovou praxi. Konkrétně bylo popsáno použití již zmiňovaného fóliového tenzometru LI66, vyvinutého speciálně pro účely zakomponování do kompozitních laminátů. [13; 24]

Během výrobního procesu existuje při zpracovávání suchých vyztužujících tkanin riziko, že bude vkládaný tenzometr mezi vrstvami klouzat a nebude tak zajištěna jeho přesná poloha. Aby se tomu zabránilo, musí být senzor během manipulace se všemi ostatními potřebnými technologickými materiály řádně upevněn. Při použití běžných lepidel na suchá vlákna je třeba brát v úvahu to, že v oblasti použití lepidla nemusí dojít k dokonalému prosycení a adhezi mezi pryskyřicí, tenzometrem a vyztužujícími vlákny. Níže jsou uvedeny dvě možnosti, jak tuto vzájemnou adhezi všech zmíněných prvků bezpečně zaručit. [24]

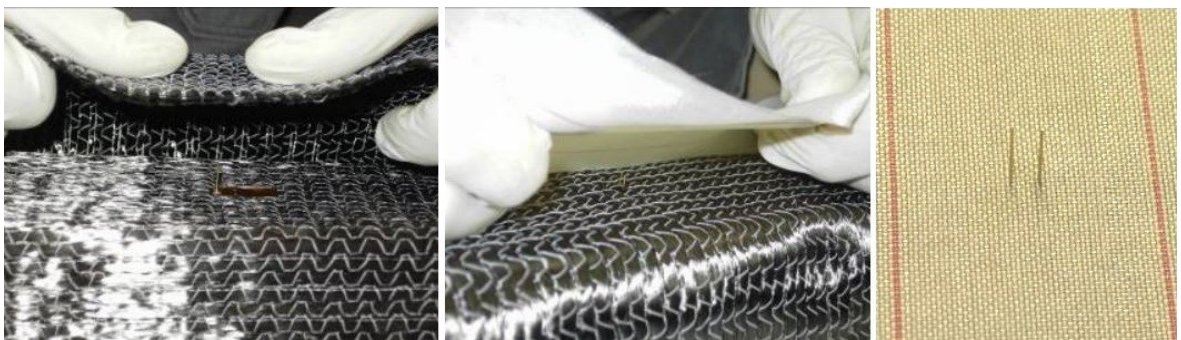
- Použití pojivého prášku

Běžným způsobem spojování vláknových tkanin a pomocných materiálů je použití tzv. pojivého prášku. Ten se skládá z termoplastického materiálu, který se za účelem fixace rozptýlí mezi vlákna tkaniny a za působení vnějšího dodaného tepla se roztaví. Jakmile se prášek ochladí, spojí vlákna a případné další vrstvy dohromady, stejně tak jako zafixuje tenzometr na příslušnou pozici. Pro rovnoměrné rozprostření pojiva je doporučeno použít sítko. Použití krycí vrstvy napomůže nanést pojivý prášek lokálně, jen v oblasti použití tenzometru. Na rozprášené pojivo se tedy poté může umístit tenzometr, který se může ještě přesně vyrovnat pomocí pravítek. Pro ohřátí je možné využít např. elektrickou žehličku, která by měla být schopna roztavit pojivo při cca 80 °C. Během tohoto procesu by měl být tenzometr zakryt tenkou vrstvou PTFE fólie. Tím se zabrání přímému kontaktu horkého nástroje jednak s tenzometrem, ale také se samotným pojivým práškem, aby se na žehličku nenalepil. [24]



Obr. 22 Aplikace pojivého prášku pro fixaci tenzometru; lokální nanášení prášku na výrobek přes krycí vrstvu (vlevo); zarovnání tenzometru (uprostřed); natavení prášku žehličkou přes PTFE fólii (vpravo); dle [24]

Po umístění tenzometru se nanese další potřebné vrstvy vyztužující tkaniny. Ty by měly být aplikovány s dostatečnou opatrností, aby se při propichování nepoškodily kolíky vodiče senzoru. Při integraci tohoto typu tenzometru u zvolené výrobní technologie vakuové infuze následuje jako další vrstva odtrhová tkanina. Ta se umísťuje obdobným způsobem jako vláknové výztuže s maximální opatrností. Pokud kolíky vodičů příliš vyčnívají, je možné je před další operací zkrátit na délku cca 2 mm. V dalším kroku je nutné kolíky opatřit ochranným pěnovým krytem, který se na ně lehkým tlakem připevní. Pěnový kryt je nezbytné použít z několika důvodů. Slouží jako ochrana čepů během další manipulace, jako ochrana pružné vakuovací fólie proti propíchnutí a v neposlední řadě pro dodatečné upevnění tenzometru během infuze pryskyřice a vytvrzování. Další postup závisí na typu zvolené výrobní technologie, např. položením odsávací tkaniny nebo vakuovací fólie. [24]

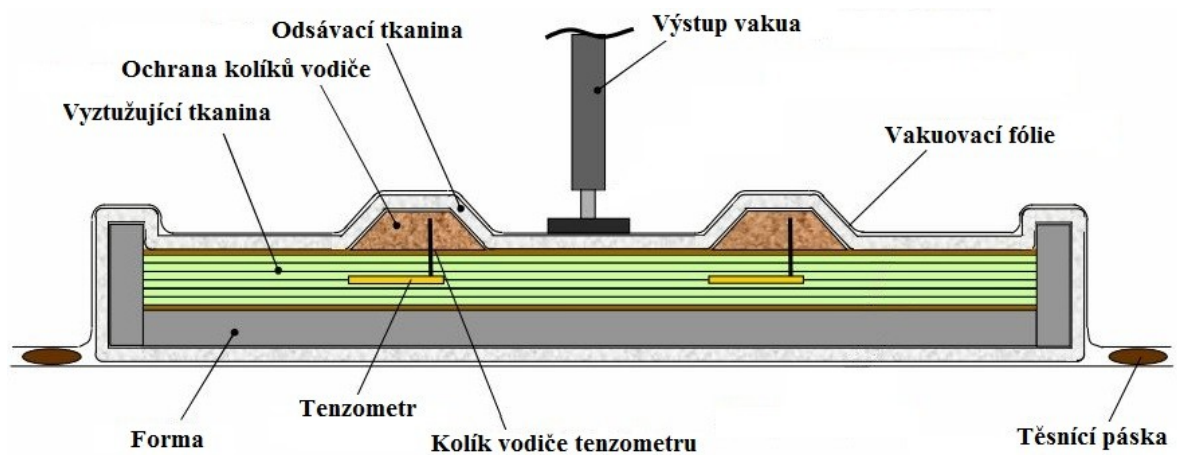


Obr. 23 Postup integrace tenzometru s kolíky vodičů; aplikace dalších vrstev vyztužující tkaniny (vlevo); aplikace odtrhové tkaniny (uprostřed); vyčnívající kolíky skrz odtrhovou tkaninu (vpravo); dle [24]



Obr. 24 Opatření pro ochranu kolíků vodičů; zkrácení vodičů na délku cca 2 mm (vlevo); aplikace ochranného pěnového krytu (uprostřed); aplikace dalších vrstev technologických materiálů; dle [24]

Tento typ speciálního tenzometrického senzoru lze využít pro širokou škálu výrobních technologií, včetně např. běžné technologie ručního kladení, sofistikovanější infuze pryskyřice za pomoci vakua, tak rovněž integrace mezi vrstvy prepregové tkaniny. Zjednodušené schéma technologických komponentů připraveného předlisku při vakuové infuzi zobrazuje Obr. 25.



Obr. 25 Zjednodušené schéma konfigurace připravených technologických materiálů pro integraci tenzometru při vakuové infuzi; dle [24]

- Použití speciálních lepicích sprejů

Dalším způsobem pro zafixování senzoru je použití speciálních lepidel ve spreji, které se používají pro upevnění vyztužujících tkanin v konstrukčně složitějších formách. Tyto typy lepidel jsou navrženy tak, aby nenarušovaly proces prosycování vláken pryskyřicí a ve struktuře kompozitu působily co nejméně rušivě. K upevnění senzoru stačí lehký mlhový nástřik. Pro lokální nanášení lepidivé vrstvy je možné použít krycí vrstvu, podobně jako u nanášení pojivých prášků. U prepregových materiálů není nutné tenzometry dodatečně fixovat, protože jejich adekvátní přilnutí je již zajištěno lepivostí samotné prepregové vrstvy. V zásadě je nezbytné, vyvarovat se během instalace nadbytečným častým úpravám polohy tenzometru opakovaným přesouváním, aby nedošlo k poškození tenzometru. [24].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Z technického hlediska se integrační proces senzorů do kompozitní struktury ve většině případů zabývá třemi omezeními.

Prvním z nich je samotná proveditelnost výrobního procesu. To vyžaduje především volbu vhodné technologie pro výrobu kompozitu s ohledem na omezení, dané přítomností cizího tělesa (senzoru) ve struktuře.

Druhou položkou je analýza k posouzení toho, jakým způsobem a v jaké míře může vložené těleso ovlivnit mechanické vlastnosti hostitelské struktury. Ověření integrity struktury je nutné provádět zejména z toho důvodu, že integrovaná tělesa mohou ve struktuře vytvářet místa s koncentracemi napětí a snižovat tak celkovou životnost výrobků.

Třetím krokem je vhodné metrologické zkoumání, které je zásadní pro posouzení, zda měřící odezva, získaná z integrovaných senzorů dosahuje relevantních výsledků dle metrologických požadavků. Ve specifickém případě použití integrovaných tenzometrů je žádoucí, aby zjištěná deformace pomocí integrovaného senzoru byla docela shodná s deformací, vyhodnocenou běžným povrchovým senzorem. V takovém případě lze tuto měřící soustavu skutečně využít pro nepřetržité monitorování zatížení v ostrém provozu.

Cíle diplomové práce je možné zformulovat do následujících bodů:

1. Možnosti integrace senzoru do kompozitní struktury.
2. Experimentální návrh kompozitních struktur s integrovanými inserty pro sledování jejich vlivu na mechanické vlastnosti. Volba, popis a zdůvodnění zpracovatelské technologie.
3. Experimentální testování mechanických vlastností kompozitních struktur s integrovaným insertem a bez něj, dle ČSN EN ISO 527-4.
4. Experimentální návrh integrace senzoru LI66-10/350 do struktury kompozitu.
5. Porovnání výstupních signálů zvoleného integrovaného tenzometru do struktury s tenzometrem LY21-3/120, umístěným na povrchu kompozitu při tahovém zatížení.
6. Závěr diplomové práce.

5 OVĚŘENÍ STRUKTURÁLNÍ INTEGRITY KOMPOZITU

Jak již bylo zmíněno v úvodu, důležitým faktorem pro výrobu součástí požadovaných kvalit je posouzení, jakou formou a v jaké míře může integrovaný senzor včetně jeho vodičů narušit integritu struktury a tím ovlivnit výsledné vlastnosti kompozitů. Následující kapitola popisuje návrhy experimentálního zkoumání dvou případů tohoto jevu.

5.1 Návrh experimentu s podélným integrovaným drátem

V praxi je možné setkat se s případy, že jsou kriticky namáhanými místy kompozitních výrobků vedeny vodiče zabudovaných senzorů takového typu, kdy vede vodič podélně ve směru zatížení výrobku. V první části ověření integrity struktury s dopadem na změnu mechanických vlastností byla realizována výroba zkušebních tělísek s podélným integrovaným drátem. Z tohoto důvodu byla navržena varianta experimentu pro statickou zkoušku tahem, při které byl ve zkušebním tělísku podélně integrovaný drát, simulující vodič senzoru. Pro výrobu tělísek byla zvolena technologie vakuové infuze pod pružnou fólií.

5.1.1 Technologické materiály pro experiment

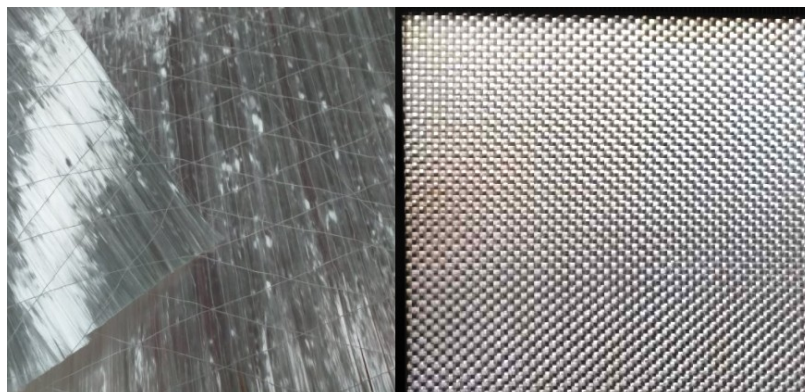
Pro výrobu metodou vakuové infuze je zapotřebí několik základních komponentů a pomocných materiálů. Jak už bylo popsáno výše, základními dvěma prvky kompozitních výrobků jsou výztuže a matrice.

- **Vyztužující tkaniny**

Jako výztuž pro všechny části experimentů byly zvoleny dva typy skelných tkanin, a to konkrétně:

- Skelná tkanina jednosměrně orientovaná s plošnou hmotností 250 g/m²
- Skelná tkanina AEROGLOSS s plátňovou vazbou s plošnou hmotností 280 g/m²

Obě tkaniny jsou dle výrobce Havel Composites vhodné pro bezproblémové prosycení epoxidovou, polyesterovou i vinylesterovou pryskyřicí.



Obr. 26 Detail skelné jednosměrně orientované tkaniny (vlevo); tkaniny s plátňovou vazbou (vpravo); dle [25]

- **Matrice**

Materiál matrice byl vybírán s ohledem na nižší viskozitu pryskyřice, která by zajistila nejlepší podmínky pro dokonalé prosycení vrstev obou typů vyztužujících skelných tkanin. Z dostupných zdrojů byl vybrán laminační systém od firmy GRM Systems:

- Epoxidová pryskyřice LG 700
- Tužidlo HG 700

Tato řada výrobků představuje dle výrobce epoxidový systém nové generace, vytvořen na bázi modifikované epoxidové pryskyřice a několika vhodných tužidel. Díky specifičnosti každého jednotlivého tužidla lze nastavit odlišné podmínky zpracovatelnosti a vytvrzení laminačního systému. Použitá pryskyřice je charakterizována jako nízkoviskozní, se zvýšenou reaktivitou. Vyznačuje se výjimečnou flexibilitou a zvýšenou teplotní odolností. Obsahuje modifikátory, zajišťující kvalitní průnik a spojení s vyztužující tkaninou. Tužidlo HG 700 je základní verze tužidla, určeného pro pryskyřici LG 700. [26]

Tab. 1 Vybrané vlastnosti nevytvrzené pryskyřice LG 700 a tužidla HG 700; dle [26]

Pryskyřice LG 700	hodnota	jednotka	poznámka
Hustota	1,18 - 1,23	g/cm ³	při 25 °C
Viskozita	500 - 700	mPa·s	při 25 °C
Gel time	3 - 5	hod	pro vrstvu 1 mm při 25 °C s tužidlem HG 700
Tužidlo HG 700			
Hustota	0,94	g/cm ³	při 25 °C
Viskozita	15 - 20	mPa·s	při 25 °C
Míchací poměr pryskyřice : tužidlo = 100 : 30			

Tab. 2 Orientační mechanické parametry vytvrzené nevyztužené pryskyřice LG 700; dle [26]

Vytvrzená nevyztužená pryskyřice LG 700	hodnota	jednotka
Mez pevnosti v ohybu	110 - 120	MPa
Modul pružnosti v ohybu	2700 - 3300	MPa
Mez pevnosti v tahu	65 - 75	MPa
Mez pevnosti v tlaku	120 - 140	MPa
Tažnost	6 - 8	%
Rázová houževnatost	38 - 48	kJ/m ²

5.1.2 Pomocné materiály a zařízení pro vakuovou infuzi

Jak již bylo zmíněno, technologie výroby vakuovou infuzí se neobejde bez dalších vrstev materiálů pro vytvoření předlisku a dalších pomocných prvků systému pro evakuaci vzduchu a infuzi pryskyřice.

- **Forma**

Jako forma pro výrobu laminátových desek, ze kterých byly dále zhotoveny zkušební tělíska, sloužila skleněná tabule. Je důležité, aby forma nebyla poškozená nebo znečištěná.

- **Separátor formy**

Jako separátor formy byl použit prostředek Havel Wax 60-x3 od firmy Havel Composites. Jedná se o univerzální separační voskový přípravek ve formě pasty pro použití v kontaktu s polyesterovými a epoxidovými pryskyřicemi. U zaběhnutých nástrojů účinně pomáhá k vícenásobnému odformování při zpracovatelských teplotních podmínkách až do 140 °C. Jeho účinek se zlepšuje po cca 4 až 6 vytvrzovacích cyklech, kdy při vývinu tepla během vytvrzování voskový přípravek postupně více pronikává do povrchových pórů formy. Ve stavu tzv. plně voskem nasyceného je dosaženo nejlepšího účinku. Výrobce doporučuje, pro dostatečné zabezpečení proti přilnutí výrobku k formě, kombinaci voskového separátoru společně s použitím naneseného filmu separačního prostředku na bázi polyvinylalkoholu. [27]

- **Odtrhová tkanina**

Jedná se o vrstvu, určenou primárně pro oddělení všech pomocných vrstev od hotového výrobku. Po odtržení zůstává na výrobku strukturovaný povrch, který je připraven pro další

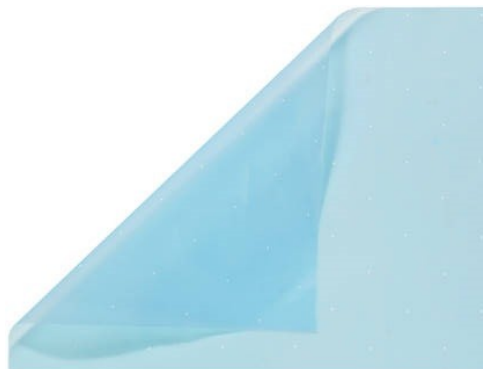
technologické operace. V opačném případě ovšem není nutná žádná další úprava tohoto povrchu výrobku. Materiál této tkaniny, nejčastěji polyamid, je z důvodu snadné manipulace při strhávání velice pevný. Zachovává si však dostatečnou propustnost pro přebytkovou pryskyřici. Obsahuje červené vodící proužky pro snazší manipulaci. [28]



Obr. 27 Odrhová tkanina; dle [29]

- **Děrovaná separační fólie**

V případě, že se u metody vakuové infuze jedná o výrobek složitějších tvarů, menších velikostí nebo výrobků slabší tloušťky, je s výhodou možné použít mezi laminát a odtrhovou tkaninu děrovanou separační fólii. Jedná se o vrstvu, která jednak na výrobku zanechá podstatně hladší povrchovou strukturu, ale také značně napomůže se snadnější separací pomocných vrstev od laminátu, než samotná odtrhová tkanina.

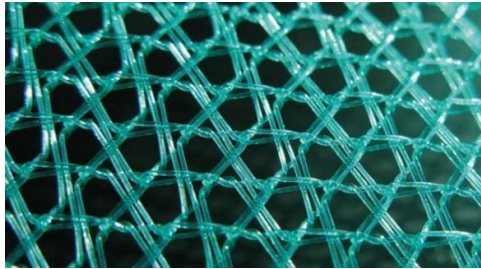


Obr. 28 Děrovaná separační fólie; dle [29]

- **Rozvodná síťka**

Jedná se o síťku nebo tkaninu, která se aplikuje na vrstvu odtrhové tkaniny. Tento materiál zajišťuje modifikaci procesu prosycování jednotlivých vrstev vyztužujících tkanin pryskyřicí. Jelikož se pryskyřice pohybuje cestou nejmenšího odporu, tato rozvodná síťka neboli distribuční médium umožňuje dobré proudění nejprve vzduchu a poté přiváděné

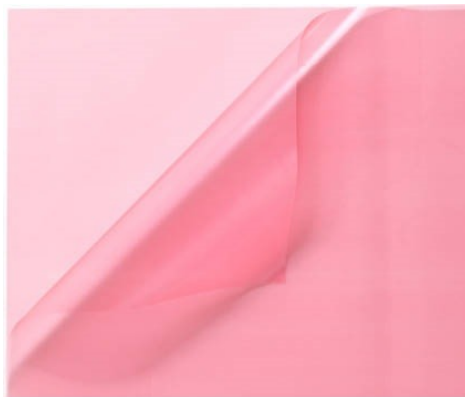
pryskyřice. Až poté, co je pryskyřice rozvedena v rovině po celé ploše předlisku, nastává vlivem tlaku prosycování jednotlivých vrstev vyztužující tkaniny.



Obr. 29 Rozvodná síťka; dle [28]

- **Vakuovací fólie**

Pružná vakuovací fólie je poslední, uzavírající vrstva vakuového systému. Je neporézní a lze ji využít pro infuzi epoxidové i polyesterové pryskyřice. Vyrábí se nejčastěji z polyamidu, ale i polyethylenu. Fólie, určené pro vysoké teploty se vyrábějí z polytetrafluorethylenu. Nejprve je nutné fólii připravit na rozměry cca o 30 % větší než rozměry samotného předlisku z toho důvodu, aby bylo zajištěno dostatečné překrytí a utěsnění všech pomocných materiálů a aby mohla fólie působit na vrstvy rovnoměrným tlakem po celé ploše. [29]



Obr. 30 Vakuovací fólie; dle [29]

- **Komponenty infuzního potrubí**

Při vakuové infuzi byly použity dva typy hadic. Jeden typ hadice je ve skutečnosti stuha, stočená do tvaru trubice, která je využívána po obvodu formy pro vytvoření vakua a případné odsátí přebytečné pryskyřice. Druhý typ hadice slouží pro napojení předlisku k zásobě připravené pryskyřice a také pro odčerpávání vzduchu směrem k vakuové pumpě. Obě hadice jsou připojovány podle potřeby pomocí vakuovacích spojek nebo koncovek.



Obr. 31 Hadice pro dopravu vakuovou infuzi spirálová (vlevo); vakuovací (vpravo); vakuovací spojka (dole); dle [29]

- **Těsnící páska**

Oboustranně lepicí a těsnící hmota ve formě pásky na bázi butylkaučuku. S jejími elastoplastickými vlastnostmi je vhodná pro utěsnění všech vstupních a výstupních hadic i k vytvoření silného a spolehlivého těsnění pružné vakuovací fólie a formy. Je možné ji použít i pro fixaci spirálové hadice po obvodu formy. Vyniká vysokou přilnavostí ke mnoha povrchům a snadnou manipulací. Běžně je odolná až do 150 °C.



Obr. 32 Těsnící páska; dle [29]

- **Fixační lepidlo**

Fixační lepidlo ve spreji pro dočasné vytvoření spoje je určeno pro usnadnění manipulace s vrstvami vyztužující tkaniny a dalších pomocných vrstev na svislých nebo členitých a tvarově složitých místech formy.

- **Vakuová pumpa**

Zařízení pro vytvoření podtlaku pod pružnou vakuovací fólií a následnému přívodu připravené pryskyřice. Dostatečně výkonná pro vytvoření podtlaku 1 bar, který je doporučený pro vakuovou infuzi ve formách pro malé až středně velké výrobky.



Obr. 33 Vakuová pumpa; dle [30]

- **Zachycovač pryskyřice (rezervoár)**

Jedná se o zachycovací nádobu pro přebytečnou pryskyřici, která je umístěna mezi výrobní formou a vakuovou pumpou. Jedná se o ochranný člen infuzního systému, který chrání vakuovou pumpu před případným nasátím přebytečné pryskyřice.



*Obr. 34 Zachycovač pryskyřice;
dle [31]*

5.1.3 Výroba kompozitu pro zkušební tělíska s podélným drátem

V experimentu byla zkušební tělíska vyráběna ze dvou typů vyztužujících skelných tkanin. Postup výroby obou kompozitních desek, ze kterých byly následně tělíska nařezána, je totožný.

Při přípravě formy bylo nutné očistit povrch a vyleštit ho pomocí technického líhu. Poté bylo nutné povrch formy opatřit separačním prostředkem. Pro aplikaci separačního vosku Havel Wax 60-x3 byla použita čistá bavlněná látka, pomocí které byla nanesena na funkční plochu formy. Poté byla vrstva čistou látkou rozleštěna krouživými pohyby do vysokého lesku. Pro zvýšení účinku separačního prostředku byl postup aplikace třikrát zopakován. Před nanesením další vrstvy bylo potřeba cca 10 minut počkat, až se odpaří těkavé podíly rozpouštědla přípravku z předchozí vrstvy.



Obr. 35 Separátor Havel Wax 60-x3

Dále bylo nutné připravit na požadované rozměry vyztužující tkaniny. Z důvodu zachování homogenity výztuže nebyly vrstvy tkanin co do šířky nijak nastavovány a překládány. Šířky vyztužujících tkanin, které byly v laboratoři k dispozici, tak určovaly základní rozměry vyrobených kompozitních desek. Experiment byl navržen tak, aby bylo z kompozitních desek obou typů skelné výztuže vyrobeno pro porovnání vždy 8 zkušebních tělísek s podélně integrovaným drátem a 8 vzorků bez něj. Tkaniny tak byly připraveny na rozměry 520 x 300 mm, aby bylo zajištěno rozložení tělísek i s dostatečnými přídávky na jejich nařezání.

Na čistou a připravenou formu byly následně pokládány jednotlivé vrstvy vyztužující tkaniny, kterých bylo celkem šest. Jelikož bylo navrženo integrovat drát doprostřed zkušebního tělíska, tedy do poloviny jeho tloušťky, byly nejprve položeny první tři vrstvy tkaniny. Jednalo se o měděné dráty o průměru 0,2 mm, vložené mezi 3. a 4. vrstvu tkanin.

Tyto dráty mají simulovat vodiče senzorů, integrovaných do struktury. Dráty byly na koncích uchyceny kusem těsnící pásky pro zafixování jejich polohy dle *Obr. 32*.



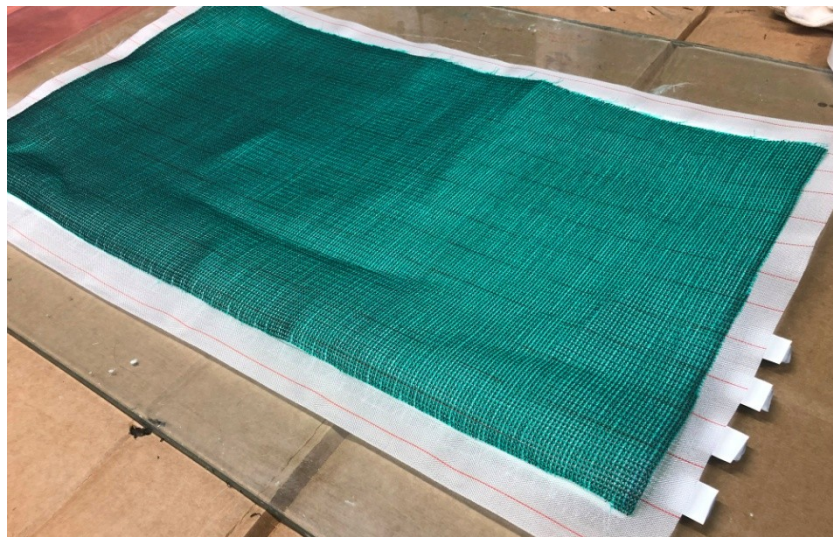
Obr. 36 Umístění podélných drátů mezi 3. a 4. vrstvou obou typů vyztužujících skelných tkanin

Po položení zbývajících třech vrstev tkanin následovalo pokládání pomocných materiálů. Prvním byla jedna vrstva odtrhové tkaniny. Ta byla připravena na rozměry, přesahující vyztužující tkaniny, aby bylo poté možné od hotového laminátu snadno oddělit všechny pomocné materiály.



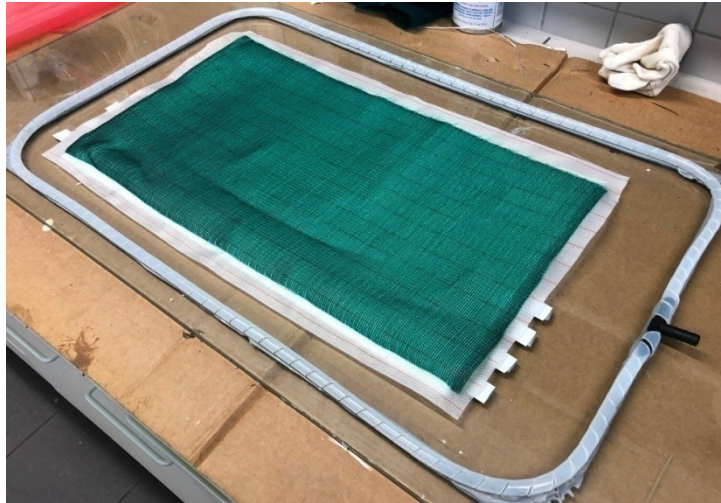
Obr. 37 Umístění odtrhové tkaniny

V dalším kroku byla na materiály umístěna rozvodná síťka. Ta byla připravena se stejnými rozměry, jako vyztužující skelné tkaniny. Pro fixaci rozvodné sítěky na odtrhovou tkaninu bylo možné místy použít lepidlo ve spreji.



Obr. 38 Umístění rozvodné sítěky

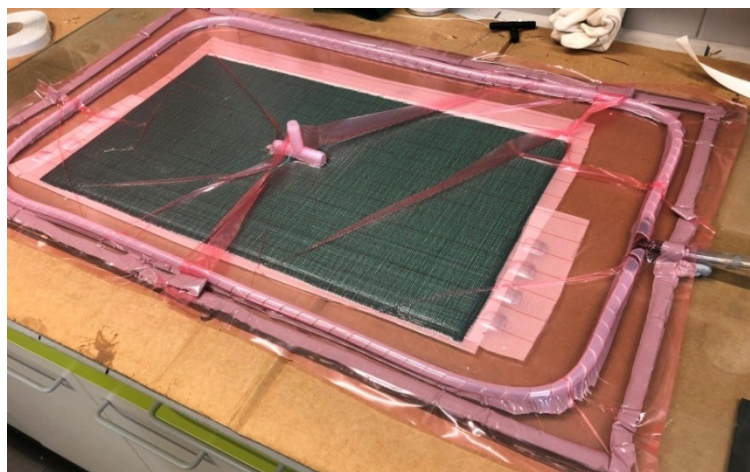
Další operací bylo umístění spirálové hadice pro vytvoření vakua. Její umístění bylo navrženo po celém obvodu výrobku, pro vytvoření rovnoměrného tlaku na celý předlisek. Spirálová hadice byla ustřižena na požadovanou délku a zafixována po obvodu pomocí pryžové těsnící pásky. V místě, kde bude připojena hadice k odsátí vzduchu směrem k vakuové pumpě, byla vložena vakuovací spojka ve tvaru "T".



Obr. 39 Umístění spirálové hadice

Po připravení všech vrstev pomocných materiálů přichází uzavření formy pružnou vakuovací fólií. Ta byla připravena na rozměry s přírůstkem cca 30 % oproti rozměrům výrobku. Fólie byla přilepena na skleněnou formu pomocí těsnicí pásky. Po obvodu bylo nutné na některých místech vytvořit tzv. ucha. To jsou místa slepené těsnicí pásky, která po evakuaci vzduchu zajišťují dokonalé přilnutí fólie k vrstvám tkanin a zajištění působení tlaku rovnoměrně po celé ploše. Ještě před přilepením celé vakuovací fólie a úplným uzavřením formy bylo nezbytné umístit pod fólii doprostřed na rozvodnou síťku "T" spojku, které zde bude zastupovat konektor pro přívod pryskyřice, viz *Obr. 40*.

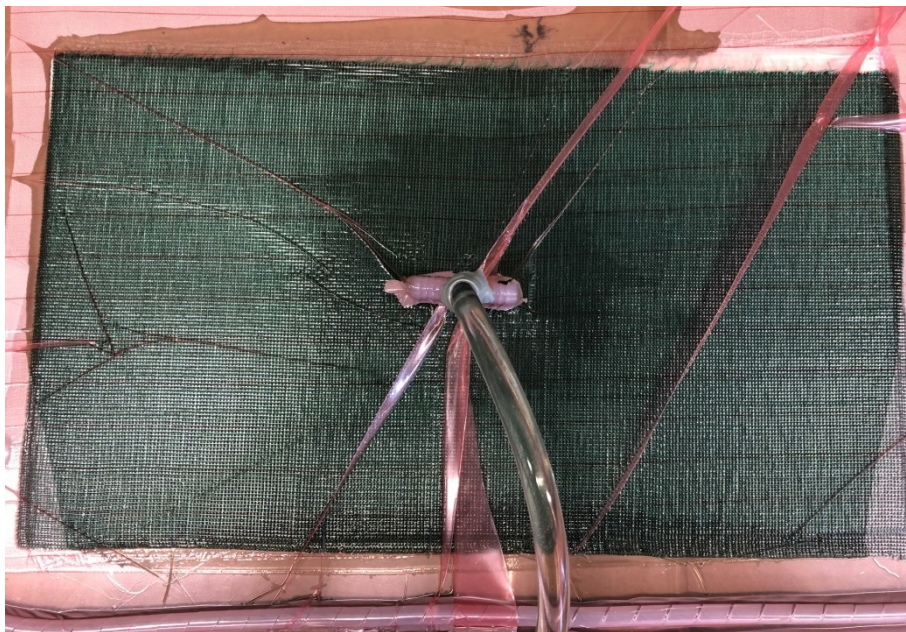
Po přilepení fólie po celém obvodu, připojení odsávací hadice a důkladném utěsnění tohoto kritického místa následovala zkouška těsnosti. Po zapnutí vakuové pumpy, před kterou byl v sestavě zařazen zachycovač pryskyřice, bylo nezbytné poslechem zkontrolovat těsnost celého obvodu přilepené fólie i výstupního konektoru.



Obr. 40 Zaformovaný předlisek

Mezitím bylo potřeba přichystat pryskyřici do zásobníku pro infuzi. Dle výrobcem udávaného poměru bylo smícháno 462 g pryskyřice a 138 g tužidla. U technologie vakuové infuze je nutné brát na zřetel dostatečný přídavek při přípravě pryskyřice (cca o 10 - 20 % více), a to z důvodu ztrát v přívodních hadicích, případně zbytků odsáté pryskyřice v hadici směrem k zachycovači.

Během zkoušky těsnosti vakuového systému byla nakonec k přívodnímu konektoru vprostřed předlisku připojena a dodatečně utěsněna přívodní hadice. Při dočasném zacpání konce přívodní hadice bylo ověřeno že vzduch v žádném jiném místě neuniká. Po důkladném smíchání obou složek směsi a dosažení podtlaku v systému s hodnotou 1 bar byl s opatrností ponořen přívod do pryskyřice a zahájena infuze. Po prosycení všech vrstev a vizuální kontrole, že ze zásobníku již pryskyřice není nasávána, bylo možné přívodní hadici vyjmout a utěsnit její konec samosvornými kleštěmi. Z důvodu dostatečného prosycení a zajištění stálého tlaku po celý čas vytvrzování za pokojové teploty byla vakuová pumpa v provozu cca 10 hodin. Po této době již byly kompozitní desky dostatečně vytvrzené a bylo možné je bezpečně odformovat. Nejprve byla odlepena vakuovací fólie spolu s hadicemi infuzního systému a poté mohla být z povrchu desky za použití mírné síly odstraněna odtrhová tkanina. Nakonec následovala separace vyrobené kompozitní desky od formy pomocí klínek a ostatních přípravků.

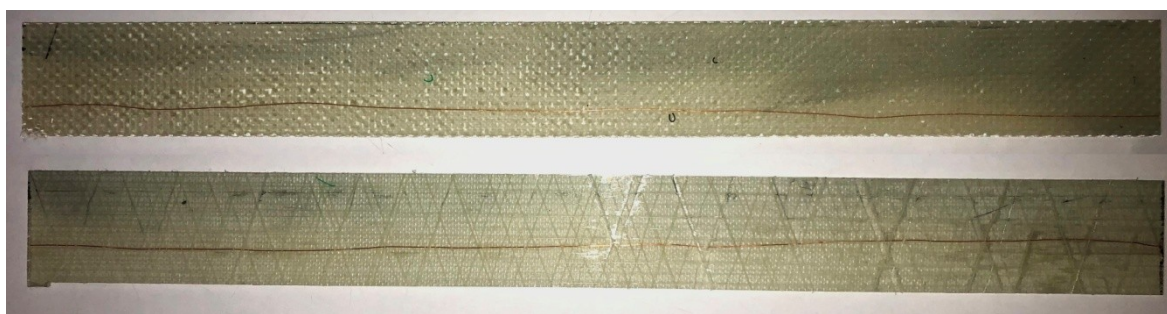


Obr. 41 Průběh prosycování vrstev přiváděnou pryskyřicí

V průběhu infuze na *Obr. 41* je možné zaznamenání několika fází prosycení. V tmavém místě v okolí přívodní hadice jsou již pryskyřicí prosyceny vrstvy vyztužující tkaniny do

hloubky. V okolí, kde je barva světlejšího odstínu je pryskyřice teprve povrchově rozvedena na úrovni rozvodné sítě. V pravém a levém dolním rohu je možné si povšimnout světlých míst, do kterých pryskyřice ještě přivedena ani povrchově není.

Z vyrobených kompozitních desek byla zkušební tělíska nařezána pomocí vodního paprsku tak, aby odpovídala rozměrům, daným normou ČSN EN ISO 527-4 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny. Přesné naměřené rozměry vyrobených tělísek budou zaneseny do tabulky s naměřenými a vypočítanými hodnotami u vyhodnocení výsledků tahové zkoušky.



Obr. 42 Zkušební tělíska s podélným integrovaným drátem pro statickou zkoušku v tahu, vyztužené skelnou tkaninou s plátňovou vazbou (nahore); skelnou jednosměrně orientovanou tkaninou (dole)

5.2 Návrh experimentu s integrovaným insertem

V této části experimentu bylo cílem ověřit, zda při statickém zatížení v tahu může pevnost a soudržnost kompozitní struktury narušit přítomnost cizího tělesa, integrovaného mezi vrstvami vyztužující tkaniny. Toto vložené cizí těleso neboli insert má simulovat situaci, při které by byl v zatěžovaném výrobku integrován senzor reálných rozměrů. Pro výrobu kompozitních desek, ze kterých byla zkušební tělíska s insertem vyráběna, byla opět volena metoda vakuové infuze.

5.2.1 Technologické materiály pro experiment

- **Vyztužující tkaniny**

Jako vyztužující prvky kompozitní dvou vyráběných kompozitních desek byly opět voleny totožné tkaniny, jako v první části experimentu. Jednalo se tedy opět o skelnou jednosměrně orientovanou tkaninu s plošnou hmotností 250 g/m^2 a tkaninu s plátňovou vazbou a plošnou hmotností 280 g/m^2 .

- **Matrice**

Z důvodu dlouhé doby zpracovatelnosti i dlouhé doby vytvrzovacího procesu byl volen odlišný materiál matrice, než tomu bylo v předchozím případě. Výrobce Havel Composites deklarovaná kratší doba vytvrzování rozhodla o volbě následujícího laminačního systému:

- Epoxidová pryskyřice L 285
- Tužidlo 285

Tento laminační systém se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi a je vhodný pro použití se skelnými, uhlíkovými i kevlarovými výztužemi. Po vytvrzení za pokojové teploty jsou výrobky opracovatelné a lze je bez větších obtíží odformovat. Výrobek získá povrch s vysokým leskem. Směs pryskyřice s vybraným tužidlem je hydrofilního charakteru. Je plně kompatibilní s gelcoaty na bázi polyesteru nebo s polyuretanovými barvami. [32]

Tab. 3 Vybrané vlastnosti nevytvrzené pryskyřice L 285 a tužidla 285; dle [32]

Pryskyřice L 285	hodnota	jednotka	poznámka
Hustota	1,18 - 1,23	g/cm ³	při 25 °C
Viskozita	600 - 900	mPa·s	při 25 °C
Gel time	2 - 3	hod	pro vrstvu 1 mm při 25 °C s tužidlem 285
Tužidlo 285			
Hustota	0,94 - 0,97	g/cm ³	při 25 °C
Viskozita	50 - 100	mPa·s	při 25 °C
Míchací poměr pryskyřice : tužidlo = 100 : 40			

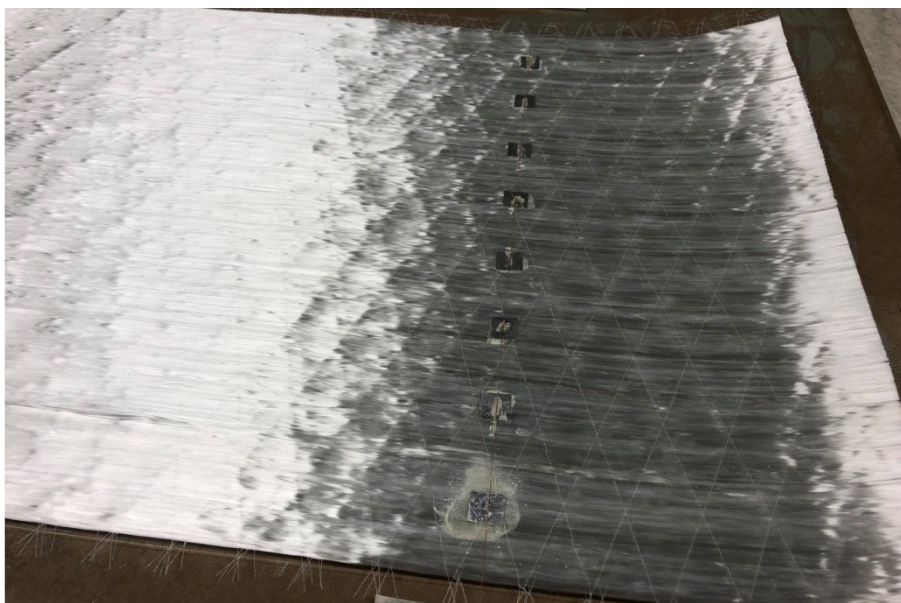
Tab. 4 Orientační mechanické parametry vytvrzené nevyztužené pryskyřice L 285; dle [32]

Vytvrzená nevyztužená pryskyřice L 285	hodnota	jednotka
Mez pevnosti v ohybu	110 - 120	MPa
Modul pružnosti v ohybu	3000 - 3300	MPa
Mez pevnosti v tahu	70 - 80	MPa
Mez pevnosti v tlaku	120 - 140	MPa
Tažnost	5 - 6,5	%
Rázová houževnatost	45 - 55	kJ/m ²

5.2.2 Výroba kompozitu pro zkušební tělíska s integrovaným insertem

Výrobní proces je až na několik málo změn totožný, jako při výrobě tělísek s integrovaným podélným drátem.

Na připravenou očištěnou formu byly aplikovány vrstvy separačního přípravku. Prvními vrstvami byly vyztužující tkaniny, kterých bylo opět šest. Mezi 3. a 4. vrstvou u obou typů skelných tkanin byly tedy integrovány inserty, simulující umístěné reálné senzory. Inserty byly nastříhány z hliníkové fólie tloušťky 0,1 mm na rozměry 10 x 10 mm. Dále byly pomocí technického lihu zbaveny nečistot a mastnoty a umístěny a rozvrženy na 3. vrstvu tkaniny tak, aby bylo možné z vyrobené kompozitní desky nařezat osm zkušebních tělísek s insertem a osm tělísek bez něj. Z důvodu zabezpečení přesné polohy při další manipulaci s vrstvami tkanin byly inserty zajištěny malým množstvím fixačního lepidla ve spreji. Dále byl v příčném směru na osu zkušebního tělíska umístěn měděný drát o průměru 0,2 mm, který měl simulovat kontaktní vodiče ke každému insertu.



Obr. 43 Umístění insertů s příčným drátem mezi 3. a 4. vrstvou vyztužující skelné jednosměrné tkaniny



Obr. 44 Umístění insertů s příčným drátem mezi 3. a 4. vrstvou vyztužující skelné tkaniny s plátňovou vazbou

V dalším kroku byly položeny zbývající tři vrstvy vyztužující tkaniny. Z důvodu horší manipulace při odstraňování odtrhové tkaniny a zbývajících pomocných vrstev u obou vyrobených desek v předchozí části experimentu, byla mezi odtrhovou tkaninu a poslední vrstvu výztuže zařazena děrovaná separační fólie.

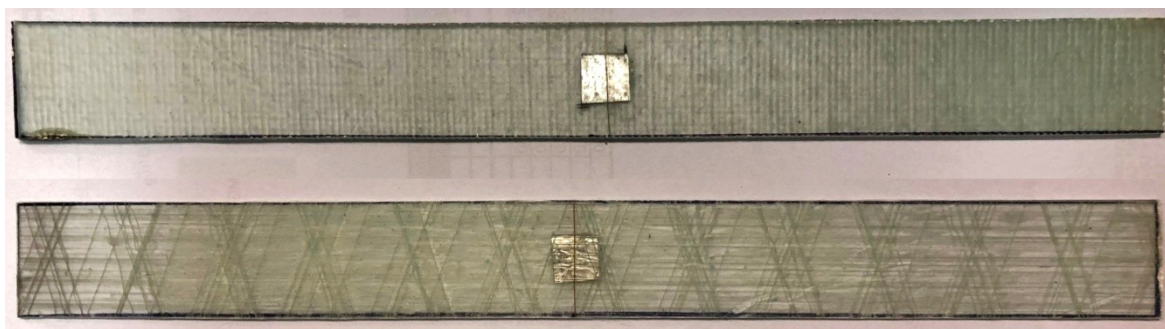


Obr. 45 Aplikace děrované separační fólie pod vrstvou odtrhové tkaniny pro lepší manipulaci při odtrhování a odstranění pomocných materiálů od výrobku

Na děrovanou separační fólii tedy opět následovala odtrhová tkanina a rozvodná síťka. Po přípravě pružné vakuovací fólie, umístění a utěsnění hadic infuzního systému a zkoušce těsnosti byl přichystán laminační systém. Dle daného poměru bylo smícháno 429 g pryskyřice L 285 a 171 g tužidla 285. Použití odlišného laminačního systému znamenalo

zkrácení doby vytvrzování a vyrobené kompozitní desky bylo možné odformovat již po cca 6 hodinách.

Z důvodu požadavku na přesnost umístění integrovaných insertů do středu zkušebního tělíska probíhalo řezání ručně, pomocí úhlové brusky s podporou vody, kvůli zabránění spálených hran.



Obr. 46 Zkušební tělíska s integrovaným insertem a příčným drátem pro statickou zkoušku v tahu, vyztužené skelnou tkaninou s plátňovou vazbou (nahore); skelnou jednosměrně orientovanou tkaninou (dole)

5.3 Stanovení tahových vlastností kompozitní struktury

Statická zkouška tahem byla prováděna na stroji Zwick/Roell Vibrophore 100 a testovacím softwarem testXpert III. Stroj dokáže vyvinout maximální sílu 100 kN, což je pro testování kompozitních zkušebních tělísek dostačující. Zkoušky probíhaly v normálním ovzduší při teplotě 22 °C.

Stanovení tahových vlastností probíhalo dle normy ČSN EN ISO 527-4. Tělíska byla v hydraulických čelistech upínána tlakem 30 bar. Jelikož při tomto upínacím tlaku v průběhu zkoušky tělíska nevyklouzávala z čelistí stroje ani nedocházelo k jejich deformaci, opatření stykových ploch koncovými příložkami nebylo nutné. V souvislosti se znalostí vlastností zkoušeného kompozitního materiálu byl posuv příčnicku pro zkoušku nastaven na rychlost 1 mm/min. Zkouška trvala až do úplného porušení materiálu.

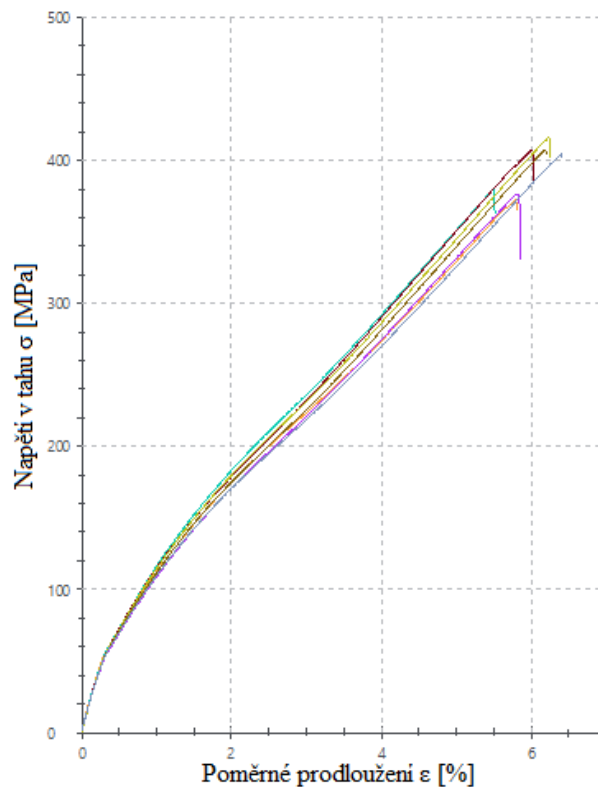
5.3.1 Vyhodnocení změn integrity kompozitní struktury s podélným drátem

V této části experimentálního ověření, zda má přítomnost integrovaných prvků vliv na pevnost a soudržnost kompozitní struktury, byla tedy realizována statická zkouška tahem pro porovnání u osmi zkušebních tělísek s podélným drátem a osmi bez něj. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu a meze pevnosti v tahu vyrobené kompozitní struktury a

rozměry zkušebních tělísek byly uvedeny v následujících tabulkách. Pro každou sadu tělísek byly vykresleny grafy, zobrazující závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení.

Tab. 5 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátnové vazby bez integrovaného drátu

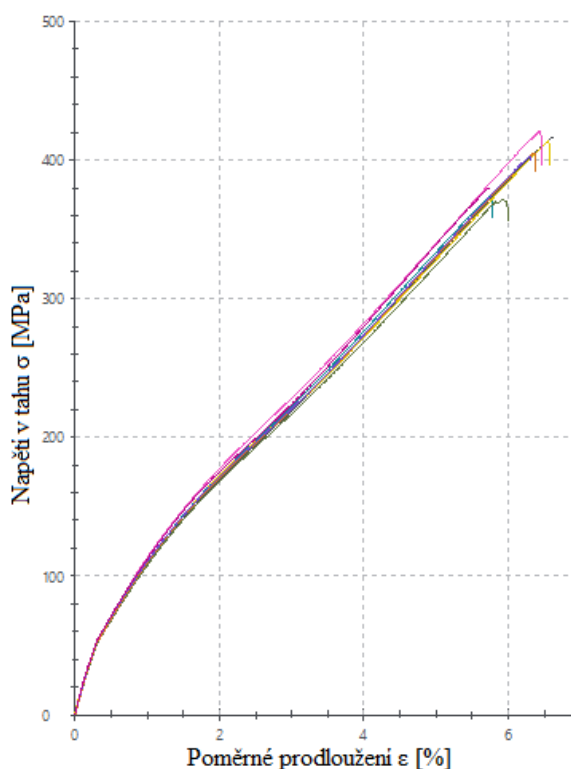
Kompozit s tkaninou plátnové vazby				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	17900	373	1,74	25,14
2	17700	380	1,73	25,22
3	17600	408	1,73	25,16
4	17800	416	1,74	25,22
5	16700	376	1,74	25,21
6	17200	407	1,75	25,22
7	17200	405	1,77	25,17
\bar{x}	17443	395,0	1,743	25,191
s	428	17,9	0,014	0,034
V [%]	2,45	4,53	0,79	0,13



Obr. 47 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátnové vazby bez integrovaného drátu

Tab. 6 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátňové vazby a integrovaným drátem

Kompozit s tkaninou plátňové vazby a integrovaným drátem				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	17200	375	1,81	25,22
2	16900	417	1,80	25,17
3	17200	414	1,77	25,21
4	17200	372	1,79	25,22
5	17400	405	1,78	25,19
6	17800	421	1,74	25,17
7	17600	403	1,78	25,16
8	17400	380	1,76	25,18
\bar{x}	17338	398,4	1,779	25,190
s	277	19,8	0,022	0,024
V [%]	1,60	4,97	1,25	0,09



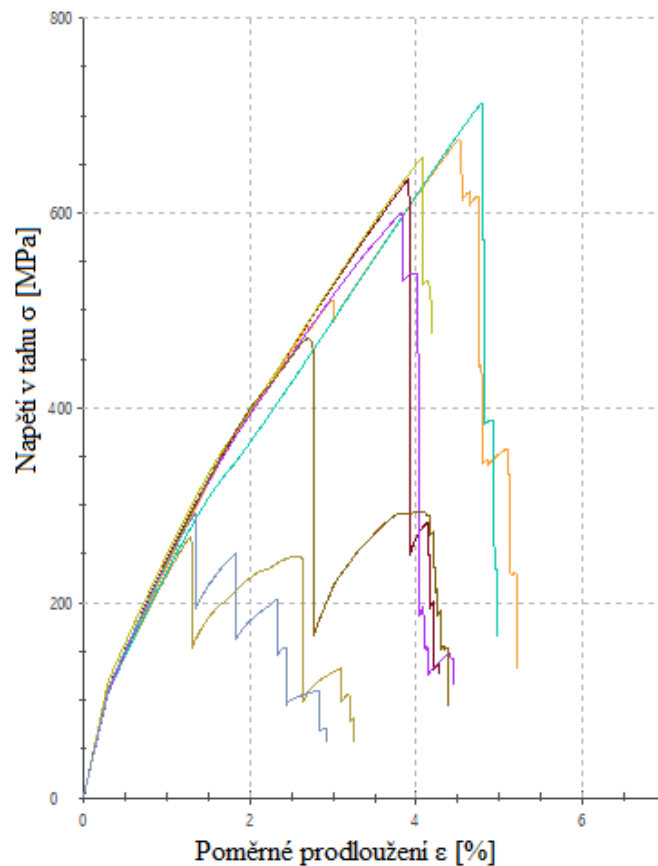
Obr. 48 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátňové vazby a integrovaným drátem

Z výsledků tahových zkoušek kompozitních tělísek, uvedených v tabulkách (Tab. 5 a Tab. 6) je patrné, že při podélné integraci drátu o průměru 0,2 mm mezi vrstvy vyztužující tkaniny s plátňovou vazbou prakticky nedošlo ke změnám modulu pružnosti v tahu ani pevnosti. Z výsledků zkoušek byl vyloučen jeden zkušební vzorek, a to z důvodu špatného upnutí do čelistí zkušebního stroje. Z grafické interpretace závislosti napětí v tahu

a poměrného prodloužení zbývajících vzorků není patrný žádný pokles napětí při zatěžování, zaznamenané tahové křivky tak mají plynulý průběh bez lokálních výkyvů.

Tab. 7 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou bez integrovaného drátu

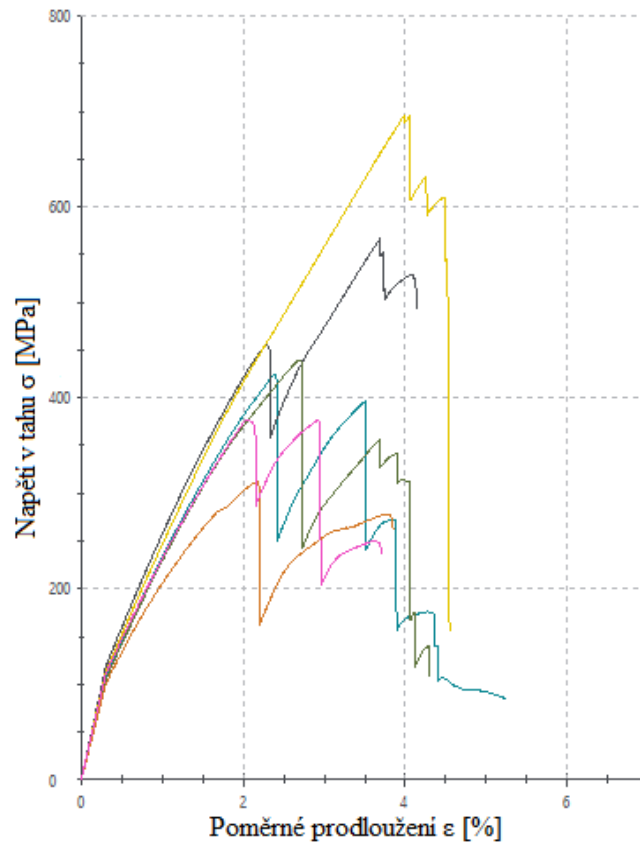
Kompozit s jednosměrnou tkaninou				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	36100	267	1,24	25,01
2	36000	676	1,25	25,04
3	35800	712	1,25	25,04
4	37500	634	1,24	25,08
5	40400	657	1,23	25,02
6	36300	599	1,25	25,00
7	37200	471	1,26	24,94
8	36900	292	1,20	25,04
\bar{x}	37025	538,5	1,240	25,021
s	1493	175,2	0,007	0,015
V [%]	4,03	32,53	0,56	0,06



Obr. 49 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou bez integrovaného drátu

Tab. 8 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou a integrovaným drátem

Kompozit s jednosměrnou tkaninou a integrovaným drátem				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	35900	425	1,23	25,08
2	39200	567	1,12	25,04
3	37400	697	1,20	25,08
4	34800	440	1,25	25,09
5	33200	313	1,29	25,11
6	36500	377	1,21	25,02
\bar{x}	36167	469,8	1,22	25,07
s	2077	139,4	0,06	0,03
V [%]	5,74	29,67	4,70	0,13

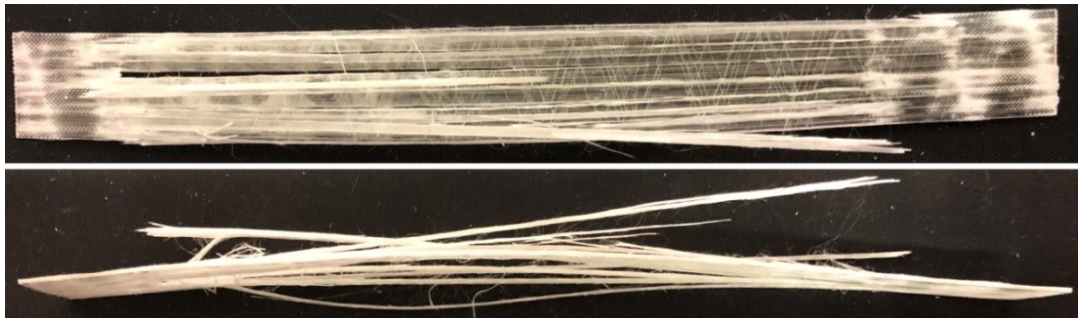


Obr. 50 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou a integrovaným drátem

Při porovnání naměřeného modulu pružnosti v tahu u kompozitu, u kterého byla jako vyztužující materiál použita skelná jednosměrná tkanina, se výsledky v případě struktury s podélně integrovaným drátem významně neliší od skupiny zkušebních tělísek bez tohoto drátu. U struktury s integrovaným drátem je možné pozorovat nepatrný pokles

maximálního napětí v tahu. Nicméně se jedná o pokles řádově v desítkách MPa, což s přihlédnutím ke značné směrodatné odchylce je možné považovat za zanedbatelné změny. Při pohledu na grafické znázornění průběhu tahové zkoušky u obou případů jednosměrné výztuže obsahují křivky místní poklesy napětí a v některých případech značně kolísavý průběh při zatěžování. To bylo způsobeno postupným trháním jednotlivých podélných vláken vyztužující tkaniny, orientovaných pouze v jednom směru.

Na *Obr. 51* a *Obr. 52* jsou zobrazena zkušební tělíska po tahové zkoušce s jejich charakteristickými formami porušení. Pro kompozit s tkaninou s jednosměrnou orientací bylo při tahovém zatížení typické postupné rozštěpování až do úplné ztráty soudržnosti. Kompozitní zkušební tělíska s tkaninou s plátňovou vazbou se vyznačovala náhlým porušením materiálu a lomem pod úhlem cca 45°.



Obr. 51 Charakteristické porušení zkušebního tělíska kompozitu s jednosměrně orientovanou výztuží



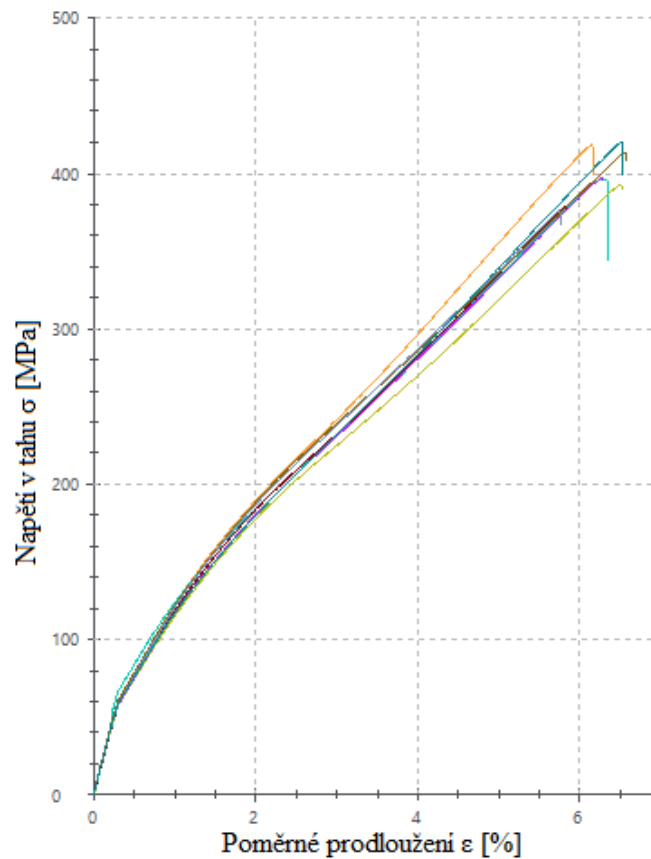
Obr. 52 Charakteristické porušení zkušebního tělíska kompozitu s tkaninou plátňové vazby (nahore); detailní pohled (dole)

5.3.2 Vyhodnocení změn integrity kompozitní struktury s insertem

V této části experimentu byla pro ověření strukturální soudržnosti provedena statická zkouška tahem rovněž pro dvě sady zkušebních tělísek po osmi kusech, kde byl do jedné sady integrován hliníkový insert s příčným drátem.

Tab. 9 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátnové vazby bez insertu

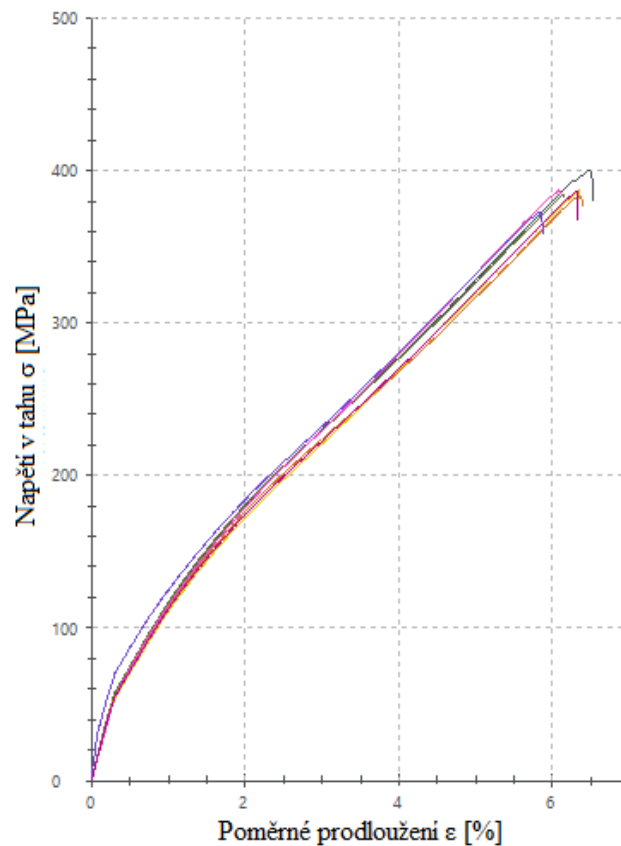
Kompozit s tkaninou plátnové vazby				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	19600	418	1,83	24,53
2	23700	396	1,85	25,15
3	19500	379	1,77	24,45
4	19200	393	1,82	25,23
5	19100	397	1,80	24,15
6	20200	414	1,73	25,05
7	19500	376	1,71	23,98
8	19600	420	1,79	24,58
\bar{x}	20050	399,1	1,788	24,640
s	1511	16,9	0,049	0,463
V [%]	7,54	4,24	2,72	1,88



Obr. 53 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátnové vazby bez insertu

Tab. 10 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátňové vazby a insertem

Kompozit s tkaninou plátňové vazby a insertem				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	19200	400	1,79	24,58
2	18200	387	1,88	23,58
3	19300	384	1,84	24,25
4	18800	384	1,81	25,05
5	18000	387	1,81	24,54
6	19600	373	1,78	24,56
7	18500	387	1,84	24,87
\bar{x}	18800	386,0	1,821	24,490
s	597	7,9	0,034	0,476
V [%]	3,18	2,05	1,89	1,94

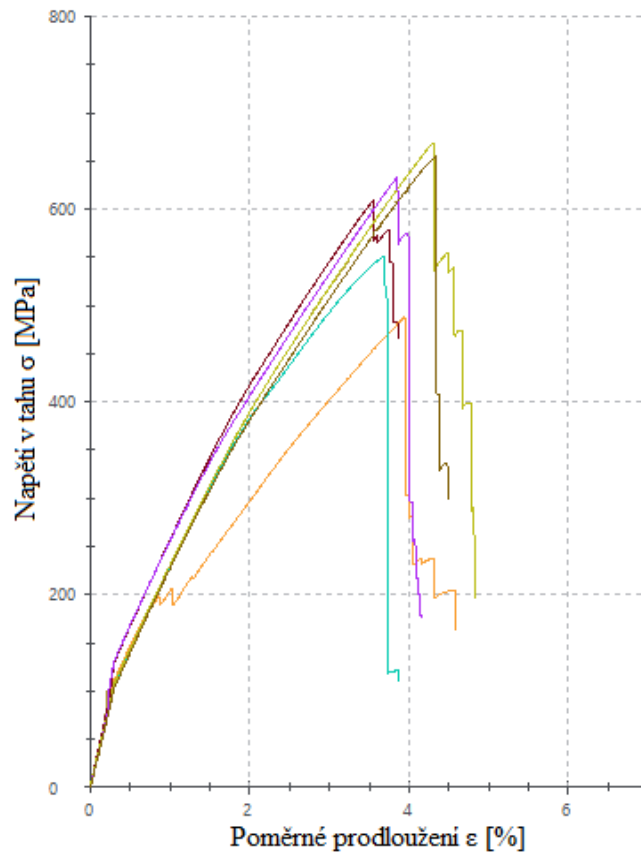


Obr. 54 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátňové vazby a insertem

Ze zjištěných hodnot lze konstatovat, že i v případě hliníkového insertu s tloušťkou 0,1 mm, integrovaného mezi vrstvy vyztužující tkaniny, nedošlo k nijak významnému ovlivnění vrstev nebo poklesu pevnosti při statickém zatěžování v tahu.

Tab. 11 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou bez insertu

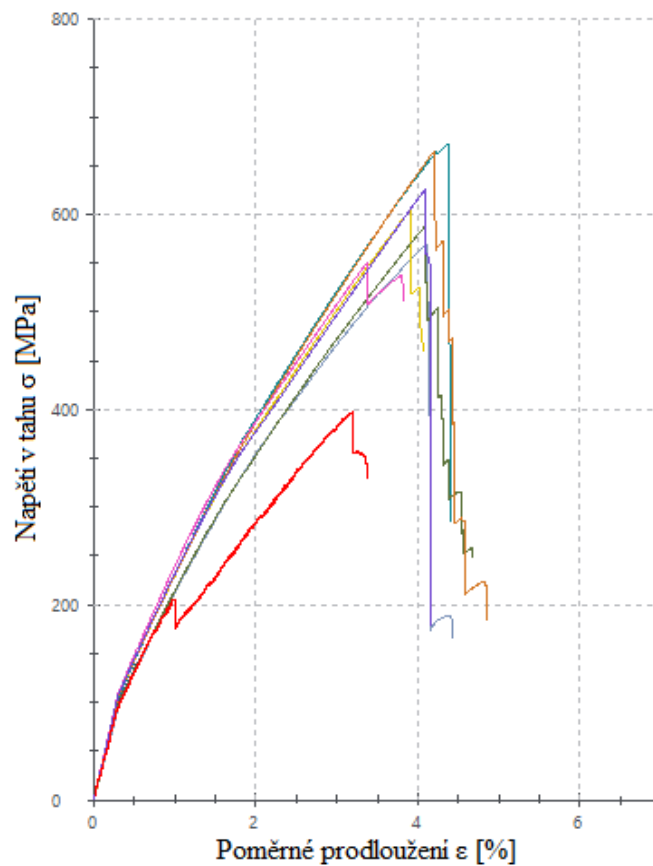
Kompozit s jednosměrnou tkaninou				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	37400	488	1,20	25,31
2	35800	551	1,25	25,13
3	39600	610	1,28	25,84
4	35200	669	1,24	25,54
5	46400	633	1,29	25,16
6	34600	656	1,29	25,16
\bar{x}	38167	601,2	1,258	25,357
s	4417	69,3	0,035	0,282
V [%]	11,57	11,53	2,82	1,11



Obr. 55 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou bez insertu

Tab. 12 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou a insertem

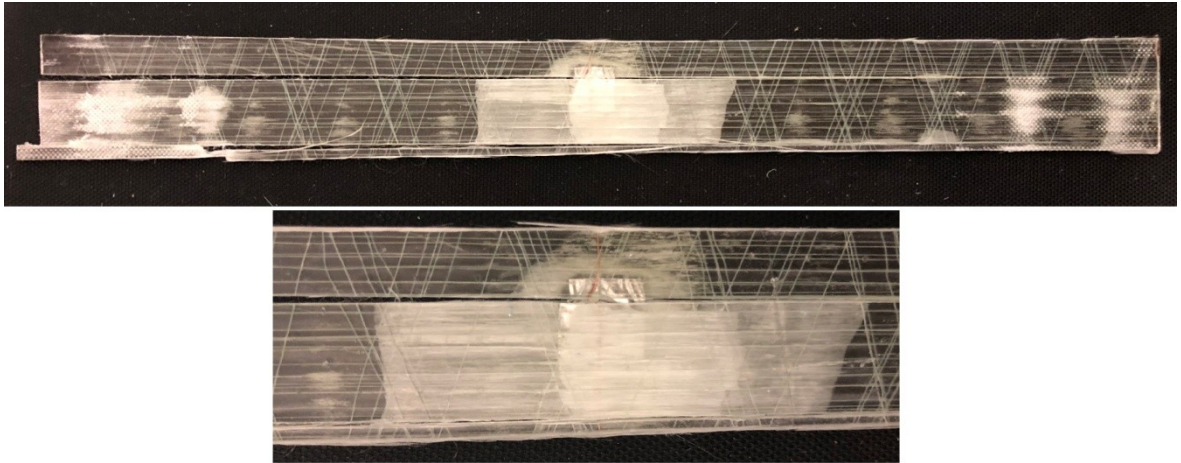
Kompozit s jednosměrnou tkaninou a insertem				
Č. měření	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
1	31500	570	1,28	25,84
2	34600	672	1,23	25,54
3	35500	604	1,33	24,24
4	32300	588	1,36	25,09
5	35900	666	1,27	25,01
6	36000	551	1,24	25,12
7	35400	625	1,26	25,45
\bar{x}	34457	610,9	1,281	25,184
s	1819	46,2	0,047	0,510
V [%]	5,28	7,56	3,70	2,03



Obr. 56 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou a insertem

U kompozitní struktury, vyztužené jednosměrně orientovanou tkaninou, je taktéž ze zjištěných hodnot tahové zkoušky neprůkazné, že by integrovaný insert, simulující reálný senzor, mohl ovlivnit pevnost materiálu v tahu. Nicméně je nutné poznamenat, že v

jediném případě bylo nutné výsledek zkoušky vyloučit z tabulky hodnot, jelikož v okolí insertu došlo k lokální delaminaci vrstev. Průběh této zkoušky je na *Obr. 56* vyznačen červenou barvou. Po detailnějším prozkoumání zmíněného deformovaného zkušebního tělíska byl vyvozen závěr, že k lokální delaminaci vrstev došlo z důvodu nedbalé manipulace při rozmístování a fixaci hliníkového insertu, a to konkrétně nadměrného použití fixačního lepidla ve spreji.



Obr. 57 Porušení zkušebního tělíska kompozitu s jednosměrnou tkaninou a insertem lokální delaminací vrstev (nahore); detailní pohled (dole)

6 INTEGRACE SENZORU DO STRUKTURY A OVĚŘENÍ JEHO FUNKČNOSTI

Z předchozího experimentálního ověření bylo dokázáno, že integrace cizích prvků do kompozitních struktur, které simulovaly reálné senzory včetně jejich vodičů, nevykazovala negativní vlivy na celkovou pevnost či soudržnost materiálu. V následující kapitole byl zrealizován návrh integrace speciálního fóliového odporového tenzometru, který je výrobcem a svou konstrukcí předem určený pro zakomponování do vláknových kompozitů.

Jako již bylo zmíněno, jedním z faktorů, kterým je třeba se nevyhnutelně zabývat, je posouzení funkčnosti samotného senzoru po integračním procesu. Senzor zabudovaný uvnitř materiálu by měl podávat relevantní výstupní data, která by neměla být integrací nijak zkreslena či jinak ovlivněna.

Během této experimentální studie vybraného speciálního tenzometru, integrovaného do struktury kompozitu, byly jeho výstupní signály deformačních změn při tahovém zatěžování srovnány s měřením pomocí lineárního fóliového tenzometru, připevněného na povrchu téhož kompozitního zkušební tělíska.

6.1 Návrh experimentu s integrovaným senzorem

Pro experiment byla z uvedených materiálů vyrobena čtyři kompozitní zkušební tělíska. Dvě z vyztužující jednosměrně orientované tkaniny a dvě tělíska z tkaniny s plátňovou vazbou. Obě použité tkaniny již byly popsány v předchozích kapitolách. Jako matrice byl použit laminační systém od Havel Composites, a to konkrétně epoxidová pryskyřice s označením LH 385 a tužidlo H 535.

Tab. 13 Vybrané vlastnosti nevytvrzené pryskyřice LH 385 a tužidla H 535; dle [33]

Nevytvrzená pryskyřice LH 385	hodnota	jednotka	poznámka
Hustota	1,12 - 1,16	g/cm ³	při 25 °C
Viskozita	400 - 800	mPa·s	při 25 °C
Doba zpracovatelnosti	25 - 30	min	při 25 °C s tužidlem H 535
Tužidlo H 535			
Hustota	0,98 - 1,04	g/cm ³	při 20 °C
Viskozita	100 - 350	mPa·s	při 25 °C
Míchací poměr pryskyřice : tužidlo = 100 : 35			

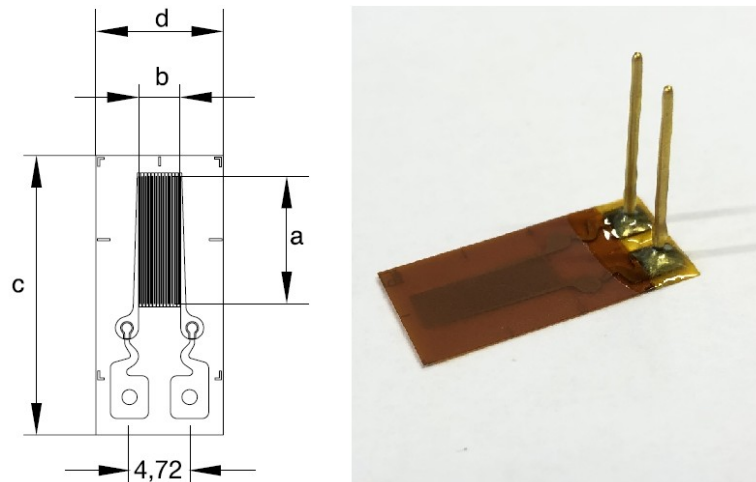
6.1.1 Integrovaný fóliový tenzometr LI66

Tenzometr LI66-10/350, který byl zvolen pro integraci do struktury, byl výrobcem HBM zařazen do kategorie speciálních tenzometrů. Splňuje speciální konstrukční a mechanické požadavky pro měření v předurčeném prostředí kompozitu. Nejvýraznějším rysem tohoto tenzometru jsou dva vertikálně připevněné kontaktní kolíky pro připojení vodičů, které jsou 15 mm vysoké, každý o průměru 0,6 mm. Pozlacené koncovky kolíků jsou opatřeny speciální izolací, která senzor chrání a umožňuje jej integrovat i např. mezi elektricky vodivá uhlíková vlákna. Tenzometr je v zásadě vhodný pro všechny současné způsoby zpracování kompozitů i použité materiály (nasycený prepreg i suché tkaniny) a jeho teplotní odolnost je do 200 °C.

Na rozdíl od obvyklé aplikace tenzometrů na povrchu součástí, kde se k přilepení používá speciálních lepidel, je integrační tenzometr k materiálu na obou stranách spojen matricí pryskyřice během výroby kompozitu. Je vyžadována nejlepší možná adheze, které je možné dosáhnout mezi ploškami tenzometru a pryskyřicí, aby se napětí přenášelo, pokud možno bez ztrát, přímo na měřicí mřížku. Toto je zajištěno speciální předúpravou krycí i nosné fólie tenzometru. [34]

Tab. 14 Základní charakteristiky senzoru LI66; dle [34]

LI66-10/350		hodnota	jednotka
Jmenovitý odpor		350	Ω
Max. budící napětí		2,5	V
Rozměry	Měřicí mřížka	a	10 mm
		b	3,8 mm
	Nosič mřížky	c	22 mm
		d	10 mm
Měřicí mřížka	materiál	Konstantan	
	tloušťka	5	μm
Nosič mřížky	materiál	Polyimid	
	tloušťka	55 ± 5	μm
Základní fólie	materiál	Polyimid	
Celková tloušťka senzoru		95 ± 15	μm



Obr. 58 Schéma tenzometru LI66 (vlevo); tenzometr LI66 (vpravo); dle [34]

6.1.2 Výroba kompozitu pro zkušební tělíska s tenzometrem

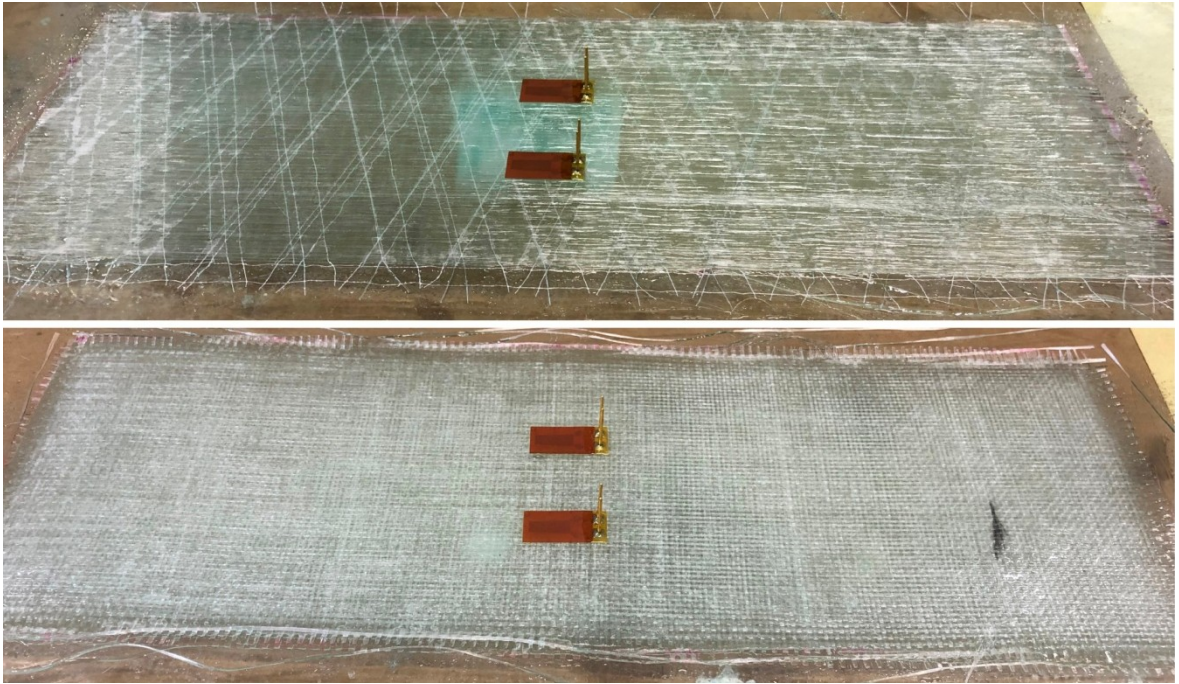
Jako výrobní technologie kompozitu pro zkušební tělíska s integrovaným tenzometrem byla zvolena ruční laminace. Důvody pro volbu této metody byly bezpečnější kontrola výrobního procesu a větší jistota při opatrné manipulaci se senzory během jejich ukládání a fixování mezi vrstvy vyztužující tkaniny a během jejich postupného prosycování.

Jelikož bylo k dispozici pět fóliových tenzometrů pro integraci, byla volena výroba dvou zkušebních tělísek od každého typu vyztužující tkaniny. Ty byly nastříhány na rozměry 100 x 300 mm, opět v počtu šesti vrstev. Na očištěnou skleněnou formu, opatřenou separátorem Havel Wax 60-x3, byly postupně ukládány nejprve tři vrstvy vyztužující tkaniny.

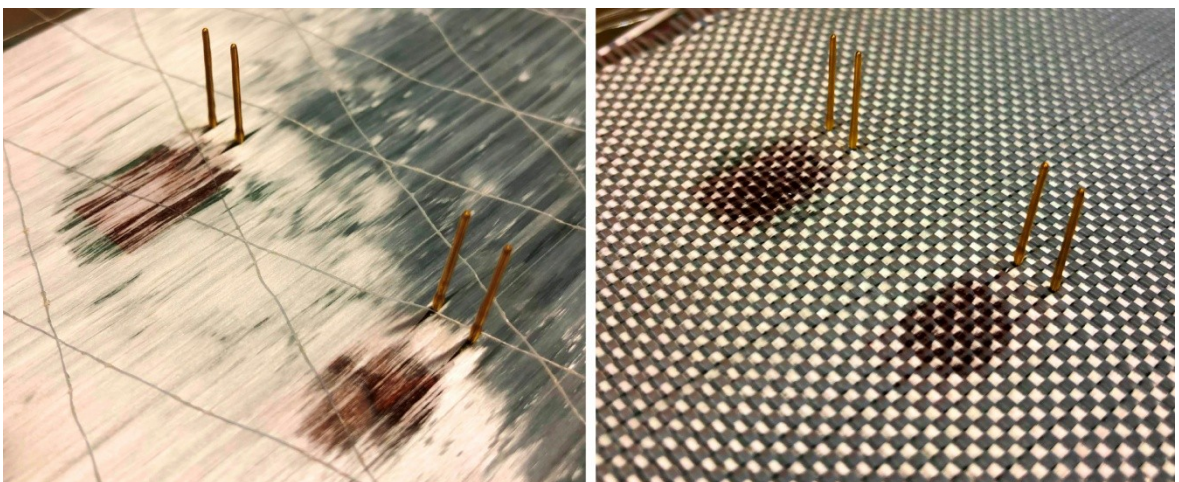
Na každou vrstvu bylo nutné nanést štětcem laminační pryskyřici. Ta byla připravena dle stanoveného poměru v množství 59 g pryskyřice LH 385 a 21 g tužidla H 535. Nejprve byla v malém množství ověřena doba želatinace. Ta odpovídala cca 25 minutám, kterou uváděl výrobce s použitím příslušného tužidla. Tak bylo stanoveno zpracovatelské okno, během kterého bylo možné bezpečně nanášet pryskyřici a prosycovat jí tkaninu.

Po nanesení malého množství štětcem byla pryskyřice distribuována po celé ploše tkaniny pomocí kovových laminačních válečků s příčným a podélným rýhováním. Tím byly postupně vrstvy tkaniny prosycovány a zároveň byla přebytečná pryskyřice pomocí válečků vytlačována do stran mimo tkaninu. Na třetí vrstvu tkaniny byly pokládány tenzometry. Jelikož byly pokládány na tkaniny již nasycené pryskyřicí, nebylo potřeba zajišťovat jejich polohu dalšími fixačními lepidly nebo podobnými přípravky. S výhodou

bylo možné využít lepkavého povrchu tkaniny s pryskyřicí a případně dodatečně upravit přesnou polohu tenzometrů. Dále následovalo pokládání zbylých třech vrstev tkanin. Před položením čtvrté vrstvy tkaniny byly plošky tenzometrů opatřeny kapkou pryskyřice pro zaručení dokonalé adheze. Zbylé vrstvy byly pokládány s opatrností při propichování tkanin vertikálně připevněnými kontaktními kolíky, které nakonec vyčnívaly nad povrch kompozitu.



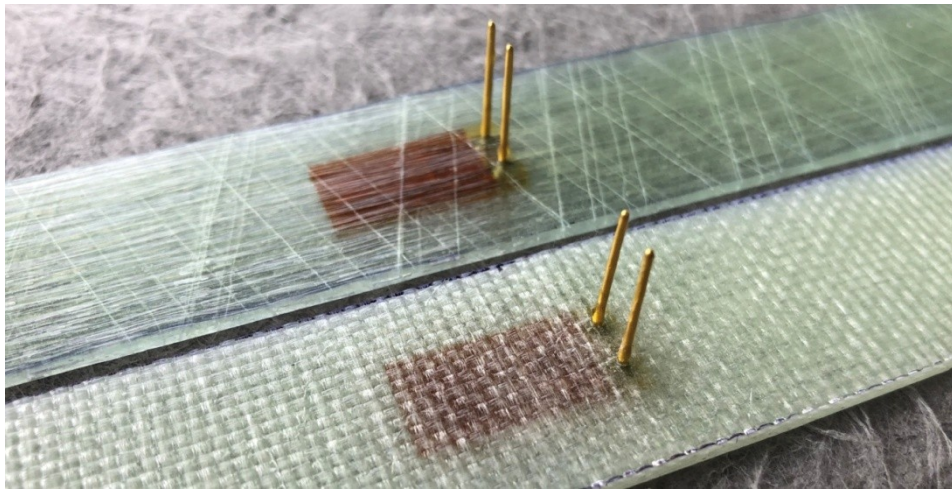
Obr. 59 Tenzometry LI66 umístěné na 3. vrstvě jednosměrné tkaniny (nahore); tkaniny s plátňovou vazbou (dole)



Obr. 60 Detailní pohled na 4. vrstvu tkaniny, propíchnutou kolíky senzoru LI66

Vyrobené kompozitní desky, které vytvrzovaly při běžné teplotě okolí cca 22 °C přes noc do druhého dne, byly odseparovány od formy. Následovalo nařezání celkem čtyř

zkušebních tělísek pro statickou zkoušku tahem pomocí ruční úhlové brusky, jako se osvědčilo v předchozím experimentu.



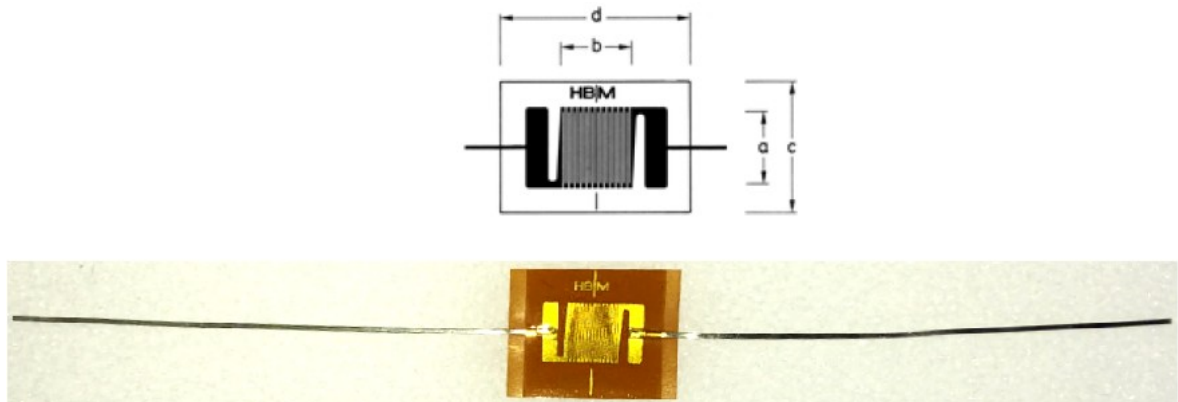
Obr. 61 Detailní pohled na připravená zkušební tělíska s integrovaným tenzometrem LI66 pro statickou zkoušku tahem

6.1.3 Instalace vnějšího tenzometru LY21 a průběh experimentu

Pro ověření funkčnosti a spolehlivosti integrovaného tenzometru byl na povrch zkušebních tělísek instalován komparační fóliový tenzometr LY21-3/120. LY je základní univerzální řadou lineárních fóliových tenzometrů s jednou měřicí mřížkou pro měření deformací v jednom směru. Na cca 1,5 mm dlouhé integrované pájecí jazýčky jsou připojené výstupní měděné poniklované vodiče s délkou cca 30 mm, které slouží připojení izolovaných vodičů do měřicího obvodu. [34]

Tab. 15 Základní charakteristiky senzoru LY21; dle [34]

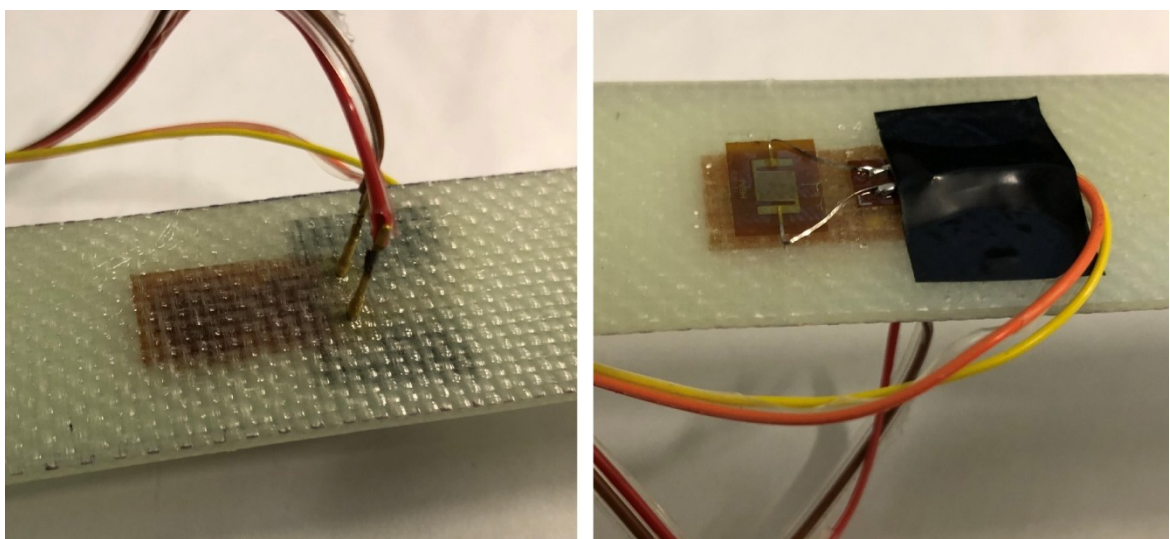
LY21-3/120			hodnota	jednotka
Jmenovitý odpor			120	Ω
Max. budící napětí			6	V
Rozměry	Měřicí mřížka	a	3	mm
		b	2,8	mm
	Nosič mřížky	c	7,5	mm
		d	10	mm
Měřicí mřížka	materiál	Konstantan		
	tloušťka	3,8	μm	
Nosič mřížky	materiál	Polyimid		
	tloušťka	55 ± 5	μm	
Základní fólie	materiál	Polyimid		
Celková tloušťka senzoru			81 ± 22	μm



Obr. 62 Schéma tenzometru LY21 (nahore); tenzometr LY21 (dole); dle [34]

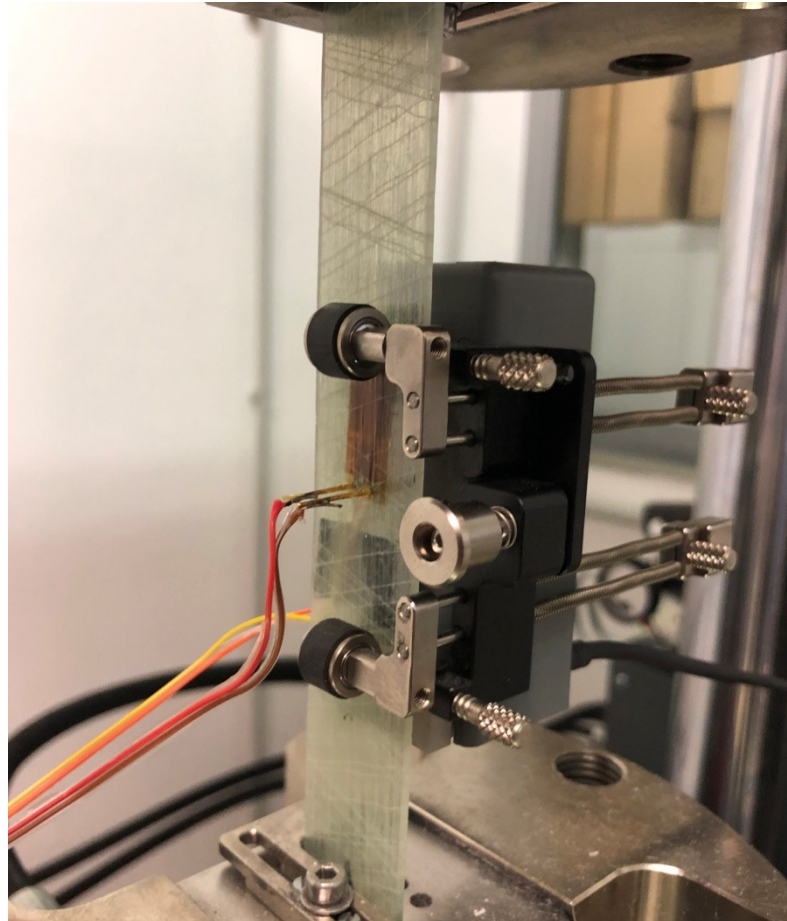
Vnější fóliové tenzometry byly na zkušební tělíska nainstalovány odborným technikem, pomocí vteřinového lepidla. Plocha zkušebního tělíska v místě lepení byla nejprve jemně obroušena a očištěna, aby byla dosažena co nejlepší adheze mezi nosnou fólií tenzometru a kompozitním materiálem.

Ke kontaktům obou tenzometrů byly následně připájeny vodiče. Oba tenzometry každého zkušebního tělíska byly zapojeny do obvodu čtvrtinového Wheatstoneova můstku. Jelikož se jednalo o zkoušku krátkodobou, v porovnání např. s únavovou zkouškou, nedocházelo k významnému kolísání teplot v místnosti a nebylo tak nutné do měřicího obvodu zapojovat členy pro kompenzaci teplotní roztažnosti. Pro zaznamenávání měřených dat sloužila univerzální šestnáctikanálová měřicí ústředna MX1615, určená pro tenzometrická měření, spolu se softwarem Catman Easy od společnosti HBM.



Obr. 63 Připojené vodiče ke kontaktním kolíkům integrovaného tenzometru LI66 (vlevo); přilepený a připojený tenzometr LY21 na povrchu zkušebního tělíska

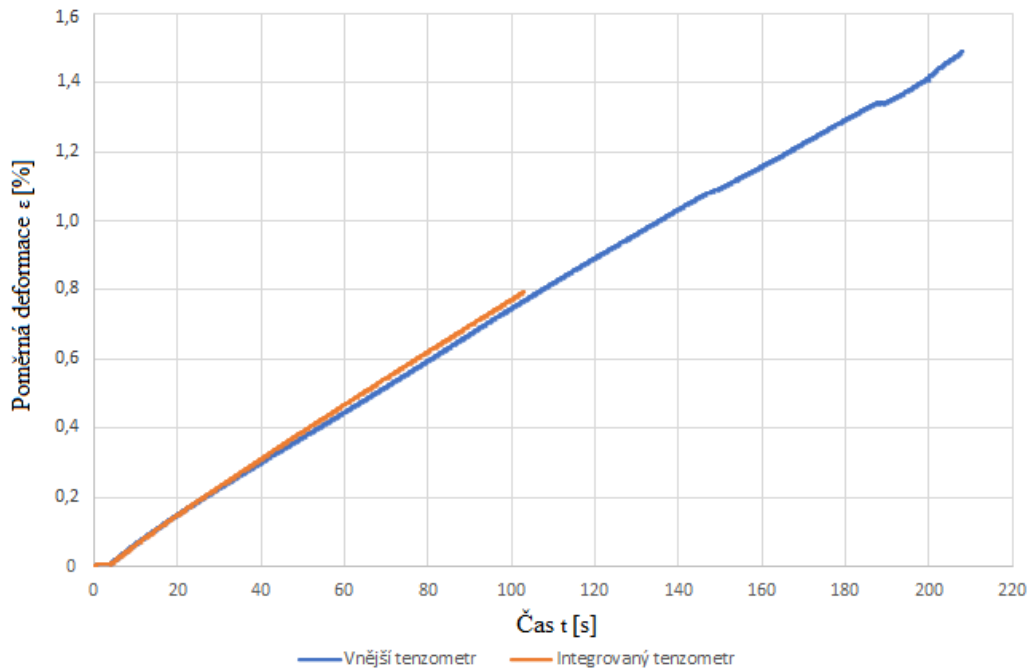
Pozice tenzometrů na povrchu musela být zvolena do středu tělíska, obdobně jako u integrovaného tenzometru. Důvodem bylo bezpečné upevnění extenzometru na tělísko během prvotního měření modulu pružnosti v tahu tak, aby nedošlo ke kontaktu s přípojenými vodiči tenzometrů a ovlivnění samotného měření.



Obr. 64 Upnuté zkušební tělísko v čelistech zkušebního stroje s připojenými vodiči tenzometrů a připojeným extenzometrem

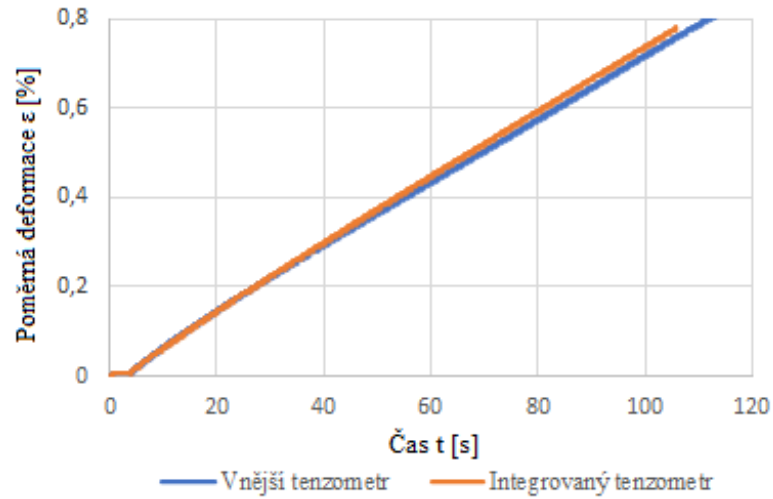
Zkouška trvala až do úplného porušení materiálu, přičemž pomocí měřicí sestavy s příslušnými použitými tenzometry byla zaznamenána poměrná deformace materiálu v závislosti na čase. Získaná data pro porovnání deformací vnějšího a integrovaného tenzometru byla zpracována a následně graficky interpretována.

6.2 Ověření funkčnosti tenzometru a vyhodnocení výsledků

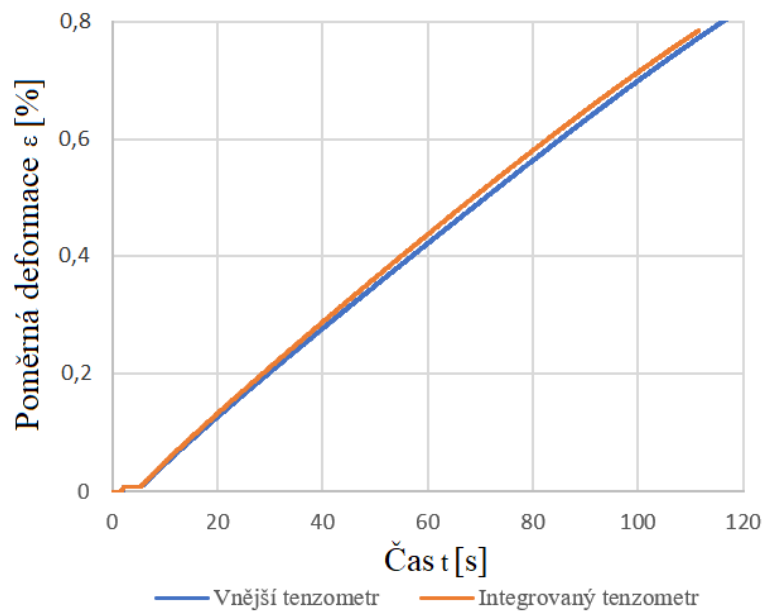


Obr. 65 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s tkaninou plátňové vazby získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělísko 1

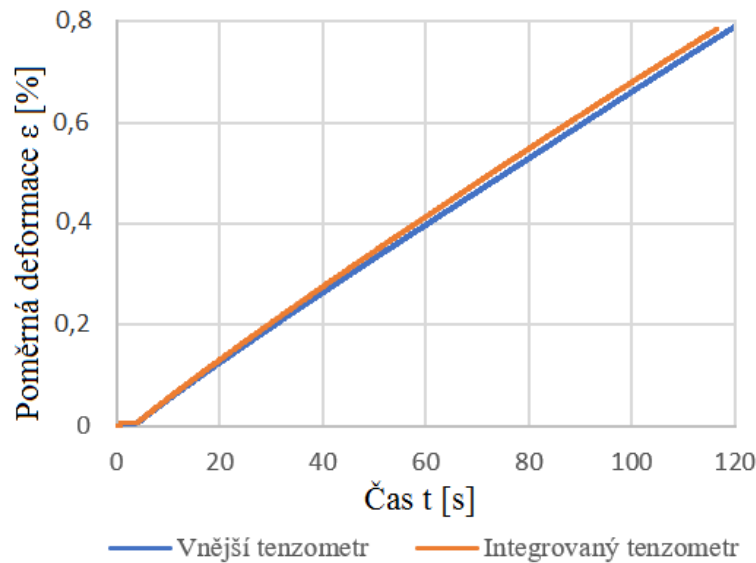
Při pohledu na grafickou interpretaci závislosti poměrné deformace na čase je zřejmé, že u prvního tělíska kompozitu s tkaninou plátňové vazby došlo v čase 100 s k takovému porušení integrovaného tenzometru, které zapříčinilo ztrátu signálu s měřicí jednotkou. Stalo se tak při poměrné deformaci materiálu cca 0,8 %. Vnější tenzometr poté ztratil signál při deformaci 1,5 %. Nicméně pro účel analýzy ověření funkčnosti integrovaného tenzometru byla tato získaná data dostatečná a vyhovující. Tento trend ztráty signálu integrovaného a poté i vnějšího tenzometru byl obdobný u všech třech zbývajících zkušebních tělísek. V následujících grafech jsou proto interpretována data zmíněných závislostí pouze do momentu první ztráty signálu.



Obr. 66 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s tkaninou plátnové vazby získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělísko 2



Obr. 67 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s jednosměrnou tkaninou získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělísko 3



Obr. 68 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s jednosměrnou tkaninou získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělísko 4

Z grafických závislostí poměrné deformace na čase u obou dvou kompozitních zkušebních tělísek, vyrobených z vyztužující tkaniny s plátňovou vazbou, stejně tak u dvou tělísek s tkaninou jednosměrně orientovanou, je možné pozorovat obdobně stoupající tendenci křivek výstupních signálů vnějších i integrovaných tenzometrů. Tyto zjištěné skutečnosti značí, že byla úspěšně ověřena funkčnost a spolehlivost použitých fóliových tenzometrů, integrovaných ve struktuře kompozitu. Ztráta výstupního signálu integrovaného tenzometru, která přišla dříve, než tomu bylo u povrchově lepeného tenzometru, mohla být zapříčiněna porušením kontaktních kolíků nebo jejich utržením z nosné mřížky tenzometru. Rovněž také mohlo dojít k rychlejšímu porušení integrovaného tenzometru kvůli přenášenému napětí z hostitelské struktury přes celý jeho povrch, oproti vnějšímu tenzometru, přilepenému na povrchu.

Tělíska s vyztužující tkaninou s plátňovou vazbou nebyla ani v jednom případě přetržena v místě integrovaného senzoru. U kompozitů s jednosměrnou tkaninou došlo vlivem rozvláknění a rozštěpení celého tělíska během zkoušky také k přímému a viditelnému porušení obou tenzometrů.

ZÁVĚR

V rešerši diplomové práce byly charakterizovány vyztužující materiály a matrice, jakožto hlavní součásti kompozitních struktur, včetně popisu jejich strukturálních chování během procesu vytvrzování. Dále byly popsány základní principy výrobních technologií se zaměřením na vakuovou infuzi pryskyřice do připraveného předlisku suché vyztužující tkaniny pod pružnou fólií. Proces vakuové infuze je efektivní metodou pro přípravu vysoce kvalitních laminátů, zejména pokud se jedná o rozměrné díly, které by byly obtížně výrobitelné jakoukoliv jinou technologií.

Laminační systémy z reaktivních epoxidových pryskyřic, které jsou v praxi nejčastěji využívány při technologii vakuové infuze, naleznou uplatnění v oblastech automobilového, leteckého nebo kosmického průmyslu. V případech těch nejnáročnějších aplikací je usilováno o monitorování strukturních změn namáhaných součástí pomocí snímacích prvků, které by co nejméně narušovali povrch dané součásti či jinak negativně ovlivňovali jejich běžné použití. Tyto skutečnosti vedly k možnostem zabudování senzorů dovnitř kompozitní struktury.

Během experimentálního zkoumání bylo technologií vakuové infuze vyrobeno několik sad zkušebních kompozitních tělísek pro statickou zkoušku tahem. Pro výrobu byly použity dva typy vyztužujících tkanin a několik typů epoxidových pryskyřic. V prvním kroku byly do kompozitu zakomponovány podélné dráty a hliníkové inserty, které měli simulovat integrované senzory včetně jejich vodičů. Z výsledků tahových zkoušek bylo zjištěno, že přítomnost cizích prvků, zakomponovaných mezi vrstvami vyztužujících tkanin kompozitu neměla žádný vliv na pevnost a celkovou soudržnost kompozitní struktury.

V další části experimentu byl realizován návrh pro integraci fóliového odporového tenzometru, speciálně určeného pro měření deformací uvnitř kompozitního materiálu. Z důvodu citlivé manipulace s tenzometry při jejich přesném ukládání a fixování mezi vrstvy tkaniny byla kompozitní tělíska vyrobena metodou ruční laminace.

Při zatěžování v průběhu tahové zkoušky byla následně ověřena funkčnost a spolehlivost integrovaného tenzometru porovnáním výstupního signálu s vnějším tenzometrem, aplikovaným na povrchu. Jelikož oba tenzometry ve všech případech interpretovali shodné hodnoty deformací, bylo tím potvrzeno, že během integračního procesu nedošlo k žádnému závažnému poškození či znehodnocení vnitřního tenzometru a lze jej tak touto metodou bezpečně aplikovat v praxi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LIPTÁKOVÁ, Tatiana. *Polymérne konštrukčné materiály*. Žilina: University of Žilina, 2012, 189 s. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [2] *DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK: Composite Materials Handbook, Vols 1-5* [online]. In: Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate, 2002 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a426516.pdf>
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] RUDD, C. D., A. C. LONG, K. N. KENDALL a C. G. E. MANGIN. *Liquid moulding technologies: Resin systems* [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, © 1997 [cit. 2021-02-07]. ISBN 1855732424. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=QqyjAgAAQBAJ&pg=PA65&hl=cs&source=gb_s_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false
- [5] GRAHAM-JONES, J. a J. SUMMERSCALE. *Marine Applications of Advanced Fibre- Reinforced Composite*. Cambridge: Woodhead Publishing. © 2016. ISBN 978-1-78242-250-1.
- [6] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [7] Technologie výroby kompozitů. In: *Havel Composites* [online]. © 2021 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [8] PLESSIS, Hugo. *Fibreglass Boats: Construction, Gel Coat, Stressing, Blistering, Repair, Maintenance*. A&C Black, 2013. ISBN 978-1-4081-2274-7.
- [9] What is resin infusion (or vacuum infusion)? In: *Vacmobiles.com* [online]. © 2020 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: https://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html
- [10] Vacuum Infusion Process. In: *CompositesWorld Magazine* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/knowledgecenter/closed-molding/closed-mold-process/vacuum-infusion-process>

- [11] Vacuum Infusion Complete Guide. *Fibre Glast Developments Corp.* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide>
- [12] ŽALUDEK, Milan. *Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. [Přednášky]. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018
- [13] HOROSCHENKOFF, A., S. KLEIN a K. H. HAASE. *Structural integration of strain gages* [online]. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik, 2006 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <http://2007.parcfd.org/seminar/strain-gage/integ.pdf>
- [14] WANG, P., J. MOLIMARD, S. DRAPIER, A. VAUTRIN a J.C. MINNI. Monitoring the resin infusion manufacturing process under industrial environment using distributed sensors. *Journal of Composite Materials* [online]. 2012 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: doi:10.1177/0021998311410479
- [15] SHOKRIEH, Mahmood M. *Residual Stresses in Composite Materials* [online]. Woodhead Publishing, 2014 [cit. 2021-02-25]. ISBN 978-0-85709-859-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRSCM0001/residual-stresses-in/residual-stresses-in>.
- [16] *Termočlánky* [online]. Plzeň: Nové technologie – výzkumné centrum Západočeská univerzita v Plzni, ©2021 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/teplotni-pole/wiki/kontaktni-mereni/termoclanky>
- [17] PARLEVLIET, P. P., H. E. N. BERSEE a A. BEUKERS. Residual stresses in thermoplastic composites—A study of the literature—Part II: Experimental techniques. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2007 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2006.07.002
- [18] KANG, H. K., D. H. KANG, H. J. BANG, C. S. HONG a C. G. KIM. Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors. *Smart Materials and Structures* [online]. 2002 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/11/2/311.

- [19] BENEDIKT, B., P. PREDECKI, L. KUMOSA, D. ARMENTROUT, J. K. SUTTER a M. KUMOSA. The use of X-ray diffraction measurements to determine the effect of bending loads on internal stresses in aluminum inclusions embedded in a unidirectional graphite-fibre/PMR-15 composite. *Composites Science and Technology* [online]. 2001 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: doi:10.1016/S0266-3538(01)00105-1.
- [20] BENEDIKT, B., M. KUMOSA, P. K. PREDECKI, L. KUMOSA, M. G. CASTELLI a J. K. SUTTER. An analysis of residual thermal stresses in a unidirectional graphite/PMR-15 composite based on X-ray diffraction measurements. *Composites Science and Technology* [online]. 2001 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: doi:10.1016/S0266-3538(01)00060-4.
- [21] HRUŠKA, František. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [22] JAVIDINEJAD, A a S. P. JOSHI. Autoclave Reliability of MEMS Pressure and Temperature Sensors Embedded in Carbon Fiber Composites. *Journal of Electronic Packaging* [online]. 2001 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: doi:10.1115/1.1322563
- [23] MEMMOLO, V., M. SCHMIDT, L. MAIO a F. RICCI. Sensor integration within composite structures for continuous load monitoring. *7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)* [online]. IEEE, 2020 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: doi:10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9160247
- [24] KLEIN, Sebastian. *Integration of strain gages into fibre composite structures* [online]. Hottinger Baldwin Messtechnik [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <http://www.ae.metu.edu.tr/seminar/strain-gage/Day2/embedded.pdf>
- [25] Tkaniny. In: *Havel Composites: ESHOP* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/kategorie/tkaniny-sklo-karbon-uhlik-aramid-364>
- [26] *Technický list laminační pryskyřice LG 700 a tužidla HG 700*. Verze: 4.0. GRM Systems s.r.o., 2019.

- [27] *Technický list Havel Wax 60-x3* [online]. Havel Composites, ©2021 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/havel-wax-60-x3-450g-3311-7946>
- [28] Pomocné materiály a příslušenství. In: *Havel Composites: ESHOP* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/kategorie/-368>
- [29] Vacuum Bagging Consumables. In: *Easy Composites Ltd* [online]. 2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/vacuum-bagging-consumables>
- [30] Dual stage Vacuum Pump. *Teddington-France* [online]. ©2021 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.teddington.com/en/dual-stage-vacuum-pump-value-tf-ve225n-2246.html>
- [31] Airtech Europe SARL. *Airtech Advanced Materials Group* [online]. ©2021 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <http://catalogue.airtech.lu/index.php?lang=EN>
- [32] *Technický list laminační pryskyřice L 285 a tužidla 285* [online]. Havel Composites, ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/7/3801ead7cb8f67913c1b13e44001bf82c9015a49.pdf>
- [33] *Technický list epoxidové pryskyřice LH 385* [online]. Havel Composites, ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/3732/63fb8b925c5d9fdd7eb4009b1843bb9cf70a1397.pdf>
- [34] *Strain Gauges* [online]. Hottinger Baldwin Messtechnik, ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/S01265.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	procento
°	stupeň
°C	stupeň Celsia
a	délka měřicí mřížky tenzometru
a_0	původní tloušťka zkušebního tělíska
b	šířka měřicí mřížky tenzometru
b_0	původní šířka zkušebního tělíska
c	délka nosiče mřížky tenzometru
cm	centimetr
d	šířka nosiče mřížky tenzometru
E	modul pružnosti v tahu
EFPI	vnější interferometrický senzor
FBG	vláknový optický senzor s Braggovou mřížkou
FOS	vláknový optický senzor
g	gram
hod	hodina
kJ	kilojoule
LRTM	lehké vysokotlaké vstřikování
M	metr
MEMS	mikroelektromechanický systém
min	minuta
mm	milimetr
MPa	megapascal
mPa	milipascal
Pa	pascal
Pa	pascal
PTFE	polytetrafluorethylen
PVA	polyvinylalkohol
RTM	vysokotlaké vstřikování
s	sekunda
s	odhad směrodatné odchylky
t	čas

TC	termočlánek
T_g	teplota skelného přechodu
UV	ultrafialové
V	volt
V	variační koeficient
VARI	vakuová infuze
\bar{x}	odhad aritmetického průměru
ε	poměrné prodloužení/deformace
μm	mikrometr
σ	napětí v tahu
σ_{max}	maximální napětí v tahu
Ω	ohm

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Křivky vytvrzovací charakteristiky nenasycené polyesterové pryskyřice za studena (vlevo); za tepla (vpravo), dle [3].....	17
Obr. 2	Průběh viskozity epoxidové pryskyřice pro různé teploty za izotermních podmínek (vlevo); pro vybranou teplotu se srovnáním izotermního a neizotermního průběhu (vpravo), dle [3].....	18
Obr. 3	Zjednodušená grafické interpretace synergického efektu v kompozitní struktuře, dle [6].....	18
Obr. 4	Grafická interpretace závislosti zatěžující síly na axiálním stlačení jednotlivých příkladů složek kompozitní struktury hliníkové pěny a trubky, dle [6].....	19
Obr. 5	Rozhraní matrice a výztuže a jejich vzájemné zaklínění bez zatížení (vlevo); se zatížením (vpravo), dle [6]	20
Obr. 6	Schéma metody ruční laminace; dle [7]	22
Obr. 7	Zjednodušené schéma metody vakuové infuze; dle [11].....	23
Obr. 8	Standardní rozložení vstupů a výstupů infuzního systému a pomocných materiálů; dle [11].....	25
Obr. 9	Modifikace toku pryskyřice; dle [11]	26
Obr. 10	Schematické znázornění modifikace vstupů a výstupů infuzního systému; dle [11].....	26
Obr. 11	Schematické znázornění umístění termočlánků a optických senzorů mezi vrstvami kompozitní desky, dle [14].....	33
Obr. 12	Závislost teploty pryskyřice u termočlánků 3 a 4 a signálu optického senzoru na čase, dle [14]	34
Obr. 13	Závislost teploty pryskyřice u jednotlivých termočlánků na čase, dle [14].....	35
Obr. 14	Schéma hybridního FBG/EFPI senzoru, dle [18].....	36
Obr. 15	Schematické znázornění umístění a směrů optických senzorů a termočlánků v jednosměrném laminátu (a); příčném laminátu (b); tkaninovém laminátu (c); dle [18].....	38
Obr. 16	Konfigurace vzorku kompozitu s hliníkovou inkluzí při čtyřbodovém ohybu na rentgenovém difraktometru Siemens D500, dle [19]	39
Obr. 17	Realizace umístění více tenzometrů pro napětí v rovině ve dvou kolmých osách (a); šikmo ve třech osách (b); šikmo ve dvou osách (c); jako spirála (d); růžicové zapojení se čtyřmi tenzometry (e), dle [21].....	40
Obr. 18	Příprava a vrstvení izolační fólie (a); vložení senzoru do otvoru (b); dle [22]	41
Obr. 19	Grafické zobrazení výstupních signálů tlakových senzorů a kontrola jejich linearity před a po vytvrzovacím cyklu v autoklávu; dle [22].....	42
Obr. 20	Grafické zobrazení výstupního signálu teplotního senzoru 1 a 2 a kontrola jejich linearity před a po vytvrzovacím cyklu v autoklávu; dle [22]	42
Obr. 21	Vyrovnání tenzometru do formy pomocí instalační šablony; dle [24].....	44

Obr. 22 Aplikace pojivého prášku pro fixaci tenzometru; lokální nanášení prášku na výrobek přes krycí vrstvu (vlevo); zarovnání tenzometru (uprostřed); natavení prášku žehličkou přes PTFE fólii (vpravo); dle [24]	45
Obr. 23 Postup integrace tenzometru s kolíky vodičů; aplikace dalších vrstev vyztužující tkaniny (vlevo); aplikace odtrhové tkaniny (uprostřed); vyčnívající kolíky skrz odtrhovou tkaninu (vpravo); dle [24]	46
Obr. 24 Opatření pro ochranu kolíků vodičů; zkrácení vodičů na délku cca 2 mm (vlevo); aplikace ochranného pěnového krytu (uprostřed); aplikace dalších vrstev technologických materiálů; dle [24]	46
Obr. 25 Zjednodušené schéma konfigurace připravených technologických materiálů pro integraci tenzometru při vakuové infuzi; dle [24].....	47
Obr. 26 Detail skelné jednosměrně orientované tkaniny (vlevo); tkaniny s plátňovou vazbou (vpravo); dle [25]	51
Obr. 27 Odtrhová tkanina; dle [29]	53
Obr. 28 Děrovaná separační fólie; dle [29]	53
Obr. 29 Rozvodná síťka; dle [28]	54
Obr. 30 Vakuovací fólie; dle [29]	54
Obr. 31 Hadice pro dopravu vakuovou infuzi spirálová (vlevo); vakuovací (vpravo); vakuovací spojka (dole); dle [29].....	55
Obr. 32 Těsnící páska; dle [29].....	55
Obr. 33 Vakuová pumpa; dle [30].....	56
Obr. 34 Zachycovač pryskyřice; dle [31]	56
Obr. 35 Separátor Havel Wax 60-x3	57
Obr. 36 Umístění podélných drátů mezi 3. a 4. vrstvou obou typů vyztužujících skelných tkanin	58
Obr. 37 Umístění odtrhové tkaniny	59
Obr. 38 Umístění rozvodné sítěky.....	59
Obr. 39 Umístění spirálové hadice	60
Obr. 40 Zaformovaný předlisek	60
Obr. 41 Průběh prosycování vrstev přiváděnou pryskyřicí	61
Obr. 42 Zkušební tělíska s podélným integrovaným drátem pro statickou zkoušku v tahu, vyztužené skelnou tkaninou s plátňovou vazbou (nahore); skelnou jednosměrně orientovanou tkaninou (dole)	62
Obr. 43 Umístění insertů s příčným drátem mezi 3. a 4. vrstvou vyztužující skelné jednosměrné tkaniny	64
Obr. 44 Umístění insertů s příčným drátem mezi 3. a 4. vrstvou vyztužující skelné tkaniny s plátňovou vazbou	65
Obr. 45 Aplikace děrované separační fólie pod vrstvu odtrhové tkaniny pro lepší manipulaci při odtrhování a odstranění pomocných materiálů od výrobku	65

Obr. 46 Zkušební tělíska s integrovaným insertem a příčným drátem pro statickou zkoušku v tahu, vyztužené skelnou tkaninou s plátňovou vazbou (nahore); skelnou jednosměrně orientovanou tkaninou (dole)	66
Obr. 47 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátňové vazby bez integrovaného drátu.....	67
Obr. 48 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátňové vazby a integrovaným drátem	68
Obr. 49 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou bez integrovaného drátu	69
Obr. 50 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou a integrovaným drátem.....	70
Obr. 51 Charakteristické porušení zkušebního tělíska kompozitu s jednosměrně orientovanou výztuží	71
Obr. 52 Charakteristické porušení zkušebního tělíska kompozitu s tkaninou plátňové vazby (nahore); detailní pohled (dole)	71
Obr. 53 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátňové vazby bez insertu	72
Obr. 54 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s tkaninou plátňové vazby a insertem.....	73
Obr. 55 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou bez insertu.....	74
Obr. 56 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení kompozitu s jednosměrnou tkaninou a insertem.....	75
Obr. 57 Porušení zkušebního tělíska kompozitu s jednosměrnou tkaninou a insertem lokální delaminací vrstev (nahore); detailní pohled (dole).....	76
Obr. 58 Schéma tenzometru LI66 (vlevo); tenzometr LI66 (vpravo); dle [34]	79
Obr. 59 Tenzometry LI66 umístěné na 3. vrstvě jednosměrné tkaniny (nahore); tkaniny s plátňovou vazbou (dole)	80
Obr. 60 Detailní pohled na 4. vrstvu tkaniny, propíchnutou kolíky senzoru LI66	80
Obr. 61 Detailní pohled na připravená zkušební tělíska s integrovaným tenzometrem LI66 pro statickou zkoušku tahem	81
Obr. 62 Schéma tenzometru LY21 (nahore); tenzometr LY21 (dole); dle [34]	82
Obr. 63 Připojené vodiče ke kontaktním kolíkům integrovaného tenzometru LI66 (vlevo); přilepený a připojený tenzometr LY21 na povrchu zkušebního tělíska.....	82
Obr. 64 Upnuté zkušební tělíska v čelistech zkušebního stroje s připojenými vodiči tenzometrů a připojeným extenzometrem	83
Obr. 65 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s tkaninou plátňové vazby získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělíska 1	84
Obr. 66 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s tkaninou plátňové vazby získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělíska 2	85

-
- Obr. 67 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s jednosměrnou tkaninou získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělísko 3 85
- Obr. 68 Grafická závislost poměrné deformace na čase kompozitu s jednosměrnou tkaninou získaná vnějším a integrovaným tenzometrem; tělísko 4 86

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vybrané vlastnosti nevytvrzené pryskyřice LG 700 a tužidla HG 700; dle [26].....	51
Tab. 2 Orientační mechanické parametry vytvrzené nevyztužené pryskyřice LG 700; dle [26].....	52
Tab. 3 Vybrané vlastnosti nevytvrzené pryskyřice L 285 a tužidla 285; dle [32]	63
Tab. 4 Orientační mechanické parametry vytvrzené nevyztužené pryskyřice L 285; dle [32].....	63
Tab. 5 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátňové vazby bez integrovaného drátu	67
Tab. 6 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátňové vazby a integrovaným drátem.....	68
Tab. 7 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou bez integrovaného drátu	69
Tab. 8 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou a integrovaným drátem.....	70
Tab. 9 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátňové vazby bez insertu.....	72
Tab. 10 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s tkaninou plátňové vazby a insertem	73
Tab. 11 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou bez insertu	74
Tab. 12 Naměřená a vypočítaná data pevnosti v tahu pro kompozit s jednosměrnou tkaninou a insertem	75
Tab. 13 Vybrané vlastnosti nevytvrzené pryskyřice LH 385 a tužidla H 535; dle [33].....	77
Tab. 14 Základní charakteristiky senzoru LI66; dle [34]	78
Tab. 15 Základní charakteristiky senzoru LY21; dle [34].....	81

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE LG 700

Příloha P II TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE L 285

Příloha P III TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE LH 385

Příloha P IV CHARAKTERISTIKY TENZOMETRŮ LI66, LY21

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE LG 700

Laminační pryskyřice LG 700 pro RTM* Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S

Laminační pryskyřice (Laminační systém)
LG 700
 pro RTM
 Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S

Gel time: (nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách)

LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
při 25°C	1 – 2 hod.	2 – 3 hod	3 – 5 hod	8 – 12 hod	12 – 14 hod
při 50°C	25 min.	50 min.	1,5 hod	2 – 3 hod	4 – 6 hod

Teplotní odolnost (Tg):

LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
při 23°C (2-7 dní)	55°C	60°C	60°C	55°C	45°C
při 50°C (3 hodiny)	65°C	70°C	70°C	65°C	55°C
při 60°C (> 3 hodiny)	75°C	80°C	80°C	75°C	60°C
při 80°C (> 2 hodiny)	95°C	100°C	100°C	95°C	85°C
při 120°C (2 hodiny)	105°C	110°C	110°C	105°C	95°C

Poměr míchání pryskyřice + tužidlo:

Stožky váhové	100 : 30
Stožky objemové	100 : 38

2.2 Technické parametry

Vlastnosti:

	LG 700
Hustota	g/cm ³ (25°C) 1,18 - 1,23
Viskozita	mPa.s (25°C) 500 – 700
Ekvivalent epoxidu	mol/kg 155 – 165
Index epoxidu	0,60 - 0,64
Barva	Gardner max 3

	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
Hustota	g/cm ³ (25°C) 0,98	0,96	0,94	0,98	0,96
Viskozita	mPa.s (25°C) 30 - 40	35 - 50	15 - 20	10 - 15	10 - 15
Vodkový ekvivalent	max 3*	48	48	48	48
Směsná viskozita	mPa.s (23°C) 320 - 328	450 - 457	245 - 249	277 - 285	277-285

* Vztahuje se k neobarvenému tužidlu.

Podrobnosti pro zpracování:

	LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
Průměrná hodnota epoxidu	0,62	-	-	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	48	48	48	48	48
Skladování	24 (epoxid), 24 měsíců (tužidlo) v uzavřeném obalu	-	-	-	-	-

1. Popis

Laminační systém LG 700 je epoxidový systém nové generace, na bázi silně modifikované epoxidové pryskyřice a několika tvrdidel, kterými lze nastavit rozdílnou zpracovatelnost a podmiňky vytváření.

Laminační pryskyřice LG 700 je velmi tekutá pryskyřice se zvýšenou viskozitou a reaktivitou, vyznačující se mimořádnou flexibilitou při zachování velmi vysoké teplotní odolnosti. Pryskyřice obsahuje modifikační činidla, maximálně zlepšující průnik laminační směsi do tkaniny.

Tužidlo HG 700 F je velmi rychlé tužidlo s několika akcelerátory, umožňující velmi krátký temperační cyklus. Je určeno zejména pro sériovou výrobu menších dílů. Gel-time (100g) při 23°C je 20 minut.

Tužidlo HG 700 M je rychlé tužidlo s akcelerátorem, umožňující krátký temperační cyklus. Je vhodné pro výrobu menších a středně velkých dílů. Gel-time (100g) při 23°C je 50 minut.

Tužidlo HG 700 je základní varianta tužidla pro epoxid LG 700. Je velmi tekuté a proto vhodné pro infuzi i těch nejtenších materiálových skladeb. Gel-time (100g) při 23°C je 90 minut.

Tužidlo HG 737 je velmi pomalé tužidlo pro injekční velkých dílů nebo velmi silných materiálových skladeb. Ani při síle laminátu nad 1 cm nedochází k zaholení směsi. Gel-time (100g) při 23°C je cca 3 hodiny.

Tužidlo HG 700 S je velmi pomalé tužidlo. Gel-time (100g) při 23°C je cca 4-6 hodin.

2. Použití

Laminační systém 700 se používá zejména pro RTM, ale je možné ho použít i pro ruční laminaci za pokojové i zvýšené teploty. Je vhodný k přípravě komposit s vyšší teplotnou odolností a výbornými mechanickými vlastnostmi. Je předurčen k výrobě i náročných kompozitních dílců. Směsná viskozita systému je 300 – 350 mPa.s, die teploty a použitého tvrdidla.

Systém je použitelný pro všechny běžné používané výtuzže, jako jsou například skleněná, uhliková nebo aramidová vlákna, sendvičové materiály atd. Systém je kompatibilní s většinou běžných i polyesterových gelcoatů. Přesto doporučujeme jednotlivé kombinace nejprve předem vyzkoušet.

2.1 Pracovní postup

Se systémem doporučujeme pracovat v rozmezí teplot 18 až 30°C běžnými zpracovatelskými postupy pro výrobu kompozitů.

Tento systém byl navržen tak, aby dostatečně vytvářoval i při pokojové teplotě od 18 - 30°C, proto může být zpracování i při pokojové teplotě a používán bez následného tepelného vytváření. Doba zpracovatelnosti je 20 – 180 minut při pokojové teplotě (podle typu tužidla).

Při vytváření za tepla lze dosáhnout teplotní odolnosti až 120°C, viz. tabulka teplotních odolností (str. 2).

Orientační mechanické parametry vytvrzené nevytuzené pryskyřice:

Mez pevnost a ohybu	MPa	110 - 120
E - modul - ohyb	MPa	2700 - 3300
Mez pevnost v tahu	MPa	65 - 75
Mez pevnost v tlaku	MPa	120 - 140
Tažnost	%	6 - 8
Rázová houževnatost	KJ/m ²	38 - 48
Shore D	-	85

3. Skladování a balení

Pryskyřice mohou být skladovány po dobu nejméně 24 měsíců, tužidla 24 měsíců v pečlivě uzavřených obalech. Při teplotách pod + 15 °C mohou pryskyřice a tužidla zkrystalizovat. Krystalizace je patrná jako zamrazení či změna tekuté podoby obsahu obalu na pevnou. Před zpracováním se musí krystalizace zahřátím odstranit. Poměru zahrátého obsahu obalu až do přibližně 50 - 60 °C ve vodní lázni nebo páci a mícháním či potřásáním uvedete materiál do prvotního stavu bez jakékoli vady na kvalitě. Zpracovávají pouze výrobky zcela jednotné barvy. Před zahřátím vždy dobře uzavřete, aby došlo k vyrovnání tlaku. Během zahřívání dobře opatrně. Nezapínejte nad otevřeným omeštem! Při míchání používejte bezpečnostní pomůcky (rukavice, brýle, respirátor).

4. Kontakt**Výrobce/Dovozce:**

GRM Systems s.r.o.
Stavivý š.p. 158
CZECH REPUBLIC

Tel.: +420 585 431 734
Fax: +420 585 431 994
www.grm-systems.cz
info@grm-systems.cz

KANCELÁŘ A SKLAD
GRM Systems s.r.o.
Technická 26
779 00 Olomouc
CZECH REPUBLIC

Technický servis:

Zbyněk Gafroř
Tel.: +420 777 766 706
zbynek@grm-systems.cz

Poznámka

Tento technický list byl vytvořen na základě našich nejnovějších poznatků a podle nejlepšího vědomí a svědomí. Jelikož nejsme schopni kontrolovat správnost použití našich výrobků, nemůžeme garantovat ani výsledky.

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE L 285

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLA 285, 286, 287

Návod k použití, technické listy

Charakteristika

Schválení:	Německý federální úřad pro letectví
Použití:	výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní nářadí, letecké modely, formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	- 60 °C - □ + 50-60 °C za temperování - 60 °C - □ + 80+ 100 °C po temperování
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Extrémně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) od přibližně 45 minut do asi 5 hodin (závisí na použitém tužidle)
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: tixotropní tepelná úprava L 285 W: bílá

Použití

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle) pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Po tepelném vytvrzení při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větróné a motorové větróné (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C.

Rozmezí doby zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 45 min. a 5 h v závislosti na druhu tužidla. Tužidla mají stejný poměr míchání a mohou být míchány mezi sebou v jakémkoli poměru. Toto dovoluje výběr optimálního systému pro všechny metody zpracování. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty zpracovatelné a lze je vytvářet z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

Viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken, nicméně, pryskyřice se nerozlije na vertikálním povrchu. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, např. aerosol, mikrobalon, bavlněné vločky, kovový prášek apod.

Pokud se nevyžaduje vysoká tepelná odolnost či letecké schválení, dá se tužidlo 285 použít bez následného temperování. Nicméně, uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.

Použití

Laminační systém má hydrofilní charakter (vyšší absorpce vlhkosti, nižší odpor rozptylu páry). Proto neočekáváme žádné problémy kompatibility při jeho kombinaci s polyesterovými gelcoaty, rozmanitými barvami (např. na bázi PUR) atd. Bohužel však nemáme k dispozici testy těchto kombinací.

Od svého schválení v roce 1985 byl laminační systém L 285 používán téměř všemi výrobci letadel a kluzáků a - zvláště kvůli své extrémně dobré fyziologické kompatibilitě - je nejvíce užívaným systémem dnešního leteckého průmyslu. Často se stává, že pracovníci, kteří zaznamenali problémy s některými epoxidy (alergie či podráždění pokožky), jsou schopni zpracovávat laminační pryskyřici L 285.

Je nutno dodržovat příslušná bezpečnostní pokyny pro manipulaci s epoxidovými pryskyřicemi a tužidlo a naše instrukce pro bezpečné zpracování.

Specifikace

		Laminační pryskyřice L 285
Hustota °C	g/cm 3 / 25	1,18 - 1,23
Viskozita °C	mPas / 25	600 - 900
Ekvivalent epoxidu	-	165 - 170
Hodnota epoxidu	-	0,59 - 0,65
Barva Gardner		max 3

		Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota °C	g/cm3 / 25	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita °C	mPas / 25	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo G	mg KOH /	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva Gardner		max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

(*) Vztahuje se pouze k průsvitnému tužidlu - tužidla mají průsvitné modrou barvu

Míchací poměry

Pryskyřice L 285: Tužidlo 285, 286, 287	
Složky váhové	100 : 40 (+/-2)
Složky objemové	100 : 50 (+/-2)

Gel time
- nanos do vrstvy 1 mm při různých teplotách

	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
20 - 25 °C	přibl. 2 - 3 hod.	přibl. 3 - 4 hod.	přibl. 5 - 6 hod.
40 - 45 °C	přibl. 45 - 60 min.	přibl. 60 - 90 min.	přibl. 80 - 120 min

Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm3	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu	psi x 10 ³ N/ mm2	16 - 18 110 - 120
Modul pružnosti	psi x 10 ⁵	4,6 - 4,8 3,0 - 3,3
kN/mm2		
Pevnost v tahu	psi x 10 ³	10 - 11,5 70 - 80
kN/mm2		
Pevnost v tlaku	psi x 10 ³	18 - 20 120 - 140
kN/mm2		
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla nárazu		45 - 55
Nmm/mm2		
Pevnost ve střihu	D	80 - 85
Absorpce vody %	24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,20 - 0,30 0,60 - 0,80
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw.	10 %	2 X 10 ⁴ 2 X 10 ⁶
Vytvrzení:	24 h při 23 °C + 15 h při 60 °C	
Typická data dle WL 5 3203 Části 1 a 2		
Manuálu o německých leteckých materiálech		

PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE LH 385



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.
Sivinská ulice 67
783 54 Příelínice
tel.: +420 565 128 011
www.havel-composites.com
IČ: 25907379
DIČ: CZZ5907379

TECHNICKÝ LIST

EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE LH 385

Všobecně:

Epoxidová pryskyřice LH 385 se vyznačuje nízkou viskozitou. Při vytvrzování aminy, nebo polyaminy nabízí vysoce kvalitní vlastnosti jako vysoké mechanické vlastnosti, dobrou chemickou odolnost, výborné tepelné vlastnosti atd. Lze ji využít i jako epoxidový lak, s vhodným tužidlem.

Jedná se o pryskyřici nízké viskozity na bázi bisphenolu A. Viskozita: 400-800 mPas/25 °C. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke zkrystalizování. Přednosti směsi pryskyřice a doporučeného tužidla je jeho čírost.

Zvláštní vlastnosti: Pryskyřice je i při teplotě 0 - 10°C čirá, nedochází k zakalení tak, jako u některých epoxidových pryskyřic. Pryskyřice s tužidlem vytvoří před laminací nízko viskozni systém, který umožňuje dobré smačeni za současného vytlačeni bublin z laminovaného povrchu.

Doba zpracovatelnosti /tzv. pot lífe/ od přibližně 15 min. do asi 5 hodin podle použitého tužidla.

Tepelná odolnost výrobku bez výrazných změn jejích parametrů:

> + 50-150 °C

Zpracování: Při teplotách mezi 10 °C až 50 °C, všechny běžné metody zpracování

Schválení: není

Použití: lodě, pádla, kapoty

Systémy laminačních pryskyřic pro vytvrzování při pokojové teplotě

Pro vytvrzování při pokojové teplotě od 10 - 30 °C lze uplatnit různé kombinace laminační pryskyřice a tužidel. Tyto systémy byly upraveny takovým způsobem, že při pokojové teplotě zcela vytvrdnou.

Tepelná odolnost 40 - 60 °C lze dosáhnout vytvrzováním při pokojové teplotě /tzv. pravidlo palce: vytvrzovací teplota + 30 °C = maximální tepelná odolnost/. Tepelná odolnost těchto systémů může být zvýšena na přibližně 90 °C postupným tepelným temperováním při teplotě 50 - 70 °C

Použitá tužidla

Tužidlo	teplotní odolnost (°C)	zpracovatelnost (v min)	poměr LH 385 k tužidlu v gramech
H 533	80	15	100 : 35
H 534	80	20	100 : 35
H 535	80	30	100 : 35
H 536	80	50-70	100 : 35
H 538	120	60-80	100 : 35
H 285	80	50	100 : 40
H 286	100	90	100 : 40
H 287	150	240	100 : 40

Lze také dobarvovat pigmentem.

Vlastnosti pryskyřice

Skupenství	kapalina
Epoxidový hmotnostní ekvivalent (g/mol)	170 - 180
Barva (Gardner)	max. 3
Epoxidový index	0,51 - 0,56
Bod vznícení (°C)	nad 150
Viskozita (mPa.s při 25°C)	400 - 800
Hustota (g/cm ³)	1,12- 1,16

Skladování

Pryskyřice mohou být skladovány po dobu nejméně 12 měsíců v pečlivě utěsněných kontejnerech. Při teplotách pod + 15 °C do 0°C pryskyřice nekystalizuje.

Vypracoval: ing. Vojtěch Greeman

info@havel-composites.cz

Datum 13.1.2014

Revize: Ing. Richard Moravec dne 5.5.2021

PŘÍLOHA P IV: CHARAKTERISTIKY TENZOMETRŮ LI66, LY21



Dehnungsmessstreifen
Strain gages
Jauges d'extensométrie

Bestellnummer
Order No.
No. de référence

Typ
Type
Type

Stückzahl
Contents
Quantité

Temperaturkoeffizient
des k-Faktors
Temperature coefficient
of gage factor
Coefficient de température
du facteur k

Folienlos
Foil lot
Lot de la feuille

Herstellungslot
Production batch
Lot de fabrication

1-LI66-10/350

10/350 LI66

5

93 ± 10 [10⁻⁶ / K]
(-10°C ... +45°C)

A406/04

812097104

Widerstand
Resistance
Résistance

350 Ω ± 0,35 %

k-Faktor
Gage factor
Facteur k

2.03 ± 1.0 %


Querempfindlichkeit
Transverse sensitivity
Sensibilité transverse

-0.2 %

Temperaturkompensation: Quarz mit
Temperature compensation: quartz with
Compensation de température: quartz avec

$\alpha = 0.5 [10^{-6} / K]$

Daten / Data / Données



RoHS



Curve 1



Dehnungsmeßstreifen
Strain Gauges
Jauges d'extensométrie

Typ 3/120LY21

Stückzahl
Quantity
Quantité

Temperaturkoeffizient
des k-Faktors
Temperature coefficient
of gage factor
Coefficient de température
du facteur k

Artikel Nr.
Part No.
No. de Réf.

Folienlos
Lot
Lot de la feuille

Herstellungslot
Batch
Lot de fabrication

10

mit ohne Applikationshilfe
avec without Application aid
sans Support d'aide à l'application

Widerstand
Resistance
Résistance

120,00 [Ω] ± 0,35 [%]

k-Faktor
Gauge factor
Facteur k

1,97 ± 1 [%]

Querempfindlichkeit
Transverse Sensitivity
Sensibilité transverse

0,6 [%]

Temperaturkompensation: Angepaßt für
Temperature Compensation: Compensated for
Compensation de température: Compensation pour

$\alpha = 10.8 [10^{-6} / ^\circ C]$

Stahl
Steel
Acier

Alumi-
nium

Sonstige
Other
Autre

Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an.

All technical data in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number.

Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jauge ainsi que le lot de fabrication.



Temperaturgang der Dehnungsmessstreifen bei Applikation auf Werkstoffen mit unseitig angebenem Wärmeausdehnungskoeffizienten α . Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

Kennlinie 1: DMS ohne Anschlußbändchen

Kennlinie 2: DMS mit Anschlußbändchen (30 mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.
 T = Temperatur in °C L = einfache Bändchenlänge in mm

The **Thermal output** refers to strain gauges when bonded to materials with the coefficient of thermal expansion α given overleaf. Values are measured at a continuous temperature progression.

Curve 1: Gauges without connecting leads

Curve 2: Gauges with connecting leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, then the thermal output lies between curve 1 and 2. The numeric approximation allows the calculation of the thermal output for any lead length.
 T = temperature in °C L = simple lead length in mm

Comportement en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont les coefficients de dilatation thermique α sont indiqués au verso. Mesuré au cours d'une variation continue de la température.

Courbe 1: Jauges sans fils de sortie

Courbe 2: Jauges avec fils de sortie (longueur unitaire du fil de 30 mm). Lorsque les fils sont plus courts, le comportement en température se trouvera entre les deux courbes 1 et 2. Le dernier terme de l'équation déterminée avec exactitude l'influence des fils de sortie.
 T = température en °C L = longueur unitaire des fils en mm