

Vliv vlhkosti na únavovou životnost konstrukčních kompozitů

Bc. Tomáš Hoferek

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Hoferek**
Osobní číslo: **T18335**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Vliv vlhkosti na únavovou životnost konstrukčních kompozitů**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši pro danou problematiku
2. Zhotovte zkušební tělesa a proveďte jejich kondicionaci
3. Proveďte experimentální zkoušky životnosti pro zvolené materiály
4. Vyhodnoťte dosažené výsledky

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

Seznam doporučené literatury:

RŮŽIČKA, Milan a Jiří FIDRANSKÝ. Pevnost a životnost letadel. Praha: Vydava-telství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02254-4.
EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

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 užit 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 na 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

Diplomová práce se zabývá vlivem vlhkosti na únavovou životnost zkušebních těles z různých kompozitních materiálů vyřezaných ze vzorků, které byly vyrobeny technologií ručního kladení za mokra. Zkušební tělesa byla kondicionována různým prostředím za různých podmínek a následně na nich byly realizovány statické a dynamické zkoušky, aby bylo možné provést vyhodnocení vlivu vlhkosti na únavovou životnost.

Klíčová slova: ruční kladení za mokra, únava kompozitních materiálů, statické zkoušky, dynamické zkoušky.

ABSTRACT

The master thesis deals with the influence of moisture on the fatigue life of test specimens made of various composite materials, cut from samples produced by the technology of manual wet laying. The test specimens were exposed to different environments under different conditions and subsequently static and dynamic tests were performed on them in order to perform the evaluation.

Keywords: manual wet laying technology, fatigue of composite materials, static tests, dynamic tests.

Touto formou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a vynaložený čas, který mi věnoval po celou dobu tvorby této práce i v nelehkých dobách nouzového času.

OBSAH

ÚVOD	10
1 DEFINOVÁNÍ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	11
1.1 DĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ DLE VLÁKEN.....	12
1.1.1 Skelná vlákna	13
1.1.1.1 Základní vlastnosti skelných vláken [3]:	13
1.1.1.2 Základní druhy skelných vláken	14
1.1.2 Uhlíková vlákna	14
1.1.2.1 Výchozí materiály pro výrobu uhlíkových vláken [3]:.....	14
1.1.2.2 Základní vlastnosti uhlíkových vláken [3]:	14
1.1.3 Aramidová vlákna	15
1.1.3.1 Základní vlastnosti aramidových vláken [3]:.....	15
1.2 MATRICE A JEJICH DĚLENÍ U POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	16
1.2.1 Reaktivní pryskyřice	16
1.2.1.1 Epoxidové pryskyřice	17
1.2.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE)	17
1.2.1.3 Fenolické pryskyřice (PF-R).....	17
1.2.1.4 Nenasycené polyesterové pryskyřice	18
1.2.2 Termoplasty.....	18
2 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ	19
2.1 RUČNÍ KLADENÍ ZA MOKRA	19
2.2 POKLÁDÁNÍ PREPREGŮ, VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	20
2.3 PULTRUZE	20
2.4 RTM	21
3 VLIV VLHKOSTI NA KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	22
3.1 VLIV VLHKOSTI NA MATRICI.....	22
3.2 VLIV VLHKOSTI NA KOMPOZITY VYZTUŽENÉ ARAMIDOVÝMI VLÁKNY	22
3.3 VLIV VLHKOSTI NA KOMPOZITY VYZTUŽENÉ UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	24
3.4 VLIV VLHKOSTI NA KOMPOZITY VYZTUŽENÉ SKELNÝMI VLÁKNY	26
4 ÚNAVA MATERIÁLU A JEHO TECHNICKÁ ŽIVOTNOST	27
4.1 ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ U KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	27
4.2 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY	30
4.2.1 Druhy zatěžování	30
4.2.2 Průběh křivky zatěžování	30
4.2.3 Frekvence při zkoušce	31
4.2.4 Testovací teplota	31
4.2.5 Wöhlerovy křivky	31
1 PRAKTICKÁ ČÁST	32
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	33
6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	34

6.1	POPIS VÝROBY VZORKŮ	34
6.1.1	Příprava vzorku z kompozitního materiálu se skelnými vlákny	35
6.1.2	Příprava vzorku z kompozitního materiálu s karbonovými vlákny	35
6.1.3	Příprava vzorku z kompozitního materiálu s aramidovými vlákny	36
6.2	POPIS VÝROBY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	37
6.3	KONDICIONACE ZKUŠEBNÍCH TĚLES	38
6.3.1	Příprava zkušebních těles z kompozitního materiálu se skelnými vlákny	38
6.3.2	Příprava zkušebních těles z kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny	39
6.3.3	Kondicionace zkušebních těles z kompozitního materiálu s aramidovými vlákny	39
7	STATICKE ZKOUŠKY	40
7.1	POPIS ZKUŠEBNÍHO STROJE ZWICK/ROELL VIBROPHORE 100.....	40
7.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY STATICKÝCH TAHOVÝCH ZKOUŠEK ZKUŠEBNÍCH TĚLES ZE SKLOLAMINÁTU	41
7.3	NAMĚŘENÉ HODNOTY STATICKÝCH TAHOVÝCH ZKOUŠEK ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z KOMPOZITU S ARAMIDOVÝMI VLÁKNY	44
7.4	NAMĚŘENÉ HODNOTY STATICKÝCH TAHOVÝCH ZKOUŠEK ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z KOMPOZITU S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	47
7.5	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZE STATICKÝCH ZKOUŠEK	50
7.5.1	Tělesa ze sklolaminátu	50
7.5.2	Kompozitní tělesa z aramidových vláken	50
7.5.3	Kompozitní tělesa z uhlíkových vláken	51
7.5.4	Porovnání zkušebních těles po statických zkouškách	52
8	DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY	53
8.1	VÝSLEDKY DYNAMICKÉ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍCH TĚLES ZE SKLOLAMINÁTU	54
8.2	VÝSLEDKY DYNAMICKÉ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z KOMPOZITU S ARAMIDOVÝMI VLÁKNY	56
8.3	VÝSLEDKY DYNAMICKÉ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z KOMPOZITU S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	58
8.4	POROVNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES PO DYNAMICKÝCH ZKOUŠKÁCH.....	60
9	VYHODNOCENÍ	61
9.1	KOMPOZITNÍ MATERIÁL ZE SKLOLAMINÁTU	61
9.2	KOMPOZITNÍ MATERIÁL Z ARAMIDOVÝCH VLÁKEN.....	62
9.3	KOMPOZITNÍ MATERIÁL Z UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	63
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK.....	76

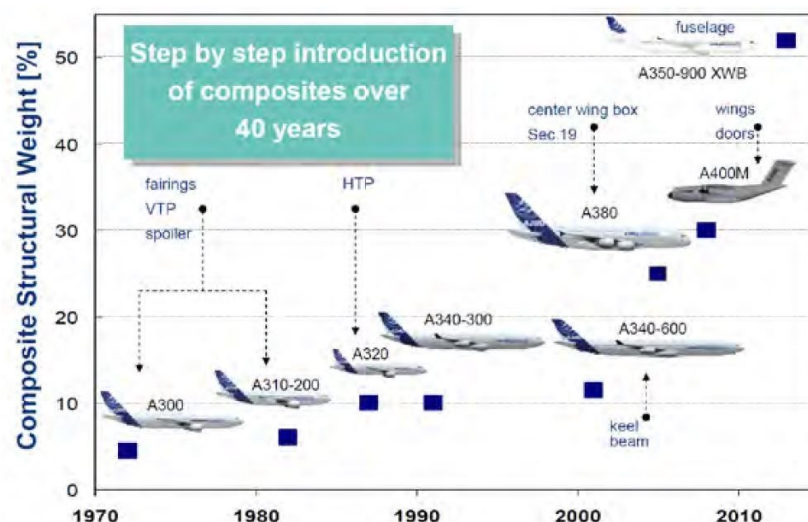
SEZNAM PŘÍLOH.....	78
---------------------------	-----------

ÚVOD

Využití kompozitních materiálů představuje zcela nové možnosti v konstrukci, oproti použití klasických konstrukčních materiálů. Původně byly tyto materiály určené pouze pro strategické účely, jako je vojenský průmysl, kosmonautika a další, přičemž v posledních letech se tyto materiály rozšířily téměř do všech oblastí, kde se uplatňují jejich mechanické vlastnosti v poměru s výrobními a zpracovatelskými náklady, které jsou oproti použití konvenčních materiálů a výrobním technologiím výrazně vyšší.

Kompozitní materiály jsou inspirovány strukturami vytvořenými přírodou, poněvadž jsou tyto struktury v přírodě zcela běžné a vyskytují se u organických materiálů, které jsou vystaveny poměrně vysokému mechanickému zatěžování, například dřevo, tkáň a další.

První známé použití kompozitního materiálu, se objevuje již 800 let př. n. l, kde obyvatelé Izraele používali ke stavbě domů cihly vyrobené z hlíny a slámy, tato kombinace zajišťovala pevnost tehdejších cihel, avšak technický rozvoj těchto materiálů začal od roku 1950 hlavně díky kosmonautice a od roku 1970 se tato technologie dostala i do civilních odvětví letectví, motorsportu a dalších, kde se dále vyvíjí dle potřeb a dnešních trendů, přičemž jejich význam v technických aplikacích především v civilním letectví hraje čím dál větší roli, což je vidět na Obr. 1. [4] [14].



Obr. 1 Vývoj aplikací kompozitních materiálů v konstrukci dopravních letadel Airbus [14].

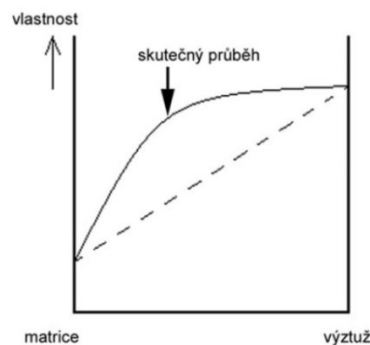
1 DEFINOVÁNÍ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU.

Kompozit je heterogenní materiál, který je složen ze dvou nebo více fází, při výrazně odlišných chemických, fyzikálních a mechanických vlastnostech, přičemž pevnější nespojitá fáze se nazývá výztuž a poddajnější spojitá fáze se nazývá matrice. Výztuž v kompozitním materiálu má výrazně lepší mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, modul pružnosti, ...)[1].

Za kompozit lze považovat více fázové materiály, které splňují níže uvedená kritéria [1]:

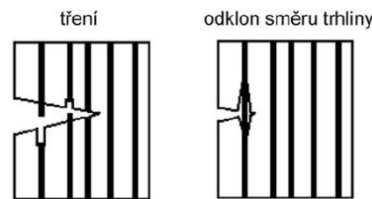
- Minimální podíl výztuže musí být 5%
- Kompozitní materiál musí mít smíchané fáze, ze kterých se skládá
- Vlastnost matrice a výztuže (fyzikální, mechanická a chemická) je výrazně rozdílná

Hlavním důvodem spojování více fází je synergismus, který je charakteristický pro kompozitní materiály a znamená to, že výsledné vlastnosti kompozitu jsou lepší, než vlastnosti poměrného sečtení fází, tato vlastnost je velmi důležitá, jelikož jsme schopni vytvořit materiály o zcela nových vlastnostech [2].



Obr. 2 Synergické chování fází kompozitního materiálu [2].

Synergismus si můžeme představit na spojení dvou křehkých fází (výztuže a matrice), kde je každá fáze zvlášť křehká, nicméně výsledný kompozitní materiál získal určitou houževnatost, tedy vlastnost proti křehkému poškození. Tento projev materiálu je způsoben tím, že případná trhlinka je zpomalována na rozhraní matrice a výztuže, což vede k odklánění směru trhlinky za doprovodu vzniku tepla, které je způsobeno vzniklým třením mezi matricí a vytahující se výztuží (vlákny) kompozitu [2].



Obr. 3 Jevy při porušení kompozitu na rozhraní matrice a výztuže [2].

1.1 Dělení kompozitních materiálů dle vláken.

Výztuže můžeme dělit dle geometrického tvaru, což je vidět na obr. 4. [2][1]:

- Částicové výztuže jsou takové výztuže, které mají obdobné rozměry ve všech svých směrech.
- Vlákňové výztuže jsou takové výztuže, které mají rozměr v podélném směru výrazně větší než ve směrech ostatních. Vlákňové výztuže dělíme dle délky vláken na:
 - Výztuže s krátkými vlákny, zde jsou vlákna výrazně kratší, než je sám výrobek.
 - Výztuže s dlouhými kontinuálními vlákny, zde jsou vlákna dlouhá srovnatelně s délkou výrobku a možné uspořádání vláken má celou řadu možností textilních vazeb dle obr. 5, při výběru textilní vazby je rozhodující požadovaná pevnost kompozitu tvar a členitost formy, mezi základní druhy textilních vazeb patří:
 - Plátňová vazba: je nejméně poddajná a zároveň nejpevnější vazba, kde jsou rovingy a útky stejně silné a stejnoměrně vzdálené, pramen útku prochází vždy pod, a nad každým pramenem osnovy, což tvoří vyváženou plátňovou vazbu.
 - Keprová vazba: je taková vazba, kde pramen útku musí překřížit minimálně dva prameny osnovy, než opět projde pod jedním nebo více prameny osnovy a dále se útek posouvá vždy k nejbližšímu prameni osnovy, což má za následek vytvoření diagonálního vzoru.
 - Atlasová vazba: je vazbou nejméně pevnou, kde je jeden pramen osnovy překryt čtyřmi i více prameny útku svrchu a jedním pramenem ze spodní strany, kde počet pramenů os-

novy překrytých útkem udává vaznost atlasu, která bývá od 6 do 12. Výsledný povrch je lesklý a hladký, což je dáno tím, že plošky lan leží rovnoběžně s povrchem, díky čemu jsme schopni dosáhnout výborného objemového podílu vláken ve výsledném kompozitním materiálu, což má za následek vysokou pevnost a tuhost.



Obr. 4 Rozdělení kompozitních materiálů dle geometrických tvarů výztuže [2].



Obr. 5 Rozdělení textilních vazeb vláknových výztuží s dlouhými vlákny [1].

1.1.1 Skelná vlákna

Díky silné kovalentní vazbě mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny mají relativně vysoký modul pružnosti v tahu.

1.1.1.1 Základní vlastnosti skelných vláken [3]:

- Skelná vlákna jsou izotropní, tedy vlastnosti v příčném a podélném směru jsou stejné.
- Skelná vlákna mají přibližně stejný modul pružnosti v tahu jako hliník, přičemž pevnost v tahu je výrazně vyšší než u oceli a také než u většiny anorganických a organických vláken.
- Skelná vlákna nemají viskoelastické chování.
- Skelná vlákna jsou nehořlavá, přičemž ani dlouhodobé působení teploty 250°C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností.

1.1.1.2 Základní druhy skelných vláken

- Skelná vlákna z bez alkalické skloviny: jsou často označována jako E-vlákna, což je důsledkem jejich vynikajících elektroizolačních vlastností s poměrně vysokou propustností záření a jedná se o nejrozšířenější druh skloviny určený k výrobě vláken cca 90% trhu [3].
- Skelná vlákna vyrobená s R-skloviny: tato resistence skloviny má vysoký obsah SiO_2 , MgO a Al_2O_3 čímž má o 40% až 70% vyšší pevnost [3].
- Skelná vlákna vyrobená s C-skloviny: vlákna vyrobená z této skloviny mají výbornou odolnost proti kyselinám a chemicky agresivním látkám [3].
- Skelná vlákna vyrobená s ECR-skloviny: mají vyšší dielektrickou konstantu než má E-sklovina, proto se nepoužívají v kosmonautice [3].

1.1.2 Uhlíková vlákna

Jsou vlákna se skvělou pevností a tuhostí nicméně s nízkou tažností. Organické suroviny, které jsou výchozí ve vláknitém tvaru, jsou karbonizovány a při karbonizaci dochází k odštěpení téměř všech prvků kromě uhlíku. Grafítizace dosáhneme zvyšující se teplotou, přičemž nad 1800°C se tvorba grafitové struktury zastaví. Vyšší grafítizací dosáhneme lepších mechanických vlastností [3].

1.1.2.1 Výchozí materiály pro výrobu uhlíkových vláken [3]:

- Celulóza: Vyrobená vlákna se používají především jako izolační materiály pro vysoké teploty, jelikož nemají dokonalou strukturu.
- Polyakrylonitril: Tato vlákna jsou velmi rozšířená a jedná se o vlákna standardní.
- Smola: Vlákna získaná z tohoto materiálu mají nižší pevnost v tahu oproti standardním vláknům, jelikož vazby mezi grafitovými rovinami jsou řídké. Tato vlákna nejsou příliš rozšířená.

1.1.2.2 Základní vlastnosti uhlíkových vláken [3]:

- Se zvyšujícím zatížením stoupá modul pružnosti v tahu, tedy vlákna mají progresivní deformační chování.

- Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost spolu s vysokým modulem pružnosti v tahu i při vysokých teplotách, které mohou dosahovat až 500°C
- Dobrou tepelnou a elektrickou vodivost
- Dobrou odolnost proti korozi
- Jsou kompatibilní s tělesnými tkáněmi
- Jsou anizotropní a mají modul pružnosti v tahu daleko větší ve směru vláken než ve směru kolmém
- Neodráží radarové paprsky, jsou průchozí pro záření
- Jsou hořlavá, avšak hoří velmi pomalu
- Uhlíková vlákna jsou odolná proti dlouhodobému dynamickému namáhání
- Uhlíková vlákna jsou křehká a při zpracování se musí povrchově upravovat apretací směsí na bázi epoxidové pryskyřice, které slouží k ochraně a zároveň zlepšuje vazby mezi vlákny a matricí

1.1.3 Aramidová vlákna

Jsou vlákna s vysokou pevností a tuhostí na bázi lineárních organických polymerů, přičemž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Aramidová vlákna jsou zpracovatelná s veškerými běžnými termoplasty i s reaktivními pryskyřicemi, přičemž v laminátu lze využít až 70% jejich reálné pevnosti, ve zvláštních případech dokonce ještě více, tato vlákna mají záporný součinitel teplotní délkové roztažnosti ve směru vláken, což je způsobeno vysokou orientací molekul, jelikož kovalentní vazby ve směru molekul jsou pevnější než vedlejší vazby mezi makromolekulami, které mají příčné oscilace daleko větší a působí tahovými silami na kotvící body a stahují vlákna v podélném směru dohromady, tedy v případě že bude na vlákna působit zvyšující se teplota, bude jejich oscilace v příčném směru vzrůstat a tím pádem bude docházet k jejich smrštění účinkem entropie [3].

1.1.3.1 Základní vlastnosti aramidových vláken [3]:

- Májí velmi vysokou pevnost v tahu, jelikož se jedná o nejlehčí vyztužující vlákno
- Aramidová vlákna jsou anizotropní

- Aramidové vlákna jsou vhodná pro konstrukce namáhané na tah a nehodí se pro namáhání ohybem nebo tlakem, což je dáno tím, že pevnost v tlaku je výrazně nižší než pevnost v tahu
- Jsou obtížně obrobitelná
- Aramidová vlákna nejsou příliš odolná proti vysokým teplotám, teplota skelného přechodu je 300°C a teplota rozkladu je 480°C. V kompozitech vydrží teploty až do 300°C, přičemž se netaví a tím pádem jsou vhodná pro použití ochranných obleků
- Aramidová vlákna jsou citlivá na UV záření, což má za následek pokles pevnosti
- Aramidová vlákna jsou schopna absorbovat vlhkost do 7%, což vede ke snížení pevnosti vlákna, ale také mezi spoji vláken s matricí, proto se vlákna před použitím vysušují cca 20 min při 120°C

1.2 Matrice a jejich dělení u polymerních kompozitů

Matrice je materiál, který slouží k zaručení geometrického tvaru, přenosu sil a ochraně vláken, jedná se o materiál, který je prosycen systémy výztuží, takový materiál pak nazýváme kompozit. K dosažení fyzikální a chemické vazby je zásadní adheze na hranici vláken a matrice, přičemž ji dosáhneme vhodnou apretací, která se nanese na vlákna[3].

1.2.1 Reaktivní pryskyřice

Jedná se o nejrozšířenější skupinu termosetů pro výrobu kompozitu, přičemž jsou to tavitelné nebo kapalné pryskyřice [3].

Nejpoužívanější typy reaktivních pryskyřic jsou [3]:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice
- Vinylesterové pryskyřice
- Fenolické pryskyřice
- Izokyanátové pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice
- Metakrylátové pryskyřice

1.2.1.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice patří mezi termosety s velice dobrými mechanickými vlastnostmi, dále mají vysokou rozměrovou stálost a dobrou přilnavost k povrchu, pouze 8% celkové produkce je využito jako matrice pro kompozitní materiály. Hlavní uplatnění mají jako zalévací hmoty pro elektroniku, výrobu forem a taktéž jsou používány pro různé povlaky, zejména pro práškové povlakování.

Epoxidové pryskyřice obsahují v molekule nejméně jednu častěji však dvě epoxidové skupiny, které jsou nutné pro stavbu makromolekuly, tvrdidlo je přidáváno v kapalném nebo i v tuhém stavu a obsahuje v molekule aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými pryskyřicemi, tyto pryskyřice jsou za normálních teplot kapalné a obsahují rozpouštědla.

Nevytvrzené pryskyřice mají epoxidovou skupinu trojčlenného kruhu, který se skládá z jednoho kyslíkového a dvou uhlíkových atomů, jelikož je tento kruh napjatý má tendenci se otevřít za působení aktivních vodíkových můstků, proto vícefunkční epoxidy spolu s vícefunkčními tvrdidly tvoří trojrozměrnou síť. Tento reakční mechanismus se nazývá polyadice [3].

1.2.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE)

U vinylesterových pryskyřic probíhá zasítování pomocí koncových metakrylátových skupin za vzniku esterových vazeb. Vyrábějí se z bisfenolu A, popřípadě jako novolakové VE pryskyřice. Vinylesterové pryskyřice VE obsahují reaktivní rozpouštědlo a makromolekula předpolymeru VE má méně reaktivních míst s porovnáním UP, a proto je dvojná vazba umístěna pouze na koncích makromolekuly. Výsledná matrice má pak větší ohebnost a lepší odolnost proti tvorbě mikrotrhlin, což je dáno důsledkem menšího zasítování [3] [1].

1.2.1.3 Fenolické pryskyřice (PF-R)

Variety fenolických pryskyřic vycházejí z nejrůznějších druhů fenolu o různých molárních poměrech fenolu/formaldehydu, také mohou tyto pryskyřice vycházet z různých chemických a fyzikálních modifikací. Vždy se jedná o reaktivní pryskyřice vyráběné kondenzací fenolu a 30 až 50% vodných roztoků aldehydů.

Fenol a formaldehyd může být nahrazen vysokomolekulárními aldehydy, což má za následek zvýšení ohebnosti, zvětšení reaktivity za nižších teplot [3] [1].

1.2.1.4 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou bezbarvé, popřípadě slabě zažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které se vytvrzují za normální teploty nebo zvýšené teploty bez vzniku těkavého produktu. Reakční teplo je uvolňováno při vytvrzování a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9%. Nenasycená polyesterová pryskyřice obsahuje oligomerní lineární molekuly spolu s reaktivními dvojnými vazbami. Ve styrenu se rozpouštějí vysokoviskozní pryskyřice, které zároveň působí při vytvrzování jako kopolymerační monomer a radikálovými mechanismy se vytvrzují. Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou jedny z nejpoužívanějších matric, a to díky dobrému smáčení vláken, vysoké rychlosti vytvrzování a relativně nízké ceně.

Tyto pryskyřice se používají již od roku 1936 a přes 70% produkce těchto pryskyřic se uplatňuje ve výrobě kompozitních materiálů [3].

1.2.2 Termoplasty

Termoplasty se od termosetů liší především ve zpracovatelských podmínkách, jelikož je potřeba pro zpracování termoplast zahřát na zpracovatelskou teplotu cca 200°C, rozpouštědla pro snížení viskozity způsobují i po jejich odstranění nižší odolnost proti korozi při napětí. Vzhledem k velkému počtu termoplast pro matrice je jejich porovnání velmi obtížné [3].

2 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ

V dnešní době se používá celá řada výrobních technologií. Základní technologie jsou založeny na principech tažení, lisování, stříkání a navíjení. Výrobní technologie se liší produktivitou práce, obsaženým objemovým podílem vláken, opakovatelností, výchozím polotovarem, tvarovými možnostmi a typem zpracovávaného pojivového systému matrice [8].

Pro vysokou únosnost kompozitního materiálu je rozhodující objemový podíl vláken, čím je tento podíl vyšší tím pádem je i vyšší únosnost laminátu, což platí cca do 70 % zastoupení vláken. Níže v tab. 1 je uvedeno objemové zastoupení vláken pro různé technologie [8].

Výrobní technologie	Objemový podíl vláken v laminátu v %
Pultruze	43 – 83
Ovíjení	25 – 65
Navíjení	45 – 65
RTM	25 – 65
Lisování	30 – 50
Lisování polotovarů GMT a SMC	15 – 40
Pokládání prepregů (autokláv)	50 – 70
Stříkání	18 – 35
Ruční laminace	10 – 38

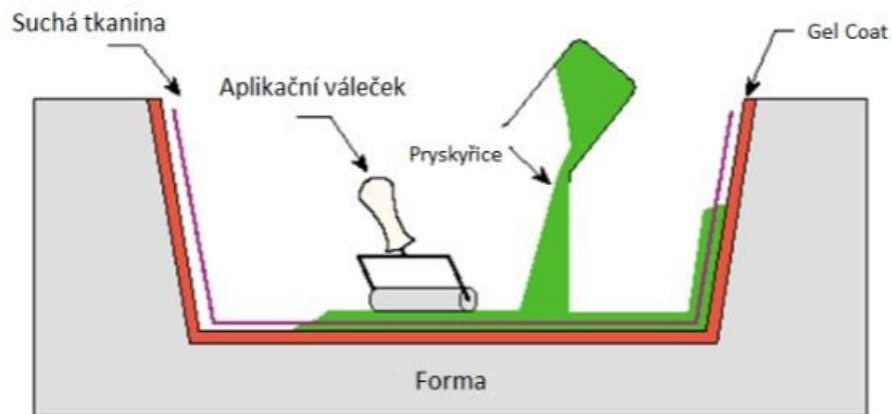
Tab. 1. Srovnání výrobních technologií dle obsaženého objemového podílu vláken [8].

2.1 Ruční kladení za mokra

Na otevřenou formu se kladou výztuže v podobě rohože nebo tkaniny a prosycování se provádí tekoucí pryskyřicí, která se nanáší ručně. Touto metodou lze vyrobit i velmi rozměrné výrobky[1].

Při této výrobní metodě se odpařují z reaktivní pryskyřice do okolí rozpouštědla, což může mít vliv na hygienu práce, proto se používají UP pryskyřice s vosky, které vytvářejí na povrchu stojící pryskyřice nepropustnou vrstvu. Obsah vosku v pryskyřici má malý vliv na prosycování[1].

Výroba ručním kladením za mokra je možná při použití UP pryskyřic pouze za teplot přesahujících 15°C, vytvrzování se provádí při pokojové teplotě, popřípadě jej lze urychlit urychlovači [1].

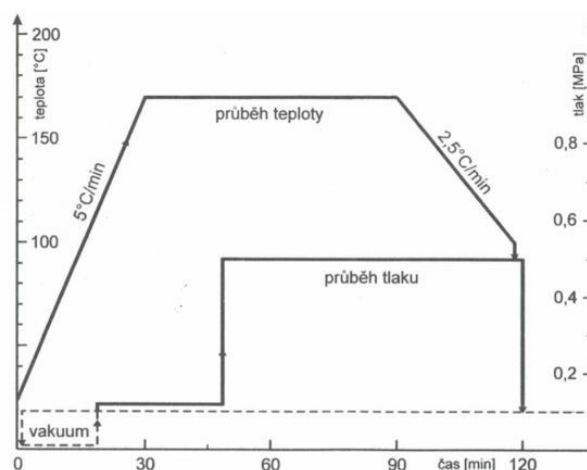


Obr. 6. Schéma ručního kladení za mokra [9].

2.2 Pokládání prepregů, vytvrzování v autoklávu

Použití prepregů zaručuje velmi vysoký objemový podíl vláken a tím je zaručena vysoká únosnost. Tato technologie se používá pro nejnáročnější aplikace v leteckém a automobilovém průmyslu. Přířezy prepregů jsou na formu pokládány ručně nebo mohou být pokládány portálovými roboty.

Výrobek je potřeba nejprve celý vložit do vaku z vysoko tažné fólie s technologickými vrstvami pro odsátí nadbytečné pryskyřice při vytvrzování. Vytvrzování výrobku probíhá v autoklávu, což je velká tlaková nádoba s ohřevem, tedy na výrobek působí zvýšená teplota, přetlak a vakuum, vytvrzovací cyklus je na obr. 7 [8].

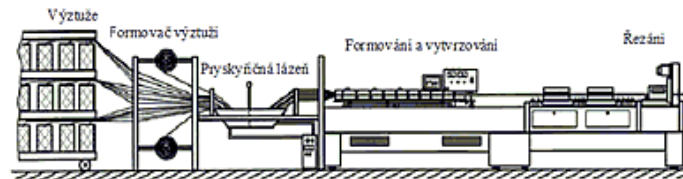


Obr. 7. Vytvrzovací cyklus autoklávu pro uhlíkový prepreg Sigrafil Ce 1003 [8].

Pultruze je kontinuální výrobní technologie, kde jsou vlákna impregnována tekutou UP a nebo VE pryskyřicí, dále jsou vtahována do tvarovací a vytvrzovací hlavy. Vytvrzovací

hlava umožňuje pro skelná vlákna i mikrovlnný ohřev a pro uhlíková vlákna je možný indukční ohřev. Hotový vytvrzený nekonečný profil je dále odtahován housenkovými pásy, kde je dále dělen na potřebnou délku diamantovým kotoučem.

Nejnovější pultruzní stroje mají pro lepší prosvycování pryskyřici vstříkovanou přímo do tvarovací hlavy, což lépe prosytí výztužná vlákna a zároveň odstraní páry uvolňované z rozpouštědla [1].



Obr. 8. Schéma putruzního stroje [10].

2.4 RTM

Tato technologie využívá uzavřenou formu, díky tomu se do okolí neuvolňují výpary z reaktivního rozpouštědla, které je obsaženo v UP a VE pryskyřici. Pryskyřice spolu s tvrdidlem se ohřejí a následně se dopravují do prostoru mísící hlavy, kde se smíchají a následně jsou injekčně vstříknuty do dutiny většinou hliníkové nebo ocelové formy. Celý proces se odehraje v jednom kroku, kde je materiál také lisován a vystaven vakuu. Hlavní výhodou této technologie je přesnost dílu s hladkými povrchy po obou stranách [1] [8].



Obr. 9. Schéma RTM [1].

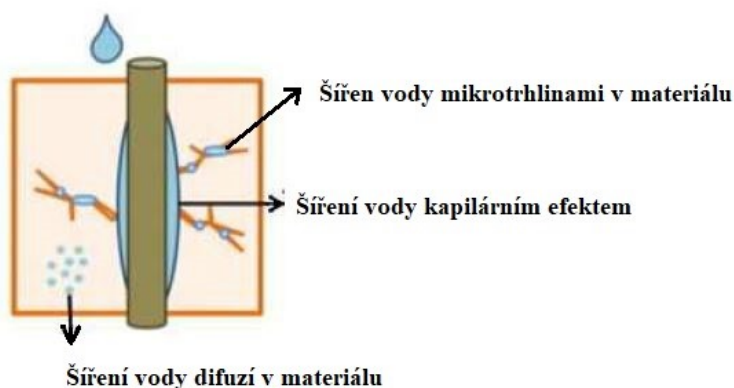
3 VLIV VLHKOSTI NA KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Vliv vlhkosti na kompozitní materiály je komplexní. Výsledkem působení vlhkosti na materiál je oslabení rozhraní vláken s matricí a plastizace materiálu, kde převážnou část celkové vlhkosti pohlcené kompozitním materiálem pohltí matrice, která nabobtná. K úplnému nasycení dílce dochází pouze výjimečně. [5].

3.1 Vliv vlhkosti na matrici

Vlhkost do matrice může prostupovat následujícími způsoby dle Obr. 10 [5] [13]:

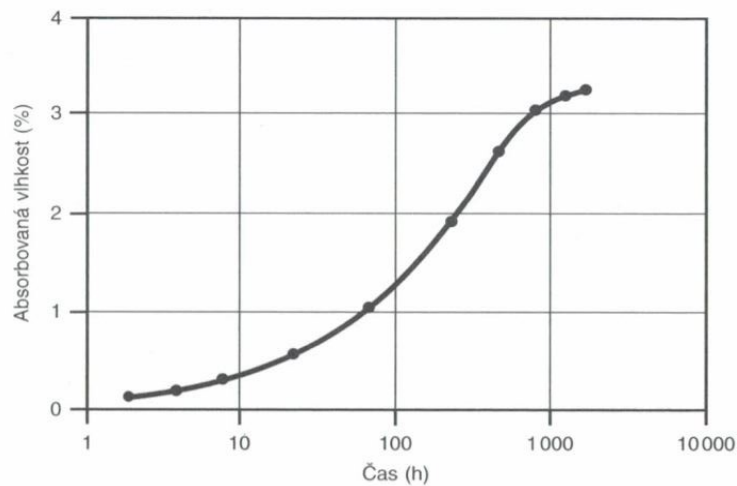
- Difuzí, jedná se o samovolné rozptylování částic v matrici. Podstatou difuze je dle 2. termodynamického zákona snaha o dosažení stavu s nejnižší vnitřní energií, díky tomu dochází ke zvyšování entropie.
- Kapilárním efektem podél rozhraní vláken a matrice, kde voda může stoupat podél vláken v matrici.
- Mikrotrhlinami a dutinami v materiálu, což vede k významné degradaci matrice.



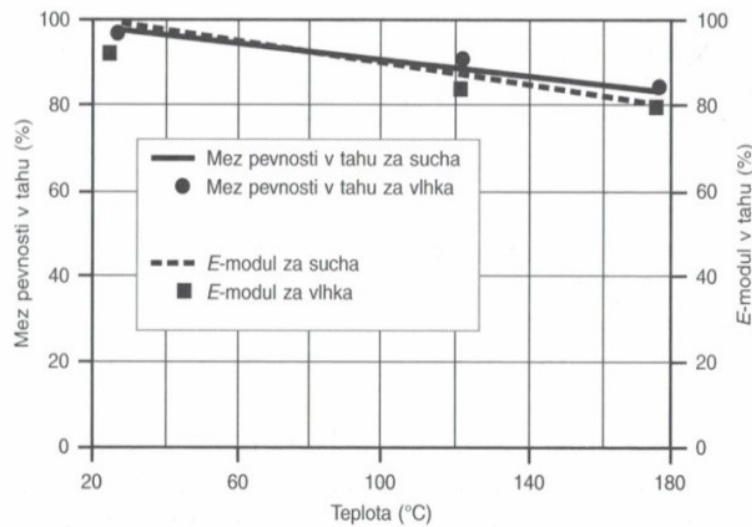
Obr. 10. Vlhkost prostupující do kompozitního materiálu [5].

3.2 Vliv vlhkosti na kompozity vyztužené aramidovými vlákny

Vliv vlhkosti na aramidová vlákna je díky polaritě karbonamidových vazeb mezi aromatickými jádry, které jsou štěpeny vysokou koncentrací OH^- iontů, jsou aramidová vlákna hydrofilní. Při podmínkách, kdy je relativní vlhkost vzduchu 50% a teplota okolí je 23°C , se pohybuje obsah vody v aramidových vláknech mezi 3 až 5%, přičemž tato vlákna mohou absorbovat vlhkost až do 7%. Proniklá vlhkost zvětšuje pohyblivost řetězců a tím snižuje modul pružnosti v tahu [3].



Obr. 11. Absorpce vlhkosti cívky aramidových vláken o hmotnosti 4,5 kg [3].



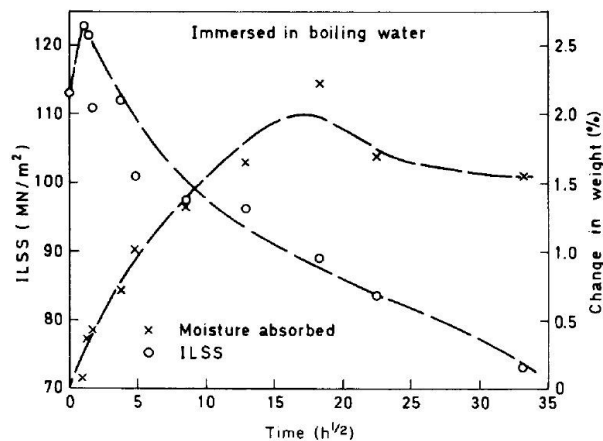
Obr. 12. Relativní pokles meze pevnosti v tahu a E-modul suchého a vlhkého aramidového vlákna v závislosti na teplotě [3].

Z provedené zkoušky, která se zabývala vlivem vlhkosti na tepelné a mechanické vlastnosti autoklávovaných a pecí vytvrzovaných epoxidových laminátů z kevlaru – 49, bylo zjištěno, že lamináty vytvrzované v peci obsahovaly větší procento dutin, což mělo za následek větší absorpci vlhkosti a vyšší hodnoty difuzivity vlhkosti. Absorpce vlhkosti způsobila zhoršení mechanických vlastností, kde hydrokopičké vlákno z kevlaru poskytlo snadnou cestu pro vniknutí vlhkosti [21].

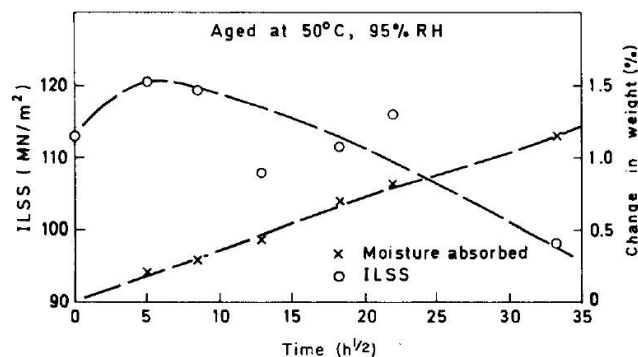
3.3 Vliv vlhkosti na kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny

Tahové napětí může urychlit absorpci vlhkosti otevřením již existujících vnitřních dutin v materiálu, které přispívají ke spojování mikrotrhlin. Vniklá vlhkost může také reagovat s nereaktivovaným epoxidem, čímž se zintenzivní proces stárnutí [19].

Difuzní koeficienty pro vlhkost v jednosměrných kompozitech z uhlíkových vláken byly vypočteny z grafů znázorněných na obr. 13 a obr. 14. Pro vzorek $12,7 \times 10^{-7} \text{mm}^2/\text{s}$, který byl vařen ve vodě a pro vzorek $13,8 \times \frac{10^{-8} \text{mm}^2}{\text{s}}$, který byl vystaven 50°C při 95% relativní vlhkosti, bylo maximální množství absorbované vlhkosti v obou případech asi 2% hmotnosti vzorku [17].

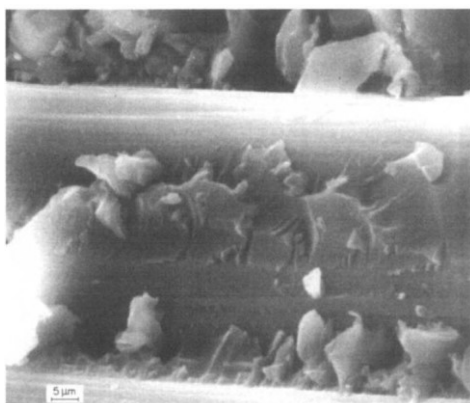


Obr. 13. Závislost mezilaminární smykové pevnosti na absorpci vody u vzorků, které byly vystaveny vařící vodě. [17].

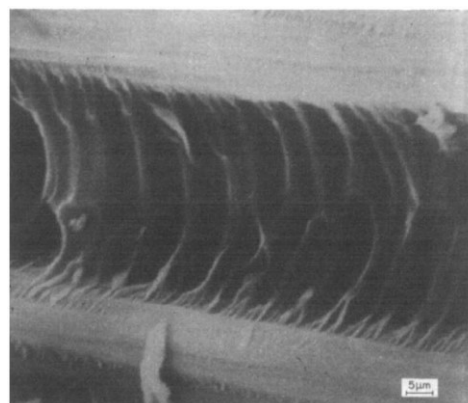


Obr. 14. Závislost mezilaminární smykové pevnosti na absorpci vody u vzorků, které byly vystaveny teplotě 50°C při relativní vlhkosti 95% [17].

Mezilaminární smyková pevnost kompozitu vzrostla, když absorbování vody bylo malé, cca 0,2 % hmotnosti vzorku. Při další absorpci vody se mezilaminární smyková pevnost kompozitu snížila. V případě, že se podíváme na lom vzorku (elektronovým mikroskopem) obr. 15, který byl vystaven vaření po dobu 16 hodin, zjistíme, že jsou vlákna mnohem hladší ve srovnání s lomem vzorku, který byl vystaven po době 72 hodin teplotě 50°C při relativní vlhkosti 95% obr. 16. U vzorku, který byl vystaven vaření, došlo k degradaci vazby vláken s matricí, ale to nemělo vliv na výsledky tříbodového ohybového testu [17].



Obr. 15. Lomový povrch vzorku, který byl vystaven 16 hodinám vaření ve vodě [17].



Obr. 16. Lomový povrch vzorku, který byl vystaven teplotě 50°C při relativní vlhkosti 95% po dobu 72 hodin [17].

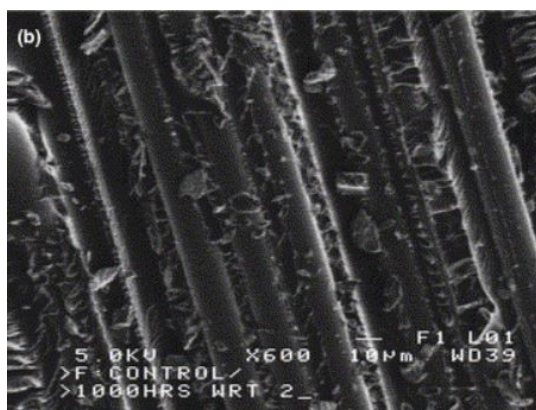
U studovaných kompozitů z epoxidových pryskyřic vyztužených uhlíkovými vlákny se mezilaminární smyková pevnost snížila se zvýšením množství absorbované vlhkosti, a byla nezávislá na způsobu vystavení prostředí za mokra. Povrchové úpravy vláken pro zajištění lepších vazeb vláken s matricí měly zanedbatelný vliv na absenci vlhkosti [17].

Další výzkum zabývající se vlivem vlhkosti na mechanické vlastnosti ukázal, že vlastnosti kompozitu na bázi epoxidů byly ovlivněny absorbovanou vlhkostí pouze ve vzorcích, které měly orientována vlákna kolmo ke směru zatížení. Z detailního zkoumání lomových ploch uhlíkových vláken epoxidového kompozitu vyplynulo, že vliv vlhkosti vedl ke zvýšení selhání rozhraní. Epoxidová matrice se díky vlhkosti stává měkčí a zhoršuje se přilnavost vláken k matrici. Vliv vody na hodnoty dominující vláknům nebyl v tomto výzkumu detekovatelný [20]. Tuto informaci potvrzuje i výzkum zabývající se vlivem dlouhodobých účinků vlhkosti na kompozity z uhlíkových vláken s epoxidovou matricí, kde došli k závěru, že hlavní vliv na celkovém snížení mechanických vlastností je způsoben hlavně bobtnáním epoxidové matrice v důsledku absorpce vody [23].

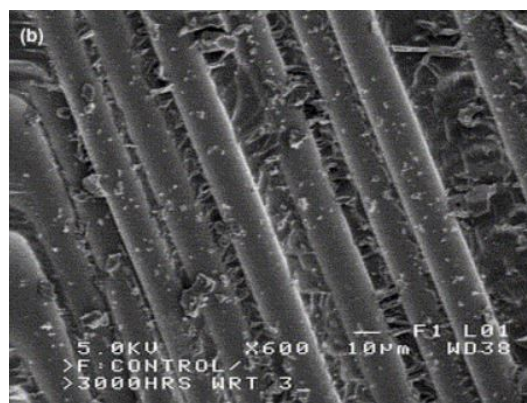
3.4 Vliv vlhkosti na kompozity vyztužené skelnými vlákny

Skelná vlákna mají hydrofilní povrch, což znamená, že při 20°C a relativní vlhkosti vzduchu 65% jsou schopna absorbovat 0,1 % hmotnosti vody, to je dáno oxidy SiO_2 a Al_2O_3 , které vytvářejí hydroxylové skupiny, ke kterým jsou vodíkovými můstky vázány molekuly vody. Čerstvě vyrobená skelná vlákna mají vysokou rychlost hydrofilie, absorbovaná vlhkost působí negativně jako tenzoaktivní látka, a tím pádem dochází ke snížení lomové energie skla. Taktéž může způsobit špatnou vazbu s polymerní matricí. Skelná vlákna se doporučují před použitím, a to i za podmínek že nebyla skladována ve vlhkém prostředí, vysoušet v horkovzdušných sušárnách [1].

Studie, která zkoumala kombinované účinky zatížení, vlhkosti a teploty na kompozitním materiálu s epoxidovou pryskyřicí se skelnými vlákny, která byla vyrobeny z E-skla, ukázala, že při pokojové teplotě po 500 a 1000 hodinách kondicionování ve vodě dojde ke snížení modulu. To bylo způsobeno přítomností vody, jelikož se předpokládá, že voda difunduje do kompozitu a v průběhu času saturuje matrici, až dosáhne rozhraní vláken s matricí, protože pryskyřice na bázi epoxidů absorbují vodu. Očekává se, že přítomnost vody v matrici na bázi epoxidu změkčí síť a sníží modul v důsledku zvýšení volného objemu a snadnosti segmentového pohybu, když se na kompozit aplikuje zatížení. Další sorpce vody od 500 h do 3000 h při pokojové teplotě vedla ke zkrěhnutí zkušebních těles a ke snížení pevnosti a mírnému poklesu modulu v důsledku plastifikace matrice vodou [22].



Obr. 17. Porucha vzorku, který byl vystaven po 1000 hodin vodě při pokojové teplotě [22].



Obr. 18. Porucha vzorku, který byl vystaven po 3000 hodin vodě při pokojové teplotě [22].

4 ÚNAVA MATERIÁLU A JEHO TECHNICKÁ ŽIVOTNOST

K zajištění bezpečné životnosti daného výrobku je nezbytné znát údaje o provozních spektech, zatížení a o kritických částech konstrukce, kde by mohly vznikat defekty. Na základě znalosti dané konstrukce se provádí celá řada měření a výpočtů, výstupy jsou náhodného charakteru s poměrně vysokým rozptylem hodnot, což znamená, že nelze zkonstruovat výrobek, u něhož by nemohlo dojít k poruše, nicméně na základě správného vyhodnocení zkoušek a měření můžeme zkonstruovat výrobek, který bude mít pravděpodobnost vzniku poruchy na únosném stupni [6].

Mezním stavem únavy materiálu se rozumí stav, kdy dojde vlivem časově proměnných zatížení k poruše materiálu a tento již nebude funkčně způsobilý [7].

4.1 Únavové poškození u kompozitních materiálů

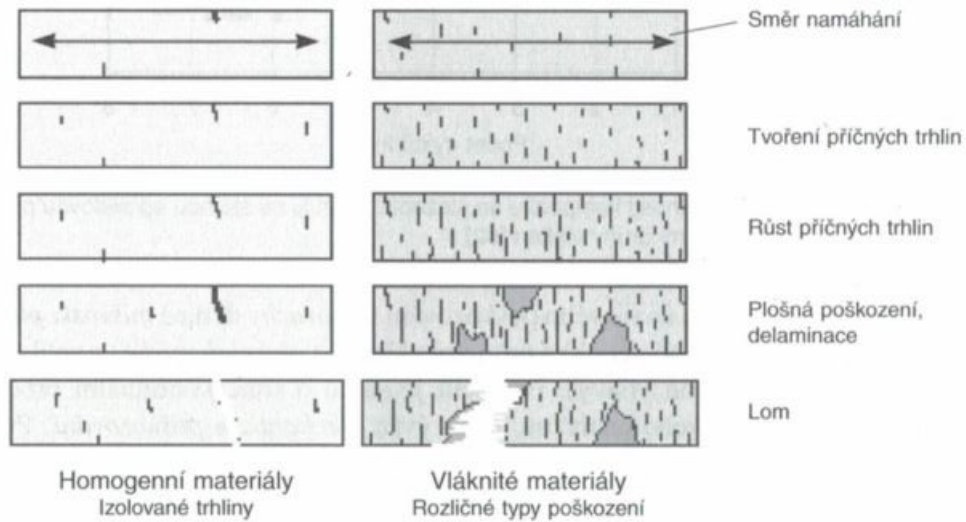
Únavovým poškozením rozumíme poměrný pokles únavového života zkoumané součásti vzniklým proměnným zatížením a říká nám, jaký vliv má proměnné zatížení na únavovou životnost. U nových součástí je únavové poškození rovno nule a u součástí přetržené lomem je rovno jedné [6].

Hlavní faktory ovlivňující únavové chování kompozitního materiálu:

- Vliv střední složky
- Vliv okolního prostředí – vlhkost, teplota
- Vliv výztuže a její orientace
- Vliv konstrukce – koncentrátoři napětí
- Vliv cyklického zatěžování

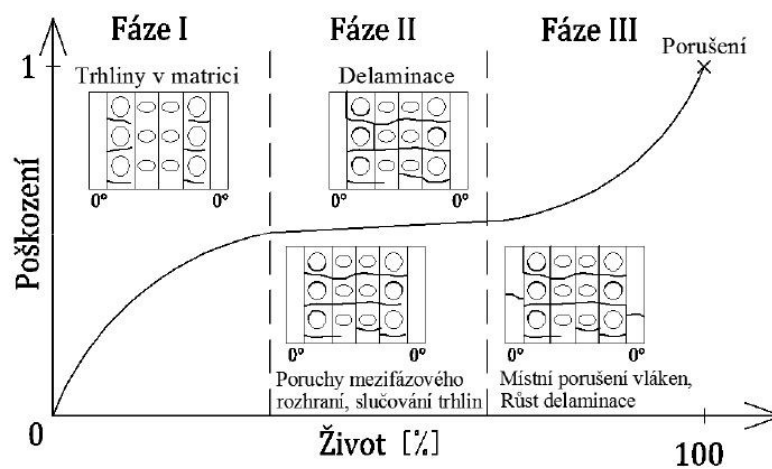
Kompozitní materiály umožňují optimalizaci konstrukce díky variabilitě jejich vláknových struktur s ohledem na předpoklady následného namáhání, nicméně díky jejich mikro i makroskopické struktuře existuje celá řada způsobů porušování. Což pro izotropní materiály, například kovy, neplatí a je proto důležité správně pochopit a interpretovat chování kompozitních materiálů při únavovém namáhání. U kovových materiálů při cyklickém zatěžování se typicky vytvoří lokálně působící trhlinka, kde lze popsat její růst a kritickou velikost aparátém lomové mechaniky, což pro vláknové kompozity neplatí, jelikož při dynamickém namáhání vznikají a rozvíjí se různé typy poruch v celém objemu materiálu.

Jednotlivé poruchy nemají takový význam jako trhlinka u kovového materiálu, jelikož u vlákniny vyztužených kompozitů může trhlina zastavit vedlejší pevnější složka. Rozdíly vzniku a šíření trhlín je vidět na obr. 19. [3].



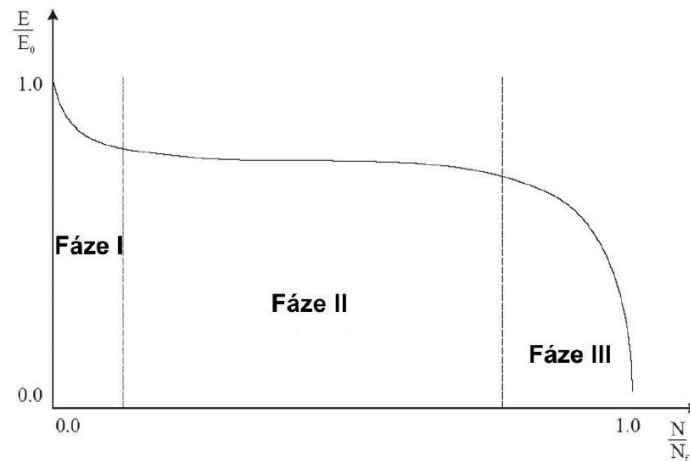
Obr. 19 Průběh poškození u homogenních a heterogenní materiálu [3].

Proces únavového poškození kompozitního materiálu je zobrazen na obr. 20 a lze jej rozdělit na tři fáze, kde první fáze nastává již po určitém počtu cyklů. Hlavním důvodem bývá iniciace trhlín v matici, která je doprovázena strmým nárůstem poškození. Druhá fáze je doprovázena pozvolným nárůstem trhlín, což je zapříčiněno nárůstem trhlín v matici spolu se vznikem delaminace a ve třetí fázi již dochází k hromadnému porušování vláken a k velkému nárůstu delaminace až do úplného přetržení [7].



Obr. 20 Rozvoj poškození během zkoušení životnosti kompozitního materiálu $\left[\left(\frac{0^\circ}{90^\circ}/\pm 45^\circ\right)_s\right]$, [7].

V závislosti na postupujícím poškození v kompozitním materiálu klesá i jeho tuhost, což je vidět na obr. 21. Zde je pokles tuhosti rozdělen taktéž na tři fáze, které odpovídají nárůstu poškození a poklesu životnosti materiálu.



Obr. 21 Průběh poklesu tuhosti kompozitních materiálů, namáhaných na tah – tah, skladba

$$\left[\left(\frac{0^\circ}{90^\circ} / \pm 45^\circ \right)_s \right], [11].$$

Typy poškození, které vznikají u vlákny vyztužených kompozitů, můžeme rozdělit do následujících skupin [3]:

- Trhlina v matrici
- Porušení soudržnosti vlákna s matricí
- Lom vlákna
- Delaminace, porušení soudržnosti jednotlivých vrstev, což se projevuje u vrstvených materiálů při postupujícím procesu únavy

Rozsah typů a časové pořadí poškození dále závisí na vlastnostech jednotlivých složek, ze kterých se materiál skládá, dále závisí na orientaci vláken, druhů zatěžování, a proto je prakticky nemožné kvalitativně vlivy jednotlivých poruch ohodnotit a dále formulovat obecné zákonitosti procesu porušování [3].

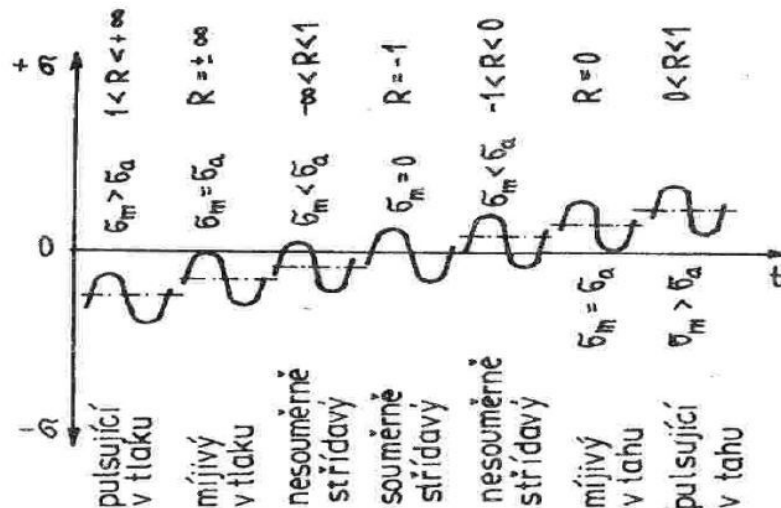
4.2 Dynamické zkoušky

Dynamické zkoušky se provádí při různých typech namáhání a při různých úrovních, přičemž se dají zkoušky rozdělit na dva modely [12][6]:

- První jednostupňový model má konstantní zátěž a k poruše dojde až po určitém počtu cyklů, deformace se zvyšuje s rostoucím počtem cyklů, tento model je vhodný pro odvození standartních S-N křivek.
- Druhý vícestupňový model má na začátku konstantní zatížení či deformaci, při kterém neprobíhají v materiálu žádné změny, a dále se stupňovitě zvedá zátěž, až dojde k selhání materiálu, což je také kritérium pro ukončení zkoušky. Tento model se používá při testování únavových lomů.

4.2.1 Druhy zatěžování

Druhy zatížení nám určuje aplikace pro jakou je daný díl navržen, přičemž může být díl zatěžován tlakově, tahově anebo kombinací obou složek, ze kterých se výsledné zatížení skládá. Kompozitní materiály se chovají pod napětím různě, například pod tlakovým zatížením dochází k únavě matrice a pod tahovým zatížením dochází k únavě vláken, které mají lepší mechanické vlastnosti než matrice [12].



Obr. 22 Klasifikace zátěžných cyklů dle velikosti σ_a , σ_m , a součinitele asymetrie cyklu R [6].

4.2.2 Průběh křivky zatěžování

Průběh křivky zatěžování má také vliv na únavovou životnost, přičemž nejpoužívanější je sinusový průběh, což je dáno jednoduchostí testovacích zařízení, ale hlavně nejrealističtější

šími výsledky s porovnáním tvarů křivek trojúhelníkových, čtvercových a pilových zubů [12].

4.2.3 Frekvence při zkoušce

Kompozitní materiály jsou na rozdíl od kovů při testování únavové životnosti značně ovlivněny frekvencí, což je dáno tím, že při zatížení materiálu vyšší frekvencí dochází k jeho zahřátí nebo při nižších frekvencích může docházet k jeho vyšší creepové deformaci, popřípadě k obojím.

Uvolněné napětí se přemění v teplo, které má za následek ohřívání materiálu, což může materiál ohřát až na teplotu vyšší než je teplota skelného přechodu matrice a tím pádem dojde k výraznému snížení únavové životnosti. Tento jev je u kompozitních materiálů běžně pozorován [12].

4.2.4 Testovací teplota

Převážná část experimentálních zkoušek je prováděna za normálních teplot, je to proto, že tento typ zkoušky je jednodušší a také levnější a poskytuje základní informace o chování materiálu při jeho únavě. Nicméně ve skutečnosti jsou materiály vystavovány kombinovanému termomechanickému zatěžování a tedy pro návrh designu jsou tyto testy nezbytné, jelikož platí, že při vyšších teplotách se snižuje únavová životnost daného materiálu [12].

4.2.5 Wöhlerovy křivky

K popisu únavového chování se nejčastěji používají pro vlákny vyztužené kompozity Wöhlerovy křivky. Kritériem únavy je lom, což znamená úplné porušení zkušebního tělesa, díky statistickému vyhodnocení zkoušek jsme schopni poměrně dobře hodnotit vhodnost materiálů pro konkrétní únavové namáhání [3].

V případě, kdy se lom pro dynamické zatížení ukáže jako nedostatečným kritériem, což se projevuje u vláknů vyztužených materiálů, kde s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou klesá tuhost a vlastnosti se mění v určitých mezích s rostoucím počtem cyklů, se pro vlákna vyztužené prvky stanoví kritérium únavy, což může být určitý pokles tuhosti obvykle 10% popřípadě 20%, což vede k získání dalších informací o časovém průběhu únavy [3].

I. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je studium a vyhodnocení vlivu vlhkosti na únavovou životnost konstrukčních kompozitů. K tomu to účelu budou vyrobeny tři vzorky výrobní technologií ručního kladení za mokra s vyztužujícími tkaninami z aramidových, uhlíkových a sklených vláken. Vzorky budou nařezány na zkušební tělesa, která budou kondicionována v atmosferických podmínkách a ve vodě po dobu 750h a 1000h.

Na zkušebních tělesech z různých kompozitních materiálů, která budou kondicionována v různém prostředí, se provedou statické zkoušky ke zjištění maximální síly F_{max} , která je důležitá pro zvolení horní meze cyklického zatížení.

Dynamické zkoušky budou provedeny u různě kondicionovaných zkušebních těles, a to vždy na jedné zvolené horní mezi cyklického zatížení pro konkrétní kompozitní materiál, ze kterého budou vyrobena zkušební tělesa, aby bylo možné určit, jaký vliv měla vlhkost na jejich únavovou životnost.

Závěrem bude grafické vyhodnocení vlivu vlhkosti na únavovou životnost vybraných kompozitních materiálů.

6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Vliv vlhkosti na únavovou životnost bude testován u zkušebních těles splňující normu ČSN EN ISO 527 – 4. Zkušební tělesa jsou vyřezána ze třech vzorků, které jsou vyrobeny výrobní technologií ručního kladení za mokra z kompozitních materiálů s uhlíkovými, aramidovými a skelnými vlákny. Každý vzorek má pět vrstev jednoho druhu tkaniny.

6.1 Popis výroby vzorků

Vzhledem k tomu, že se postup výroby pro všechny vzorky opakuje, je níže uveden obecný postup výroby, dále pak následují detaily pro konkrétní typ kompozitního materiálu:

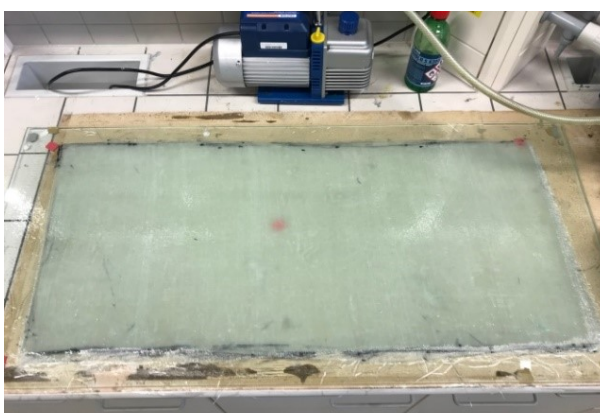
- Nejprve je potřeba celou formu, což je v našem případě skleněná tabule o rozměru 900 x 600 mm, řádně vyčistit od zbytků staré pryskyřice a odmastit ji, k tomuto účelu byla použita škrabka a acetonové ředidlo
- Dále byl nanesen separační vosk Havel Wax 60 – x3, který se nanáší na povrch formy hadříkem v kruhových pohybech. Po nanesení následovalo vyleštění povrchu skla papírovou utěrkou. Tento soubor činností byl proveden celkem třikrát. Separací vosk slouží k dobrému oddělení výrobku, v našem případě vzorku, po vytvrzení pryskyřice
- Jakmile byla forma připravená, bylo potřeba nastříhat pět vrstev výztuže
- Po přípravě výztuže následovala příprava matrice, kde byl zvolen hmotnostní poměr 45 % výztuže / 55% matrice. Z tabulky epoxidových systémů se určil poměr pryskyřice a tužidla, který je 100:40, po jejich smíchání získáme matici určenou k prosvycování vláken. Míchání bylo provedeno dřívkem v nádobě pro tuto činnost určené
- Zde začíná nanášení matrice vždy ve dvou směrech (v podélném a příčném) na formu a po nanesení pokládáme první vrstvu výztuže pod úhlem 0°, dále výztuž přejedeme vlačovací válečkem taktéž ve dvou směrech, aby došlo k dobrému prosvycení vláken, a dále se proces opakuje s tím, že výztuž je kladena vždy ve stejném směru, tedy pod úhlem 0°
- Nakonec se nechá takto připravený materiál vytvrdnout a po vytvrzení se od formy odseparuje nožem, přičemž je potřeba na poslední vrstvu nanést také matici, aby byla všechna vlákna dobře prosvycena
- Vytvrzování probíhalo za atmosférických podmínek

6.1.1 Příprava vzorku z kompozitního materiálu se skelnými vlákny

Pro výrobu vzorku byly zapotřebí položky, které jsou uvedeny v tab. 2.

Název	Použitý materiál	Množství
Separáční vosk	Havel Wax 60 - x3	-
Pryskyřice	Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS)	307 g
Tuřidlo	Tuřidlo 285 (MGS)	123 g
V�yztuř	Skelná tkanina 200 g/m2 AEROGLOSS, kepr	350 g

Tab. 2 Použité materiály a jejich množství pro v yrodu vzorku se skelnými vlákny



Obr. 23 Vzorek se skelnými vlákny AEROGLOSS

6.1.2 Příprava vzorku z kompozitního materiálu s karbonovými vlákny

Pro v yrodu vzorku byly zapotřebí položky, které jsou uvedeny v tab. 3.

Název	Použitý materiál	Mnořství
Separáční vosk	Havel Wax 60 - x3	-
Pryskyřice	Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS)	358 g
Tuřidlo	Tuřidlo 285 (MGS)	143 g
V�yztuř	Uhlíková tkanina 200 g/m2 kepr	410 g

Tab. 3 Použité materiály a jejich množství pro v yrodu vzorku s karbonovými vlákny



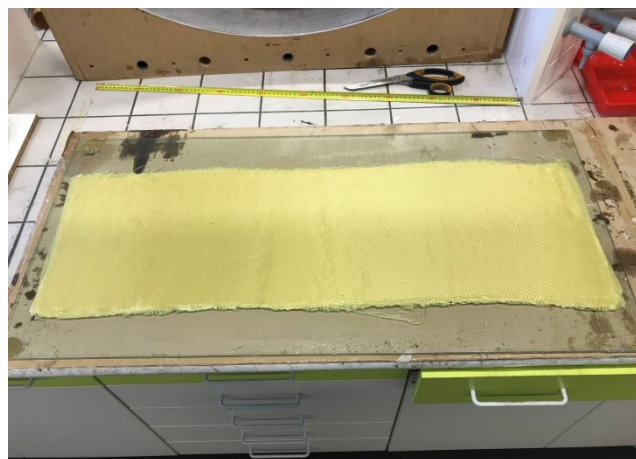
Obr. 24 Vzorek s uhlíkovými vlákny kepr

6.1.3 Příprava vzorku z kompozitního materiálu s aramidovými vlákny

Pro výrobu vzorku byly zapotřebí položky, které jsou uvedeny v tab. 4.

Název	Použitý materiál	Množství
Separáční vosk	Havel Wax 60 - x3	-
Pryskyřice	Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS)	268 g
Tuřidlo	Tuřidlo 285 (MGS)	95 g
V�yztuř	Aramidová tkanina 173 g/m2 kepr	235 g

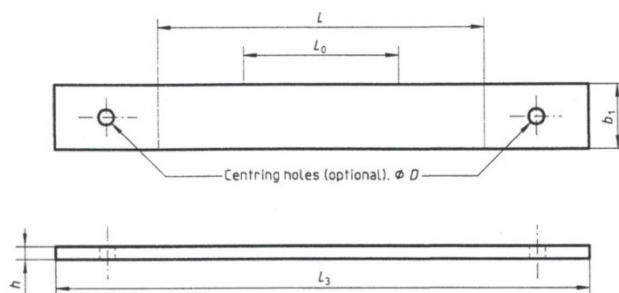
Tab. 4 Použité materiály a jejich množství pro v yrodu vzorku s aramidovými vlákny



Obr. 25 Vzorek s aramidovými vlákny

6.2 Popis výroby zkušebních těles

Řezání všech zkušebních těles bylo provedeno vodním paprskem dle normy ISO 527 - 4, zkušební tělesa pravoúhlé bez koncových jazýčků, což odpovídá typu 2, kde byla vynechána díra, jelikož se zkušební tělesa budou upínat do čelistí bez její nutnosti [15].



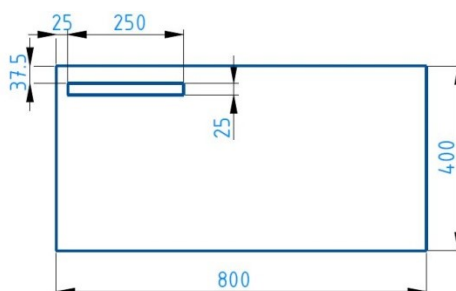
Obr. 26. Zkušební těleso pravoúhlé bez koncových jazýčků typ 2

Rozměry jsou v tab. 5:

Rozměry	mm
L_3	250
b_1	$25 \pm 0,5$
L_0	50 ± 1
L	150 ± 1
L_3	$3 \pm 0,25$

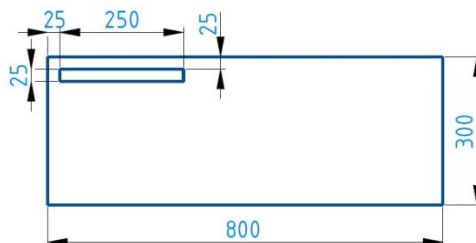
Tab. 5 Základní rozměry vzorků [15].

Směr řezání zkušebních těles ze vzorků z kompozitních materiálů ze skelných a uhlíkových vláken je znázorněn na obr. 27, přičemž bylo potřeba zkušební tělesa začít řezat s dostatečnou vzdáleností od okrajů vzorků, jelikož zde docházelo k roztřepení tkaniny, což bylo způsobeno obtížností přesného kladení jednotlivých vrstev výztužné tkaniny ručním kladením za mokra. Hodnoty jsou uváděny v mm.



Obr. 27 Směr řezání zkušebních těles ze vzorků z kompozitních materiálů ze skelných a uhlíkových vláken.

Směr řezání zkušebních těles ze vzorku z kompozitního materiálu z aramidových vláken je stejný jako u kompozitních materiálů ze skelných a uhlíkových vláken, jediným rozdílem je šířka vzorku. Vzorek je uveden na obr. 28 a uvedené hodnoty jsou taktéž v mm.



Obr. 28 Směr řezání zkušebních těles ze vzorku z kompozitního materiálu z aramidových vláken.

Okraje všech takto vyrobených zkušebních těles zůstaly neošetřené.

6.3 Kondicionace zkušebních těles

Kondicionace zkušebních těles byla rozdělena dle druhů materiálů, zkoušek, působícího média a délky času. Atmosférické podmínky byly 20°C při relativní vlhkosti vzduchu 50%.

6.3.1 Příprava zkušebních těles z kompozitního materiálu se skelnými vlákny

Ze vzorku kompozitu ze skelných vláken obr. 23 bylo vyrobeno celkem 39 zkušebních těles. Zkušební tělesa byla kondicionována dle tab. 6.

Název zkoušky	Prostředí kondicionace	Čas	Počet zkušebních těles
Statická	Atmosférické	-	5
Statická	H_2O	750 h	5
Statická	H_2O	1000 h	6
Dynamická	Atmosférické	-	8
Dynamická	H_2O	750 h	8
Dynamická	H_2O	1000 h	7

Tab. 6 Kondicionace zkušebních těles ze skelných vláken pro testování

6.3.2 Příprava zkušebních těles z kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny

Ze vzorku kompozitu z uhlíkových vláken obr. 24 bylo vyrobeno celkem 38 zkušebních těles. Zkušební tělesa byla kondicionována dle tab. 7.

Název zkoušky	Prostředí kondicionace	Čas	Počet zkušebních těles
Statická	Atmosférické	-	4
Statická	H_2O	750 h	5
Statická	H_2O	1000 h	6
Dynamická	Atmosférické	-	8
Dynamická	H_2O	750 h	8
Dynamická	H_2O	1000 h	7

Tab. 7 Kondicionování zkušebních těles z uhlíkových vláken pro testování

6.3.3 Kondicionace zkušebních těles z kompozitního materiálu s aramidovými vlákny

Ze vzorku kompozitu z aramidových vláken obr. 25 bylo vyrobeno celkem 28 zkušebních těles. Zkušební tělesa byla kondicionována dle tab. 8.

Název zkoušky	Prostředí kondicionace	Čas	Počet zkušebních těles
Statická	Atmosférické	-	5
Statická	H_2O	750h	4
Statická	H_2O	1000h	4
Dynamická	Atmosférické	-	7
Dynamická	H_2O	750 h	4
Dynamická	H_2O	1000 h	4

Tab. 8 Kondicionování zkušebních těles z aramidových vláken pro testování

7 STATICKÉ ZKOUŠKY

Statická zkouška slouží k zjištění závislosti zatěžovacího napětí na deformaci zkušební tělesa. V našem případě především pro zjištění maximální síly F_{max} , ze které bude určena hodnota pro dynamickou zkoušku. Ke statickým zkouškám byl použit stroj Zwick/Roell Vibrophore 100, který byl opatřen softwarem testXpert III.

7.1 Popis zkušebního stroje Zwick/Roell Vibrophore 100

Je zkušební zařízení určené pro statické a především pro dynamické zkoušky materiálů a pro stanovení trvanlivosti s ohledem na únavovou životnost materiálů [16].



Obr. 29 Zkušební stroj Zwick/Roell Vibrophore 100 [16].

Základní parametry stroje [16]:

- Maximální síla 100 kN
- Maximální střední zatížení ± 100 kN
- Maximální amplituda síly ± 50 kN
- Maximální elastické namáhání vzorku 6 (± 3) mm
- Rozsah frekvence 30 – 285 Hz
- Počet frekvenčních kroků 8
- Počet vodicích sloupců 4
- Počet vodicích šroubů 2

Nastavené hodnoty měření na stroji	
Rychlost zatížení	$5 \text{ mm} * \text{min}^{-1}$
Zatížení před	10 N
Rychlost při měření modulu pružnosti	$1 \text{ mm} * \text{min}^{-1}$
Vzdálenost čelistí	1073 mm

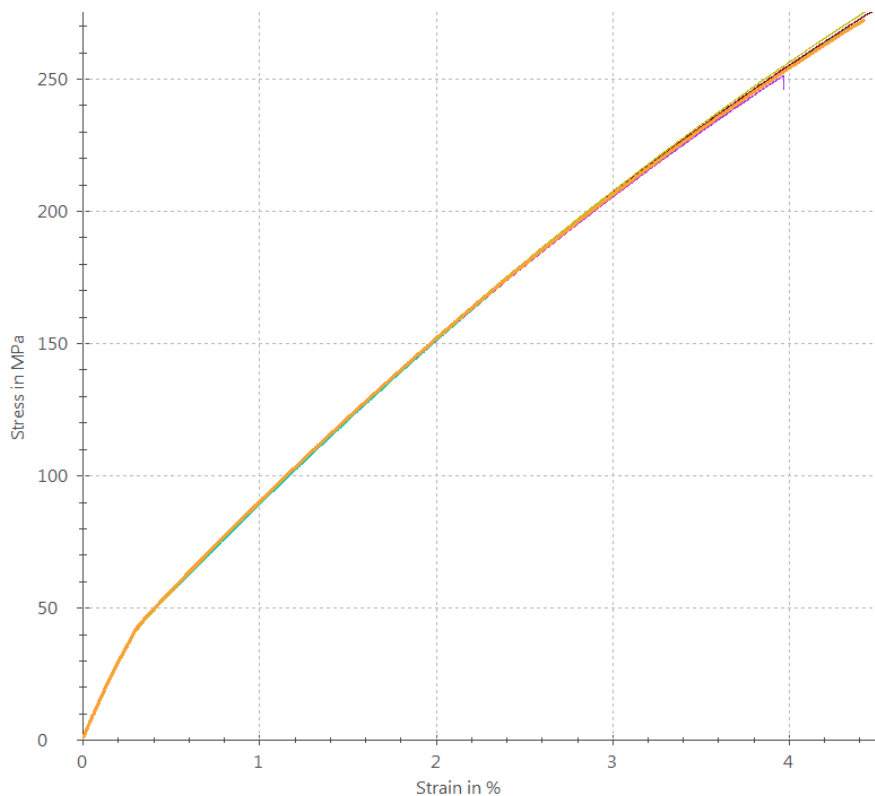
Tab. 9 Nastavené hodnoty měření na stroji

7.2 Naměřené hodnoty statických tahových zkoušek zkušebních těles ze sklolaminátu

V tab. 10 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles ze sklolaminátu, které byly kondicionovány v běžném klimatu.

Sklolaminát	E	F_{max}	σ_{Mt}	W_{Fmax}	ε	a	b
n=5	[MPa]	[N]	[MPa]	[N. mm]	[%]	[mm]	[mm]
n1	13600	8642,3	272,2	11059,06	4,4	1,28	25,42
n2	13600	8566,2	269,8	10682,95	4,3	1,28	25,42
n3	13600	8783,7	276,65	11420,06	4,5	1,28	25,42
n4	13400	8844,7	278,57	11470,39	4,5	1,28	25,42
n5	13800	7973,9	251,15	9127,37	4	1,28	25,42
\bar{x}	13600	8562,1	269,67	10751,97	4,3	1,28	25,42
S	148	346,92	10,927	961,88	0,2	0	0
V	1,09	4,05	4,05	8,95	5,11	0	0

Tab. 10 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu za běžného klimatu

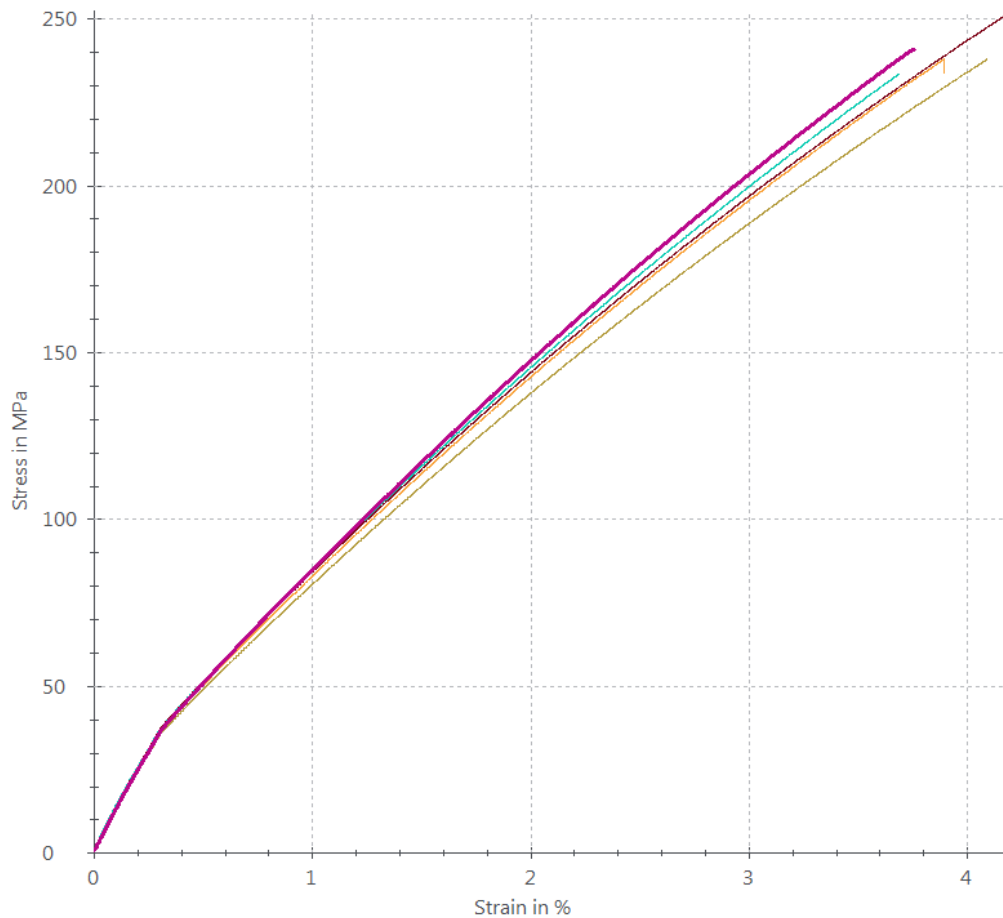


Obr. 30 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles ze sklolaminátu za běžného klimatu

V tab. 11 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles ze sklolaminátu, které byly kondicionovány H_2O po dobu 750 hodin.

Sklolaminát n=5	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N. mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	11700	7646,8	240,85	8092,64	3,8	1,28	25,42
n2	11200	7557,1	238,02	8803,27	4,1	1,28	25,42
n3	11500	7553,3	237,9	8335,78	3,9	1,28	25,42
n4	11600	7414,2	233,52	7747,71	3,7	1,28	25,42
n5	11900	7964,4	250,85	9483,38	4,2	1,28	25,42
\bar{x}	11600	7627,2	240,23	8492,56	3,9	1,28	25,42
S	270	206,05	6,4897	674,09	0,2	0	0
V	2,33	2,7	2,7	7,94	5,31	0	0

Tab. 11 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu vystavené H_2O po dobu 750 hodin

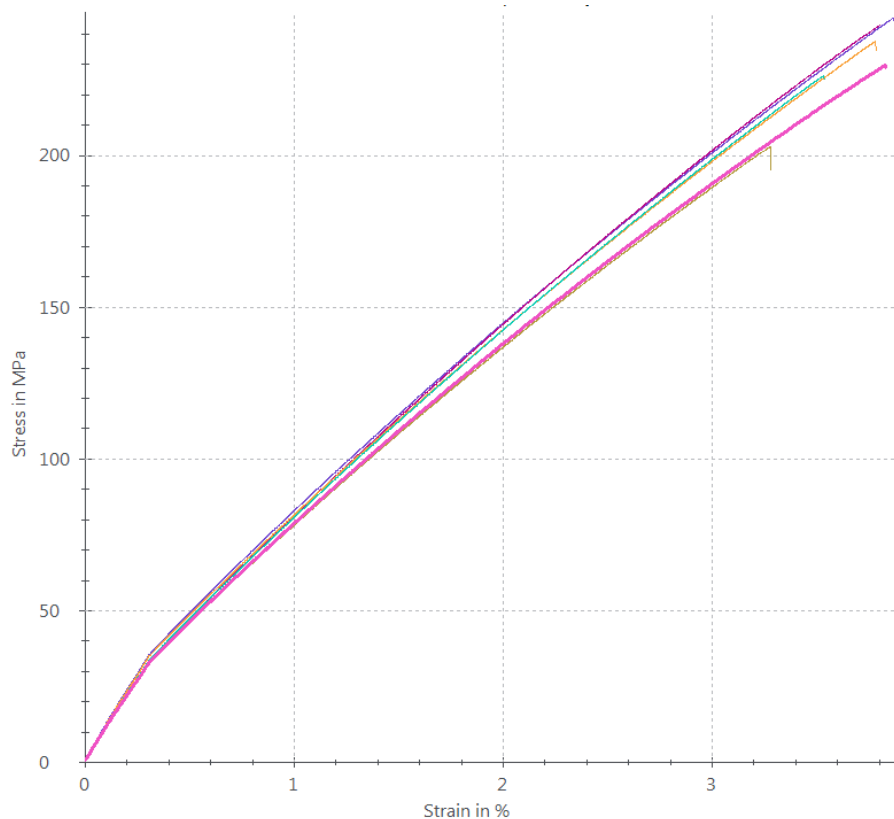


Obr. 31 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles ze sklolaminátu vystavené H_2O po dobu 750 hodin

V tab. 12 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles ze sklolaminátu, které byly kondicionovány H_2O po dobu 1000 hodin.

Skelné vlákno n=6	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N. mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	10400	7291,1	229,64	7823,1	3,8	1,28	25,42
n2	11200	7783,1	245,14	8383,78	3,9	1,28	25,42
n3	10700	7708,4	242,78	8113,57	3,8	1,28	25,42
n4	10300	6433,8	202,64	5880,43	3,3	1,28	25,42
n5	11100	7542,4	237,56	7939,95	3,8	1,28	25,42
n6	10700	7182,8	226,23	7023,14	3,5	1,28	25,42
\bar{x}	10700	7323,6	230,66	7527,33	3,7	1,28	25,42
S	354	493,92	15,556	927,51	0,2	0	0
V	3,29	6,74	6,74	12,32	6,25	0	0

Tab. 12 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu vystavené H_2O po dobu 1000 hodin



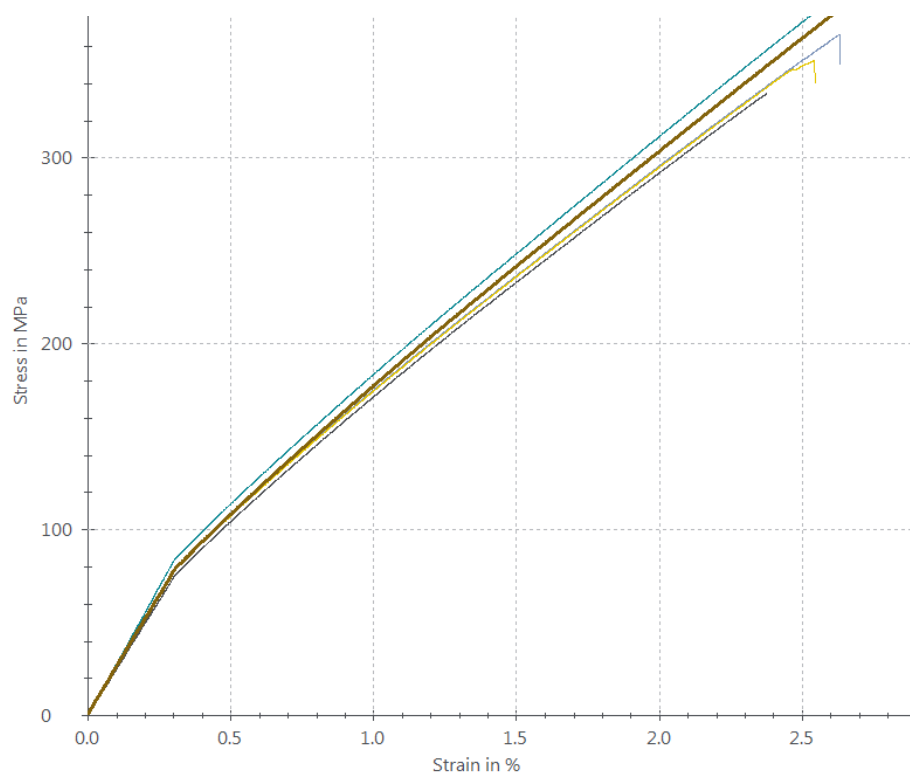
Obr. 32 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles ze sklolaminátu vystavené H_2O po dobu 1000 hodin

7.3 Naměřené hodnoty statických tahových zkoušek zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny

V tab. 13 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny, které byly kondicionovány v běžném klimatu.

Kompozit s aramidovými vlákny n=5	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N. mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	25600	16441	409,39	13230,33	2,9	1,52	25,12
n2	25800	14719	366,51	10994,42	2,6	1,52	25,12
n3	27500	16231	404,16	12635,01	2,8	1,52	25,12
n4	24600	13436	334,56	9003,16	2,4	1,52	25,12
n5	25600	14161	352,6	10321,58	2,5	1,52	25,12
\bar{x}	25800	14998	373,44	11236,9	2,6	1,52	25,12
S	1050	1305,9	32,518	1718,62	0,2	0	0
V	4,08	8,71	8,71	15,29	7,45	0	0

Tab. 13 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny za běžného klimatu

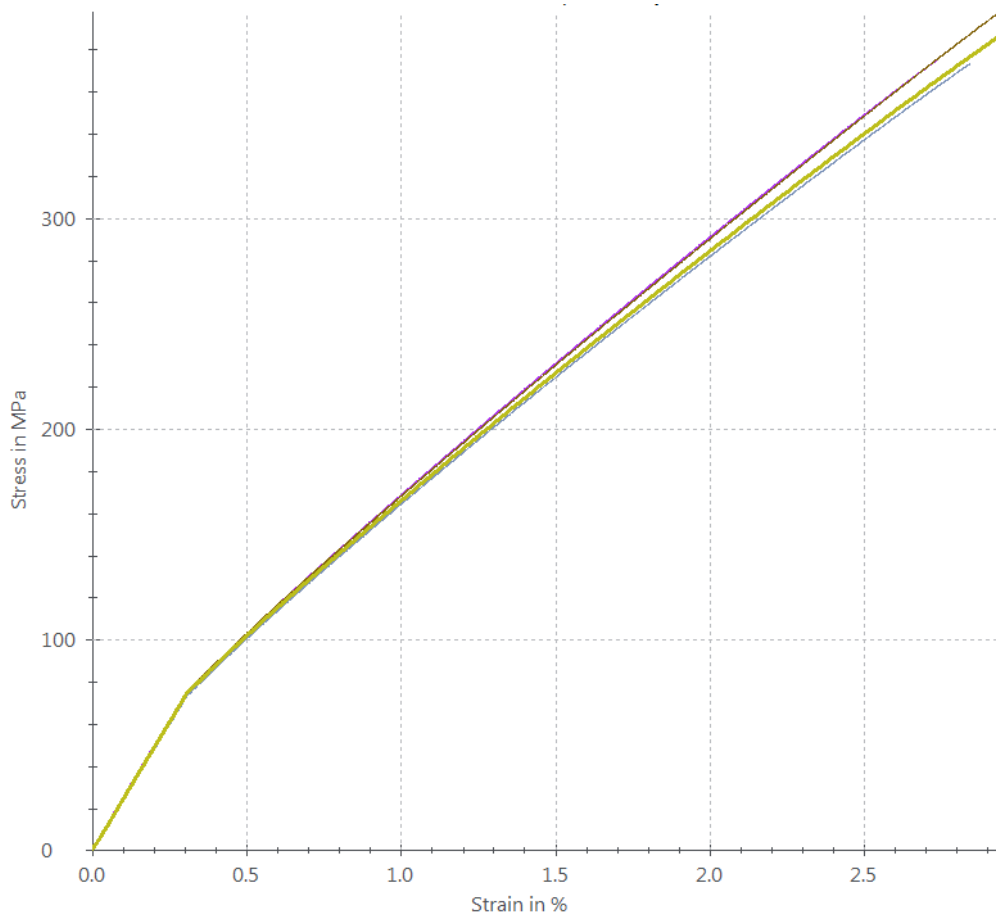


Obr. 33 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s aramidovými vlákny za běžného klimatu

V tab. 14 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny, které byly kondicionovány H_2O po dobu 750 hodin.

Kompozit s aramidovými vlákny n=4	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N. mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	24400	15566	387,6	12891,28	2,9	1,52	25,12
n2	24200	15079	375,48	11546,42	2,7	1,52	25,12
n3	24400	16007	398,59	13114,52	2,9	1,52	25,12
n4	23800	14999	373,48	11964,46	2,8	1,52	25,12
\bar{x}	24200	15413	383,79	12379,17	2,9	1,52	25,12
S	292	468,88	11,675	745,76	0,1	0	0
V	1,21	3,04	3,04	6,02	3,47	0	0

Tab. 14 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H_2O po dobu 750 hodin

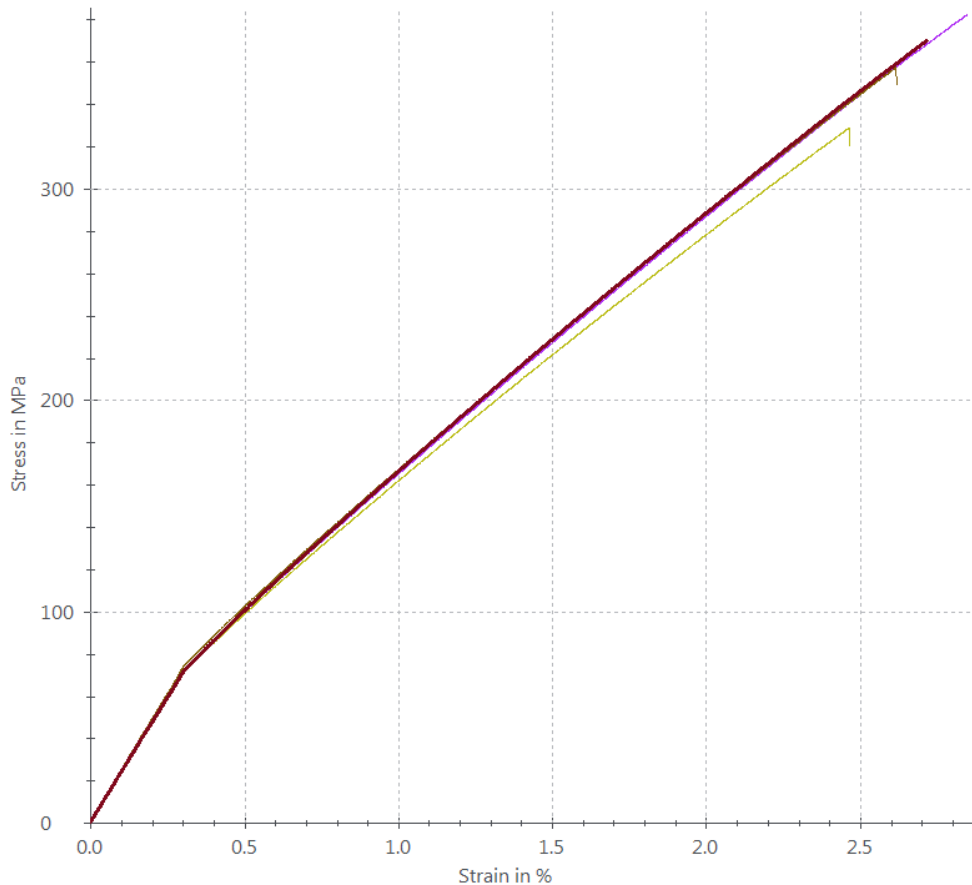


Obr. 34 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H_2O po dobu 750 hodin

V tab. 15 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny, které byly kondicionovány H_2O po dobu 1000 hodin.

Kompozit s aramidovými vlákny n=4	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N. mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	23500	14876	370,42	11254,15	2,7	1,52	25,12
n2	23400	13213	329	9145,71	2,5	1,52	25,12
n3	23400	15374	382,82	12187,32	2,8	1,52	25,12
n4	24200	14366	357,73	10537,03	2,6	1,52	25,12
\bar{x}	23600	14457	359,99	10781,05	2,7	1,52	25,12
S	397	926,11	23,06	1282,62	0,2	0	0
V	1,68	6,41	6,41	11,9	6,12	0	0

Tab. 15 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H_2O po dobu 1000 hodin



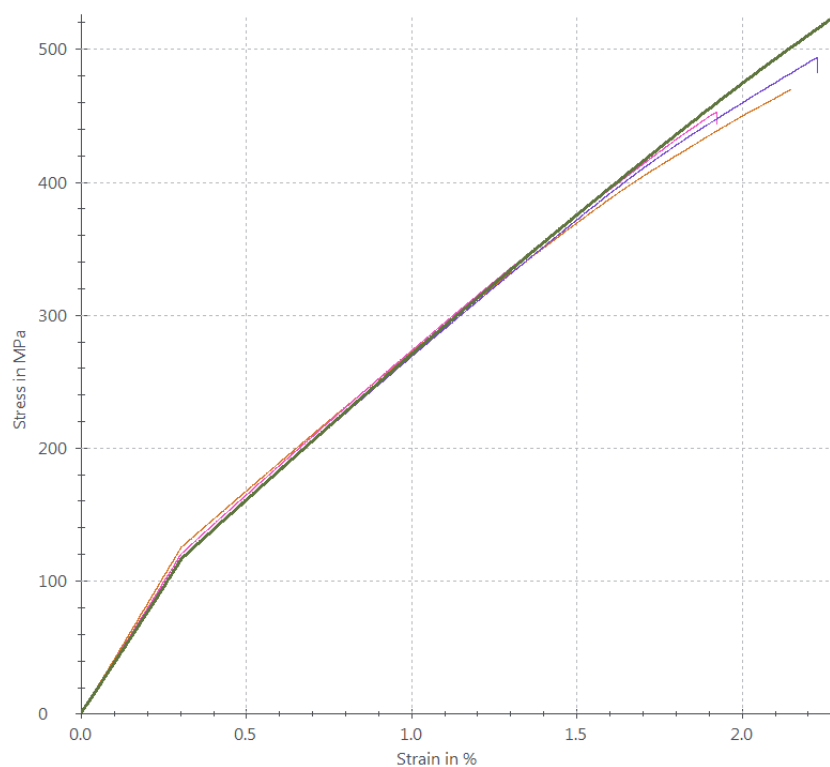
Obr. 35 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H_2O po dobu 1000 hodin

7.4 Naměřené hodnoty statických tahových zkoušek zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

V tab. 16 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny, které byly kondicionovány v běžném klimatu.

Kompozit s uhlíkovými vlákny n=4	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N·mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	38200	23351	526,49	14929,45	2,3	1,9	25,16
n2	41400	20848	470,06	13156,54	2,1	1,9	25,16
n3	39700	20082	452,79	10968,97	1,9	1,9	25,16
n4	38500	21905	493,89	13981,57	2,2	1,9	25,16
\bar{x}	39400	21547	485,81	13259,13	2,1	1,9	25,16
S	1480	1416,3	31,933	1689,9	0,2	0	0
V	3,76	6,57	6,57	12,75	7,47	0	0

Tab. 16 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené běžnému klimatu

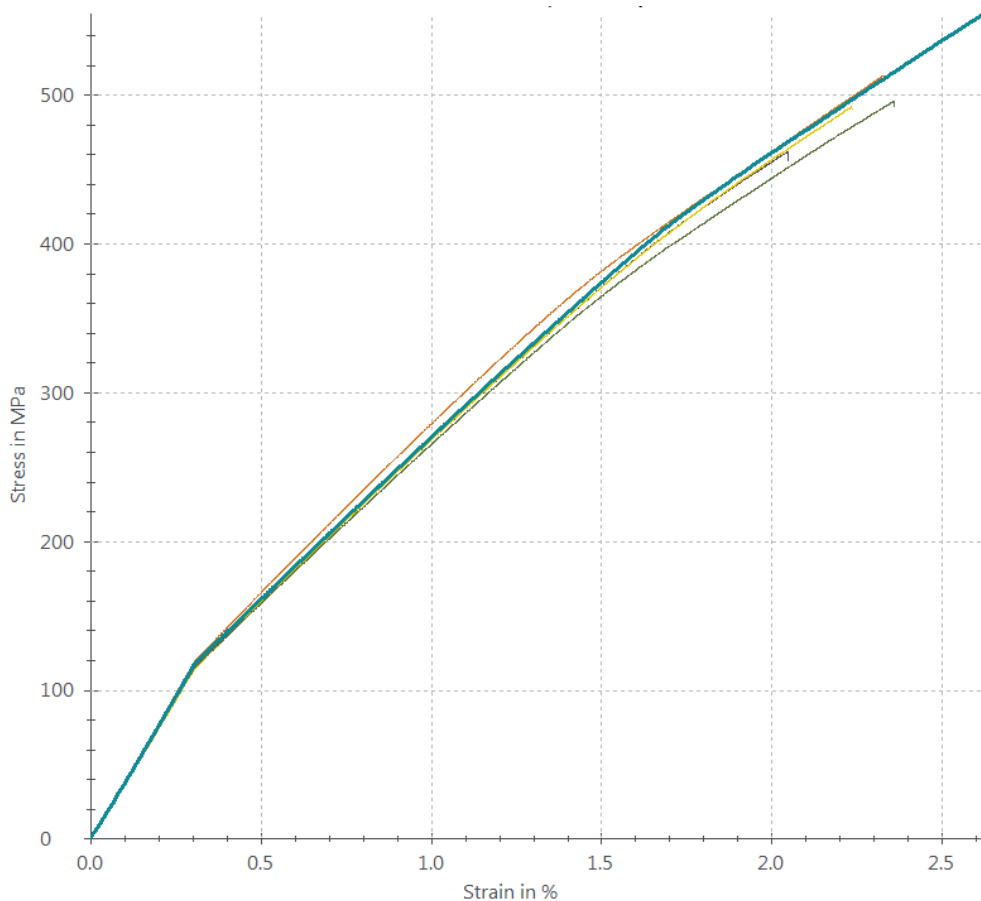


Obr. 36 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené běžnému klimatu

V tab. 17 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny, které byly kondicionovány H_2O po dobu 750 hodin.

Kompozit s uhlíkovými vlákny n=5	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N.mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	38600	24558	553,71	18570,4	2,6	1,9	25,16
n2	37600	20476	461,67	11986,02	2	1,9	25,16
n3	37700	21824	492,05	13974,51	2,2	1,9	25,16
n4	37500	21992	495,85	15081,58	2,4	1,9	25,16
n5	38900	22761	513,18	15417,42	2,3	1,9	25,16
\bar{x}	38100	22322	503,29	15005,99	2,3	1,9	25,16
S	644	1496,5	33,741	2401,26	0,2	0	0
V	1,69	6,7	6,7	16	8,95	0	0

Tab. 17 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené H_2O po dobu 750 hodin

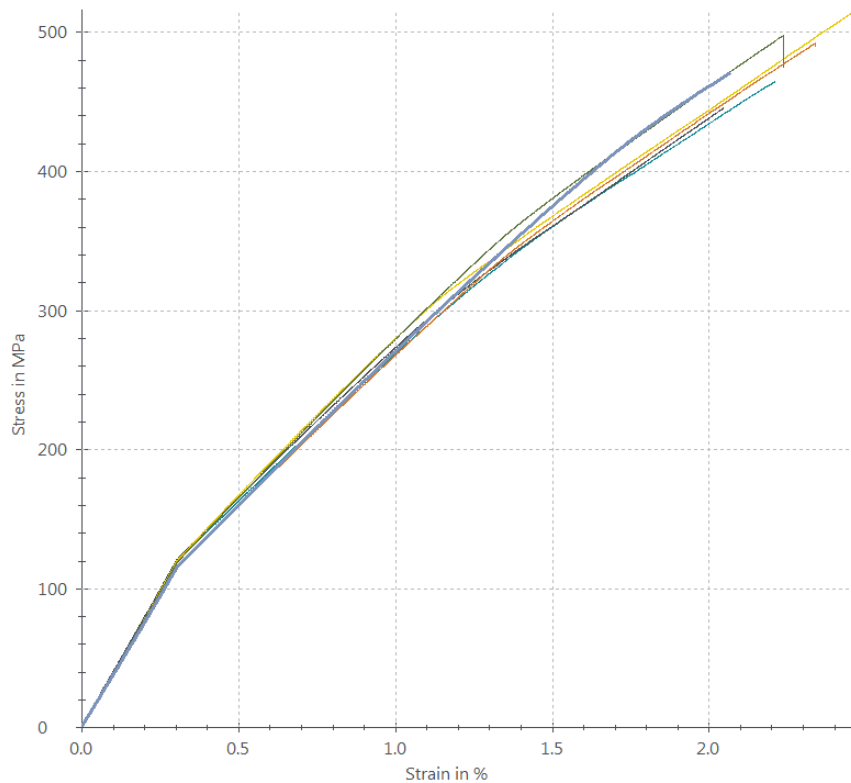


Obr. 37 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené H_2O po dobu 750 hodin

V tab. 18 vidíme hodnoty statických zkoušek zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny, které byly kondicionovány H_2O po dobu 1000 hodin.

Kompozit s uhlíkovými vlákny n=6	E [MPa]	F_{max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	W_{Fmax} [N. mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	37700	20874	470,63	12325,38	2,1	1,9	25,16
n2	38900	20630	465,14	13473,96	2,2	1,9	25,16
n3	39400	19786	446,11	11933,32	2	1,9	25,16
n4	39600	22841	514,99	16537,99	2,5	1,9	25,16
n5	38800	22098	498,23	14392,33	2,2	1,9	25,16
n6	37400	21840	492,42	14882,88	2,3	1,9	25,16
\bar{x}	38600	21345	481,25	13924,31	2,2	1,9	25,16
S	910	1114,7	25,134	1714,21	0,2	0	0
V	2,36	5,22	5,22	12,31	7,1	0	0

Tab. 18 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené H_2O po dobu 1000 hodin



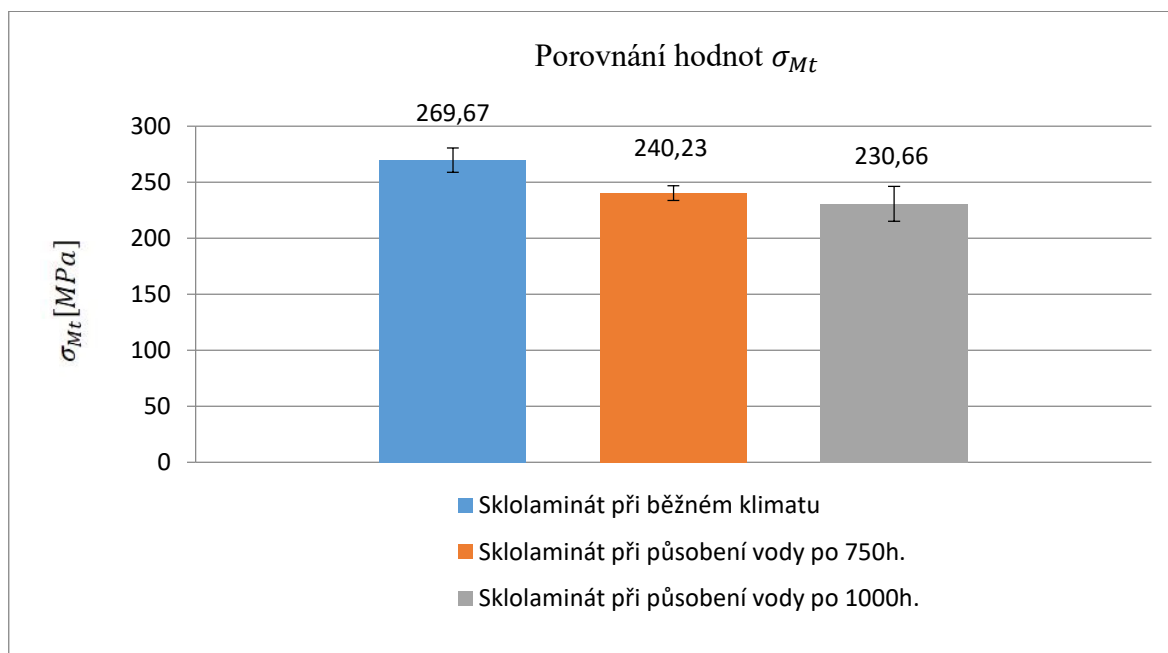
Obr. 38 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené H_2O po dobu 1000 hodin

7.5 Vyhodnocení výsledků ze statických zkoušek

Výsledky ze statických zkoušek jsou vyhodnoceny pro každý materiál, ze kterého jsou vyrobeny zkušební tělesa samostatně tak, aby bylo možné sledovat vliv vlhkosti pro konkrétní materiál.

7.5.1 Tělesa ze sklolaminátu

Nejvyšší průměrnou mez pevnosti σ_{Mt} mají zkušební tělesa, která byla kondicionována v běžném klimatu a nejnižší průměrnou mez pevnosti σ_{Mt} mají zkušební tělesa, která byla kondicionována vodou po nejdelší dobu, tedy po dobu 1000 hodin. Tato zkušební tělesa mají také nejvíce rozptýlené hodnoty od průměrné hodnoty, což určuje směrodatná odchylka.

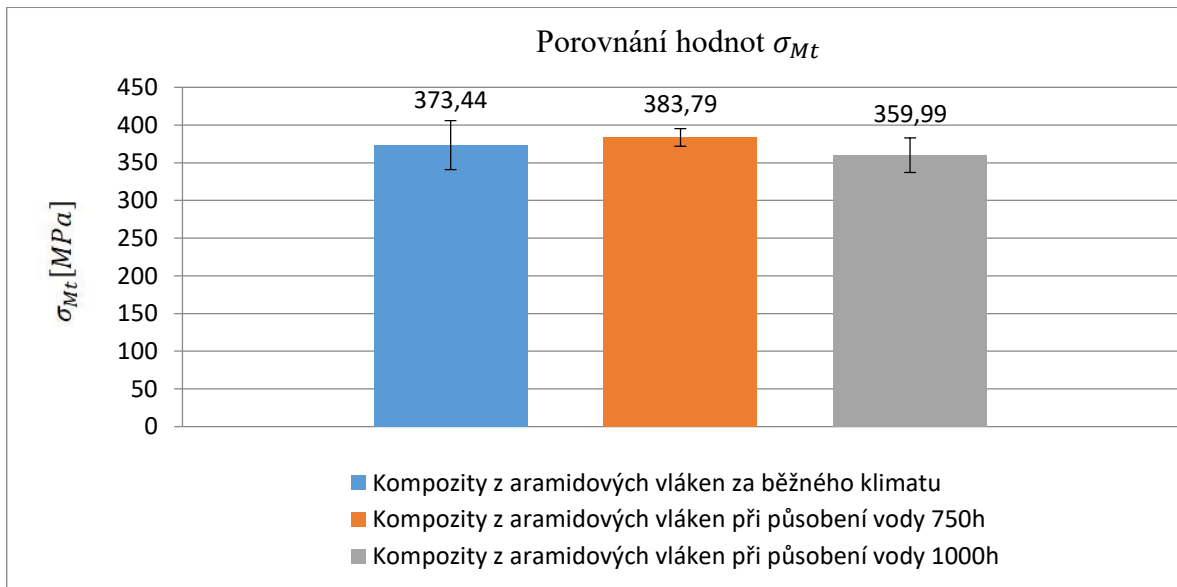


Obr. 39 Porovnání meze pevnosti σ_{Mt} , zkušebních těles ze sklolaminátu

7.5.2 Kompozitní tělesa z aramidových vláken

Nejvyšší průměrnou mez pevnosti σ_{Mt} mají zkušební tělesa kondicionována vodou po dobu 750 hodin, přičemž mají zároveň nejmenší směrodatnou odchylku. Pokud tato tělesa srovnáme se vzorky, které byly kondicionovány v běžném klimatu, zjistíme, že tělesa sice mají menší průměrnou mez pevnosti σ_{Mt} , ale zároveň mají největší směrodatnou odchylku. Z toho vyplývá, že kvalita výrobní technologie ručního kladení za mokra není nejpřesnější,

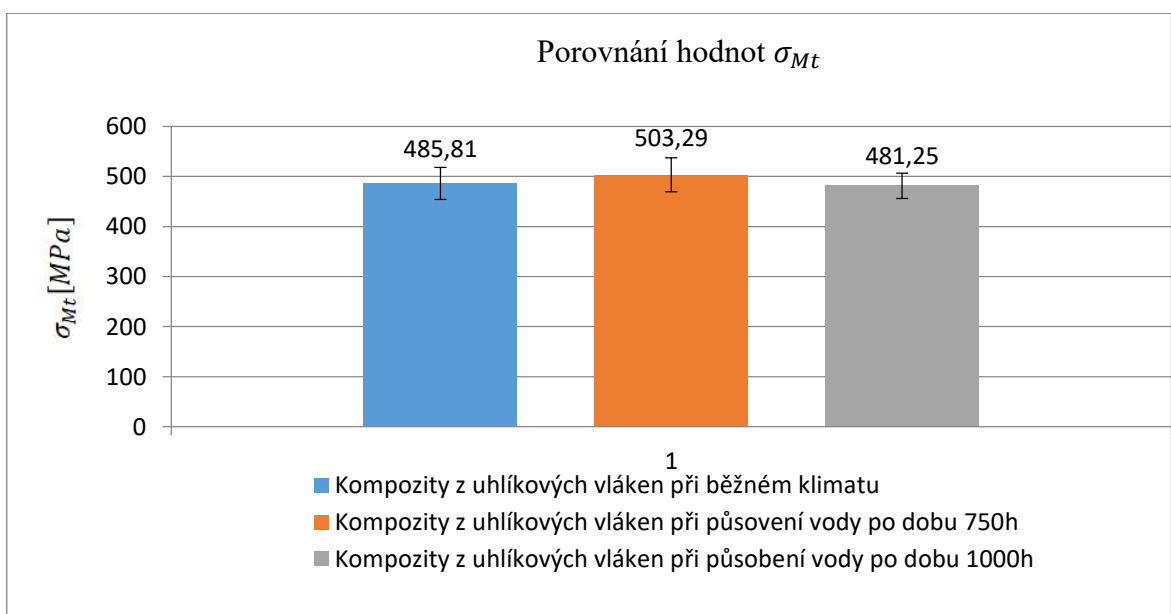
jelikož u vzorků, které byly kondicionovány vodou po dobu 1000 hodin už je pozorovatelný mírný pokles průměrné meze pevnosti σ_{Mt} .



Obr. 40 Porovnání meze pevnosti σ_{Mt} , zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny

7.5.3 Kompozitní tělesa z uhlíkových vláken

U těles z uhlíkových vláken došlo jen k drobným změnám, které mohou být způsobeny nepřesností výrobní technologie. U zkušebních těles, která byla kondicionována vodou po dobu 750 hodin, došlo dokonce k nárůstu průměrné meze pevnosti σ_{Mt} , ale také je zde největší směrodatná odchylka.



Obr. 41 Porovnání meze pevnosti σ_{Mt} , zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

7.5.4 Porovnání zkušebních těles po statických zkouškách

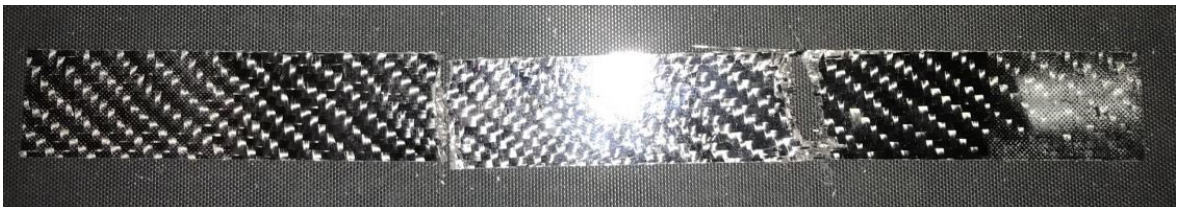
Při provádění statických zkoušek došlo téměř vždy k úplnému přetržení zkušebního tělesa. U zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny se zkušební těleso dokonce často roztrhlo v několika místech současně obr. 44, což platilo pro zkušební tělesa jak kondicionována v atmosférických podmínkách, tak i ve vodě.



Obr. 42 Zkušební těleso ze sklolaminátu po statické zkoušce



Obr. 43 Zkušební těleso z kompozitu s aramidovými vlákny po statické zkoušce

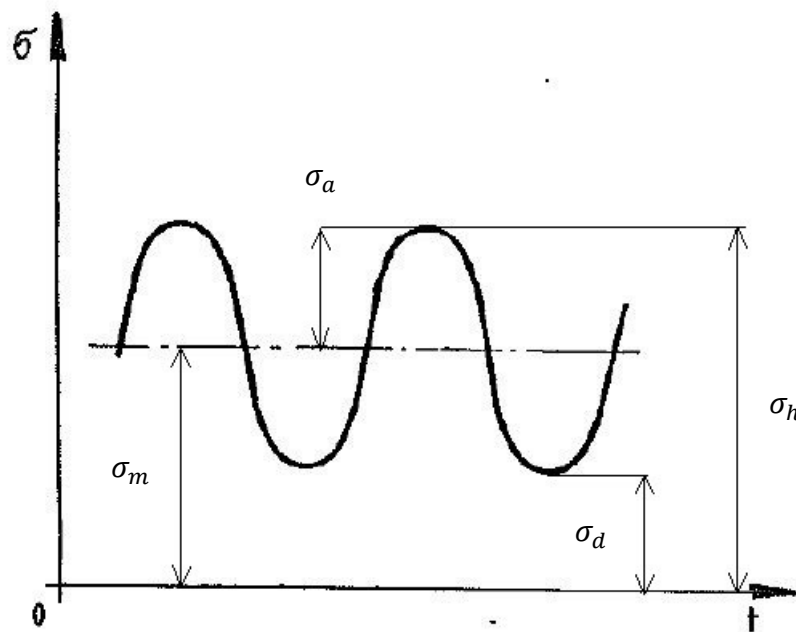


Obr. 44 Zkušební těleso z kompozitu s uhlíkovými vlákny po statické zkoušce

8 DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY

Při dynamické zkoušce by mělo dojít k náhlému porušení zkušebního tělesa, při nižší síle než je F_{max} , kterou jsme zjistili statickou zkouškou. Pro dynamické zkoušky byl použit stejný stroj jako pro statické, tedy Zwick/Roell Vibrophore 100 spolu se softwarem testExpert R, kde byl spuštěn program test controller, kterým zjistíme měřitelné hladiny zatěžujících sil pro jednotlivé druhy kompozitních materiálů a také velikost frekvence. Velikost frekvence si stroj zvolí sám jako nejvhodnější. Harmonické zatížení má sinusový průběh obr. 45.

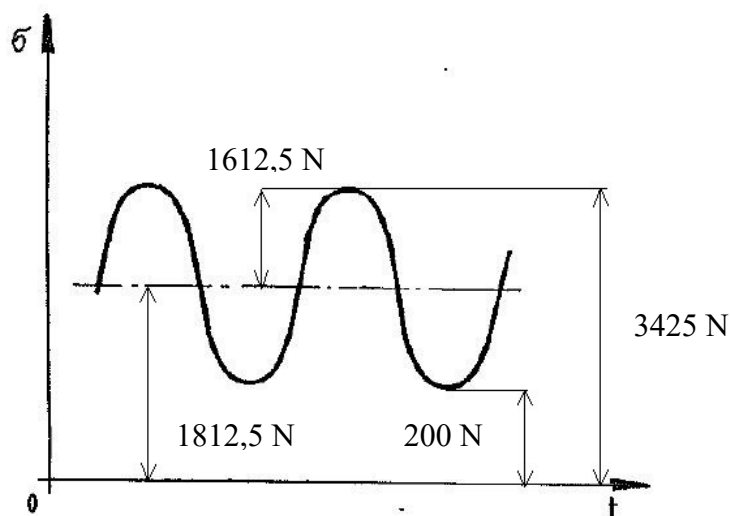
Technické parametry stroje jsou uvedeny v kapitole 6.1 s názvem popis zkušebního stroje Zwick/Roell Vibrophore 100. Vzdálenost čelistí pro dynamické zkoušky byla stanovena na 1072 mm a upínací tlak v čelisti byl 30 bar.



Obr. 45 Harmonické zatížení [18].

8.1 Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu

Pro všechna zkušební tělesa ze sklolaminátu byla zvolena horní mez cyklického zatížení, která odpovídala 40% maximální síly F_{max} , tato síla se získala ze statické zkoušky sklolaminátu, který byl vystaven běžnému klimatu, a to z důvodu zjištění rozdílů počtu cyklů různě kondicionovaných těles v H_2O . Dolní mezní zatížení bylo zvoleno na 200N, což je znázorněno v obr. 46.



Obr. 46 Hodnoty zatížení zkušebních těles ze sklolaminátu

Parametry zkušebních těles ze sklolaminátu jsou znázorněny v tab. 19.

popis	Sklolaminát za běžného klimatu	Sklolaminát kondicionovaný 750h v H_2O	Sklolaminát kondicionovaný 1000h v H_2O
Horní mez zatěžující síly [N]	3425	3425	3425
Dolní mez zatěžující síly [N]	200	200	200
Frekvence	31,42 Hz	31,5 Hz	31,6 Hz

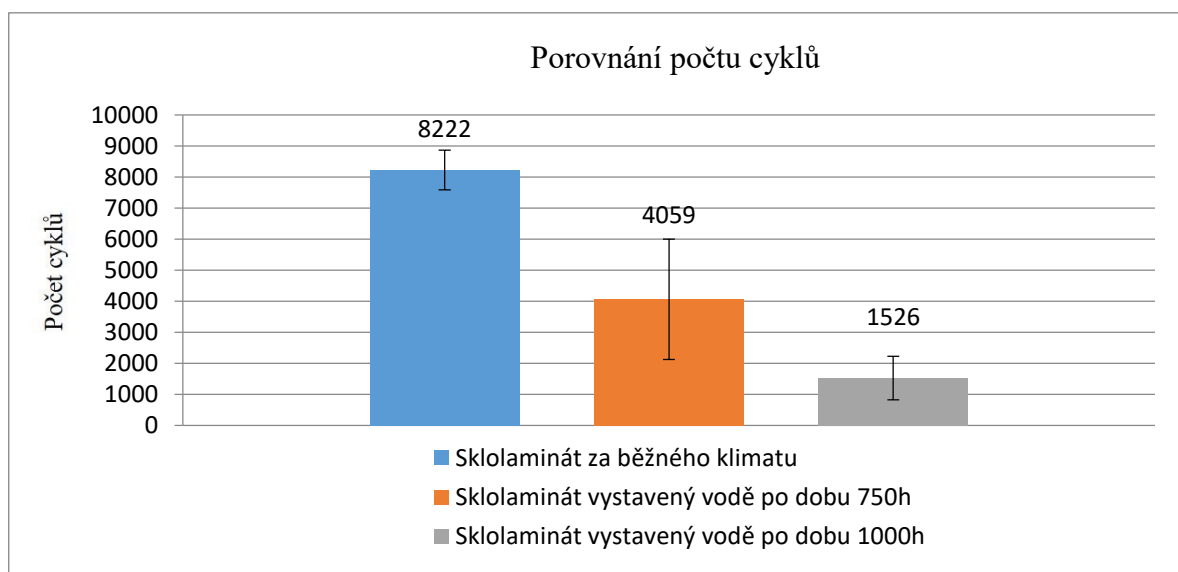
Tab. 19 Parametry zkušebních těles ze sklolaminátu pro dynamické zkoušky

Výsledné počty cyklů sklolaminátu jsou uvedeny v tab. 20.

Pořadí vzorků	Sklolaminát za běžného klimatu	Sklolaminát kondicionovaný 750h v H ₂ O	Sklolaminát kondicionovaný 1000h v H ₂ O
1.1	6872	3300	1970
1.2	8110	2500	1090
1.3	7750	5130	581
1.4	8950	2860	2850
1.5	8780	3370	1100
1.6	8130	8790	1900
1.7	8390	2850	1190
1.8	8790	3670	x
\bar{x}	8222	4059	1526
s	638,2	1938,5	703,8

Tab. 20 Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu

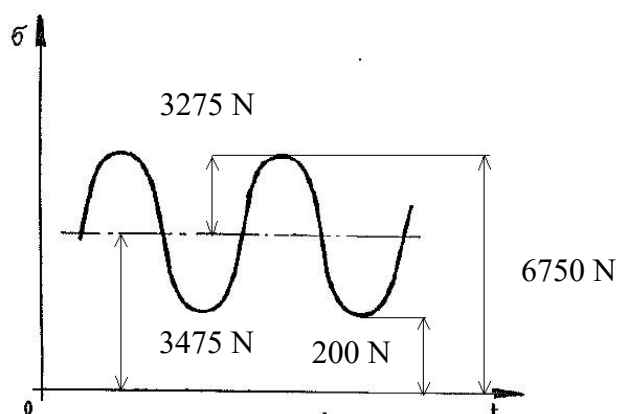
Z níže uvedeného grafu obr. 47 je zřejmý negativní vliv vlhkosti na zkušební tělesa ze sklolaminátu, nicméně také vidíme, že tělesa mají relativně velkou variabilitu od průměrné hodnoty, která je ovlivněna extrémními hodnotami. Tento jev je pozorovatelný hlavně u zkušebních těles, která byla kondicionována vodou po dobu 750 hodin.



Obr. 47 Počty cyklů zkušebních těles ze sklolaminátu

8.2 Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny

Pro zkušební tělesa z kompozitu s aramidovými vlákny byla nejprve zvolena horní mez cyklického zatížení, která odpovídala 40% maximální síly F_{max} , nicméně první zkušební těleso vydrželo přes jeden milion cyklů (1118669), aniž by došlo k jeho porušení. Vzhledem k velké časové náročnosti bylo toto těleso vyřazeno s dalšími dvěma zkušebními tělesy, která nebyla možná zatížit vyšší hladinou zatížení. Pro zbylá tělesa byla zvolena nová horní mez cyklického zatížení, která odpovídala 45% maximální síly F_{max} , tuto sílu jsme získali ze statické zkoušky těles, která byla kondicionována v běžném klimatu, a to z důvodu zjištění rozdílů počtu cyklů, které jsou tělesa schopna vydržet. Velikosti zatížení jsou zobrazeny v obr. 48.



Obr. 48 Hodnoty zatížení zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny

Parametry zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny jsou znázorněny v tab. 21.

popis	kompozity z aramidových vláken za běžného klimatu	kompozity z aramidových vláken kondicionované 750h v H ₂ O	kompozity z aramidových vláken kondicionované 1000h v H ₂ O
Horní mez zatěžující síly [N]	6750	6750	6750
Dolní mez zatěžující síly [N]	200	200	200
Frekvence	35 Hz	34,9 Hz	34,8 Hz

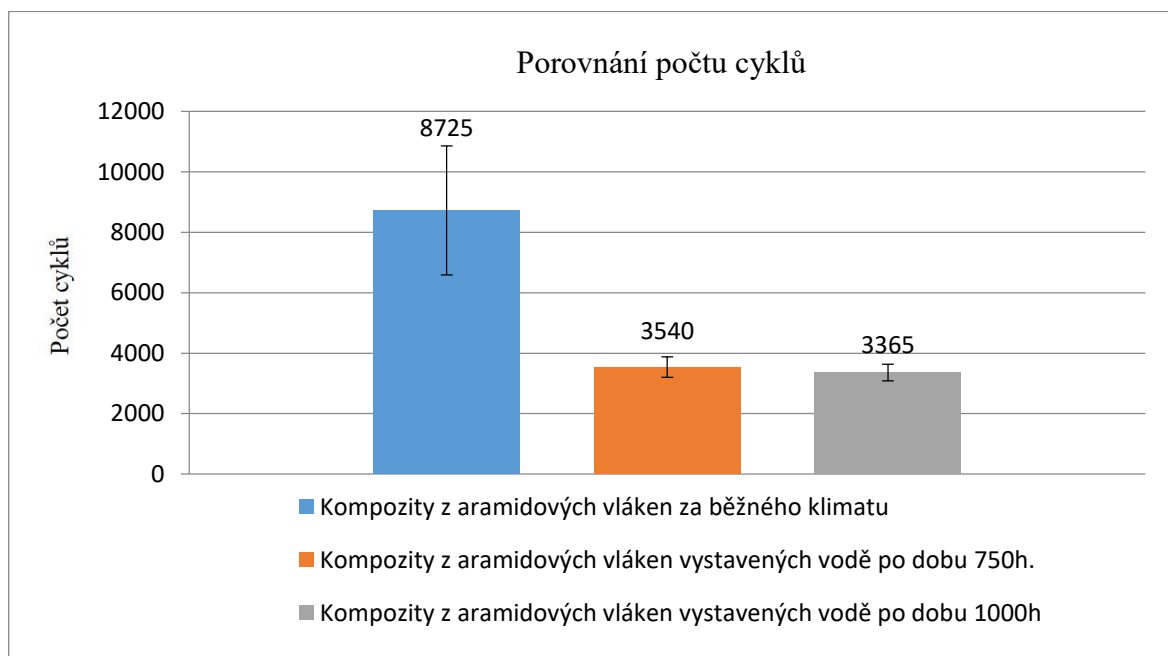
Tab. 21 Parametry zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny pro dynamické zkoušky

Výsledné počty cyklů zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny jsou uvedeny v tab. 22.

Pořadí vzorků	kompozity z aramidových vláken za běžného klimatu	kompozity z aramidových vláken kondicionované 750h v H ₂ O	kompozity z aramidových vláken kondicionované 1000h v H ₂ O
1.1	10040	3950	3380
1.2	9730	3070	2930
1.3	5030	3760	3690
1.4	10100	3380	3460
\bar{x}	8725	3540	3365
s	2137,9	340,2	275,7

Tab. 22 Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny

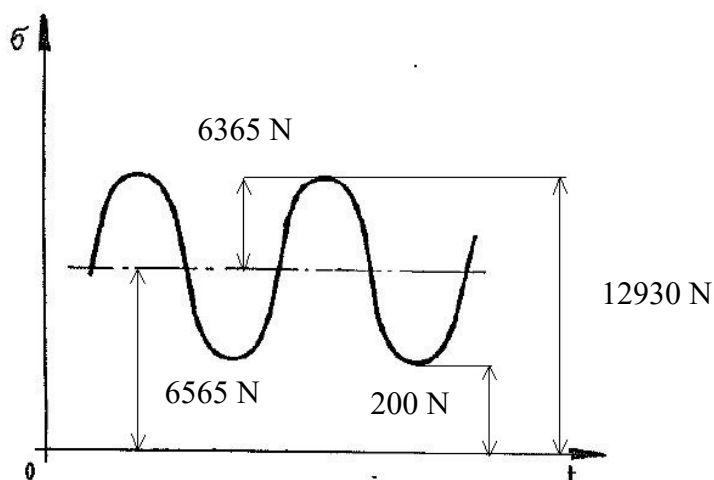
Vliv vlhkosti na zkušební tělesa z kompozitu s aramidovými vlákny je taktéž pozorovatelný, nicméně i zde je vidět velká variabilita výsledků od průměrné hodnoty obr. 49.



Obr. 49 Počty cyklů zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny

8.3 Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

Pro všechna zkušební tělesa z kompozitu s uhlíkovými vlákny byla zvolena horní mez cyklického zatížení, která odpovídala 60% maximální síly F_{max} , kterou jsme získali ze statické zkoušky zkušebních těles, která byla vystavena běžnému klimatu, a to z důvodu zjištění rozdílů počtu cyklů, které jsou tělesa schopna vydržet. Dolní mezní zatížení bylo zvoleno stejně tak jako u předchozích těles na 200N, což je vidět s ostatními parametry v obr. 50.



Obr. 50 Hodnoty zatížení zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

Parametry zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny jsou znázorněny v tab. 23.

popis	Kompozity z uhlíkových vláken za běžného klimatu	Kompozity z uhlíkových vláken kondicionované 750h v H ₂ O	Kompozity z uhlíkových vláken kondicionované 1000h v H ₂ O
Horní mez zatěžující síly [N]	12930	12930	12930
Dolní mez zatěžující síly [N]	200	200	200
Frekvence	37,4 Hz	37,3 Hz	37,2 Hz

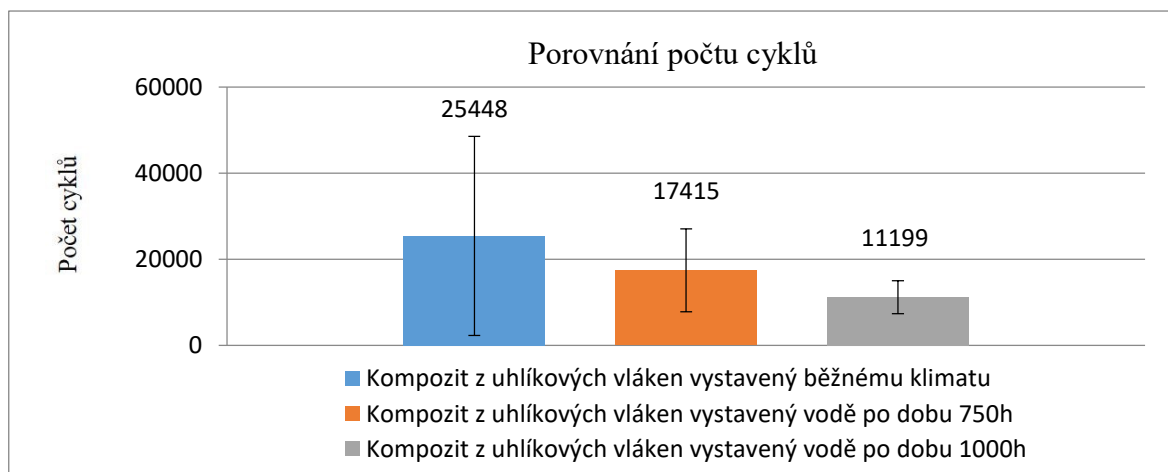
Tab. 23 Parametry zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny pro dynamické zkoušky

Výsledné počty cyklů zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny jsou uvedeny v tab. 24.

Pořadí vzorků	Kompozity z uhlíkových vláken za běžného klimatu	Kompozity z uhlíkových vláken kondicionované 750h v H ₂ O	Kompozity z uhlíkových vláken kondicionované 1000h v H ₂ O
1.1	19000	8490	14500
1.2	12980	10090	11522
1.3	11070	13230	4693
1.4	7330	8980	12955
1.5	83370	13620	16883
1.6	19210	19740	10299
1.7	16900	28250	7540
1.8	33720	36920	x
\bar{x}	25448	17415	11199
s	23095,9	9615,3	3834,4

Tab. 24 Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

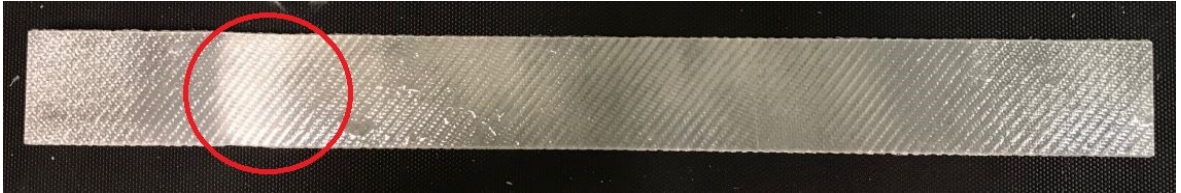
Zkušební tělesa z kompozitu s uhlíkovými vlákny mají viditelný pokles cyklů u těles, která byla kondicionována vodou, ale zároveň tělesa, která byla kondicionována atmosférickými podmínkami, mají největší směrodatnou odchylku, a tudíž je aritmetický průměr zkreslen extrémními hodnotami, které mohou být zapříčiněny kvalitou výrobní technologie.



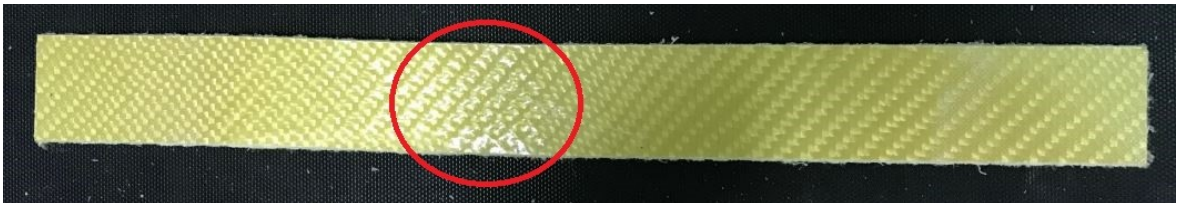
Obr. 51 Počty cyklů zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

8.4 Porovnání zkušebních těles po dynamických zkouškách

Níže jsou zobrazena zkušební tělesa, kde je červeně označené místo poškození, které nastalo vlivem dynamického zatížení a pro kondicionovaná zkušební tělesa v H₂O vypadalo vždy obdobně.



Obr. 52 Zkušební těleso ze sklolaminátu po dynamické zkoušce



Obr. 53 Zkušební těleso z kompozitu s aramidovými vlákny po dynamické zkoušce



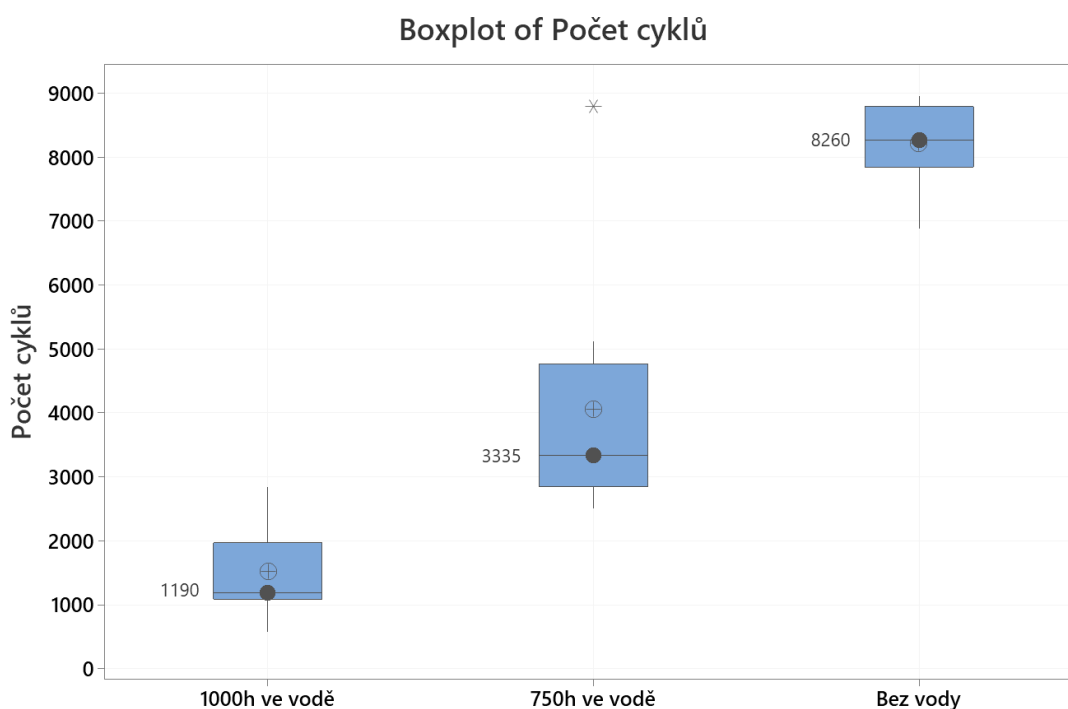
Obr. 54 Zkušební těleso z kompozitu s uhlíkovými vlákny po dynamické zkoušce

9 VYHODNOCENÍ

U zkušebních těles z různých kompozitních materiálů je pozorovatelný snižující se počet cyklů v důsledku doby, po kterou byla zkušební tělesa kondicionována ve vodě. Největší pokles cyklů je u zkušebních těles ze sklolaminátu, nicméně výsledné počty průměrných cyklů jsou zkráceny extrémními hodnotami. K odstranění extrémních hodnot využijeme medián, který vyčteme z box plotových grafů, které byly vytvořeny v softwaru Minitab.

9.1 Kompozitní materiál ze sklolaminátu

Box plotový graf znázorňující rozdíly mezi průměrnými hodnotami různě kondicionovaných zkušebních těles ze sklolaminátu obr. 55.



Obr. 55 Graf určující medián zkušebních těles ze sklolaminátu

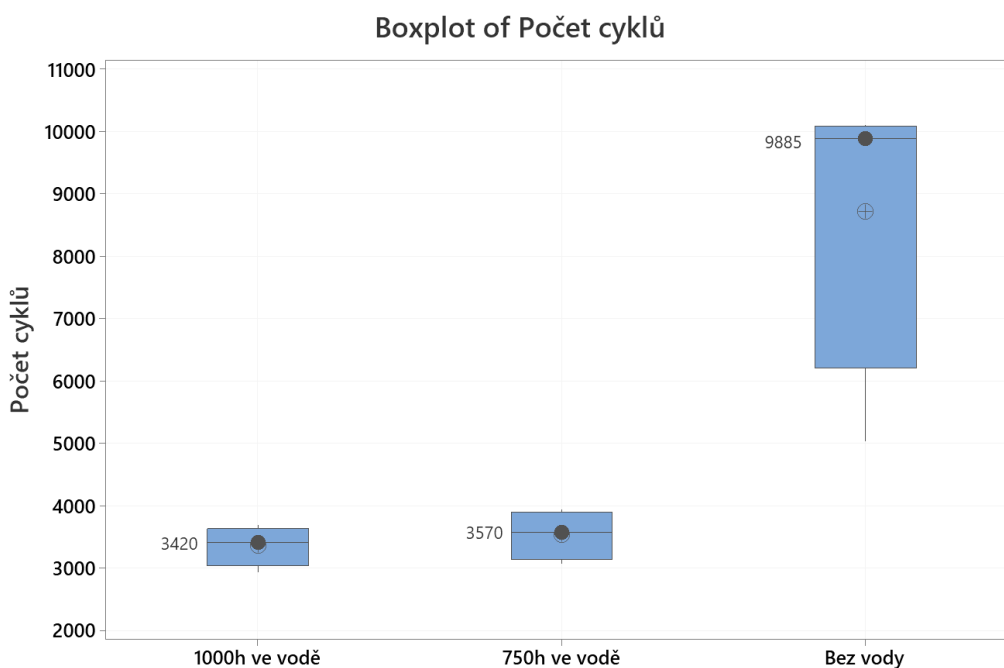
popis	Sklolaminát za běžného klimatu	Sklolaminát kondicionovaný po dobu 750h v H ₂ O	Sklolaminát kondicionovaný po dobu 1000h v H ₂ O
prostřední hodnota souboru počtu cyklů	8260	3335	1190
procentní vyjádření počtu cyklů	100%	40,4%	14,4%

Tab. 25 Vyhodnocení vlivu vlhkosti na zkušební tělesa ze sklolaminátu

Vliv vlhkosti na únavovou životnost pro zkušební vzorky ze sklolaminátu je výrazný, pakliže vzorky bez vlivu vody dosáhly 8260 cyklů, což bude pro nás 100%, klesl počet cyklů vlivem působení vody po 750 hodinách o 59,6% a po 1000 hodinách klesl počet cyklů celkem o 85,6% na 1190 cyklů, za předpokladu, že bude medián počtu cyklů vypovídající hodnotou.

9.2 Kompozitní materiál z aramidových vláken

Box plotový graf znázorňující rozdíly mezi průměrnými hodnotami různě kondicionovaných zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny obr. 56.



Obr. 56 Graf určující medián zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny

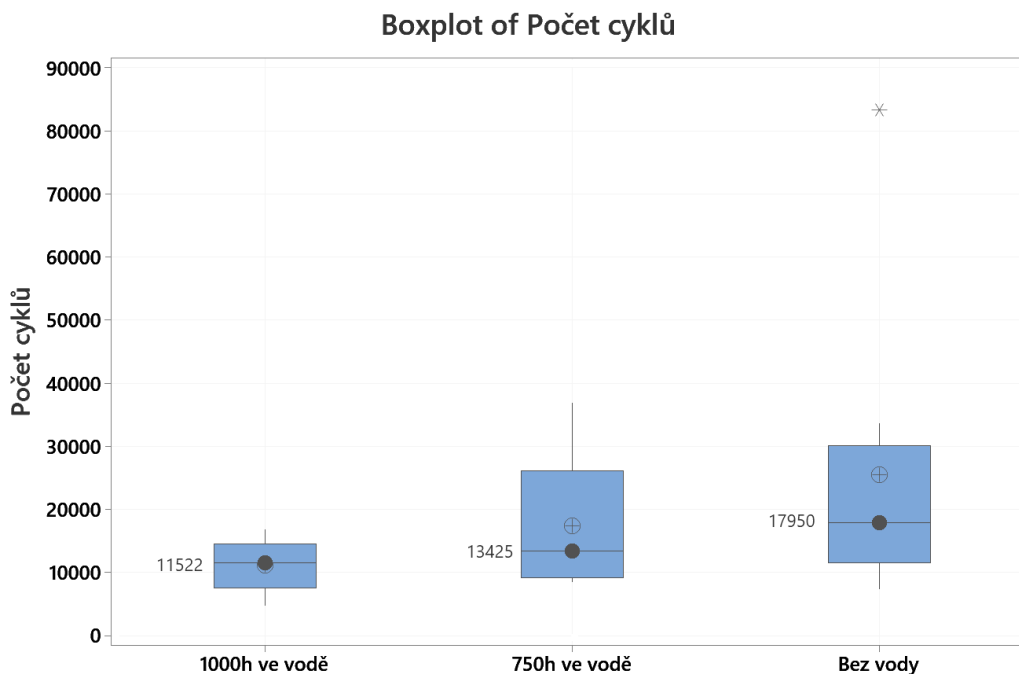
popis	Kompozit z aramidových vláken za běžného klimatu	Kompozit z aramidových vláken kondicionovaný po 750h v H ₂ O	Kompozit z aramidových vláken kondicionovaný po 1000h v H ₂ O
prostřední hodnota souboru počtu cyklů	9885	3570	3420
procentní vyjádření počtu cyklů	100%	36%	34,6%

Tab. 26 Vyhodnocení vlivu vlhkosti na zkušební tělesa z kompozitu s aramidovými vlákny

Vliv vlhkosti na únavovou životnost pro zkušební vzorky z kompozitu s aramidovými vlákny je výrazný především u těles, která byla kondicionována vodou po dobu 750 hodin, kde došlo ke snížení počtu cyklů o 64%. Toto výrazné snížení dále nepokračovalo, jelikož po 1000 hodinách došlo jen ke drobnému celkovému snížení o 65,4% na celkem 3420 cyklů.

9.3 Kompozitní materiál z uhlíkových vláken

Box plotový graf znázorňující rozdíly mezi průměrnými hodnotami různě kondicionovaných zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny obr. 57.



Obr. 57 Graf určující medián zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

popis	Kompozit z uhlíkových vláken za běžného klimatu	Kompozit z uhlíkových vláken kondicionovaný po 750h v H ₂ O	Kompozit z uhlíkových vláken kondicionovaný po 1000h v H ₂ O
prostřední hodnota souboru počtu cyklů	17950	13425	11522
procentní vyjádření počtu cyklů	100%	74,8%	64,2%

Tab. 27 Vyhodnocení vlivu vlhkosti na zkušební tělesa z kompozitu s uhlíkovými vlákny

Vliv vlhkosti na únavovou životnost zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny byl nejnižší ze všech zkoušených materiálů. U těles, která byla kondicionována vodou po dobu 750 hodin, počet cyklů klesl pouze o 25,2%. Dále u těles, která byla kondicionována vodou po dobu 1000 hodin, pokles počtů cyklů pozvolna pokračoval, až se zastavil na celkovém snížení 35,8% což odpovídá 11522 cyklů.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjištění vlivu vlhkosti na únavovou životnost konstrukčních kompozitů. Byly vyrobeny zkušební vzorky ze třech materiálů, které byly vyrobeny výrobní technologií ručního kladení za mokra. Vliv vlhkosti na únavovou životnost byl zkoumán na kompozitních materiálech ze skelných, aramidových a uhlíkových vláken, a to vždy samostatně pro konkrétní materiál.

Prvně byla provedena statická tahová zkouška, která byla provedena u všech druhů materiálů a taktéž u všech druhů zkušebních těles, tedy u těles kondicionovaných vodou a kondicionovaných v atmosférických podmínkách, které byly 20°C při relativní vlhkosti vzduchu 50%. Tyto zkoušky byly prováděny z důvodu získání základních materiálových vlastností cyklicky nezatížených těles, zejména pak z důvodu získání maximální síly F_{max} , ze které byly stanoveny hodnoty optimálních horních mezí cyklického zatížení pro dynamické zkoušky. Pro každý z jednotlivých materiálů byla zvolena jedna horní mez vyjádřená absolutní hodnotou, aby bylo možné zkušební tělesa z jednotlivých materiálů následně porovnat a určit, jaký vliv měla vlhkost na únavovou životnost kompozitních materiálů.

Pro zkušební tělesa ze sklolaminátu odpovídala horní mez cyklického zatížení 40% F_{max} , kterou jsme získali ze zkušebních těles, která byla kondicionována v atmosférických podmínkách. U zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny byla zvolena horní mez cyklického zatížení na 45% maximální síly F_{max} , kterou jsme získali taktéž ze zkušebních těles, která byla kondicionována v atmosférických podmínkách a u zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny, která byla kondicionována v atmosférických podmínkách, byla zvolena horní mez cyklického zatížení 60% z maximální síly F_{max} . Důvod zvolení různých hladin pro různý materiál byla časová náročnost, která by v případě nejnižší zvolené meze F_{max} 40% byla příliš vysoká, nicméně vzhledem k tomu, že budeme srovnávat vždy pouze zkušební tělesa z konkrétního materiálu, nebude hrát zvolení různých mezí žádnou roli.

Nejvyšší odolnost proti působení vlhkosti byla prokázána u uhlíkového kompozitu, kde pokles počtu cyklů, v případě, že vezmeme jako vypovídající hodnotu medián vzhledem k velké směrodatné odchylce, je nejnižší. Procentuální snížení počtu cyklů po 1000 hodinách ve vodě je pouze o 35,8% oproti mediánu těles, která byla kondicionována v atmosférických podmínkách.

Naopak tomu je u zkušebních těles ze sklolaminátu, která zaznamenala hned po 750 hodinách kondicionování vodou výrazný pokles mediánu, a to o 59,6% oproti mediánu počtu cyklů těles, která byla kondicionována v atmosférických podmínkách. Tento strmý pokles pokračoval i po 1000 hodinách kondicionování vodou, celkově o 85,6%, což odpovídá 1190 cyklů.

U zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny byl taktéž porovnáván medián počtu cyklů, tak jak tomu bylo u předchozích zkušebních těles ze stejného důvodu. Zde se nejvýrazněji projevil vliv vlhkosti na únavovou životnost u těles, která byla kondicionována vodou po dobu 750 hodin, kde medián počtu cyklů klesl celkem o 64% a u těles, která byla kondicionována vodou po dobu 1000 hodin, se počet cyklů ještě snížil, celkově o 65,4% oproti zkušebním tělesům, která byla kondicionována v atmosférických podmínkách, nicméně snížení počtu cyklů již nebylo tak rozdílné.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z:
<https://kompozity.webnode.cz/>
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCHV. ÚVOD DO STUDIA MATERIÁLŮ. Praha: Vydava-telství VŠCHT Praha 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Pra-ha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] ROSICKÝ, Jiří a Josef KLEMENT. Úvod do problematiky kompozitních mate-riálů. [online]. [cit. 2019-11-02]. Dostupné z:
<http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc4a791405f74c.htm>
- [5] KADLEC, Martin. Změny pevnosti a tuhosti polymerního kompozitu v zá-vislosti na teplotě, vlhkosti a prostředí: Vliv prostředí na vlastnosti kompozitních materiá-lů a konstrukcí. 22. 11. 2017. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v. v. i., Praha, 2017.
- [6] RŮŽIČKA, Milan a Jiří FIDRANSKÝ. Pevnost a životnost letadel. Praha: Vyda-vatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02254-4.
- [7] KRÁL, Michal. Únava vlákný vyztužených kompozitů s polymerní matricí [onli-ne]. Praha, 2014 [cit. 2019-11-23]. Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ús-tav, a.s. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf
- [8] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁCKO. Konstrukce strojů s kompozitními materiály. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9.
- [9] RAM, Sethu. Vacuum bag molding [online]. SlideShare 30. April 2012, [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/SethuRam2/vacuum-bag-molding>
- [10] GDP Koral Composites, Technologie výroby kompozitu [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/technologie-vyroby-kompozitu/w7>
- [11] RŮŽIČKA, Milan. Filosofie konstruování DAMAGE TOLERANCE pro kompo-zitní konstrukce [online]. Praha, [cit. 2019-11-23]. Prezentace. Dostupné z:
[https://docplayer.cz/106343421-Filosofie-konstruovani-damage-tolerance-pro-](https://docplayer.cz/106343421-Filosofie-konstruovani-damage-tolerance-pro)

kompozitni-konstrukce-prof-ing-milan-ruzicka-csc-cvut-v-praze-fakulta-strojni.html

- [12] VASSILOPOULOS, Anastasios P. Fatigue life prediction of composites and composite structures: edited by Anastasios P. Vassilopoulos. Oxford: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 1439827893.
- [13] JELÍNKOVÁ, Zdeňka. Vliv prostředí na vlastnosti polymerních kompozitů a matric [online]. Praha, [cit. 2019-9-20]. Prezentace. Ústav materiálového inženýrství. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Jenikova_Z.pdf
- [14] HRABĚTOVÁ, Martina Monteforte. Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací kompozitu v leteckém průmyslu ČR. [online]. Praha, 12.4.2012 [cit. 2019-11-23]. ISSN 1801 – 9315. Dostupné z: <https://www.vzlu.cz/cs/transfer-27-2016-s993.pdf>
- [15] ČSN EN ISO 527-4. Plasty – Stanovení vlastností – Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [16] Zwick/Roll [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/en/vibrophones/vibrophone>
- [17] Om K. Joshi. The effect of moisture on the shear properties of carbon fibre composites. Composites [online]. Elsevier. Volume 14, Issue 3, July 1983. [cit. 8. 4. 2020]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(83\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0010-4361(83)90005-8)
- [18] MICHALEC Jiří a kol. Pružnost a pevnost II. 2. Vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02375-3.
- [19] A.P.P. Fulco. Fatigue damage and fatigue life diagrams of a carbon/epoxy cross ply laminate aged by hygrothermal exposure. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing [online]. Elsevier. 16 September 2019, [cit. 7. 5. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105628>
- [20] R. Selzer and K. Friedrich. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing [online]. Elsevier. Volume 28, Issue 6, 1997, [cit. 7. 5. 2020]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(96\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00154-6)

- [21] M. Akay, S. Kong Ah Mun and A. Sranley. Influence of moisture on the thermal and mechanical properties of autoclaved and oven-cured Kevlar-49/epoxy laminates. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier. Volume 57, Issue 5, 1997, [cit. 7. 5. 2020]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00017-1)
- [22] Beckry Abdel-Magid, Saeed Ziaee, Katrina Gass and Marcus Schneider. The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites. *Composite Structures* [online]. Elsevier. Volume 71, Issues 3–4, December 2005 [cit. 7. 5. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.022>
- [23] A. Zafar, F. Bertocco, J. Schjødt-Thomsen and J.C.Rauhe. Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier. Volume 72, Issue 6, 27 March 2012 [cit. 7. 5. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.010>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	Procenta
°C	stupeň Celsia
SiO ₂	Oxid křemičitý
MgO	Oxid hořečnatý
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
MPa	Megapascal
kg	Kilogram
σ	amplituda
σ_a	Amplituda napětí
σ_m	Střední napětí
E	modul pružnosti v tahu
t	čas
min	minuta
h	hodina
s	sekunda
R	součinitele asymetrie cyklu
ISO	International Organization for Standardization
ČSN	Československá státní norma
°	stupeň
n	Počet cyklů
H ₂ O	Voda
RH	relativní vlhkost vzduchu
Hz	hertz
F _{max}	Maximální síla

σ_{Mt}	Mez pevnosti v tahu
N	Newton
W_{max}	Deformační práce
a	výška
b	šířka
mm	Milimetr
v	Variační koeficient
S	Směrodatná odchylka
\bar{x}	Průměrná hodnota
ε	poměrná deformace
bar	vedlejší jednotkou tlaku
σ_h	Horní napětí kmitu
σ_d	Dolní napětí kmitu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Vývoj aplikací kompozitních materiálů v konstrukci dopravních letadel Airbus [14]	10
Obr. 2	Synergické chování fází kompozitního materiálu [2]	11
Obr. 3	Jevy při porušení kompozitu na rozhraní matrice a výztuže [2]	12
Obr. 4	Rozdělení kompozitních materiálů dle geometrických tvarů výztuže [2]	13
Obr. 5	Rozdělení textilních vazeb vláknových výztuží s dlouhými vlákny [1]	13
Obr. 6	Schéma ručního kladení za mokra [9]	20
Obr. 7	Vytvrzovací cyklus autoklávu pro uhlíkový prepreg Sigrafil Ce 1003 [8]	20
Obr. 8	Schéma putruzního stroje [10]	21
Obr. 9	Schéma RTM [1]	21
Obr. 10	Vlhkost prostupující do kompozitního materiálu [5]	22
Obr. 11	Absorpce vlhkosti cívky aramidových vláken o hmotnosti 4,5 kg [3]	23
Obr. 12	Relativní pokles meze pevnosti v tahu a E-modul suchého a vlhkého aramidového vlákna v závislosti na teplotě [3]	23
Obr. 13	Závislost mezilaminární smykové pevnosti na absorpci vody u vzorků, které byly vystaveny vařící vodě. [17]	24
Obr. 14	Závislost mezilaminární smykové pevnosti na absorpci vody u vzorků, které byly vystaveny teplotě 50°C při relativní vlhkosti 95% [17]	24
Obr. 15	Lomový povrch vzorku, který byl vystaven 16 hodinám vaření ve vodě [17]	25
Obr. 16	Lomový povrch vzorku, který byl vystaven teplotě 50°C při relativní vlhkosti 95% po dumu 72 hodin [17]	25
Obr. 17	Porucha vzorku, který byl vystaven po 1000 hodin vodě při pokojové teplotě [22]	26
Obr. 18	Porucha vzorku, který byl vystaven po 3000 hodin vodě při pokojové teplotě [22]	26
Obr. 19	Průběh poškození u homogenních a heterogenní materiálů [3]	28

Obr. 20	Rozvoj poškození během zkoušení životnosti kompozitního materiálu $\left[\left(\frac{0^\circ}{90^\circ}/\pm 45^\circ\right)_s\right]$, [7]	28
Obr. 21	Průběh poklesu tuhosti kompozitních materiálů, namáhaných na tah – tah, skladba $\left[\left(\frac{0^\circ}{90^\circ}/\pm 45^\circ\right)_s\right]$, [11]	29
Obr. 22	Klasifikace zátěžných cyklů dle velikosti σ_a , σ_m , a součinitele asymetrie cyklu R [6]	30
Obr. 23	Vzorek se skelnými vlákny AEROGLASS	35
Obr. 24	Vzorek s uhlíkovými vlákny kepr	36
Obr. 25	Vzorek s aramidovými vlákny	36
Obr. 26	Zkušební těleso pravoúhlé bez koncových jazýčků typ 2	37
Obr. 27	Směr řezání zkušebních těles ze vzorků z kompozitních materiálů ze skel- ných a uhlíkových vláken	37
Obr. 28	Směr řezání zkušebních těles ze vzorku z kompozitního materiálu z arami- dových vláken	38
Obr. 29	Zkušební stroj Zwick/Roell Vibrophore 100 [16]	40
Obr. 30	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles ze sklolaminátu za běž- ného klimatu	41
Obr. 31	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles ze sklolaminátu vystave- né H ₂ O po dobu 750 hodin	42
Obr. 32	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles ze sklolaminátu vystave- né H ₂ O po dobu 1000 hodin	43
Obr. 33	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s aramidovými vlákny za běžného klimatu	44
Obr. 34	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H ₂ O po dobu 750 hodin	45
Obr. 35	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H ₂ O po dobu 1000 hodin	46

Obr. 36	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené běžnému klimatu	47
Obr. 37	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené H ₂ O po dobu 750 hodin	48
Obr. 38	Graf závislosti napětí na poměrné deformaci těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené H ₂ O po dobu 1000 hodin	49
Obr. 39	Porovnání meze pevnosti σ_{Mt} , zkušebních těles ze sklolaminátu	50
Obr. 40	Porovnání meze pevnosti σ_{Mt} , zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny	51
Obr. 41	Porovnání meze pevnosti σ_{Mt} , zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny	51
Obr. 42	Zkušební těleso ze sklolaminátu po statické zkoušce	52
Obr. 43	Zkušební těleso z kompozitu s aramidovými vlákny po statické zkoušce	52
Obr. 44	Zkušební těleso z kompozitu s uhlíkovými vlákny po statické zkoušce	52
Obr. 45	Harmonické zatížení [18]	53
Obr. 46	Hodnoty zatížení zkušebních těles ze sklolaminátu	54
Obr. 47	Počty cyklů zkušebních těles ze sklolaminátu	55
Obr. 48	Hodnoty zatížení zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny	56
Obr. 49	Počty cyklů zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny	57
Obr. 50	Hodnoty zatížení zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny	58
Obr. 51	Počty cyklů zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny	59
Obr. 52	Zkušební těleso ze sklolaminátu po dynamické zkoušce	60
Obr. 53	Zkušební těleso z kompozitu s aramidovými vlákny po dynamické zkoušce	60
Obr. 54	Zkušební těleso z kompozitu s uhlíkovými vlákny po dynamické zkoušce	60
Obr. 55	Graf určující medián zkušebních těles ze sklolaminátu	61
Obr. 56	Graf určující medián zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny	62

Obr. 57 Graf určující medián zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny

63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Srovnání výrobních technologií dle obsaženého objemového podílu vláken [8]	19
Tab. 2	Použité materiály a jejich množství pro výrobu vzorku se skelnými vlákny	35
Tab. 3	Použité materiály a jejich množství pro výrobu vzorku s karbonovými vlákny	35
Tab. 4	Použité materiály a jejich množství pro výrobu vzorku s aramidovými vlákny	36
Tab. 5	Základní rozměry vzorků [15]	37
Tab. 6	Kondicionace zkušebních těles ze skelných vláken pro testování	38
Tab. 7	Kondicionování zkušebních těles z uhlíkových vláken pro testování	39
Tab. 8	Kondicionování zkušebních těles z aramidových vláken pro testování	39
Tab. 9	Nastavené hodnoty měření na stroji	40
Tab. 10	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu za běžného klimatu	41
Tab. 11	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu vystavené H ₂ O po dobu 750 hodin	42
Tab. 12	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu vystavené H ₂ O po dobu 1000 hodin	43
Tab. 13	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny za běžného klimatu	44
Tab. 14	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H ₂ O po dobu 750 hodin	45
Tab. 15	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny vystavené H ₂ O po dobu 1000 hodin	46
Tab. 16	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené běžnému klimatu	47
Tab. 17	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlák-	48

	ny vystavené H ₂ O po dobu 750 hodin	
Tab. 18	Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny vystavené H ₂ O po dobu 1000 hodin	49
Tab. 19	Parametry zkušebních těles ze sklolaminátu pro dynamické zkoušky	54
Tab. 20	Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles ze sklolaminátu	55
Tab. 21	Parametry zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny pro dynamické zkoušky	56
Tab. 22	Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s aramidovými vlákny	57
Tab. 23	Parametry zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny pro dynamické zkoušky	58
Tab. 24	Výsledky dynamické zkoušky zkušebních těles z kompozitu s uhlíkovými vlákny	59
Tab. 25	Vyhodnocení vlivu vlhkosti na zkušební tělesa ze sklolaminátu	61
Tab. 26	Vyhodnocení vlivu vlhkosti na zkušební tělesa z kompozitu s aramidovými vlákny	62
Tab. 27	Vyhodnocení vlivu vlhkosti na zkušební tělesa z kompozitu s uhlíkovými vlákny	63

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I: Separáční vosk Havel Wax 60-x3
- Příloha II: Matrice Havel L285, tuřidlo 285 viz příloha
- Příloha III: Skelná tkanina 200g/m2 Kepr
- Příloha IV: Uhlíková tkanina Korcarbon CC200T-100
- Příloha V: Aramidová tkanina 173g/m2 Kepr

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST HAVEL WAX 60-X3



Havel Composites CZ, s.r.o.,
Svéslavice 67, Přáslavice, 783 54
Tel.: 585 129 010, Fax 585 129 040,
www.havel-composites.cz,
info@havel-compositec.cz

Technický list Havel Wax 60-x3

POPIS PRODUKTU:

Univerzální separační voskový prostředek ve formě pasty pro zpracování polyesterové a epoxidové pryskyřice.

Vhodný pro modely, nové nástroje a kontinuální výrobu.

Umožňuje u zaběhnutých nástrojů vícenásobné odformování při teplotách až 140°C.

POUŽITÍ:

Pro nanášení separačního voskového prostředku Havel Wax 60-x3 se používá čistá, měkká bavlněná látka.

Voskový separační prostředek se touto bavlněnou látkou velkoryse nanese na přehledové plochy a potom se vyleští čistou látkou do vysokého lesku.

Nové formy vyžadují nanesení čtyř až šesti vrstev vosku, přičemž se musí před každým novým nanesením počkat, až se podíly rozpouštědla odpaří.

[Jako dodatečné bezpečnostní opatření doporučujeme pro první odformování nanést separační film polyvinylalkoholu (PVA).]

Doporučení: Nové formy je nutné zásadně temperovat.

Upozornění: Navzdory rychlému vyleštění nanesené vrstvy zůstává film vosku pouze zcela na povrchu formy bez toho, aby do struktury formy pronikla. Díky exotermickému vývinu tepla, ke kterému dochází během prvních odformování, je separační voskový prostředek postupně stále více vhnán do povrchových pórů materiálu formy, až je dosaženo takzvaného „voskem nasyceného“ stavu formy. Jako přibližné pravidlo pro dosažení požadovaného stavu platí 4-6 odformování. Jako dodatečné zabezpečení proti lepení výrobků ve formě nebo uvíznutí výrobků ve formě se doporučuje během tohoto „kondicionování“ formy nanést separační film polyvinylalkoholu (PVA), který je možné, pokud je to nutné, snadno rozpustit pomocí teplé vody. Jestliže je tímto způsobem čistě „zaběhnuta“ nová forma, tak je možné pomocí přípravku Havel Wax 60-x3 dosahovat velmi dobrých výsledků co se týče počtů možných oddělení.

Nové formy musí být zásadně temperovány při 50 °C po dobu minimálně tří hodin než se začne s nanášením separačního prostředku.

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI: (při 25 °C)

Hmotnost na litr	0,839 kg
Bod vzplanutí	43 °C
Spodní hodnota výbušnosti	0,8 obj. %
Hodnota MAK	500 ppm
Podíl rozpouštědla	cca. 80 %
Forma dodávky	dóza 450 g

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE A TUŽIDLO

1

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:	Extremně 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 větroně a motorové větroně (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 opracovatelné a lze je vytáhnout 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 tkanině na vertikálním povrchu. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejružnější plniva, např. aerosil, mikrobaly, 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/cm ³ / 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 průsvitně modrou barvu

Podrobnosti pro zpracování

	Pryskyřice L 285	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Průměrná EP - hodnota	0,62	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	64	64	64

Technické informace o zesílené pryskyřici**Statické testy**

Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 15 h při 80 °C		G R C Skelné vlákno G F K	C R C Uhlík. vlákno C F K	S R C Kevlar.vlákno S F K
Pevnost v ohybu 10 ³	psi x	74 - 81 510 - 560	104 - 112 720 - 770	51 - 55 350 - 380
	N/mm ²			
Pevnost v tahu 10 ³	psi x	67-73 460 - 500	74 - 80 510 - 550	58 - 70 400 - 480
	N/nm ²			
Pevnost v tlaku 10 ³	psi x	59 - 64 410 - 440	67 - 74 460 - 510	20 - 23 140 - 160
	N/nm ²			
Pevnost ve stříhu 10 ³	psi x	6,1 - 6,7 42 - 46	6,8 - 8,0 47 - 55	4,2 - 4,9 29 - 34
	N/nm ²			
Modulus pružnosti 10 ³	psi x	2,9 - 3,5 20 - 24	5,8 - 6,5 40 - 45	2,3 - 2,8 16 - 19
	N/nm ²			
<p>GRC vzorky: 16 vrstev skelné tkaniny, 8 H satén, 296 g/m², 4 mm silné CRC vzorky: 8 vrstev uhlíkové tkaniny, plátno, 200 g/m², 2 mm silné SRC vzorky: 15 vrstev kevlarové tkaniny, 4H satén, 170 g/m², 4 mm silné</p> <p>Obsah vláken ve vzorcích během výroby/testování: 40 - 45 vol% Data propočítaná na obsah vláken 43 vol%</p> <p>Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech.</p>				

Míchací poměry

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

Gel time

- nános 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/cm ³	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu	psi x 10 ³ N/ mm ²	16 - 18 110 - 120
Modul pružnosti	psi x 10 ⁵	4,6 - 4,8 3,0 - 3,3
kN/mm ²		
Pevnost v tahu	psi x 10 ³	10 - 11,5
kN/mm ²		70 - 80
Pevnost v tlaku	psi x 10 ³	18 - 20
kN/mm ²		120 - 140
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla nárazu		45 - 55
Nmm/mm ²		
Pevnost ve stříhu	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 % 90 %	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		

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLO 500

Charakteristika

Schválení:	---
Použití:	Výroba kompozitních prvků Lodě a stavba lodí Sportovní nářadí Letecké modely Formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	60 °C - □ + 50 - 60 °C bez tepelného vytvrzení
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 40 °C Všechny obvyklé výrobní postupy
Zvláštní vlastnosti:	Extremně dobrá fyziologická kompatibilita, dobré mechanické vlastnosti, velmi krátké doby vytvrzení dokonce i při nízké teplotě
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: horká tixotropní úprava L 285 W: bílá

Použití

Jedná se o systémy laminačních pryskyřic s nízkou viskozitou neobsahující rozpouštědla či plniva určená pro zpracování a vytvrzování při pokojové teplotě. Vhodná pro výrobu dílů se zesílením skelnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny, jejichž rysy jsou vysoká statická a dynamická nosnost.

Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) je přibližně 10 - 15 min. Laminačení pryskyřice L 285 v kombinaci s tužidlem 500 se vyznačuje velmi krátkou dobou vytvrzení, a to i při nízkých teplotách (dobré vytvrzení je zajištěno při teplotách začínajících u + 10 °C) Dokonce i při nepříznivých vytvrzovacích podmínkách, jako je nízká teplota či vysoká relativní vlhkost lze dosáhnout nelepivých povrchů s vysokým leskem.

Viskozita směsi byla upravena tak, že pryskyřice nestéká z tkanin rozložených na vertikálním povrchu.

Díky svým výborným přilnavým vlastnostem se tyto systémy rovněž dají použít jako adheziva pro dřevo, kov, sklo, beton a nesčetné druhy plastů. Tixotropní úprava (např. laminační pryskyřice L 285 T) je upřednostňována pro silnější adhezivní spoje a vertikální povrchy. Plniva (např. kovový prášek, prach, bavlněné vločky apod.) mohou být přimíchána pro dosažení speciálních vlastností systému.

Kvůli průtažnosti 4 - 7 %, což je výhodné při použití jako laminační pryskyřice, je pevnost ve stříhu a odolnost proti odloupenutí o něco nižší než u našich speciálních adhezivních pryskyřic:

Adhezivní pryskyřice L 135 / K2 a

Adhezivní pryskyřice A 10 / A 20.

Všeobecným pravidlem při aplikaci všech adhezivních látek je pečlivá příprava povrchu, která je základním předpokladem dobré adheze. Zbytky rozpouštědel a nečistoty jako je prach, mastnota či kapky vody znemožní dobrou vazbu.

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 500
Hustota °C	g/cm ³ / 25	1,00 - 1,06
Viskozita °C	mPas / 25	200 - 350
Hodnota aminu	mg KOH / g	350 - 400
Barva Gardner		max 5

Podrobnosti pro zpracování

	Laminační pryskyřice L 285	Tužidlo 500
Průměrná hodnota epoxidu	0,63	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	62
Skladování	□ 12 měsíců v originálním obalu	
Teplota zpracování při	10 - 50 °C	
Vytvrzování	Vytvrzování při pokojové teplotě nebo vytvrzování ve formě při vysokých teplotách.	
Temperování	Není nezbytné - možno při 50 °C - □ 150 °C	

Skladování

Pryskyřice a tužidla mohou být skladovány po dobu nejméně 12 měsíců v pečlivě utěsněných kontejnerech. Při teplotách pod + 15 °C mohou pryskyřice a tužidla zkrystalizovat. Krystalizace je patrná jako zamízení či změna tekuté podoby obsahu kontejneru na pevnou. Před zpracováním se musí krystalizace zahřátím odstranit. Pomalu zahřejete až do přibližně 50 - 60 °C ve vodní lázni nebo peci a mícháním či potřásáním uvedete obsah kontejneru do původního stavu bez jakékoli vady na kvalitě. Zpracovávejte pouze výrobky zcela jednotné barvy. Před zahřátím lehce kontejner otevřete, aby došlo k vyrovnání tlaku. Během zahřívání buďte opatrní. Nezahřívajte nad otevřeným ohněm! Při míchání používejte bezpečnostní pomůcky (rukavice, brýle, respirátor).

Nárůst teploty

Optimální teplota při zpracování je v rozmezí mezi 20 a 25 °C. Vyšší teploty zpracování jsou možné, ale zkracují dobu zpracovatelnosti. Nárůst teploty o 10 °C zkrátí dobu zpracovatelnosti na polovinu. Voda (například velmi vysoká vlhkost nebo voda obsažená v plnivech) může způsobit zrychlení reakce pryskyřice / tužidlo. Rozdílné teploty a vlhkosti během zpracování nemají význačný efekt na pevnost vytvrzeného výrobku.

Nemíchejte velká množství, zvláště u tohoto vysoce reaktivního systému. Teplo sálající z nádoby, v níž dochází ke smísení, je velmi nízké, takže kvůli reakčnímu teplu (exotermická reakce pryskyřice-tužidlo) se obsah velmi rychle zahřeje. Mohou vzniknout teploty i vyšší než 200 °C, které mohou způsobit intenzivní hoření směsi pryskyřice a tužidla za výskytu kouře.

Gel time

- nános vrstvy o tloušťce 1 mm při různých teplotách

20 - 25 °C	přibližně 45 - 60 min.
40 - 45 °C	přibližně 20 - 30 min.

Míchací poměry

	Pryskyřice L 285 : Tužidlo 500
Složky váhově	100 : 40 (+/-2)
Složky objemově	100 : 50 (+/-2)

Specifikované poměry míchání musejí být co nejpřesněji dodrženy. Přidání více či méně tužidla nebude mít efekt na rychlejší či pomalejší reakci - pouze nedostatečné vytvrzení, které nelze žádným způsobem opravit.

Směs pryskyřice a tužidla je nutno velice pečlivě promíchat. Míchejte, dokud nebude směs zcela jednotné barvy. Zvláštní péči věnujte stěnám a dnu nádoby, v níž směs mícháte.

Laminační pryskyřice L 285 - Tužidlo 500	
Max T _G pro vytvrzování při 18 °C	40 - 45 °C
Max T _G pro vytvrzování při 25 °C	50 - 60 °C
Max T _G pro vytvrzování při 50 °C	60 - 65 °C

Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm ³	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu 10 ³	psi x N/ mm ²	17 - 20 120 - 140
Modul pružnosti 10 ⁵	psi x kN/mm ²	4,8 - 5,1 3,3 - 3,5
Pevnost v tahu 10 ³	psi x kN/mm ²	10 - 11,5 70 - 80
Pevnost v tlaku 10 ³	psi x kN/mm ²	18 - 20 120 - 140
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla Nmm/mm ²	nárazu	40 - 50
Tvrdość D	ve střihu	86 - 90
Absorpce vody % °C	24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,10 - 0,20 0,20 - 0,50
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw. 10 % 90 %		□ 2 X 10 ⁶ □ 2 X 10 ⁶
Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 15 h při 50 °C		
Zastupující data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech		

POZNÁMKA:

Překlad byl pořízen doslovně z manuálu "TECHNICKÉ INFORMACE" vydaného firmou MGS Kunstharzprodukte GmbH. Podrobnější či upřesňující informace Vám rádi podáme na telefonním čísle 585 129 011, na GSM: 603 847 655 (p.Havel) nebo 603 841 749 (p.Šuran).

PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST SKELNÁ TKANINA



Technický list

Skelná tkanina 200g/m²

AEROGLASS

Kepr 2/2

Váha na jednotku plochy		200 +/- 15g/m ²
Vazba		kepr
Kraje		stříhané
Hustota cm	osnova	16+/- 1
Hustota cm	útek	13 +/- 1
Použitá lubrikace		přímá silanová
Pevnost v tahu N/50*200 mm	osnova	≥ 900
	útek	≥ 860
Šíře cm		100 +/- 1cm
Délka tkaniny / 1 role		100 +/- 2 cm
Doporučená skladovatelnost	teplota	Do 16 ° C
	vlhkost	Do 48 %
Nábal	papírová dutinka	vnitřní průměr 76 mm
Balení		polyethylenová fólie

Havel Composites CZ , s.r.o., Svědlice 67, Přáslavice, 783 54

Tel.: 585 129 010, Fax 585 129 040,

www.havel-composites.cz, info@havel-compositec.cz

PŘÍLOHA P IV: TECHNICKÝ LIST KORCARBON CC200T-100



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0172101

Material Code: TOR000202
Material Designation: CC 200 T - 100
Manufacturing Date: 11.8.2015
Article no.: CA0004-641-0002
Test roll No.: C0172101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxi resin
Binding: twill 2/2

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000202						
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 490	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 500	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,38	0,35	0,41	* 0.40	DIN EN 5084
Area weight	g/m ²	200	190	210	202	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.0	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm ³	1,76				
* orientation value						
Corresponds to the batch no.: C01721						



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kucera.j@kordarna.cz

PŘÍLOHA P V: TECHNICKÝ LIST KEVLAR TYPE 282



DATA SHEET

TYPE 282

PROPERTIES	SPECIFICATION	STANDARD
Material	Twaron® 1210 dtex	UNI 9275:1988
Fabric construction (ends/picks per cm)	6,7 x 6,7 ± 0,3	UNI EN 1049-2:1996
Areal weight	173 g/m ² ± 4 %	UNI EN 12127:1999
Fabric thickness	250 µm ± 15 %	UNI EN ISO 5084:1998
Weave	TWILL 2/2	UNI 8099:1980
Tensile strength (warp/weft)	1140 N/cm	UNI EN ISO 13934-1:2000
Finishing	Fabric can be supplied Loomstate, Scoured or Water-Repellent	UNI EN 24920:1993 AATCC-118:1989
Storage	Keep the material in the original packaging in clean and dry place	
Notes		

This information is indicative of our present standard production: it might be changed and doesn't confirm contractual liabilities

PRO-SYSTEMS SPA

Rev.02 – January, 2010



PRO-SYSTEMS SPA

UFFICI COMMERCIALI E AMMINISTRATIVI VIA AL CORRE, 63/65 - 22076 MOZZATE (Co) • TEL. +39 0331 576 887 R.A. - FAX +39 0331 576 295
SEDE LEGALE VIA MOTTI, 6 - 20144 MILANO • C.F. / P.IVA IT 03707330969 - CAP. SOC. € 450.000,00 INT. VERSATO - R.E.A. MI 1495996 - MECC. M030437
E-MAIL pro-systems@pro-systems.it • WEB SITE www.pro-systems.it