



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Využití na mokro kladených uhlíkových kompozitů pro
prodloužení zbytkové životnosti ocelové konstrukce s únavovou
trhlinou.**

**The use of wet lay-up carbon fibre composites for rehabilitation of
steel structures with fatigue crack**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jan Vůjtěch

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: prof. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Praha, 2023

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Jan Vůjtěch

Název disertační práce: Využití na mokro kladených uhlíkových kompozitů pro prodloužení zbytkové životnosti ocelové konstrukce s únavovou trhlinou

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Pavla Ryjáčka, Ph.D..

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:
COST CZ (LD) Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy č. LD15131 a LD15127.
NAKI II Ministerstva kultury (No. DG18P02OVV033) “

V Praze
dne

31.8.2023

.....
podpis

1 Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří umožnili zpracování této disertační práce. Zejména bych chtěl poděkovat prof. Ing. Pavlu Ryjáčkovi, Ph.D., vedoucímu mé práce, za jeho čas a za možnost podílet se na práci, která může mít praktické využití.

2 Anotace:

Tato práce se zabývá návrhem metody preventivních oprav těžce korozně poškozených ocelových konstrukcí. Konkrétně se jedná o metodu využití na mokro kladených uhlíkových kompozitů (CFRP – carbon fibre reinforced polymer). Jelikož korozní oslabení a související koncentrace napětí na těchto detailech může iniciovat únavovou trhlinu, zabýval jsem se ve své práci únavovými zkouškami zesíleného detailu. Konečným cílem je pomocí této metody zjednodušit a zrychlit preventivní opravu ocelových konstrukcí, odstranit korozní oslabení a předejít vzniku únavové trhliny za pomoci moderního materiálu. Přestože se tento materiál již v některých stavebních konstrukcích objevuje, jeho využití pro ocelové konstrukce je stále ještě předmětem výzkumů a jeho aplikace je zatížena celou řadou nejistot. V práci jsou nejprve shrnuty informace o používaných materiálech. Dále je popsán stávající stav vědomostí o problematice zesilování pomocí CFRP a únavovém poškození. Ve druhé části práce se věnuji popisu provedených experimentů. Ty byly vytvořeny tak, aby vytvořená metodika použití obsahovala co nejširší informace ke správné aplikaci. V první řadě byl zkoumán samotný efekt zesílení, a to pomocí únavových zkoušek zesílených a nezesílených vzorků. Tyto hlavní experimenty byly dále doplněny o zkoušky materiálových vlastností a chování zesílení vystaveného extrémním účinkům prostředí. Tyto poznatky jsou poté zobecněny. Výstupem práce je ve třetí části popis správného postupu aplikace zesílení a doporučení k numerickému určení efektivnosti zesílení.

Klíčová slova: CFRP, kompozit, mokrý proces, zesilování, únava, únavová pevnost

3 Abstrakt:

The goal of this thesis is to develop a method of retrofitting steel structures with possible fatigue damage using carbon reinforced polymers (CFRP). In detail by using composites created by the wet lay-up process. Although these kinds of materials are already used in some civil engineering structures, their use for strengthening steel structures is still in the research stage. The final goal is to make preventative repair of damaged structures faster and easier. This would allow the extension of life expectancy for some structures. The state of art is presenting the current level of information available about the materials and conducted experiments. Next part is the description of my own experiments. Those include fatigue, material, and environmental resistance tests. These tests were designed to provide as wide range as possible to come to general conclusions about correct method of retrofitting. In the third part are the general conclusions, examples, and best practices.

Key words: CFRP, composite, wet lay-up, strengthening, fatigue, fatigue resistance

Obsah:

1	Poděkování.....	3
2	Anotace:	4
3	Abstrakt:.....	4
4	Úvod.....	7
5	Studie současného stavu problematiky	7
5.1	Únavové poškození konstrukcí	7
5.1.1	Vznik a šíření únavové trhliny	8
5.1.2	Metody omezení únavových trhlin.....	10
5.1.3	Metody určení životnosti konstrukce	12
5.2	FRP materiály	15
5.2.1	Vlákna	15
5.2.2	Matrice	18
5.2.3	Mechanické vlastnosti FRP.....	20
5.3	Zesilování ocelových konstrukcí FRP.....	24
5.3.1	Příklady zesílených konstrukcí.....	28
5.3.2	Vliv zesílení na zlepšení únavových parametrů ocelových konstrukcí.....	31
5.3.3	Vliv prostředí na zesílené konstrukce	32
6	Motivace a cíle práce:	34
7	Experimentální část.....	35
7.1	Úvod.....	35
7.2	Předběžná numerická studie.....	38
7.2.1	Model	38
7.2.2	Předběžná studie – určení použitého zesílení.....	40
7.3	Materiálové zkoušky CFRP	42
7.3.1	Popis experimentů.....	42
7.3.2	Výsledky experimentů	46
7.4	Únavové zkoušky	58
7.4.1	Popis vzorků.....	58
7.4.2	Kompozitní zesílení – pryskyřice a CFRP tkaniny	60
7.4.3	Únavové zkoušky – uspořádání experimentu.....	62
7.5	Výsledky únavových zkoušek.....	63
7.5.1	Popis kalibračního vzorku.....	63
7.5.2	Kalibrace	64
7.5.3	Únavové zkoušky	66
7.5.4	Únavové zkoušky – vyhodnocení	69
7.5.5	Únavové zkoušky – zhodnocení výsledků	75

7.6	Zkoušky klimatické odolnosti	76
7.6.1	Zatěžování pouze mrazem.....	77
7.6.2	Zatěžování mrazem a roztokem NaCl.....	78
7.7	Zkoušky klimatické odolnosti – dlouhodobý monitoring	80
8	Metodika aplikování CFRP zesílení.....	84
8.1	Jak a kdy lze použít	84
8.1.1	Postup určení vhodného zesílení	84
8.1.2	Metody zesilování CFRP	85
8.1.3	Postup provádění zesilování.....	86
8.2	Určení materiálových vlastností kompozitu.....	88
8.3	Návrh zesílení	88
8.3.1	Efekt zesílení – primární (přidání materiálu)	88
8.3.2	Kotvení zesílení.....	89
8.3.3	Efekt zesílení – sekundární (změna vrubového účinku)	89
9	Závěry	90
10	Literatura.....	94
11	Přílohy:.....	100

4 Úvod

Předmětem práce je výzkum možnosti využití polymerů vyztužených uhlíkovým vláknem (carbon fiber reinforced polymer – CFRP) pro zesilování degradovaných ocelových konstrukcí. FRP nalézá ve stavební praxi stále častěji své uplatnění. Je to zejména díky stále se snižující ceně a díky výhodným materiálovým vlastnostem, jako jsou vysoká pevnost, nízká hmotnost a odolnost proti degradaci vlivem povětrnostních vlivů.

Práce je zaměřena na zesilování primárně ocelových mostů, které jsou silně degradovány korozí a na kterých by toto korozní poškození mohlo vést v důsledku lokální koncentrace napětí ke vzniku únavových trhlin. Toto využití CFRP zesílení se tedy zabývá preventivním zesílením konstrukce a jeho interakcí s únavovým poškozením vzniklým na již zesíleném detailu.

Cílem výzkumu je nalézt optimální metodu aplikace CFRP na konstrukci tak, aby došlo k prodloužení zbytkové životnosti ocelové konstrukce. Zároveň bude analyzováno chování tohoto zesílení v závislosti na degradaci vlivem povětrnostních vlivů, zatížením od provozu na mostě a stavebních pracích. Dále bude analyzováno chování na kontaktu se zesilovaným prvkem a chování CFRP při jeho porušování. Uvedené činnosti budou podpořeny experimentální činností a numerickým modelováním.

5 Studie současného stavu problematiky

5.1 Únavové poškození konstrukcí

Informace v kapitole 5.1 vycházejí z publikací Klesnil, Lukáš [48], Pluhař a kol. [51] a normy ČSN EN 1993-1-9 [50]

Únava materiálu je termín pro procesy probíhající v cyklicky zatěžovaných částech konstrukcí, či strojních součástkách, při nichž dochází po nějaké době k lomu materiálu. Ten je výsledkem mikroskopických procesů probíhajících ve struktuře materiálu. K lomu dochází i přesto, že toto zatížení může být tak malé, že samotné statické působení nemá na materiál vliv. Kumulace poškození při cyklickém zatížení má nevratný charakter a projeví se postupným růstem trhliny a nakonec lomem.

Historicky se tento problém poprvé projevil u strojních součástí podrobených cyklickému působení sil, jako byly parní stroje a osy kol. Od poloviny 19. století až

do dneška je tento fenomén podrobován intenzivnímu výzkumu. První systematický výzkum prováděl A. Wöhler v druhé polovině 19. století. Jím odvozené Wöhlerovy křivky závislosti počtu cyklů do lomu na amplitudě zatížení se dodnes používají jako základní únavová charakteristika.

5.1.1 Vznik a šíření únavové trhliny

Jak již bylo řečeno, vznik únavové trhliny způsobuje postupná kumulace mikroskopických poškození. Teorie procesu vzniku popisuje tři fáze růstu trhliny:

1. Stadium změny mechanických vlastností.

V tomto stadiu dochází ke změnám ve struktuře materiálu v celém objemu prvku. V materiálu dochází k postupnému posunu dislokací v krystalické mřížce a jejich shlukování do pásů. To zapříčiňuje změnu mechanických (tzv. cyklické zpevňování/změkčování) a elektro-magnetických vlastností. Toto stadium je poměrně krátké. Dojde k postupnému nasycení, kdy jsou už všechny dislokace posunuty.

2. Stadium nukleace trhliny.

Dochází ke vzniku mnoha zárodků mikrotrhlin. To se týká ve většině pouze povrchových vrstev materiálu v místech nakupení poruch. Délka stadia je ovlivněna povrchovými nerovnostmi, napjatostí (reziduální pnutí, koncentrátoři napětí), opracováním povrchu a materiálovými vlastnostmi, případně ještě znehodnocením povrchu korozí a opotřebením. Mimo povrch vznikají zárodky trhlin pouze v přítomnosti koncentrátorů napětí (např.: vměstky, technologické vady, ...)

3. Stadium šíření trhliny.

To je rozděleno do dvou fází. V první fázi rostou mnohé zárodečné trhliny, postupně se ale jejich růst zastaví a dále pokračuje již pouze jedna „magistrální“ trhlina. Ta se ve druhé fázi stáčí kolmo k hlavnímu směru napětí a pokračuje její růst. Dochází k postupnému zmenšování nosného průřezu až následně dojde k lomu.

Je nutné upozornit, že neexistuje definice rozhraní mezi jednotlivými stadii. Rozdělení, od které délky se jedná o stadium šíření, je pouze věcí zvyku a konvence. Pro stavební konstrukce je rozhodující stadium šíření trhliny.

Délka trvání jednotlivých etap závisí především na velikosti cyklické plastické deformace. Z hlediska únavy mohou nastat dva hlavní případy:

- a. Nízkocyklová únava. Dochází ke střídavé makroplastické deformaci. Zatěžováno je napětím okolo nebo i mírně nad mezí kluzu. Kov rychle zpevní, vyčerpává se možnost plastické deformace a dochází k růstu trhliny. Počet cyklů do lomu obvykle nepřesáhne 10^4 a životnost závisí především na rychlosti šíření magistralní trhliny.
- b. Vysokocyklová únava. Dochází k mikroplastické deformaci v místech koncentrace napětí. Zatěžovací napětí je pod mezí kluzu. Trhliny mohou růst někdy i jen při 15% meze kluzu. Kumulace poškození je pomalá a po většinu času se prvek nachází ve stadiu nukleace trhliny. Počet cyklů do lomu je u vysokocyklové únavy od 10^5 výše.

Kromě nízko a vysokocyklové únavy mohou při cyklickém zatěžování nastat ještě dva případy. Za první, když se těleso poruší již v průběhu prvních desítek cyklů. Tento případ označujeme jako kvazistatický lom. Nejedná se v pravém smyslu slova o únavový proces. Za druhé, existuje úroveň zatěžování, kdy nedojde k porušení prvku ani při nekonečném počtu cyklů. Toto je označováno jako trvalá únavová pevnost. Pokud nedojde k porušení ani po 10^8 cyklů bere se, že zatěžovací napětí spadá do oblasti trvalé únavové pevnosti. Obdobně, jako u dělení stadií růstu trhliny, se i zde jedná pouze o konvenční dělení.

Teorii únavového porušení se zabývá lomová mechanika. Tou lze na základě konfigurace porušení, velikosti namáhání a rychlosti šíření trhliny určit zbytkovou životnost konstrukce. Rychlost šíření trhliny je vyjádřena jako přírůstek délky trhliny v závislosti na počtu cyklů. V 60. letech vyjádřil P. C. Paris [49] vztah rychlosti šíření únavové trhliny jako funkci výkmitu součinitele intenzity napětí K_a .

$$\frac{dc}{dN} = A * K_a^n \quad (5.1)$$

$2c$	délka trhliny
N	počet cyklů
A, n	materiálové konstanty

Dalším výzkumem pak byl vztah rozšířen tak, aby zahrnoval poznatky, že pod určitým prahovým napětím nevzniká zárodečná trhlina a že ke konci šíření trhliny dosáhne součinitel K kritické hodnoty, při níž následuje lom. Tímto vztahem, tzv. Parisovým zákonem, je možné při znalosti rychlosti šíření stanovit dobu (počet cyklů) šíření únavové trhliny do lomu. Rychlost šíření trhliny je ovlivněna: amplitudou napětí, délkou trhliny, způsobem namáhání, geometrií prvku a trhliny a materiálovými vlastnostmi.

Na lomu vysokocyklové únavy se dají odlišit dvě oblasti. Vlastní únavový lom, který je hladký, většinou rovinný a na povrchu se objevuje charakteristické žlábkování. Tj. postupové linie šíření trhliny, které odpovídají jednotlivým mikroplastickým deformacím při rozevírání lomu. A zbytkový lom, kde dojde k náhlému dolomení zeslabeného nosného průřezu. Povrch lomu je hrubozrný, nepravidelný, někdy se známkami plastické deformace.

5.1.2 Metody omezení únavových trhlin

Únavovou životnost a postup únavového poškození v čase ovlivňuje řada faktorů. Pro jednoduchost je lze rozlišit na vnější a vnitřní.

K vnějším faktorům patří:

- Průběh napětí, tj. druh napjatosti, velikost napětí a jeho časový průběh, případně reziduální pnutí
- Teplota
- Korozie a korozivní prostředí

K vnitřním faktorům potom patří:

- Materiálové vlastnosti, tj. pevnost, plasticita a lomová houževnatost
- Materiálová struktura – zrnitost
- Vruby, tj. konstrukční vruby (zářez, otvor, náhlá změna průřezu), technologické vruby (stopy po obrábění, okuje, ...) a strukturní vruby (heterogenity a vměstky ve struktuře materiálu), které slouží jako koncentrátoři napětí
- Stav povrchu, tj. opracování, mechanické zpevňování, pokovování, chemicko-tepelné úpravy

Obecně lze metody omezení únavových trhlin rozdělit do dvou skupin. Za prvé je to prevence vzniku trhlin a za druhé jsou to opravy již vzniklých trhlin.

Prevence vzniku trhlin se odbývá primárně během návrhu a budování konstrukce. Jde o to vhodným návrhem a kázní při provádění omezit co nejvíce negativní vlivy faktorů popsaných výše. Zejména se to týká vhodného návrhu konstrukčních detailů. Ty by měly být navrženy tak, aby jejich vrubový účinek byl co nejmenší. Hlavně svarům je v tomto potřeba věnovat pozornost, protože v sobě spojují velký vrubový účinek s účinkem reziduálních pnutí od svařování. Také je dobře dbát při návrhu toho, aby byly detaily snadno kontrolovatelné.

V případě, že je na konstrukci lokalizována trhlina, je třeba určit za prvé její chování a za druhé původ trhliny. U chování je nutné zjistit, zda se jedná o trhlinu stabilní či rostoucí. Pokud je trhlina rostoucí, je nutné pozorováním stanovit jakou rychlostí trhlina roste. Ne všechny trhliny na konstrukci musí být nutně rostoucí. Vzhledem k tomu, že rychlost růstu trhliny je funkcí amplitudy součinitele intenzity napětí, je možné, že se růst trhliny zastaví. To se stane, pokud se trhlina rozroste do oblasti menší intenzity napjatosti. V tomto případě je místo opravy možné trhlínu pouze monitorovat a kontrolovat, zda nedochází k opětovnému rozrůstání trhliny. Pokud je na konstrukci rostoucí trhlina, je nutné tuto situaci řešit. Způsoby řešení jsou čtyři:

1. Zintenzivněný monitoring

Pokud lze kvalifikovaně prokázat, že spolehlivost konstrukce lze udržovat na dostatečné úrovni i s únavovým poškozením, je možné konstrukci ponechat v provozu. Ovšem pouze za podmínky, že je zvýšena frekvence prohlídek a není pozorováno nepředpokládané chování. Monitoring lze provádět i pomocí metod nepřetržitého sledování.

2. Přímá oprava či výměna poškozené části

Na základě typu konstrukce a důvodu vzniku trhliny je nutné zvolit vhodnou metodu opravy. Jako metody oprav únavových trhlín jsou používány následující: odvtání špičky trhliny, zesílení přeplátováním, zesílení předepnutými šrouby, vybroušení trhliny, změna konstrukčního detailu, změna statického působení prvku a zavaření trhliny. (Pozn.: metoda svaření trhliny se sice v praxi používá, nicméně není příliš vhodná. Svařováním se do konstrukce vnáší velká pnutí a tím může dojít k prudkému nárůstu trhliny, nebo i k porušení prvku)

3. Omezení provozu na konstrukci

Omezením provozu na konstrukci dochází k poklesu celkového zatížení konstrukce. Jedná se o velmi efektivní způsob zpomalení únavových procesů, ale na druhou stranu je nutné vyvažovat možné ekonomické škody vzniklé tímto omezením.

4. Demolice konstrukce

Pokud není možné žádným z výše zmíněných způsobů udržet konstrukci v bezpečném provozu, je nutné ji odstranit a nahradit novou.

5.1.3 Metody určení životnosti konstrukce

Při určování životnosti konstrukce rozlišujeme v zásadě tři případy, za prvé životnost nové konstrukce, za druhé zbytková životnost staré konstrukce a za třetí zbytková životnost konstrukce s únavovou trhlinou. Při určování životnosti nové konstrukce se postupuje dle doporučení normy ČSN EN 1993-1-9 [50]. Normový posudek na dostatečné úrovni spolehlivosti prokáže, že se konstrukce neporuší, nebo ji nebude za dobu životnosti nutné opravovat z důvodu únavového poškození. Při posuzování zbytkové životnosti staré konstrukce se postupuje obdobně dle ČSN EN 1993-1-9 [50], ale je potřeba do posouzení zahrnout historii zatěžování konstrukce a nakumulované poškození. Určování zbytkové životnosti konstrukce s únavovou trhlinou probíhá pomocí metod lomové mechaniky, které umožní určit, jak dlouho konstrukce při daném zatěžování vydrží.

Posuzování únavy dle ČSN EN 1993-1-9 [50]

Při hodnocení konstrukcí na únavu dle normy se postupuje dle metody přípustných poškození nebo dle metody bezpečné životnosti. Ty mají zajistit, že konstrukce bude spolehlivě sloužit po celou dobu své životnosti.

Napětí působící na konstrukci se určí z normového zatížení, a to lineárně pružnou analýzou v mezním stavu použitelnosti. Napětí a jeho rozkmity se určí pro konkrétní detaily, ve kterých hrozí vznik únavové trhliny. Obvyklé konstrukční detaily, na kterých je nutné posouzení na únavu, jsou shrnuty v normě [50] v kapitole 8.

V posuzovaném místě se určí rozkmit napětí $\Delta\sigma$. Při výpočtu rozkmitu je nutné zohlednit excentricity přípojů, redistribuci napětí v důsledku boulení a smykového ochabnutí a další obdobné vlivy. Z vypočteného rozkmitu určíme návrhový rozkmit jmenovitého napětí $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}$ ($\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2}$), a to pomocí vztahů [50]:

„(6.1) rozkmit jmenovitých napětí pro detaily v tabulkách kapitoly 8

$$\gamma_{F,f}\Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \dots \lambda_n \Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k)$$

(6.2) rozkmit modifikovaných jmenovitých napětí pro detaily s náhlou změnou průřezu v blízkosti místa iniciace trhliny

$$\gamma_{F,f}\Delta\sigma_{E,2} = k_f \lambda_1 \dots \lambda_n \Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k)$$

(6.3) rozkmit extrapolovaných jmenovitých napětí pro detaily s vysokým gradientem napětí v blízkosti paty svaru pro detaily v tabulce B.1

$$\gamma_{F,f}\Delta\sigma_{E,2} = k_1(\gamma_{F,f}\Delta\sigma_{E,2}^*)\lambda_1 \dots \lambda_n$$

λ_i součinitelé ekvivalentního únavového poškození, závislé na spektrech specifikovaných v příslušných částech ČSN EN 1993

k_f součinitel koncentrace napětí, vyjadřující místní zvýšení napětí v závislosti na geometrii detailu, které není zahrnuto v příslušné S-N křivce únavové pevnosti

k_l zvětšovací součinitel dle tabulek 4.1 a 4.2“ ČSN EN 1993-9 [50]

Stanoví se únavová pevnost z příslušné S-N křivky únavové pevnosti pro určovaný detail. S-N křivky jsou trilineární. V logaritmickém měřítku jsou zobrazeny na obrázcích 7.1 a 7.2 normy [50]. Obecně lze křivku popsat rovnicí:

$$\log N = \log a - m * \log \Delta\sigma_R \quad (5.2)$$

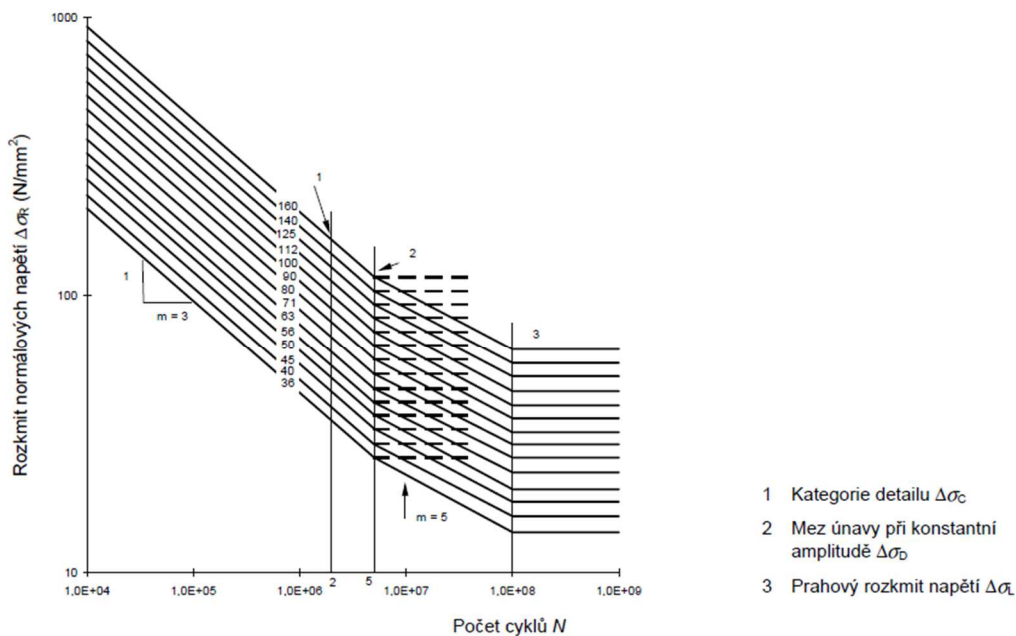
$\Delta\sigma_R$ únavová pevnost

N počet cyklů do porušení odpovídající rozkmitu napětí

m konstanta sklonu křivky, $m=3$ pro $N \leq 5 \cdot 10^6$ a $m=5$ pro $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$

$\log a$ konstanta závislá na konstrukčním detailu

Pozn.: obdobná křivka platí pro smykové napětí



Obrázek 7.1 – Křivky únavové pevnosti pro rozkmity normálových napětí

Obrázek 7.1 převzatý z normy ČSN EN 1993–9 [50]

Pro potřeby normy jsou křivky zjednodušeny dle článku 7.1(3) [50] následovně: „

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m * 2 * 10^6$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m * 5 * 10^6$$

$m=3$ pro $N \leq 5 \cdot 10^6$ a $m=5$ pro $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$ “ ČSN EN 1993-9 [50]

Posouzení se následně provádí pro jmenovitý (a modifikovaný nebo extrapolovaný) rozkmit napětí.

„Rozkmit musí splňovat podmínky (8.1 [50]):

$$\Delta\sigma \leq 1,5 * f_y \quad \text{pro rozkmit normálových napětí}$$

$$\Delta\tau \leq \frac{1,5*f_y}{\sqrt{3}} \quad \text{pro rozkmit smykových napětí}$$

Má se ověřit, že při únavovém zatížení jsou splněny podmínky (8.2 [50]):

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1 \quad , \text{ pro rozkmit normálových napětí}$$

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} \leq 1 \quad , \text{ pro rozkmit smykových napětí}$$

A pro kombinaci normálových a smykových napětí (8.3 [50]):

$$\left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}}\right)^5 \leq 1 \quad , \text{ kombinace rozkmitů}$$

Pokud nejsou dostupná data pro určení ekvivalentních rozkmitů napětí $\Delta\sigma_{E,2}$ a $\Delta\tau_{E,2}$, použije se postup dle Přílohy A. “ ČSN EN 1993-9 [50]

Posouzení popisované v Příloze A normy [50] teoreticky vychází z Palmgrem-Minerova pravidla o kumulaci poškození.

Toto pravidlo je využíváno pro svou jednoduchost. Je třeba nicméně upozornit, že výsledky dané výpočtem někdy nemusí odpovídat pozorování. Je to dáno tím, že za prvé není respektováno pořadí amplitud napětí a za druhé nejsou zahrnovány účinky amplitud ležících pod mezí únavy.

Posouzení vypadá následovně:

- 1) Určí se zatěžovací bloky. Jsou to typická uspořádání zatížení očekávaných na konstrukci během životnosti. Stanovují se dle zkušeností z obdobných konstrukcí. V případě, že se jedná o stávající konstrukci, doplní se předpokládané budoucí zatěžovací bloky o historii zatížení. A to tak, že se určí zatěžovací bloky, které již na konstrukci proběhly.
- 2) Vyhodnotí se určené zatěžovací bloky a vyhotoví se spektrum napětí. Historii napětí určujeme buď metodou stékajícího deště, nebo metodou nádrže, které určí rozkmit napětí, počet cyklů jeho výskytu a, pokud je potřeba, střední napětí cyklů. Spektrum rozkmitů napětí je seřazeno sestupně, jak je vidět v normě [50] na obrázku A.1d. Ze spektra napětí lze vyloučit některé rozkmit napětí. Za prvé ty nejvyšší, pokud působí méně

než 1% celkového poškození, a za druhé rozkmity pod hodnotou prahového rozkmitu.

- 3) Stanoví se celkové poškození a ověří se únavová pevnost. Pro každý rozkmit napětí se stanoví příspěvek k celkovému poškození D_d , kde jednotlivé příspěvky jsou vyjádřeny jako:

$$D_{d,i} = \frac{n_{E,i}}{N_{E,i}} \quad (\text{A.1 [50]})$$

$n_{E,i}$ počet cyklů příslušného rozkmitu napětí $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i$ v části i posuzovaného spektra

$N_{E,i}$ počet cyklů na mezi únavy z příslušné S-N křivky pro rozkmit $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i$

Celkové poškození se vypočítá jako:

$$D_d = \sum_i^n D_{d,i} = \sum_i^n \frac{n_{E,i}}{N_{E,i}} \quad (\text{A.1 [50]})$$

Pro posouzení na únavu za využití kumulace poškození musí být splněny dvě podmínky:

- $D_d \leq 1,0$, *kritérium kumulace poškození (A.2 [50])*
- $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} \leq \sqrt[m]{D_d} \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{mf}}, m = 3$ *kritérium ekvivalentního rozkmitu napětí (A.3 [50])*

5.2 FRP materiály

Pro vláknové kompozity se používá obecně označení FRP (fiber reinforced plastic či fiber reinforced polymer) nebo FRC (Fiber reinforced composite). To je ještě často dále upřesněno podle použitých vláken (C-carbon, A – aramid, G – glass). Vláknové kompozity sestávají ze dvou hlavních složek:

- vyztužující vlákna: zajišťují pevnost a tuhost,
- pojivo (matrice): zajišťuje tvar prvku a pozici vláken, spojuje vlákna a přenáší mezi nimi zatížení, chrání vlákna proti vnějším vlivům.

5.2.1 Vlákna

Vlákna tvoří základní kostru všech výrobků z FRP. Materiál vláken proto musí splňovat následující podmínky: musí mít vysokou pevnost a tuhost, ale zároveň i nízkou hmotnost a teplotní stálost. Pro svou správnou funkci proto vlákna musí mít především vysoký modul pružnosti a vysokou mez pevnosti. V dnešní době existuje velké množství různých druhů vláken s odpovídajícími vlastnostmi.

Experimentálně byla zkoumána například vlákna skelná, vysokopevnostní uhlíková vlákna, aramidová (kevlarová) vlákna, ale i vlákna čedičová. Bohužel, pouze některá jsou vhodná pro použití v FRP výrobcích. Je to především z komerčních důvodů, kdy mnoho druhů vláken je diskvalifikováno buď cenou materiálu nebo náročností výrobního procesu. Nejrozšířenějšími a nejobvyklejšími jsou proto výrobky užívající vlákna skelná a v menší míře také vlákna uhlíková.

Samotná vlákna mají obvykle průměr v řádu mikrometrů. Jsou tak příliš tenká, aby je bylo možné používat samostatně. Proto musí být vlákna upravována do svazků. Existují čtyři základní úpravy vláken pro potřeby vyztužování: nekonečné provazce, krátké provazce, plošná tkaná výztuž a výztužné rohože.

Nekonečné provazce vznikají svazováním jednotlivých vláken do svazků. Jsou používány jako výztuž u výrobků vytvořených pultruzí (tažením). Dávají kompozitu výborné vlastnosti ve směru pnutí vláken, ovšem v ostatních směrech téměř nepůsobí.

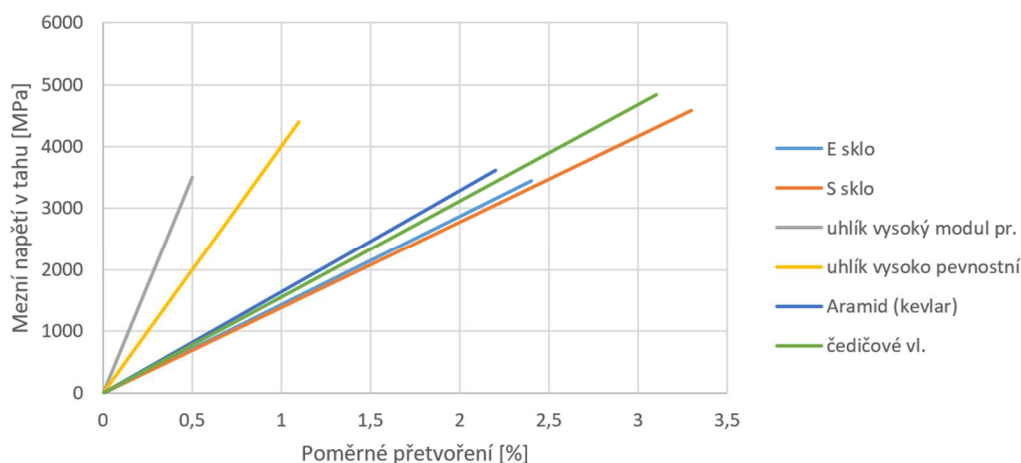
Krátké provazce jsou nasekaná vlákna nejčastěji v délce od jednoho do pěti centimetrů. Používají se u výrobků vzniklých ručním stříkáním do formy. Použití pouze krátkých vláken a jejich nerovnoměrné uspořádání ovšem výrazně snižuje výsledné mechanické vlastnosti.

Plošná tkaná výztuž vznikne tkaním z jednotlivých nekonečných provazců. Obvykle má stejné vlastnosti ve dvou směrech podle směrů tkaní vláken. Používá se primárně pro ruční laminaci.

Výztužné rohože se skládají z mixu dlouhých a krátkých vláken. Mají přibližně stejné vlastnosti ve všech směrech. Využívají se na příklad jako povrchová ochranná rouška pultrudovaných profilů.

Tabulka 1 Materiály vláken základní charakteristiky

MATERIÁL / TYP VLÁKEN	HUSTOTA	MODUL PRUŽNOSTI V TAHU	PEVNOST V TAHU
	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]
SKLO			
E-SKLO	2,54	75	3,40
S-SKLO	2,50	83	4,50
ARAMID			
KEVLAR 29	1,45	75	3,30
KEVLAR 49	1,45	120	3,75
KARBON			
VYSOKOPEVNOSTNÍ	1,80	160-250	1,4-4,9
STŘEDNÍ MODUL PR.	1,80	275-320	2,3-7,0
VYSOKÝ MODUL PR.	1,90	340-430	1,9-5,5
EXTRA VYSOKÝ MODUL PR.	1,95	440-820	1,8-3,4
OXID HLINÍKU			
SAFIMAX SD	3,25	300	2,00
OXID KŘEMÍKU			
SIGMA	3,40	40	3,50



Obrázek 1 Pracovní diagram vláken používaných v FRP

5.2.1.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou nejpoužívanějším materiálem vláken pro výrobu FRP. Skelná vlákna vznikají tažením kapek roztavené skloviny. Kapky jsou vytaženy z píčky a navedeny na navíječku, která konstantní rychlostí protáhne roztavenou sklovinu na vlákna o definovaném průměru. Při tomto procesu se na vlákno pod píčkou současně nanáší takzvaná lubrikace, která pramen vláken spojí dohromady a udělí mu vlastnosti důležité pro další zpracování vlákna a jeho konečnou aplikaci.

Nejčastěji jsou používána vlákna z tzv. E-skel a S-skel.

E-sklo značí, že se jedná o elektroizolační materiál. Je to nejlevnější a nejrozšířenější materiál v průmyslové výrobě FRP.

S-sklo je sklo vysokopevnostní (s=strength). Kvůli vyšší pevnosti je ovšem dražší než E-sklo, a proto je méně využíváno.

Přestože obecně pevnost skelných vláken klesá při vysokých teplotách, lze ji při použití v FRP považovat za konstantní. Před dosažením teploty, která by skelná vlákna mohla ovlivnit, dojde dříve k zničení polymerové matrice. Pevnost ovšem může být negativně ovlivněna rovněž účinky chemických látek a relaxací vláken při stálém zatížení.

5.2.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností a tuhostí. Vyrábí se při vysokých teplotách nejčastěji z polyakrylového vlákna. Celý proces výroby je poměrně náročný jak časově, tak na počáteční suroviny (polyakrylát). Největší nevýhodou je tak cena vláken daná právě náročností výroby. Ta omezuje širší využití uhlíkových vláken.

Právě kvůli vysoké ceně jsou uhlíková vlákna používána pouze tam, kde je možné naplno využít jejich vlastností. Z uhlíkových vláken se pro stavebnictví vyrábí především betonářská výztuž, předpínací lamely a tkaniny z uhlíkových vláken pro ruční laminování.

Při návrhu výrobků a využití uhlíkových vláken je třeba brát v úvahu ještě jednu problematickou vlastnost materiálu, a to záporný součinitel teplotní roztažnosti. V návrhu musí být bráno v potaz, že uhlík se při změnách teploty chová opačně než všechny ostatní obvyklé materiály využívané ve stavebnictví.

5.2.2 Matrice

Hlavním materiálem matrice jsou, jak vyplývá z názvu, polymerní plasty. Polymerní znamená, že se jedná o plastické hmoty tvořené dlouhými řetězci jednotlivých částí, tzv. „merů“. Plastické hmoty se dělí na dva druhy, plasty termosetové (také reaktoplasty) a plasty termoplastické. U termosetových plastů se při zvyšování teploty nemění mechanické vlastnosti. Po prvním zpracování z roztaveného plastu totiž při vychladnutí dojde k změně vlastností materiálu. Naopak plasty termoplastické mění své mechanické vlastnosti působením teploty. Při každém zvyšování teploty dochází k plastifikaci materiálu až do roztavení, kdy se surovina vrací do stejného stavu jako při výrobě. Pro svou stálost jsou na materiál matrice používány téměř výhradně termosety, i když pro některé specializované aplikace jsou využívány i termoplastické hmoty. Nejčastějším materiálem polymerních maticí jsou epoxidové pryskyřice, polyestery a vinyl estery.

Tabulka 2 Typické vlastnosti termosetů

Vlastnosti		Materiál		
		Polyester	Epoxid	Vinyl ester
Hustota	kg/m ³	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Pevnost v tahu	MPa	34,5-104	55-130	73-81
Modul pružnosti	Gpa	2,1-3,45	2,75-4,10	3,0-3,5
Poissonovo číslo	-	0,35-0,39	0,38-0,40	0,36-0,39
Souč. teplotní roztažnosti	*e-6/K	0,15-0,60	0,08-0,15	0,14-0,30

Polymerní matrice má v kompozitním výrobku dvě hlavní funkce. Za první má funkci ochranou a za druhé funkci strukturální. Matrice chrání vlákna před působením vnějšího prostředí. Například chrání před působením chemikálií, před přímými účinky požáru na vlákna nebo před působením UV záření. Různé ochranné funkce matrice lze ovlivnit pomocí přísad a vhodně zvoleným materiálem matrice. Strukturální funkce spočívá v zajištění soudržnosti vláken, v přenosu sil mezi maticí a vlákny a v distribuci zatížení rovnoměrně mezi všechna vlákna. Dále matrice zajišťuje tvar a tuhost příčného řezu. Materiál matrice výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného kompozitu.

5.2.2.1 Epoxidové pryskyřice

Jedná se o syntetické polymerní pryskyřice, které mají více než jednu epoxidovou vazbu. V základním stavu se jedná o viskózní lepidlo nebo křehkou pevnou látku. Během výroby kompozitu se k této látce přimíchá takzvané tvrdidlo, nejčastěji polyaminy. Po přidání tvrdidla dojde k vytvoření sítě nových chemických vazeb a ztuhnutí epoxidu.

Mezi největší výhody epoxidových pryskyřic patří jejich výborné mechanické vlastnosti, jednoduchá výroba, nízké smršťování během tvrdnutí (pro tuto vlastnost jsou epoxidy používány také jako lepidla) a také dobrá přilnavost k vláknům. Epoxidy jsou vysoce odolné vůči korozi a nevdají jim dlouhodobé vystavení vodě. Pomocí příměsí je také možné poměrně jednoduše regulovat jednotlivé vlastnosti, např. tuhost.

Hlavní nevýhodou epoxidových pryskyřic je především vysoká cena. I když přesná cena se mění v závislosti na konkrétním složení použitého materiálu, jsou epoxidy obecně dražší než ostatní materiály. Jako další nevýhodu lze zmínit ještě dlouhou dobu tvrdnutí materiálu.

5.2.2.2 Polyesterové matrice

V základním stavu jsou polyestery viskózní kapaliny. Při výrobě tuhého plastu jsou zahřívány a je do nich přidáno oxidační činidlo. Tím dojde k vytváření

vazeb a vzniku tuhé trojrozměrné struktury. Polyestery jsou nejlevnějším materiálem pro výrobu plastových maticí. Jsou proto hojně využívány obzvláště v kombinaci se skelnými vlákny.

Mechanické vlastnosti nejsou tak dobré jako u ostatních materiálů používaných pro výrobu FRP, ale polyestery jsou levné a snadné na výrobu. Polyestery mají navíc velmi dobrou odolnost vůči okolnímu prostředí, nepodléhají korozi a nejsou téměř ovlivněny působením UV světla. Jsou známy případy konstrukcí starších třiceti let vystavených agresivnímu prostředí, kde jedinou výraznou změnou byla ztráta barevnosti prvků. Odolnost vůči požáru lze zlepšit přidáním příměsí do základního materiálu, což ovšem výsledný výrobek prodražuje.

5.2.2.3 Vinyl-esterové matrice

Svémi vlastnostmi stojí vinyl-esterové matrice mezi polyestery a epoxidy. Jsou pevnější a odolnější na poškození než polyestery, ale jsou obdobně jednoduché na výrobu a jsou také rychle tuhnoucí jako epoxidy. Epoxidům jsou podobné ve své pevnosti a odolnosti vůči chemikáliím. Vinyl estery mají rovněž velmi dobrou odolnost vůči požáru. Velmi dobře spolupůsobí se skelnými vlákny. Přesto nejsou tolik využívány jako polyestery, za což může především jejich vyšší cena.

5.2.3 Mechanické vlastnosti FRP

5.2.3.1 Pevnost, tuhost, objemová hmotnost

Velký vliv na mechanické vlastnosti má orientace vláken v matrici. Pro většinu konstrukčních prvků se používá kombinace několika forem výztužných vláken tak, aby výsledné vlastnosti co nejlépe splňovaly požadavky, které jsou na materiál kladeny. Nejčastěji využívanou formou výztuže konstrukčních prvků, kde je kladen důraz na vysokou pevnost a tuhost, jsou přímé provazce vláken a výztužné rohože. Výztuž je nejčastěji u deskových prvků uspořádána do dvou na sebe kolmých směrů, čímž se u prvku dosáhne ortotropních vlastností. U pultrudovaných prvků je výztuž uspořádána podélně. K vytvrzení matrice dochází ve stavu, kdy je roving (svazek vláken) předepnut, což má pozitivní vliv na modul pružnosti. Ke stanovení mechanických vlastností FRP se využívají buďto materiálové zkoušky kompozitu nebo výpočet pomocí laminační teorie. Příklad vlastností pultrudovaného profilu z E-skla a polyesterové matrice obsahuje Tabulka 3. Velkou výhodou FRP produktů je jejich objemová hmotnost, která se pohybuje v rozmezí 20-30 % objemové hmotnosti oceli.

Tabulka 3 Materiálové vlastnosti pultrudovaných profilů

Typické hodnoty tuhosti a příčné smrštění (za sucha)			
		[MPa]	[--]
Modul pružnosti	E_{0°	23 000 / 28 000	
Modul pružnosti	E_{90°	8 500	
Modul smyku	G	3 000	
Poissonovo číslo	$\nu_{0^\circ,90^\circ}$		0,23
Poissonovo číslo	$\nu_{90^\circ,0^\circ}$		0,09

Typické pevnostní hodnoty (za sucha)		
		[MPa]
Ohybová pevnost, 0°	$f_{b,0^\circ}$	240
Ohybová pevnost, 90°	$f_{b,90^\circ}$	100
Tahová pevnost, 0°	$f_{t,0^\circ}$	240
Tahová pevnost, 90°	$f_{t,90^\circ}$	50
Tlaková pevnost, 0°	$f_{c,0^\circ}$	240
Tlaková pevnost, 90°	$f_{c,90^\circ}$	70
Smyková pevnost	f_τ	25
Stříhová pevnost při uchycení čepem, podélný směr	$f_{cB,0^\circ}$	150
Stříhová pevnost při uchycení čepem, příčný směr	$f_{cB,90^\circ}$	70

5.2.3.2 Odolnost proti vlivu povětrnosti

Odolnost proti povětrnostním vlivům (UV záření, změny teplot, změny vlhkosti, kyselá dešť atd.) je velmi důležitým faktorem při použití kompozitů na bázi matric ve venkovním prostředí. UP matrice mají tendenci v prvních týdnech po vystavení slunci zvyšovat svoji pevnost díky probíhajícímu dovytvřování vlivem UV záření, ale po určité době dochází k poklesu pevnosti vlivem narušování řetězců energetickou UV složkou slunečního záření. Degradace ultrafialovým zářením je provázena zežloutnutím pryskyřice. Aby pryskyřice degradovala v celém objemu, musí být propustná. Kompozity obsahují 30 až 85 objemových % skleněných vláken, která silně pohlcují UV záření, a degradace se tedy odehrává převážně na povrchu. Degradací dojde k obnažení povrchové vrstvy vláken, což výrazně neovlivní mechanické vlastnosti kompozitu. Odhalením vláken také dochází ke snížení odolnosti kompozitu proti působení vlhkosti a jiných chemikálií, proto se do kompozitů vkládají povrchové roušky na bázi UV odolných termoplastických polyesterových nebo polypropylénových vláken, které brání hlubšímu průniku UV záření a také nedovolí odkrytí vláken ani po degradaci povrchové vrstvy pryskyřice. [1]

Absorbovaná vlhkost může způsobit degradaci pryskyřice, která vede k tvorbě trhlin, ke ztrátě soudržnosti matrice s vlákny a ke korozi skelné výztuže. V důsledku této koroze může dojít k poklesu pevnosti a tuhosti FRP. Smyková a

ohybová pevnost je více citlivá na tuto degradaci oproti tahové pevnosti, která závisí převážně na vláknech. Průnik vlhkosti je definován třemi způsoby – difúzí molekul vody mezi řetězci polymeru, kapilaritou a šířením vody v mikrotrhlinách a pórech vzniklých během výroby. Tuto degradaci může urychlit zvýšená teplota, přítomnost posypové soli či vzdušná salinita typická pro přímořské oblasti. [2]

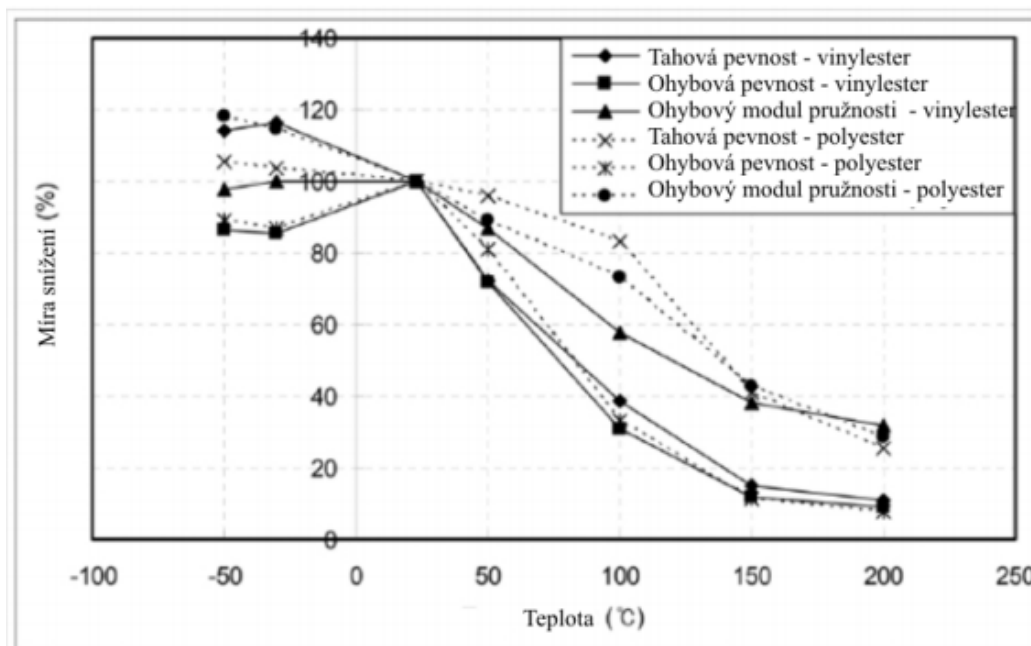
5.2.3.3 Chemická odolnost

Zatímco proti kyselinám mají FRP profily výbornou odolnost, při styku s alkáliemi se může projevit degradace E-skla, které je jako výztuž pro FRP nejpoužívanější. Alkalický roztok může proniknout ke skelným vláknům a ovlivnit jejich vlastnosti. Křehnutí jednotlivých vláken může způsobit snížení pevnosti v tahu a ztrátu adheze výztuže s matricí. Volba matrice pro skelná vlákna do prostředí, kde hrozí kontakt s alkáliemi (beton, zemina) je klíčovým faktorem pro životnost. Výzkumy ukazují, že vinyl ester má mnohem lepší odolnost proti alkáliím, než epoxidová a polyesterová matrice, protože je tvrdší a více odolný proti tvoření mikrotrhlin a tím méně propustný. To přispívá i v odolnosti proti kyselinám a ostatním chemickým roztokům. Propustnost alkalických solných roztoků matricí je také možná, ovšem pouze za podmínky vysokého napětí, které zapříčiní vývoj trhliny, anebo zvýšené teploty, která zvýší míru sorpce. Karbonová vlákna alkáliím sice odolávají, kvůli své ceně však nejsou pro běžné aplikace používána. [3] Solné roztoky bez přítomnosti alkálií mají na degradaci FRP vliv téměř totožný s vodou. [4].

5.2.3.4 Vysoká teplota a požár

Mezní teplota pro skelná vlákna je 880 °C, pro aramidová vlákna 180 °C a pro uhlíková vlákna 1600°C. Při působení vysokých teplot však měkne polymerová matrice, proto jsou její vlastnosti rozhodující při požadavku na odolnost proti vysoké teplotě. U FRP materiálu s polymerní matricí se začínají mechanické vlastnosti měnit už při teplotě nad 70 °C. Pro matrice speciálně určené pro vysoké teploty se tato teplota může zvýšit až na 140 °C [5] Při této teplotě dochází k měknutí matrice a snížení modulu pružnosti. Až do chvíle, než nastanou chemické změny, je tato změna modulu pružnosti vratným jevem. Při vzrůstající teplotě a degradaci chemických vazeb v polymerové matrici dochází ke snížení pevnosti. Protože tyto změny mechanických vlastností úzce souvisí s přesným složením materiálu matrice, není snadné stanovit obecnou závislost změny mechanických vlastností v závislosti na stoupající teplotě. Pro většinu polymerních matric však lze

uplatnit pravidlo poklesu 1 % - 5 % mechanických vlastností při zvýšení teploty o 5 °C při překročení kritické teploty 70 °C. V porovnání s nevyztuženými polymery mají FRP výrobky tu výhodu, že vlákna, která jsou nehořlavá, oddělují zbylou část pryskyřice od ohně a omezují ztrátu pryskyřice z jádra průřezu. Při návrhu konstrukčních prvků do prostředí, kde se předpokládá působení vysokých teplot, je potřeba provést materiálové zkoušky při zvýšených teplotách. Jako příklad vlivu teploty na mechanické vlastnosti FRP je uveden výsledek zkoušky Park, Hwang, Lee, Jung [6] viz Obrázek 2.



Obrázek 2 Výsledky materiálových zkoušek při účinku různých teplot [6]

Kvůli chemickému složení všechny materiály z organického polymeru jsou náchylné na vznícení. Kouř, který vzniká při vznícení, může být zdraví škodlivý. Snížení hořlavosti lze snížit úpravou složení matrice a přidáním retardérů hoření. Kvůli nízké odolnosti vůči vysokým teplotám je proto FRP materiál dnes hojně využíván jako výztuž do betonu, který FRP chrání proti účinkům požáru, pro rekonstrukce mostů a pro venkovní konstrukce, méně pro aplikace v budovách.

5.2.3.5 Nízká teplota

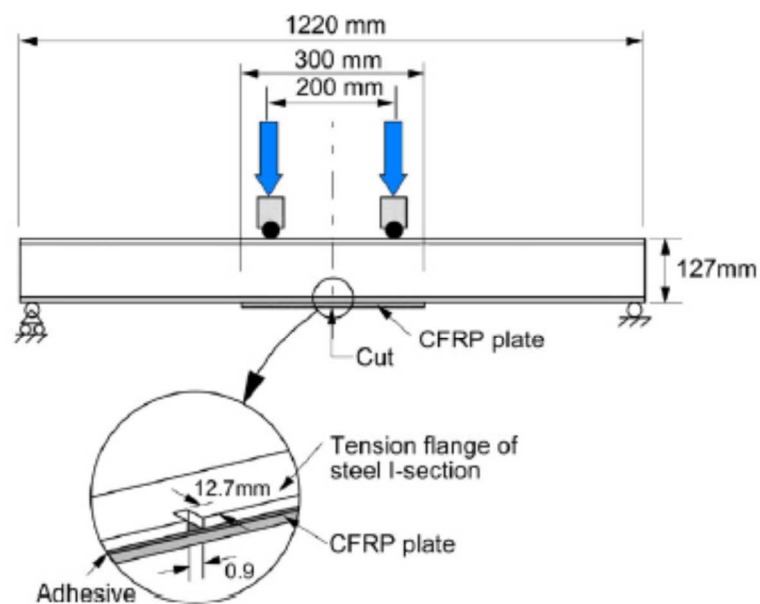
Díky rozdílné tepelné roztažnosti výztuže a matrice mohou mít nízké teploty u FRP kompozitů za následek tvrdnutí polymerové matrice. Kvůli residuálnímu pnutí mezi maticí a vlákny může docházet k rozvoji mikrotrhlin a tím ke ztrátě adheze. Mikrotrhliny se mohou dále zvětšovat při cyklickém zmrazování a rozmrazování. Tyto cykly v kombinaci s vlhkostí a mořskou či posypovou solí

zvyšují riziko poškození tvořením a expanzí solných krystalů. To může mít za následek zhoršení vlastností jako je tuhost, pevnost, stabilita a odolnost proti únavě. Pevnost v tahu ve směru vláken klesá v rozmezí od -10 do -40 °C, zatímco pevnost kolmo na vlákna se zvětšuje díky zpevnění matrice. Nicméně efekt nízkých teplot se zdá být na vlastnosti FRP nepatrný a není rozhodujícím pro běžné aplikace. Při experimentech, ve kterých byly FRP vzorky vystaveny 150 cyklům zmrazení – rozmrazení v rozsahu teplot od +23 °C do -40 °C, se ukázalo, že pevnost v tahu FRP ze skelných vláken a epoxidové pryskyřice se snížila pouze o 10 %. Podobný test s uhlíkovými vlákny neprokázal významný úbytek pevnosti v tahu ani modulu pružnosti. [7] Výrobci zaručují pro běžné matrice odolnost do -20°C.

5.3 Zesilování ocelových konstrukcí FRP

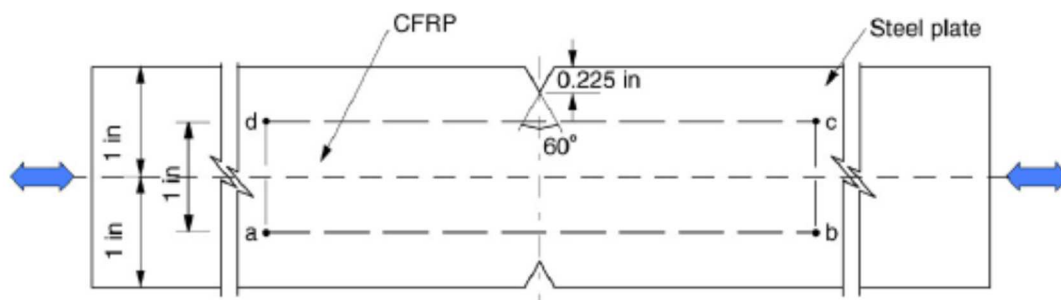
V současné době se stále větší pozornost upírá na hledání možností, jak zvýšit bezpečnost a trvanlivost mostních konstrukcí. Podle údajů BMS z roku 2013 se na našem území nachází celkem 2609 užívaných ocelových mostů a mnoho z nich se blíží nebo dokonce již překročilo svou plánovanou životnost. U takovýchto konstrukcí hrozí zvýšené nebezpečí vzniku únavových trhlin a zároveň lze předpokládat degradaci prvků nosné konstrukce vlivem působení okolního prostředí. Navíc dochází ke stálému zvyšování intenzity dopravy a mnoho mostů dnes slouží při úplně jiném zatížení, než jaké bylo předpokládáno v době uvedení do provozu. Problému stárnoucí mostní infrastruktury nečelí pouze Česká republika, ale i mnoho dalších zemí, kde byla podstatná část infrastruktury vybudovaná na přelomu 19. a 20. století (například Velká Británie a USA).

Proto probíhá rozsáhlý výzkum možností, jak nalézt co možná nejjednodušší, nejlevnější a zároveň funkční způsob, jak zesilovat a opravovat poškozené ocelové konstrukce. Standardní způsob oprav poškozené konstrukce spočívá ve výměně poškozené části nebo přeplátování externími plechy. Takováto řešení jsou sice prověřená praxí, mají ovšem řadu nevýhod. Jak poukázali Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. [8], taková zesílení přidávají nová nezanedbatelná stálá zatížení na opravovaný prvek. Provádění takového zesílení je poměrně složité. Vyžaduje uzavření opravovaného objektu na delší dobu a tím nárůst nepřímých nákladů celé opravy. Přidání externích plechů zvyšuje riziko koroze a vzniku nových únavových trhlin v narušené konstrukci.

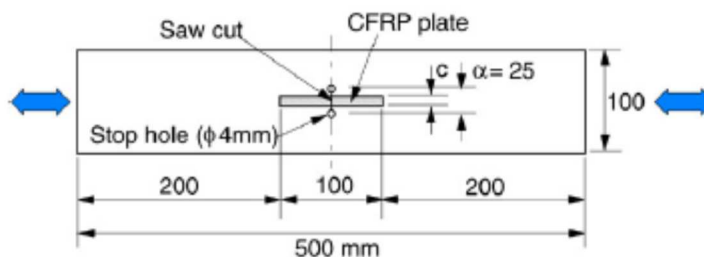


(a) I-section beam with a cut in its tension flange to create initial cracks [48].

Obrázek 3 Zesilovaný vzorek použitý ve výzkumu dvojice Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. [8]



(c) Edge notches as initial cracks [20].

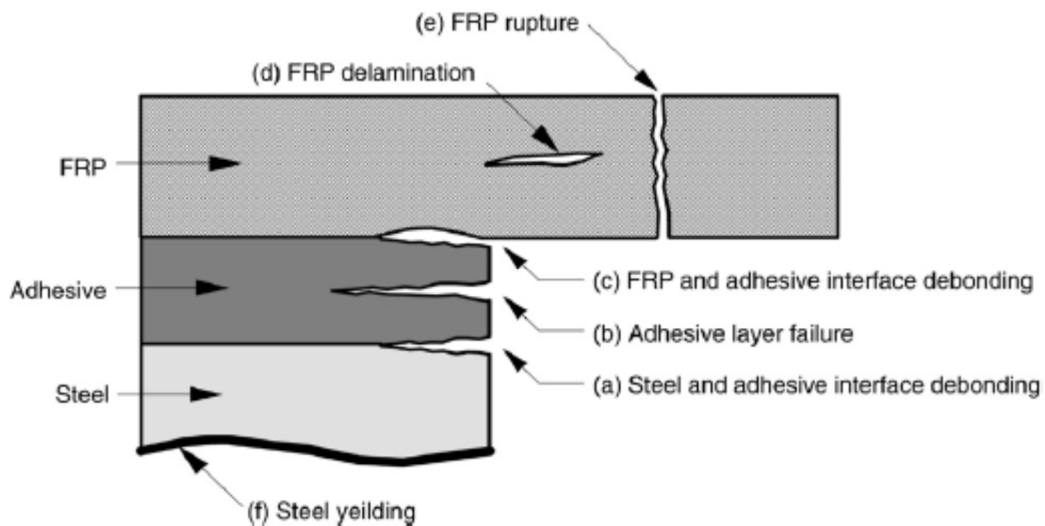


(d) Saw cut with stop holes [45].

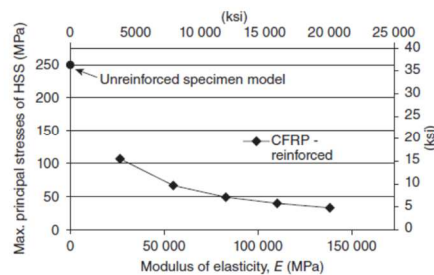
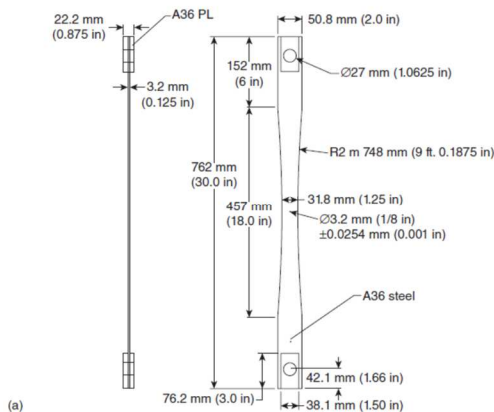
Obrázek 4 Další příklady zkušebních vzorků [15]

Proto jsou hledány alternativy standardních řešení, která pomohou jejich nedostatky překonat. Jako jedna z možných a perspektivních možností se nabízí užití FRP (Fiber Reinforced Polymer) kompozitů. Jak ukázaly například články ([9], [10], [11]). FRP kompozity mají velice výhodné vlastnosti pro použití při opravách a zesilování konstrukcí. Jsou lehké a zároveň velmi pevné. Nízká hmotnost umožňuje velmi jednoduchou manipulaci a zjednodušuje provádění oprav na poškozených objektech. Velkou výhodou je vynikající odolnost FRP kompozitů

vůči korozi a vlivům okolního prostředí. Velmi dobrý souhrn vlastností jednotlivých druhů FRP je uveden v článku J.G. Teng, T. Yu, D. Fernando [16]. Podrobněji se jednotlivému chování zesílených ocelových konstrukcí věnovaly například zprávy a články v ([16], [13], [15]). Jak z nich vyplývá, nejvhodnějšími vlákny pro využití při zesilování jsou uhlíková vlákna s vysokým modulem pružnosti.

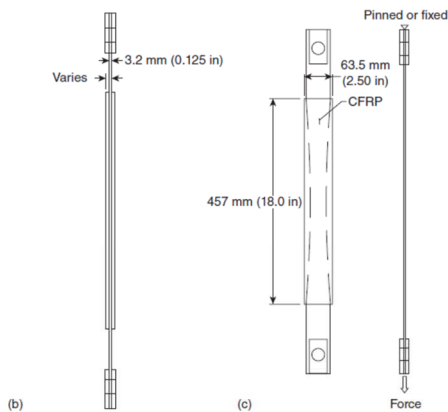


Obrázek 5 Módy porušení zesílení pomocí CFRP lamely [15]

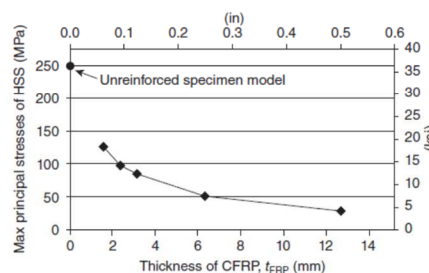


11.12 Effect of stiffness of the CFRP overlays on maximum principal hot spot stresses in the steel specimen (Gangel, 2011).

Obrázek 6 Vlivy různé tuhosti (vlevo) CFRP vyztužení na maximální napětí ve vzorku (vpravo), dle Gangel, 2011 [38]



11.11 Tension specimen: (a) 3 mm ($\frac{1}{8}$ in) bare steel; (b) specimen with CFRP overlay attached; (c) boundary and loading conditions imposed on the FE model and experimental test.



11.13 Effect of CFRP overlay thickness on maximum principal hot spot stresses in the steel specimen (Gangel, 2011).

Obrázek 7 Vlivy různé tloušťky (vlevo) CFRP vyztužení na maximální napětí ve vzorku (vpravo), dle Gangel, 2011 [38]

Zesilování ocelových konstrukcí pomocí FRP je stále poměrně novou oblastí výzkumu, a proto ještě neexistuje tak bohatá literatura, jakou by takto perspektivní problematika zasluhovala. FRP kompozity jsou ovšem rozsáhle využívány k zesilování betonových konstrukcí a v této oblasti již proběhl a stále probíhá rozsáhlý výzkum (např.: [17], [18]). Přestože nelze přebírat poznatky z výzkumu zesilování betonových konstrukcí obecně, je možné využívat některé jeho části, které nezávisí na materiálu zesilované konstrukce, jako je třeba chování lepidla. Velmi dobrou publikací, která se zabývá zesilováním konstrukcí obecně, je kniha *Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites*, Hollaway LC a Teng JG. [14]. Jsou v ní shrnuty poznatky o zesilování a opravách všech druhů konstrukcí, tedy nejen kovových, ale i betonových a zděných.

Nejnověji se zesilování ocelových konstrukcí pomocí FRP věnuje publikace *Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites* [19] od kolektivu autorů. Kniha shrnuje aktuální poznatky v tomto oboru. Věnuje se všem aspektům problematiky a naznačuje možné směry budoucího výzkumu. Uvádí také příklady realizovaných konstrukcí zesílených pomocí FRP.

Využití FRP na ocelových konstrukcích je v zásadě dvojí. Buď se jedná přímo o zesílení nepoškozené konstrukce a zvýšení únosnosti prvku konstrukce, nebo je FRP použito k opravám nebo nahrazení poškozených a degradovaných prvků. V tom případě je zachována stávající únosnost konstrukce. V roce 1994 provedli Peshkam and Leeming [20] studii porovnávající zesílení pomocí FRP a standardní

metody oprav mostní konstrukce. Zjistili, že přestože cena FRP na jednotku objemu mohla být 4 až 20krát vyšší než u oceli, tak 1 kg FRP může nahradit 24 kg oceli při zachování stejné pevnosti. A že po započtení nákladů za zdržení provozu a snížené nutnosti údržby lze dosáhnout úspory až 20 % nákladů. Dále porovnávali náklady na výměnu mostní konstrukce s náklady na zesílení pomocí FRP. V tomto případě vyšla úspora, při užití FRP, až na 40 % nákladů za nový most. Je navíc nutné si uvědomit, že ceny FRP od roku 1994 výrazně poklesly a možné úspory jsou proto ještě vyšší.

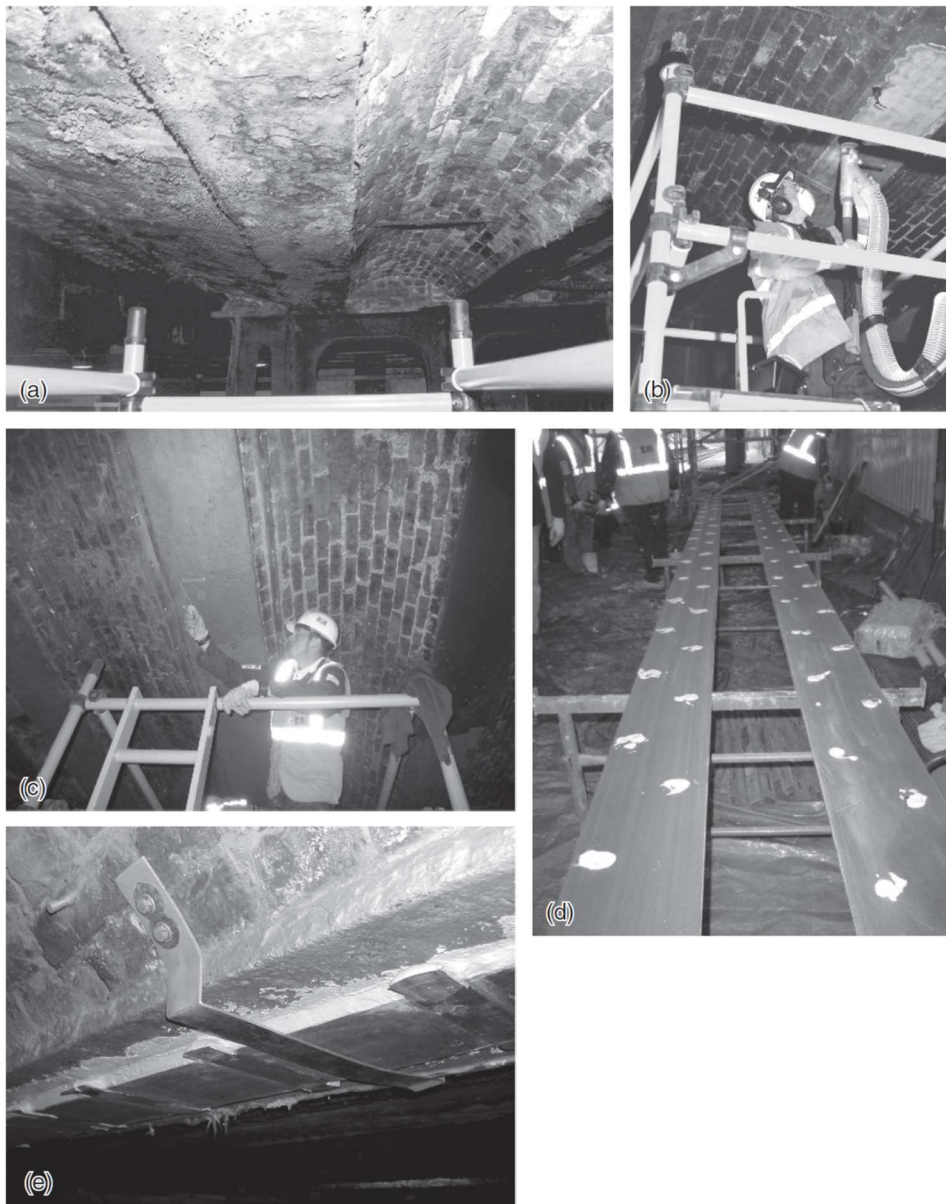
5.3.1 Příklady zesílených konstrukcí

Jak bylo uvedeno výše, jsou příklady zesílených mostních konstrukcí převzaty z knihy *Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites* [19]. Konstrukce uváděné v knize se nalézají ve Velké Británii. Ta má problém se svojí železniční infrastrukturou, neboť mnoho používaných mostů pochází ještě z 19. století a svojí předpokládanou životnost již překročily o mnoho let. Proto velká většina prací na téma FRP a ocelové konstrukce pochází právě odtud.

Železný most v Ironbridge, Shropshire z roku 1779 je vůbec první obloukový most z litiny na světě (Obrázek 8). Původně silniční most je od roku 1934 využíván pouze pro pěší. Jelikož konstrukce vykazovala stále větší poškození trhlinami, byl most při rekonstrukci v roce 2000 zesílen pomocí 3,8 mm tlusté předepnuté lamely z uhlíkových vláken s vysokým modulem pružnosti (HM CFRP). Dolní pásy nosníků byly otryskány a následně byla přilepena lamela.



Obrázek 8 Iron bridge, Shropshire [19]



Obrázek 9 Postup zesilování konstrukce [19], (a) revize konstrukce, (b) očištění materiálu – otryskání, (c) aplikace podkladní vrstvy, (d) aplikace lepidla na CFRP lamelu, (e) zesílená konstrukce

Příklad postupu zesilování viz Obrázek 9 a Obrázek 10.

Další příklady zesilovaných konstrukcí z litiny jsou například:

- **Tickford bridge**, Northamptonshire – 1810, zesílen japonským systémem Replark® v roce 1999
- **Bow Road Bridge**, East London. – 1850, zesílen nepředepnutými lamelami v roce 1999, zesílení všech sedmi nosníků bylo provedeno za 24 hodin
- **King Street Railway Bridge**, Mold – 1870, zesílen v roce 2000 pomocí částečně předpínaných CFRP lamel



Obrázek 10 King Street Railway Bridge [19]

- **Slattocks Canal Bridge, Rochdale**, – je mostní konstrukce z roku 1936. Jedná se o trémový most s horní mostovkou ze železobetonu. Nýtované hlavní nosníky byly v roce 2000 zesilovány za použití nepředeptnutých CFRP lamel tak, aby most mohla používat vozidla do hmotnosti 40 t. Zesílení tohoto mostu získalo Historic Bridge Awards commendation v roce 2000.



Obrázek 11 Slattocks Canal Bridge, instalace CFRP lamel (vlevo), dočasné připevnění lamel před vytvrzením lepidla (vpravo) [19]

5.3.2 Vliv zesílení na zlepšení únavových parametrů ocelových konstrukcí

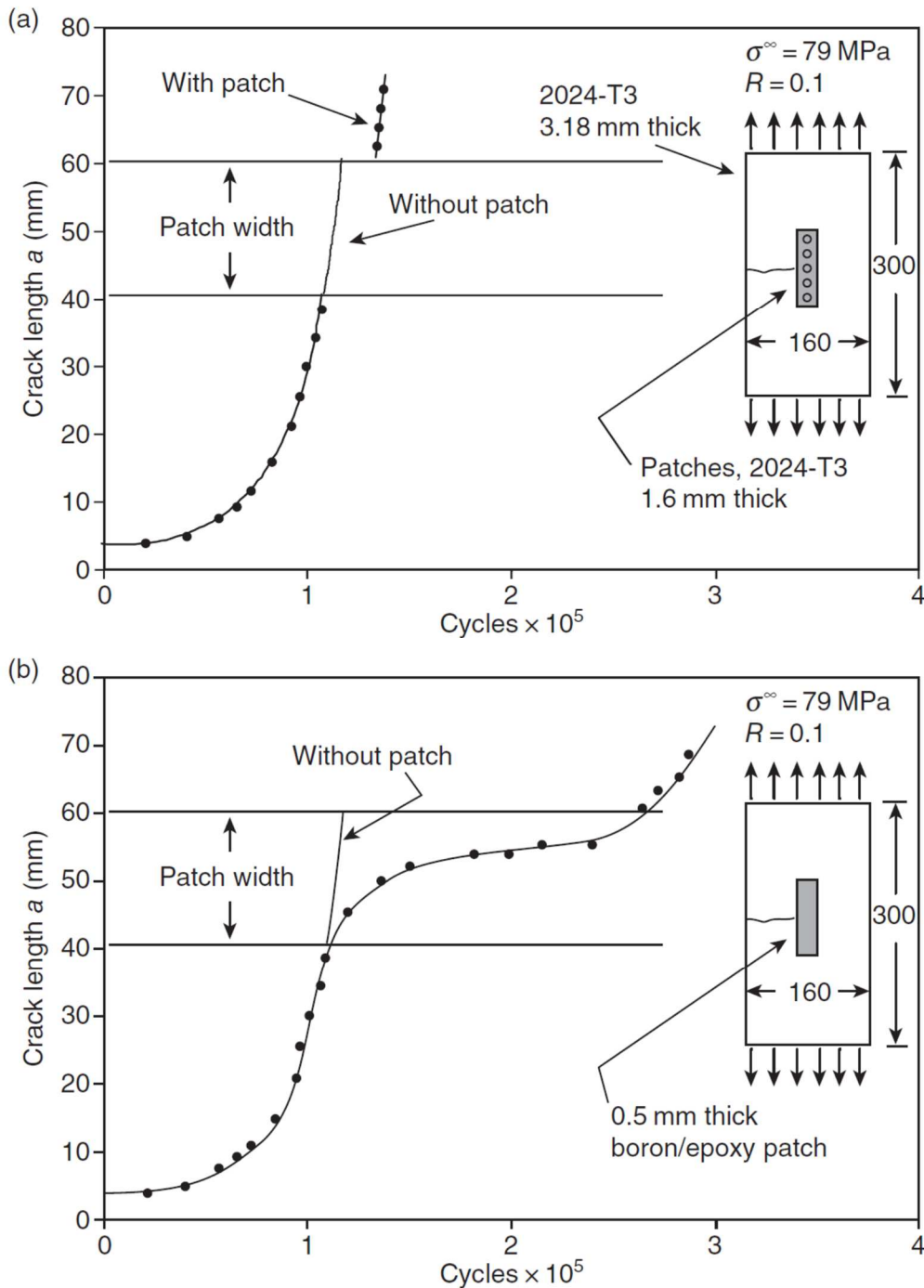
Zesilování konstrukcí na účinky únavy bylo v posledních letech předmětem mnohých výzkumů. Výsledky pokračujícího výzkumu byly několikrát shrnuty do state of the art článků jako Hollaway and Cadei, 2002 [21]; Shaat et al., 2004 [22]; Zhao and Zhang, 2007 [15]; Teng et al., 2012 [16]. Experimentální programy ve své většině řeší životnost již únavově porušených prvků. Nejvíce výzkumů proběhlo na malých vzorcích, na nichž byl uměle vytvořen zářez. Až na několik výjimek byly zkoušky prováděny na nových vzorcích.

V literatuře je popsána řada experimentů, které měly za cíl určit nejvhodnější použití CFRP. To je tloušťku, orientaci vláken, jednostranně/oboustranně, předepnuté/nepředepnuté a podobně (například Jones and Civjan (2003) [23], Liu et al. (2009a, 2009b) [24], [25]).

Výsledkem všech experimentů byl výrazný nárůst únavové životnosti zkoušených prvků. Obzvláště se v tomto ohledu osvědčila uhlíková vlákna s velmi vysokým modulem pružnosti (UHM CFRP). Dle výzkumu Wu et al. (2012) [19]; při použití UHM CFRP bylo několikrát dosaženo až zastavení růstu únavové trhliny, pokud ta byla celá zakrytá UHM CFRP proužkem. Zastavení růstu únavové trhliny je možné dosáhnout rovněž použitím předepnutí. Jak ukázali Taljsten et al. (2009) [27], když zkoumali chování předepnutých a nepředepnutých vzorků. Tento výzkum rozvedli Huawen et al. (2010) [35], kteří zkoumali jednotlivé parametry CFRP, a to míru předepnutí, modul pružnosti vláken a vliv rozpětí únavového zatížení. Zjistili, že největší vliv má míra předepnutí CFRP, kdy vzorek vyztužený maximálně předepnutým CFRP páskem měl 4krát delší životnost než vzorek bez CFRP pásku. Většina výsledků výše zmiňovaných a jejich vzájemné porovnání je shrnuta v článku Pipinato et al. (2012) [39].

Níže, Obrázek 12, je vidět růst únavové trhliny ve vztahu k počtu cyklů na vzorcích, které jsou opraveny pomocí plechu (horní) a pomocí CFRP (dolní). Zvýšení únavové životnosti při použití CFRP je velmi výrazné. Tyto grafy byly převzaty z publikace *Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites* [19]. Nejedná se ovšem o výsledky experimentů prováděných pro využití CFRP ve stavebnictví, ale o výsledky experimentů leteckého průmyslu. V letectví je totiž užití FRP zesilování mnohem rozšířenější. Přestože jsou požadavky na chování konstrukcí ve stavebnictví jiné

než ve strojírenství (rozdílné pojetí únavové životnosti), lze část znalostí aplikovat obecně.



Obrázek 12 Efekt klasického zesílení (přišroubovaný plech) (horní) a zesílení CFRP (spodní), je patrné velké zpomalení růstu trhliny [19]

5.3.3 Vliv prostředí na zesílené konstrukce

V současnosti existuje rozsáhlý výzkum, který se věnoval trvanlivosti FRP vůči extrémním vlivům prostředí. Samotné FRP má velmi dobrou trvanlivost a například podlahové dílce z FRP jsou používány i ve vysoce chemicky agresivních

prostředích. Nicméně o chování ocelových prvků zesílených CFRP obecně existuje stále málo informací. Jeden z problémů použití kombinace ocel/uhlík je v odborné literatuře již rozsáhle popsán. Jedná se o vznik galvanického článku mezi těmito materiály a následné poškození korozí. Při navrhování konstrukce je nutné tuto skutečnost vzít v úvahu a již od počátku učinit vhodná opatření, která by vzniku článku zabránila.

Nejdůležitější studie a jejich výsledky byly přehledně shrnuty v článku od kolektivu autorů Gholami et al [29], který se zabývá obecným vlivem prostředí, a v článku Heshmati et al. [40], ve kterém se autoři soustředili na lepený spoj ocel/CFRP. Autoři shrnují aktuální znalosti o vlivu prostředí na zesílené konstrukce a ukazují na oblasti, ve kterých je nutný další výzkum.

To se týká zejména těchto oblastí:

- vystavení vzorků vlivům počasí, neboť všechny studie zatím používaly metody umělého zrychleného působení extrémních vlivů,
- cyklické namáhání za zvlhčení a vysušení při různých teplotách,
- vliv teplot pod bodem mrazu a podrobnější výzkum mrazových cyklů, jelikož výsledky současných výzkumů byly značně rozporuplné,
- vliv zásaditého nebo kyselého prostředí,
- použití větších vzorků (např. válcovaných prutů) pro posouzení chování zatížených prvků vystavených agresivnímu okolí.

Ze článků vyplývá, že slabým místem každého lepeného zesílení je právě adhezní spoj, na kterém je nebezpečí delaminace adhezní vrstvy.

Major studies concerning environmental performance of CFRP/steel bonding system.

Researchers/year	Environmental conditions/factors	Specimens
Tavakolizadeh and Saadatmanesh [75]	Galvanic corrosion	Steel/CFRP plates
Al-Shawaf et al. [62]	20 °C, 0 °C, -20 °C, -40 °C	Double-lap shear joints
Dawood and Rizkalla [19]	6 month 1 week wet-1 week dry/5% salted water/38 °C/sustain loading (35% of ultimate)	Double-lap shear joints
Shan et al. [82]	90 days 50 °C/93% RH/sustain loading (30% of ultimate)	I-section steel beam
Nguyen et al. [59]	20-60 °C/various bonding length	Double-lap shear joints
Nguyen et al. [43]	-8640 h/5% salted water/20 °C and 50 °C -1000 h/50 °C/90% RH -1000 h/20-50 °C/90% RH	Double-lap shear joints
Stratford and Bisby [42]	Sustain loading/elevated Temperature (<100 °C)	I-section steel beam
Nguyen et al. [41]	20-50 °C/sustain loading (20-80% of ultimate)	Double-lap shear joints
Kim et al. [83]	8 h wet/16 h dry (100 cycles wet/dry)	Double-lap shear joints
Nguyen et al. [76]	8 h (-20 °C)/16 h room temperature (100 cycles freeze/thaw) 744 h (31 days) UV/40 °C	Double-lap shear joints

Obrázek 13 Nejdůležitější studie chování CFRP s ohledem na extrémní účinky prostředí [29]

6 Motivace a cíle práce:

Tato práce se zaměřuje na zkoumání jedné z možných metod oprav a renovací starých mostních konstrukcí, a to zesílením konstrukce pomocí uhlíkových kompozitů (zkratka CFRP – carbon fiber reinforced polymer). V České republice se otázka oprav starých mostů stává čím dál tím aktuálnějším problémem. Například dle údajů Správy železnic, státní organizace, je průměrný věk mostů v jejich správě necelých 75 let. Celkem se jedná o více než 3000 objektů, z nichž značná část se blíží, či již překročila svou předpokládanou životnost. Takové množství objektů nelze naráz opravit nebo nahradit.

Ve své práci se zaměřuji konkrétně na opravy těžce korozně poškozených konstrukcí, na kterých hrozí vznik únavových trhlin iniciovaných koncentrací napětí na korozním oslabení. Vzhledem k výše uvedenému stárí velké části objektů, se s korozním oslabením setkáváme stále častěji. To se sebou nese i zvýšenou možnost vzniku únavových trhlin z těchto defektů. Využití CFRP se jeví jako vhodná metoda preventivních oprav takto degradovaných konstrukcí. Použití CFRP lamel je velmi rychlé a flexibilní, s minimální nutností omezení provozu. Zesílení CFRP sice nezabrání vzniku, ani nezastaví úplně růstu trhliny, ale při správném použití ho výrazně zpomaluje. Díky tomu bude možné opravenou konstrukci využívat déle případně s vyšším zatížením při zachování stejné životnosti. Pro experimenty jsem zvolil metodu tzv. laminace na mokro, jelikož se jedná o tvarově nejflexibilnější způsob zesilování. Zároveň nebyl ještě tento způsob zesilování podrobně zkoumán při aplikaci na skutečných konstrukcích.

Cílem je tedy analyzovat a pochopit a následně i připravit podklady pro využívání CFRP na preventivní opravy konstrukcí s nebezpečím vzniku únavových trhlin. Ty se budou skládat z části početní, tj. výpočtu nutného zesílení a předpokládané životnosti opravené konstrukce, a z části praktické, ve které bude popsán způsob a nezbytné technické postupy provádění.

Metody dosažení těchto cílů a postup prací jsou uvedeny níže.

- přípravná numerická studie zesílení,
- únavové zkoušky nezesílených a zesílených prvků,
- materiálové zkoušky oceli a kompozitů za různých teplot,
- klimatické zkoušky odolnosti CFRP,
- dlouhodobý monitoring konstrukce,

- zpracování a ověření metodiky zesilování,

7 Experimentální část

7.1 Úvod

Hlavní částí práce jsou únavové zatěžovací zkoušky na sérii malých vzorků. Tyto vzorky byly částečně získány ze staré vyřazené konstrukce železničního viaduktu v Holubově a částečně vyrobeny ze současné oceli S355. Vzorky byly cyklicky namáhány tahem a porovnávalo se chování vzorků nezesílených a zesílených. Uspořádání zjednodušeně představuje únavové detaily na nýtovaných konstrukcích dle UIC [37]. Kromě těchto zkoušek byly provedeny ještě testy materiálových vlastností použité oceli a použitého zesílení. Pro lepší pochopení chování zesílení na skutečné konstrukci byly experimenty rozšířeny o zkoušky zrychleného stárnutí a zkoušky s teplotními extrémy. Bylo naplánováno i osazení a dlouhodobé monitorování vzorků na využívané mostní konstrukci.

Aby se experimenty co nejvíce přiblížily realitě, bylo nutné mít k dispozici takové vzorky, které co nejlépe reprezentují části skutečné degradované konstrukce. Za prvé lze mít části takových konstrukcí, které byly po řadu let vystaveny nepříznivým povětrnostním a dalším vlivům, a které jsou výsledkem působení těchto vlivů korozně oslabené. Za druhé vytvořit korozi na prvcích „uměle“ zrychlenou metodou. Takové metody mají velkou výhodou v rychlosti, s jakou můžeme dosáhnout požadované úrovně koroze na zkušebních vzorcích. Nicméně z hlediska tohoto výzkumu je preferováno použití vzorků přirozeně zkorodovaných, už jen pro možnost využití původního materiálu konstrukcí.

Z hlediska výše zmíněné přirozené koroze, byly ve spolupráci se Správou železnic, státní organizací vytipovány vhodné mostní konstrukce, ze kterých by bylo potenciálně možné odebrat části pro následné zhotovení zkušebních vzorků nebo odebrat přímo samotné zkušební vzorky v podobě přípojů či jednotlivých prvků.

Jedním z vybraných mostních objektů byl železniční jednokolejný most s vžitým názvem Holubov, který se nachází poblíže stejnojmenné vesnice, na traťovém úseku České Budějovice – Černý kříž. Jednalo se o ocelovou příhradovou nýtovanou konstrukci s horní mostovkou. Ze statického hlediska šlo o spojitý nosník o 3 polích s celkovým rozpětím 83,80 m. Most byl vystavěn v roce 1882,

opravován byl v roce 1938. Tato mostní konstrukce byla vybrána jako vhodná jak z důvodu jejího stáří a značného korozního napadení, tak především z důvodu demolice objektu a snadného odběru vzorků.

Volba plechů pro odběr vzorků byla soustředěna na části s korozním napadením, a zároveň dostatečně rozsáhlé. Byly voleny části bez koncentrací napětí a s rozkmity napětí pod mezí únavy při konstantním rozkmitu napětí tak, aby následné únavové zkoušky nebyly příliš ovlivněny historií zatěžování. Cílem zkoušek bylo totiž určení efektivnosti preventivního zesílení na vznik a rozvoj únavových trhlin. Proto byly odebrány 4 části dolních pásů příhradových nosníků mostu. Z těchto pásů pak bylo vyřezáno celkem 40 plechů o rozměrech cca 100x400mm. Z těchto byly připravovány zkušební vzorky. Dále byl ještě odebrán materiál pro provedení materiálových zkoušek tak, aby byly zjištěny potřebné charakteristiky oceli. V rámci materiálových zkoušek se uskutečnily: klasická tahová zkouška pro zjištění meze kluzu, případně smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti, modulu pružnosti (z pracovního diagramu), tažnosti a kontrakce; dále zkouška rázem v ohybu při různých teplotách pro zjištění vrubové houževnatosti oceli, chemické složení a zkouška mikrostruktury. Naměřené hodnoty a protokoly zkoušek jsou součástí práce v Příloze C.



Obrázek 14 Železniční ocelový příhradový most v Holubově



Obrázek 15 Snímání staré konstrukce, most v Holubově



Obrázek 16 Některé z odebraných vzorků

7.2 Předběžná numerická studie

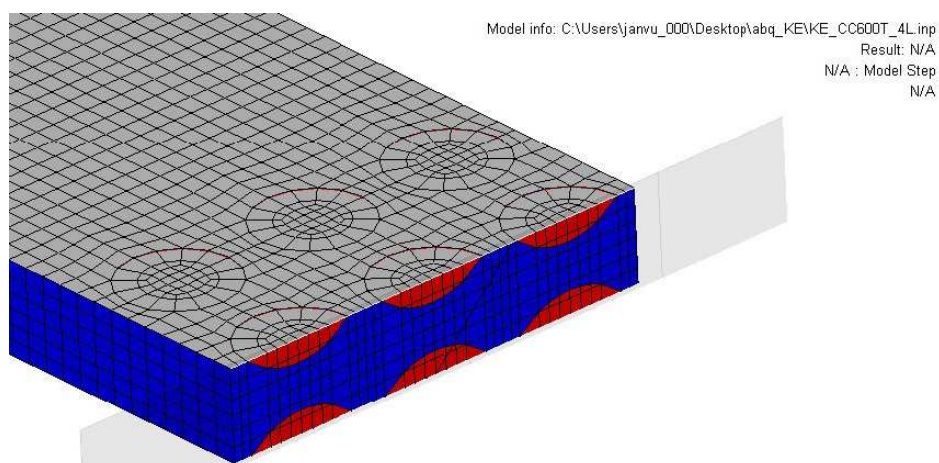
Během přípravy experimentů byly vytvořeny předběžné numerické modely zesíleného prvku. Ty byly určeny pro zjištění optimálního množství použité výztuže. Ve studii bylo porovnáváno chování nezesíleného a zesíleného vzorku při stejné úrovni zatížení. Z pozorovaného snížení napětí v oceli byl poté odvozen teoretický nárůst v únavové životnosti.

Numerické modely následně slouží k nalezení optimální metody zesílení vzorků. Tato metoda spočívá v nalezení vhodné skladby zesilujícího kompozitu a metody uchycení na ocelovou konstrukci. Experimentální vzorky vyrobené na základě studie posléze slouží ke zpětné validaci numerických modelů. Na základě validovaných modelů je poté možné hledat ideální složení výztužné kompozitní vrstvy.

7.2.1 Model

Dnes již většina komerčních numerických řešičů nabízí možnosti modelovat vrstvený kompozit se zachycením jednotlivých vrstev kompozitu s orientací a tloušťkou každé vrstvy. Vzhledem k dostupnosti byl vybrán řešič Abaqus.

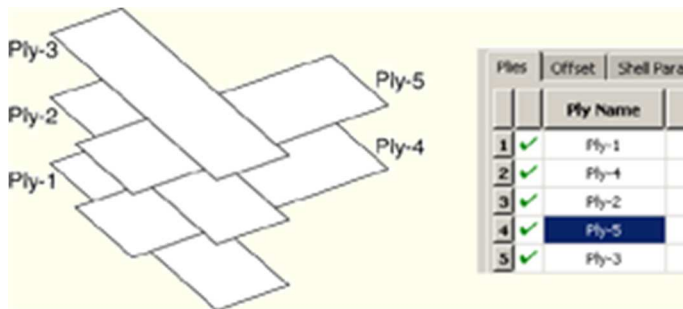
Tento řešič umožňuje modelovat vrstvený laminát pomocí tří základních elementů: a to základní shell elementy, continuum shell elementy a solid elementy. Pro náš případ jsou použity pouze základní shell elementy a solid elementy. Solid elementy se využívají v případě, kdy jsou dominantní příčné účinky napětí a pokud nelze zanedbat napětí kolmé k rovině kompozitní vrstvy.



Obrázek 17 Model vzorku s poškozením typu 1, šedá – kompozit, 2D shell; červená – epoxid, solid elementy (C3D6); modrá – ocel, solid elementy (C3D6)

Samotné modelování vrstev kompozitu probíhá při definování vlastností elementu, kde jsou definovány jednotlivé vlastnosti každé vrstvy (materiál,

tloušťka, orientace, počet integračních bodů). Při použití solid elementu je možné použít pouze jeden integrační bod pro každou vrstvu. Pro shell elementy jsou jako výchozí hodnota použity 3 integrační body.



Obrázek 18 Modelování kompozitního materiálu, řešič Abaqus

Materiál pro kompozitní vrstvu se definuje jako elastický ortotropní materiál. Základní materiálová data jsou: moduly pružnosti v kolmých směrech v rovině vrstvy E_1 , E_2 , Poissonovo číslo a smykové moduly G_{12} , G_{13} a G_{23} . Při modelování porušení vrstev se zadávají také hodnoty mezního napětí (případně přetvoření). Jako výchozí výstup výpočtu lze získat hodnotu napětí a přetvoření v každé vrstvě, a to vždy v jejím středu a na okrajích. Při větším počtu integračních bodů pak i ve více mezilehlých bodech každé vrstvy.

Použité materiálové vlastnosti kompozitu byly pro předběžnou studii odvozeny z vlastností jednotlivých složek, které jsou shrnuty v Příloze B. Při odvozování vlastností kompozitu byla použita odborná literatura a doporučení výrobce. Na základě State-of-Art byly určeny jako:

$E_1=$	130 000.0	[MPa]
$E_2=$	130 000.0	[MPa]
$\nu=$	0.29	
$G_{12}=$	7 500.0	[MPa]
$G_{13}=$	7 500.0,	[MPa]
$G_{23}=$	7 500.0	[MPa]

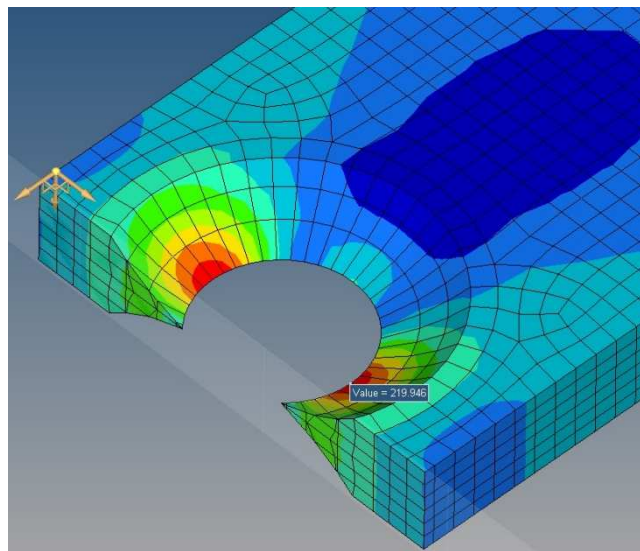
Jelikož je použita uhlíková tkanina tkána jako dvousměrná, jsou materiálové vlastnosti v obou směrech totožné.

Pro validované modely byly využity skutečně experimentálně určené materiálové vlastnosti kompozitu. Hodnoty napětí na jednotlivých vrstvách jsou validovány s hodnotami naměřenými při experimentální práci. Pro validaci byly připraveny modely, kde je ocelová deska modelována s vadou jako koncentrátorem

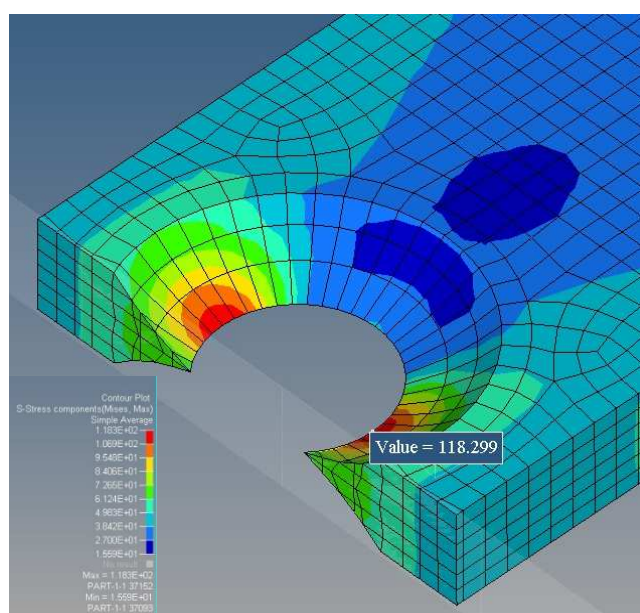
napětí, a to jak bez zesílení, tak s aplikovaným kompozitem. Stejně tak, jak je popsáno v experimentální části.

7.2.2 Předběžná studie – určení použitého zesílení

Byly vytvořeny modely pro různé množství výztuže (počet vrstev) a různé typy použitých tkanin (šířka vrstev, příp. mat. vlastnosti). Efektivnost vyztužení, tj. pokles v napětí, byla poté porovnávána mezi jednotlivými modely. Celkem bylo vytvořeno 36 modelů pro každý typ poškození. Pro ilustraci (Obrázek 19 a Obrázek 20) je redukce napětí ve vzorku zesíleném pěti, přibližně 2,5mm tlustými, vrstvami CFRP. Na vzorku s typem vady 1 je vidět pokles v úrovni napětí na přibližně 75% původní hodnoty. U typu vady 2 se jedná o pokles ještě výraznější.



Obrázek 19 Rozložení napětí na vzorku s poškozením typu 2, bez zesílení



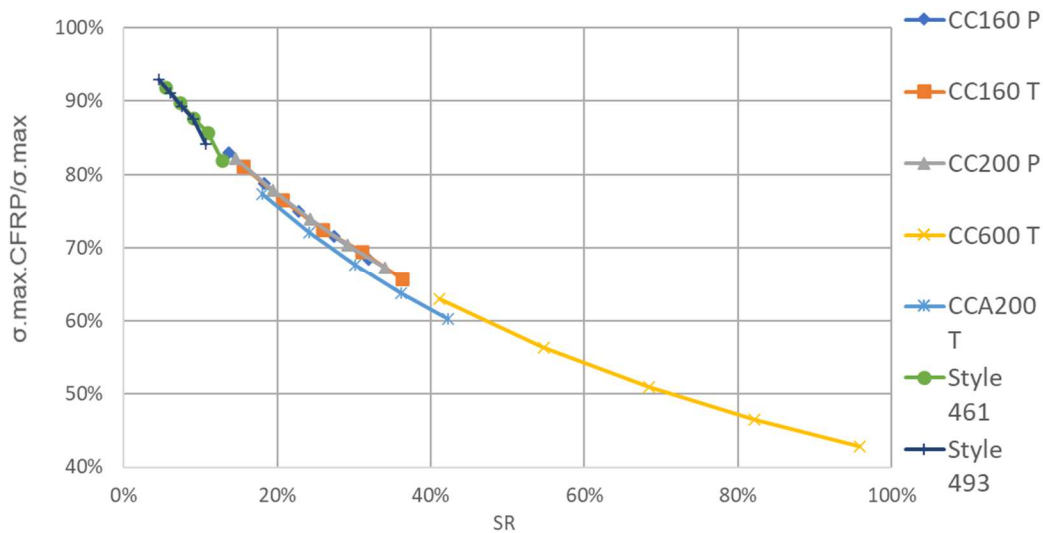
Obrázek 20 Rozložení napětí na vzorku s poškozením typu 2, s 5 vrstvami CC160P

Celková účinnost zesílení pro všechny modely je shrnuta níže na grafu (Obrázek 21). Každý druh textilie je reprezentován v grafu jednou křivkou. Textilie jsou rozděleny dle gramáže a typu tkaní. Je porovnáváno snížení napětí (osa y), které je udáváno jako poměr mezi napětím na zesíleném vzorku ku napětí na nezesíleném. Osa x vyjadřuje plochu zesílení ku ploše vzorku normalizované k modulu pružnosti (poměr SR).

$$SR = \frac{A_{CFRP} * E_{CFRP}}{A_S * E_S} \quad (7-1)$$

Hodnoty ve vzorci jsou uvažovány jako:

- A_{CFRP} -průřezová plocha kompozitního zesílení
- E_{CFRP} -modul pružnosti kompozitního zesílení (ve směru namáhání)
- A_S -průřezová plocha ocelového prvku
- E_S -modul pružnosti oceli



Obrázek 21 Vada typ 2 – pokles maximálního napětí dle objemu vyztužení

Po zvážení efektivnosti jsme pro použití v experimentu zvolili 5 vrstev těžké tkaniny CC600T.

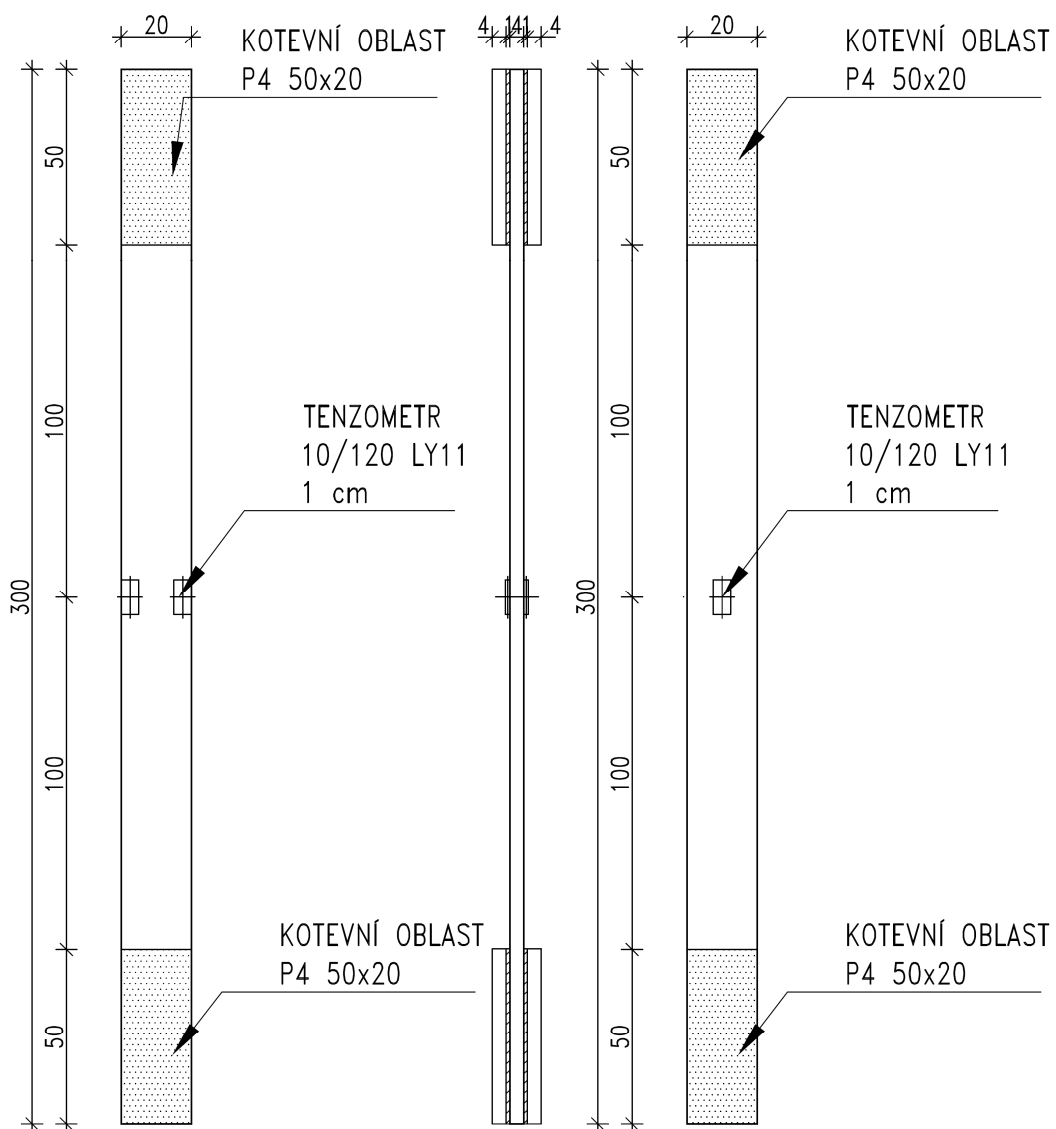
7.3 Materiálové zkoušky CFRP

7.3.1 Popis experimentů

Jelikož je lamela při mokřem způsobu laminace vytvářena in-situ, nemohou být skutečné materiálové vlastnosti kompozitu určeny předem. Přestože lze z literatury získat vzorce pro odhad materiálových vlastností na základě vlastností a poměru obsahu vláken a pryskyřice, je doporučováno vždy ještě zjišťovat skutečné vlastnosti na místě vyrobeného kompozitu např.: dle normy ISO 527-1:2012 [44].

PŘEDNÍ STRANA

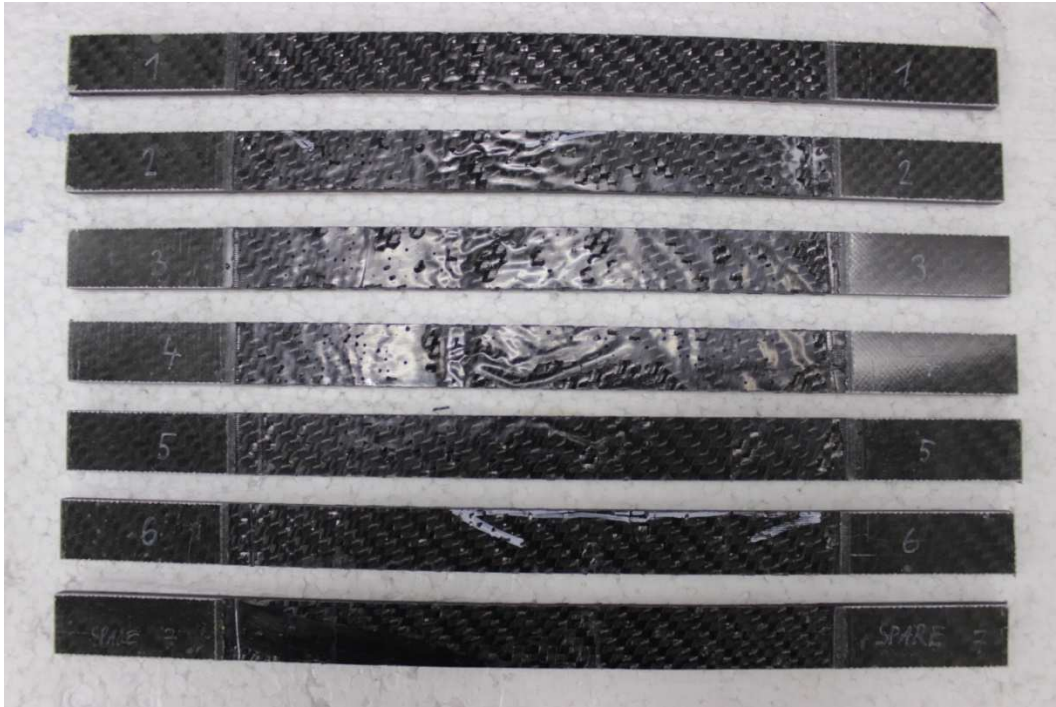
ZADNÍ STRANA



Obrázek 22 Schéma vzorků pro tahovou zkoušku

Za účelem zjištění skutečných materiálových vlastností použitého kompozitu byly navrženy dvě sady vzorků. Účelem první sady bylo zjistit vlastnosti CFRP

lamely. Zároveň s výrobou vzorků pro únavu byla ještě zvlášť vyrobena CFRP lamela stejného složení (viz výše). Z této lamely bylo vyrobeno 6 vzorků tvaru obdélníku o rozměrech 300x20 mm (Obrázek 22). Na vzorcích byly pomocí tahové zkoušky dle metodiky ASTM D3039 [45] naměřeny pevnost v tahu, Youngův modul a Poissonovo číslo.



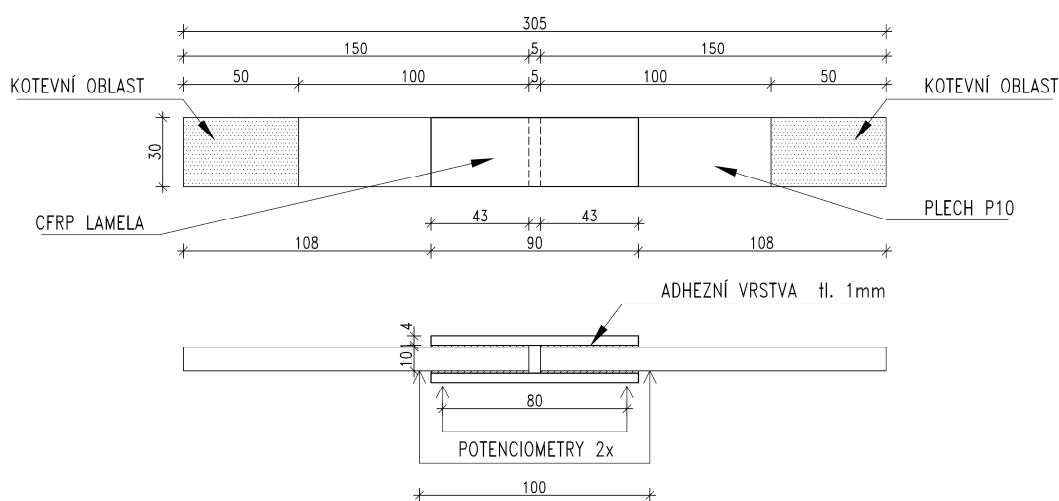
Obrázek 23 Vzorky připravené pro tahovou zkoušku



Obrázek 24 Upevnění vzorku v aparatuře

Druhou sadou vzorků byla zkoumána smyková pevnost adhezí vrstvy. Ta má naprosto zásadní význam pro efektivitu zesílení. Pokud nedojde k dostatečnému propojení vrstvy s podkladem, nefunguje celé zesílení správně a jeho efektivnost rychle klesá. Adhezí vrstva je navíc část zesílení, která je nejvíce ovlivněna vlivem změn teploty.

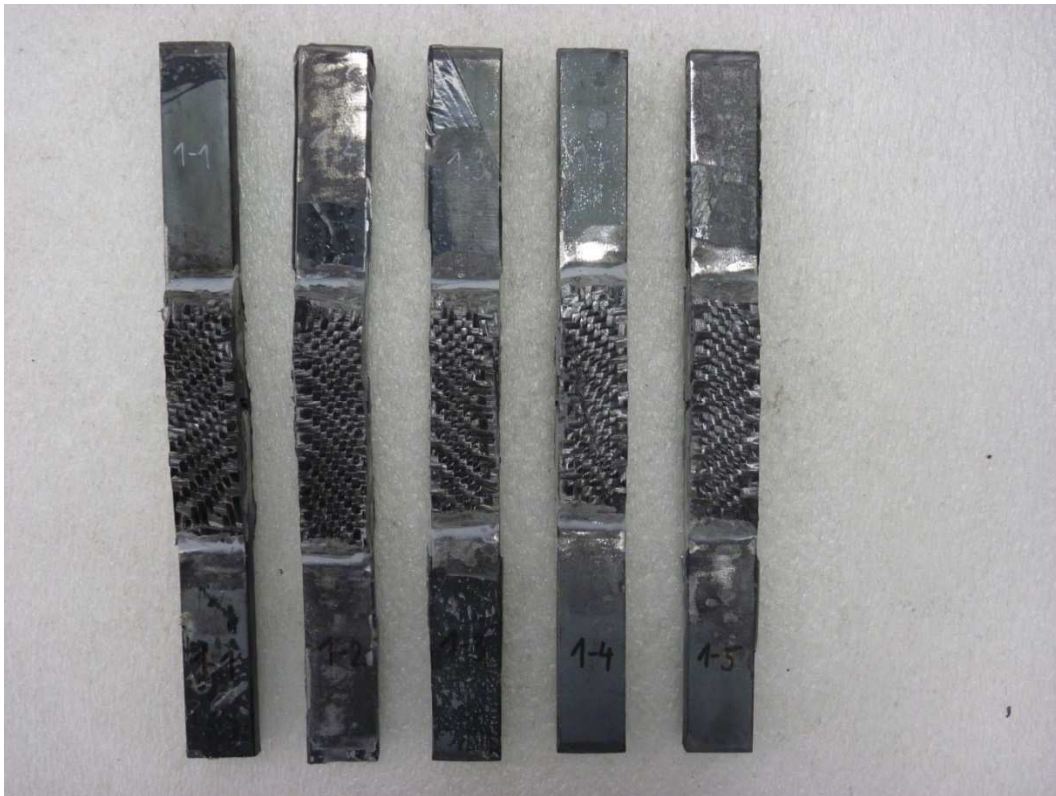
Bylo vyrobeno celkem 25 vzorků o složení 2 uhlíkové lamely + 2 ocelové plechy připojené adhezí vrstvou Sikadur 330 tl. 1 mm. (Obrázek 25 a Obrázek 26). Tyto vzorky byly poté zatěžovány rovnoměrnou silou až do porušení.



Obrázek 25 Schéma vzorku pro určení smykové pevnosti

Vzorky byly rozděleny na několik podskupin tak, aby byly pokryty rozdíly v chování za různých teplot a na různých materiálech. Teploty byly určeny

- 10 ks Vzorky za pokojové teploty (23 °C)
 - 5 ks podkladní materiál S355
 - 5 ks podkladní materiál Plávková ocel (Holubov)
- 5 ks Vzorky při teplotě -40 °C (zaokrouhlená teplota mostu z ČSN EN 1991-4 + doporučení výrobce)
- 5 ks Vzorky při teplotě +45 °C (doporučení výrobce)
- 5 ks Vzorky při teplotě +60 °C (zaokrouhlená teplota mostu z ČSN EN 1991-4)



Obrázek 26 Vzorky připravené pro zkoušku



Obrázek 27 Vzorek upevněný v aparatuře

7.3.2 Výsledky experimentů

Zkoušky materiálových vlastností, tak jak byly popsány výše, byly provedeny v laboratořích Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu (VZLÚ). Protokoly zkoušek jsou uvedeny v plném znění v Příloze D. Na doporučení pracovníků VZLÚ byly tenzometry nahrazeny potenciometry.

7.3.2.1 Kompozitní lamely – materiálové vlastnosti

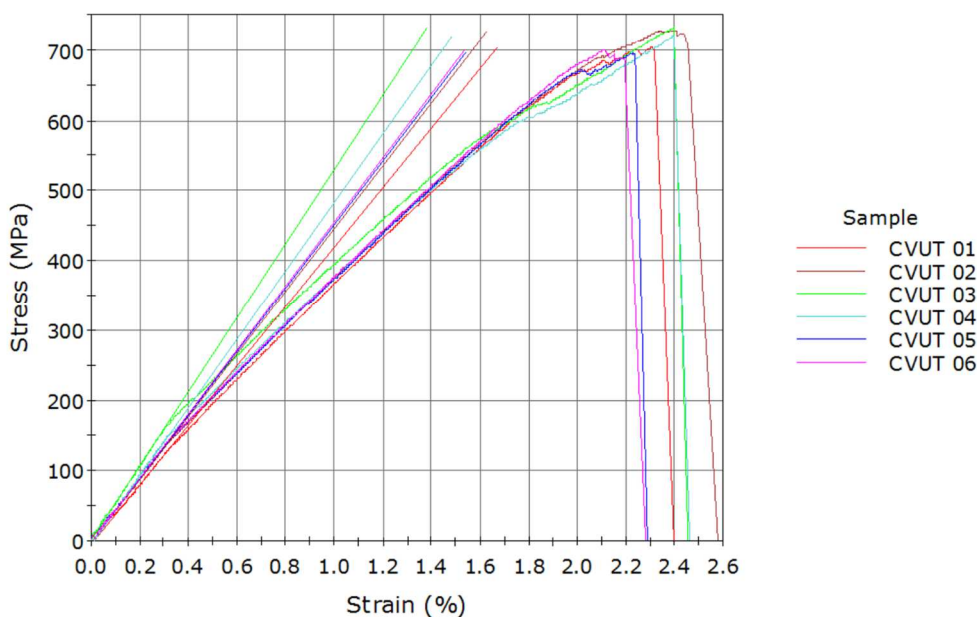
Níže jsou shrnuty výsledky pokusů (Tabulka 4) a jsou vyneseny do grafu (Obrázek 28).

Tabulka 4 Materiálové vlastnosti kompozitní lamely (pokojová teplota +23 °C)

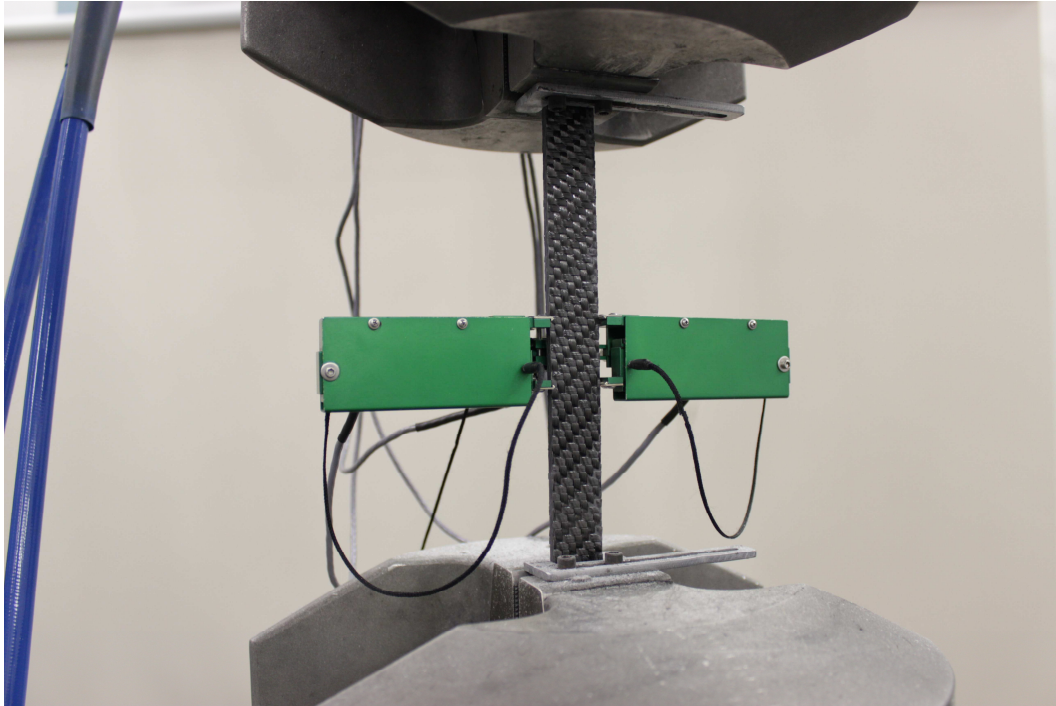
	Sample	Failure mode	Width (mm)	Thickness (mm)	E Modulus (GPa)	Poisson's no. (1)	Max. Load (kN)	Strength (MPa)
1	CVUT 01	LGM	20.26	4.13	42.5	0.03352	59.032	705.5
2	CVUT 02	LGB	20.09	4.10	44.8	0.04709	59.994	728.4
3	CVUT 03	LGB	20.11	4.13	53.0	0.02780	60.787	731.9
4	CVUT 04	LGB	20.24	4.18	49.0	0.09069	60.976	720.7
5	CVUT 05	LGM	20.15	4.17	45.3	0.04699	58.497	696.2
6	CVUT 06	LGM	20.19	4.10	45.9	0.05658	57.988	700.5
Mean			20.17	4.14	46.7	0.05044	59.546	713.9
S.D.			0.069	0.034	3.700	0.022	1.231	15.1
C.V.			0.342	0.820	7.915	44.151	2.068	2.1
Min.			20.09	4.10	42.5	0.02780	57.988	696.2
Max.			20.26	4.18	53.0	0.09069	60.976	731.9

NOTE: The E modulus was determined using a linear regression (a least square fit of a linear function) between the strain values of 0.1 and 0.3%

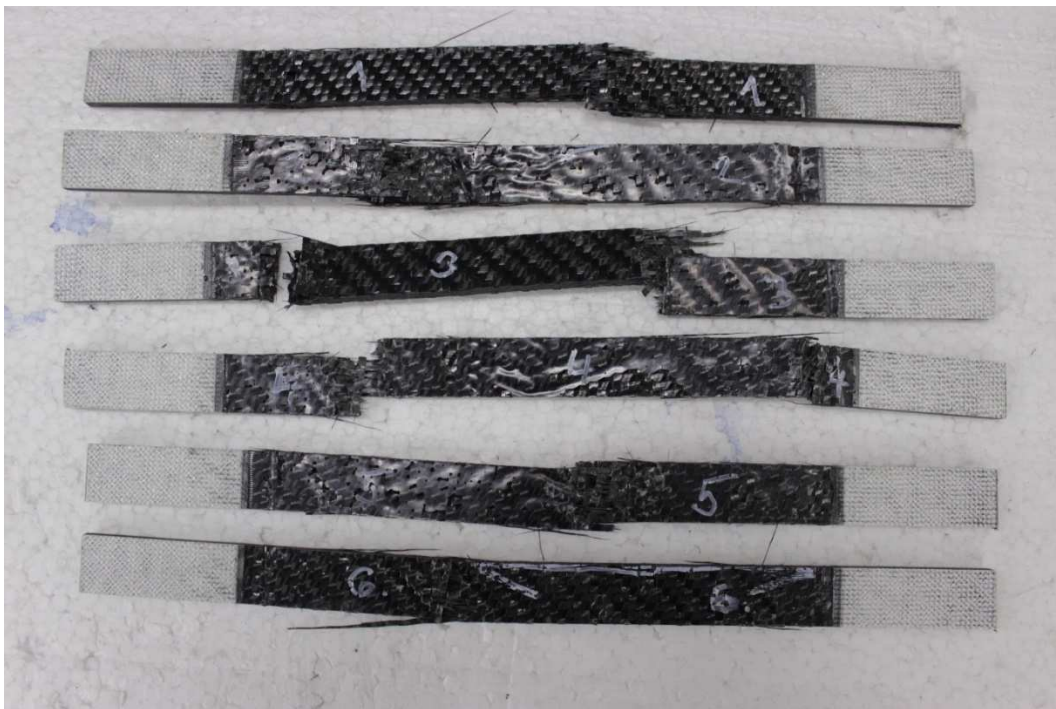
Failure mode: LGM – lateral gage middle; LGB – lateral gage bottom.



Obrázek 28 Pracovní diagram tahových zkoušek



Obrázek 29 Zapojení potenciometrů na vzorku



Obrázek 30 Vzorky po zkouškách

7.3.2.2 Zkoušky kotevní oblasti – pevnost adhezní vrstvy

Byla zkoušena smyková pevnost adhezní vrstvy. Pro jinou, než pokojovou teplotu byly zkoušky prováděny v teplotní komoře. Výsledky zkoušek jsou shrnuty v tabulkách a diagramech níže:

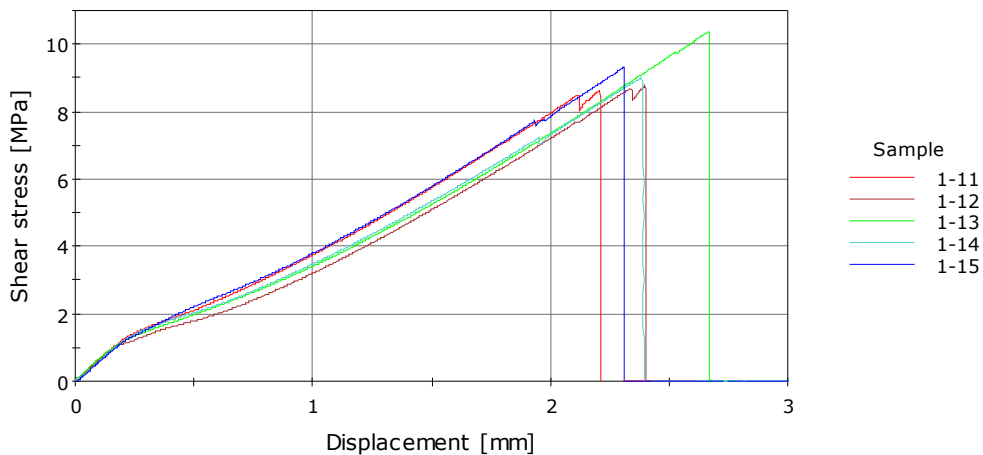
1. Ocel S355 při teplotě -40 °C

Níže jsou shrnuty výsledky pokusů (Tabulka 5) a jsou vyneseny do grafu (Obrázek 31).

Tabulka 5 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, T=-40 °C

	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-11	30.34	49.10	25.69	8.62
2	1-12	30.23	50.46	26.70	8.75
3	1-13	30.26	50.43	31.67	10.38
4	1-14	30.38	50.68	27.72	9.00
5	1-15	30.37	48.18	27.24	9.31
Mean		30.32	49.77	27.80	9.21
S.D.		0.067	1.087	2.289	0.701
C.V.		0.222	2.184	8.231	7.614
Min.		30.23	48.18	25.69	8.62
Max.		30.38	50.68	31.67	10.38

-40 °C



Obrázek 31 Pracovní diagram zkoušky, S355, -40 °C



Obrázek 32 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře



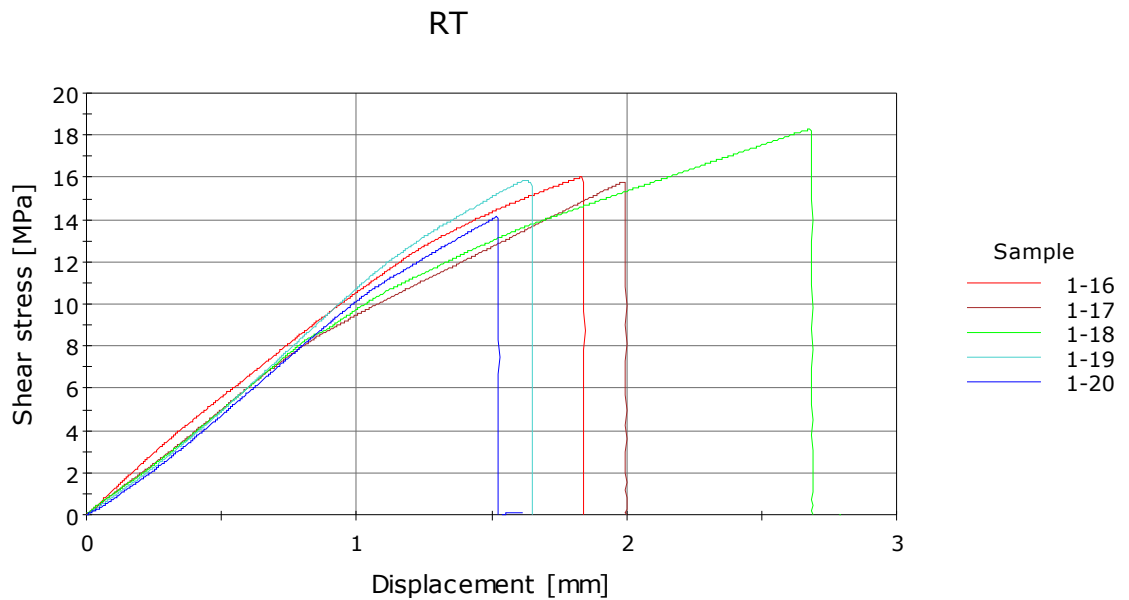
Obrázek 33 Vzorky po zkouškách

2. Ocel S355 při teplotě +23 °C (RT = room temperature)

Níže jsou shrnuty výsledky pokusů (Tabulka 6) a jsou vyneseny do grafu (Obrázek 34).

Tabulka 6 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, $T = 23\text{ °C}$ (RT = room temperature)

	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-16	30.41	49.81	48.57	16.03
2	1-17	30.38	49.59	47.57	15.79
3	1-18	30.31	49.12	54.48	18.30
4	1-19	30.37	49.87	48.14	15.89
5	1-20	30.42	49.57	42.59	14.12
Mean		30.38	49.59	48.27	16.03
S.D.		0.043	0.295	4.225	1.488
C.V.		0.142	0.595	8.753	9.282
Min.		30.31	49.12	42.59	14.12
Max.		30.42	49.87	54.48	18.30



Obrázek 34 Pracovní diagram zkoušky, S 355, + 23 °C (RT = room temperature)



Obrázek 35 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře



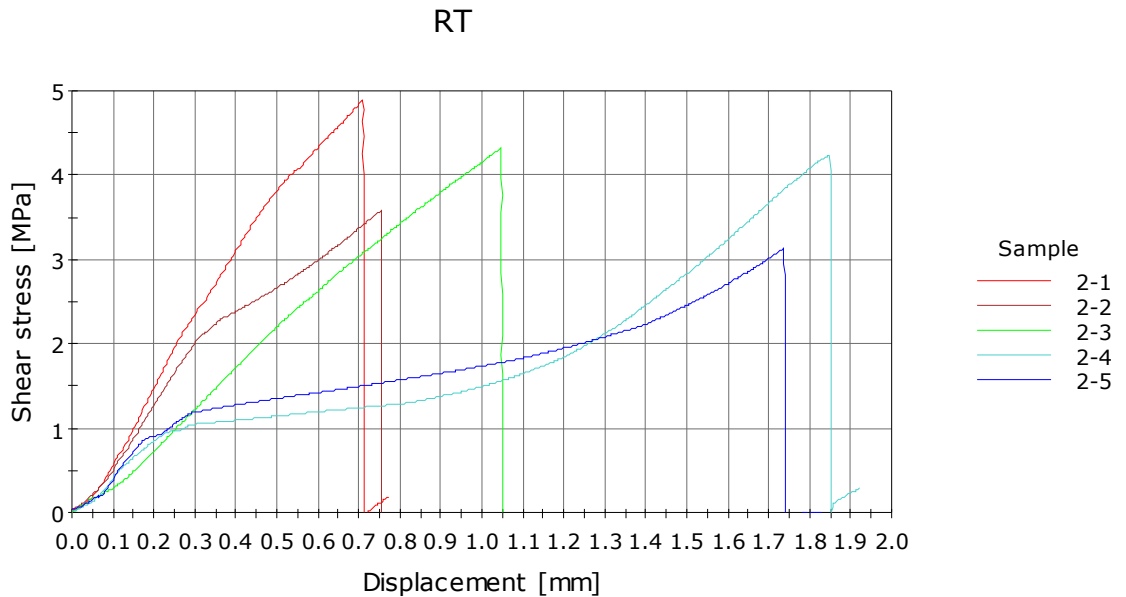
Obrázek 36 Vzorky po zkouškách

3. Ocel plávková (Holubov) při teplotě +23 °C (RT = room temperature)

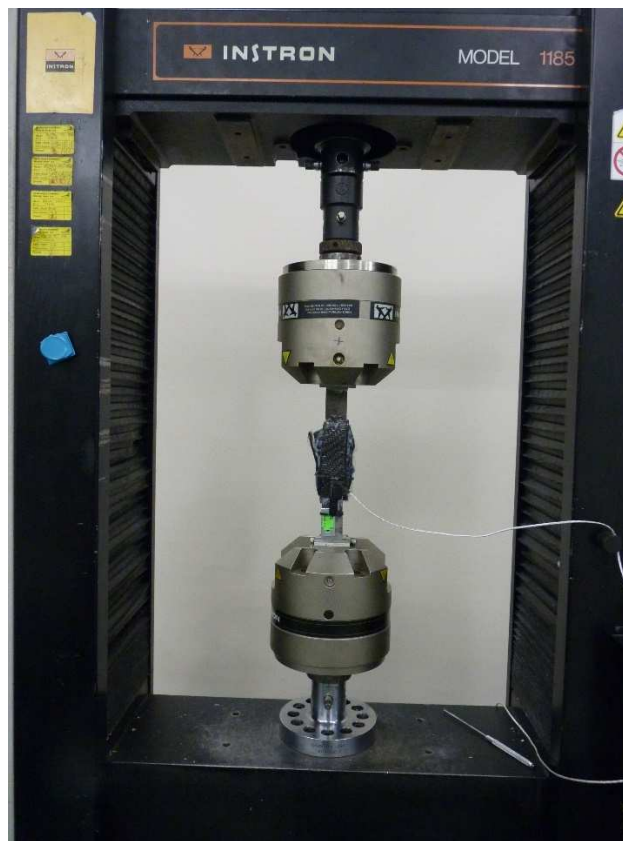
Níže jsou shrnuty výsledky pokusů (Tabulka 7) a jsou vyneseny do grafu (Obrázek 37).

Tabulka 7 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, plávková, $T = 23\text{ °C}$ (RT = room temperature)

	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	2-1	30.13	53.36	15.68	4.88
2	2-2	30.02	51.64	11.09	3.58
3	2-3	29.88	53.21	13.72	4.31
4	2-4	29.83	50.27	12.73	4.24
5	2-5	30.00	50.00	9.36	3.12
Mean		29.97	51.70	12.52	4.03
S.D.		0.119	1.579	2.425	0.685
C.V.		0.397	3.055	19.374	17.018
Min.		29.83	50.00	9.36	3.12
Max.		30.13	53.36	15.68	4.88



Obrázek 37 Pracovní diagram zkoušky, plávková ocel (1882), +23 °C, (RT = room temperature)



Obrázek 38 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře



Obrázek 39 Vzorky po zkouškách

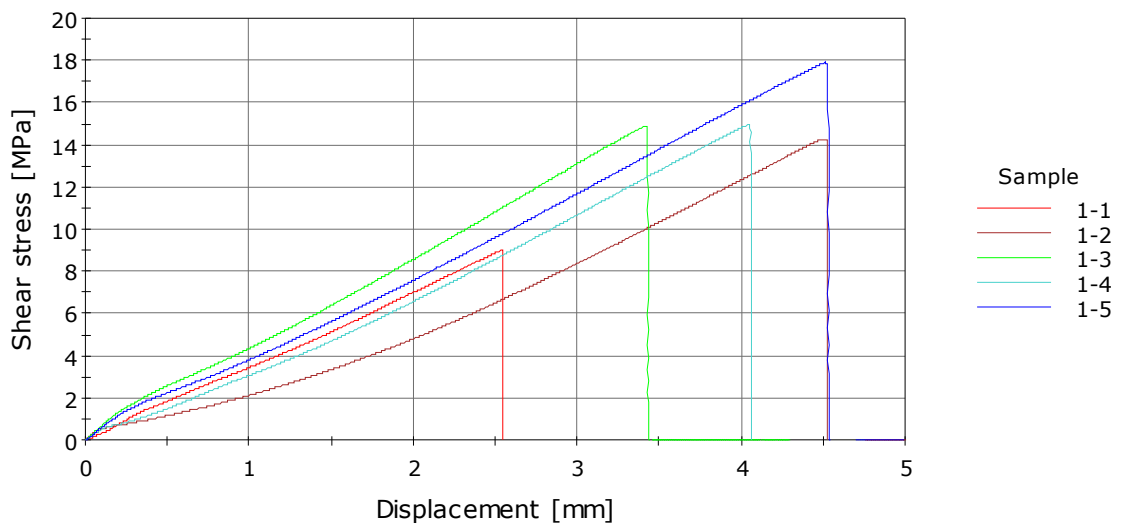
4. Ocel S355 při teplotě +45 °C

Níže jsou shrnuty výsledky pokusů (Tabulka 8) a jsou vyneseny do grafu (Obrázek 40).

Tabulka 8 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, $T= 45\text{ °C}$

	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-1	30.54	51.26	28.19	9.00
2	1-2	30.57	52.21	45.54	14.27
3	1-3	30.36	46.46	42.00	14.89
4	1-4	30.30	50.94	46.15	14.95
5	1-5	30.36	51.25	55.66	17.89
Mean		30.43	50.42	43.51	14.20
S.D.		0.121	2.266	9.946	3.226
C.V.		0.397	4.493	22.860	22.718
Min.		30.30	46.46	28.19	9.00
Max.		30.57	52.21	55.66	17.89

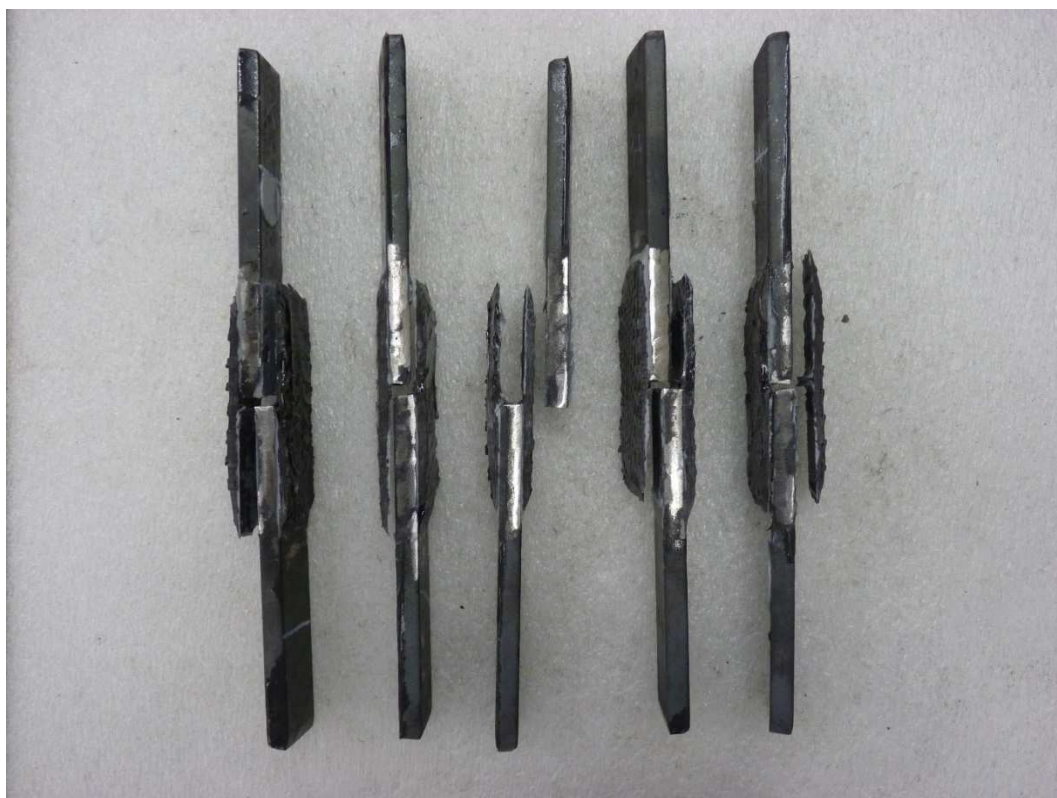
45 °C



Obrázek 40 Pracovní diagram zkoušky, S355, +45 °C



Obrázek 41 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře



Obrázek 42 Vzorky po zkouškách

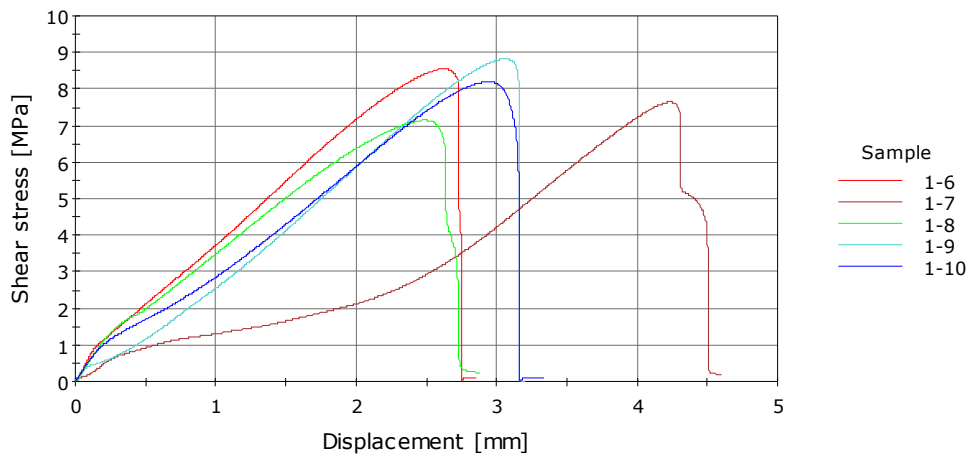
5. Ocel S355 při teplotě +60 °C

Níže jsou shrnuty výsledky pokusů (Tabulka 9) a jsou vyneseny do grafu (Obrázek 43).

Tabulka 9 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-6	30.38	49.24	25.61	8.56
2	1-7	30.45	49.30	22.94	7.64
3	1-8	30.50	50.96	22.21	7.14
4	1-9	30.41	48.32	25.94	8.83
5	1-10	30.48	51.80	25.89	8.20
Mean		30.44	49.92	24.52	8.07
S.D.		0.049	1.414	1.797	0.684
C.V.		0.162	2.833	7.330	8.466
Min.		30.38	48.32	22.21	7.14
Max.		30.50	51.80	25.94	8.83

60 °C



Obrázek 43 Pracovní diagram zkoušky, S355, +60 °C

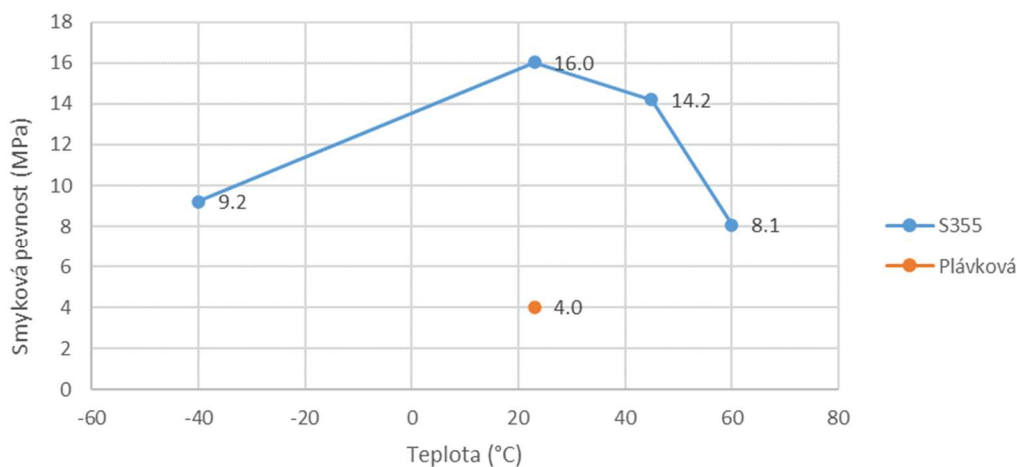


Obrázek 44 Vzorky po zkouškách

V tabulkách (Tabulka 4, Tabulka 5, Tabulka 6, Tabulka 7, Tabulka 8, Tabulka 9) jsou podrobné výsledky jednotlivých zkoušek smykové pevnosti adhezní vrstvy. Průměrné hodnoty výsledků jsou pro porovnání shrnuty Tabulka 10 níže. Průběh hodnot smykové pevnosti spoje v závislosti na teplotě je znázorněn v grafu (Obrázek 45). Rozdíly ve smykové pevnosti závislé na teplotě jsou výrazné. V extrémech klesá hodnota pevnosti na polovinu. Během navrhování je nutné k tomuto aspektu chování lepených spojů přihlídnout. Například v eurokódu jsou zavedeny materiálové koeficienty po lepené spoje $\gamma_M \geq 3$ (ČSN EN 1999–1, Příloha M [47]). Zároveň z výsledků vyplývá i výrazný rozdíl ve smykové pevnosti v závislosti na podkladním materiálu. Podklad byl u všech vzorů připraven mechanickým očištěním na stupeň Sa 2. Rozdíl je s největší pravděpodobností způsoben různou strukturou povrchu. Zatímco u moderní oceli S355 je povrch hladký, u plávkové oceli (1882) je povrch hrubý, pokryt malými důlky způsobenými korozí. Je ovšem také možné, že rozdílné výsledky mohly způsobit chyby při výrobě.

Tabulka 10 Výsledky zkoušek smykové pevnosti – shrnutí průměrných hodnot

	Vzorky		Šířka [mm]	Přesah [mm]	Max. zatížení [kN]	Smyk. pevnost [MPa]
	Teplota	ocel				
Průměr hodnot	-40 °C	S355	30.32	49.77	27.8	9.21
Průměr hodnot	+23 °C	S355	30.38	49.59	48.27	16.03
Průměr hodnot	+23 °C	plávková	29.97	51.7	12.52	4.03
Průměr hodnot	+45 °C	S355	30.43	50.42	43.51	14.2
Průměr hodnot	+65 °C	S355	30.44	49.92	24.52	8.07



Obrázek 45 Vývoj hodnot smykové pevnosti v závislosti na teplotě

7.4 Únavové zkoušky

7.4.1 Popis vzorků

Pro provedení experimentů byly vytvořeny dvě sady zkušebních vzorků. Tyto sady se liší dle typu poškození povrchu, které bylo zkoumáno. U sady číslo jedna bylo vytvořeno poškození důlkovou korozí. U sady číslo dvě byla simulována hloubková koroze ve formě prokorodování vzorku. Celkem bylo vytvořeno 40 ks vzorků. Pro porovnání chování byla část těchto vzorků vyrobena z výše zmíněné oceli z železničního viaduktu Holubov (tj. plávková ocel, 1882) a druhá část vzorků byla vyrobena ze současné oceli S355 J2+N.

Tabulka 11 Označení vzorků

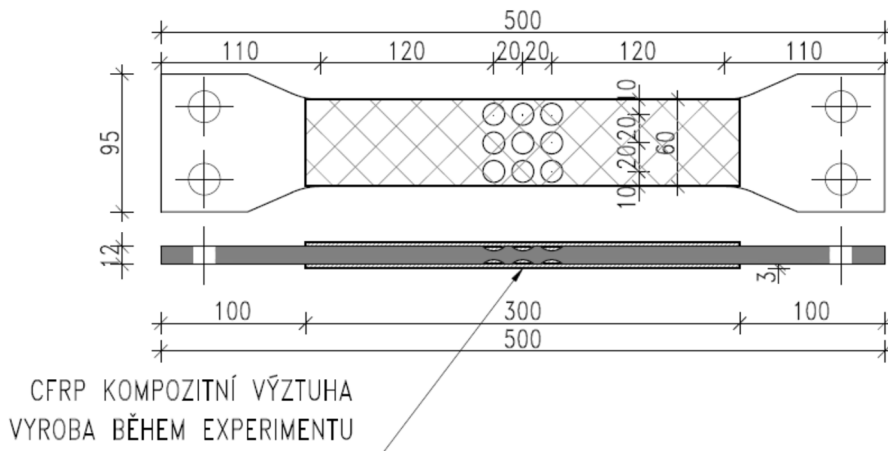
Vzorky číslo	Ocel	Vada	Úprava povrchu	Další informace
1 – 4	plávková	1	Sa 2 - otryskání	Nezesílené
5 – 8	plávková	1	Sa 2½ - otryskání	Zesílené
9 – 12	plávková	2	Sa 2½ - otryskání	Nezesílené
13 - 16	plávková	2	St 2 - ruční očištění	Nesílené
17 - 20	plávková	2	Sa 2½ - otryskání	Zesílené
21 - 24	plávková	2	Sa 2½ - otryskání	Zesílené +100 cyklů mráz
33 - 36	S355	1	Sa 2½ - otryskání	Zesílené +100 cyklů mráz a sůl
37 - 40	S355	2	Sa 2½ - otryskání	Zesílené
41 - 44	S355	2	Sa 2½ - otryskání	Zesílené
45 - 48	S355	2	Sa 2½ - otryskání	Zesílené

Pozn.: Skok v číslování vzorků způsoben změnou počtu v průběhu výroby

Sada 1

Základní schéma vzorků sady č. 1 je na Obrázek 46 níže, podrobný výkres vzorků je součástí Příloh (A). V sadě č. 1 je celkem 12 vzorků. Z toho jsou 4 vzorky ponechány jako referenční nevyztužené a na zbytek bylo nanášeno kompozitní zesílení. Na vzorcích je simulováno poškození ocelového prvku důlkovou korozí, které slouží jako koncentrátor napětí. Na obou stranách vzorku byla vytvořena skupina devíti symetricky rozmístěných důlků. Ty jsou 3 mm hluboké s průměrem 15 mm na povrchu vzorku. Tyto rozměry byly odvozeny z tvarů skutečných důlků vytvořených korozí, jak bylo prezentováno např. v článku od kolektivu autorů Macho et al. [41]. Uspořádání důlků z hlediska globální geometrie bylo zvoleno s ohledem na výhodnost pro vyhodnocení.

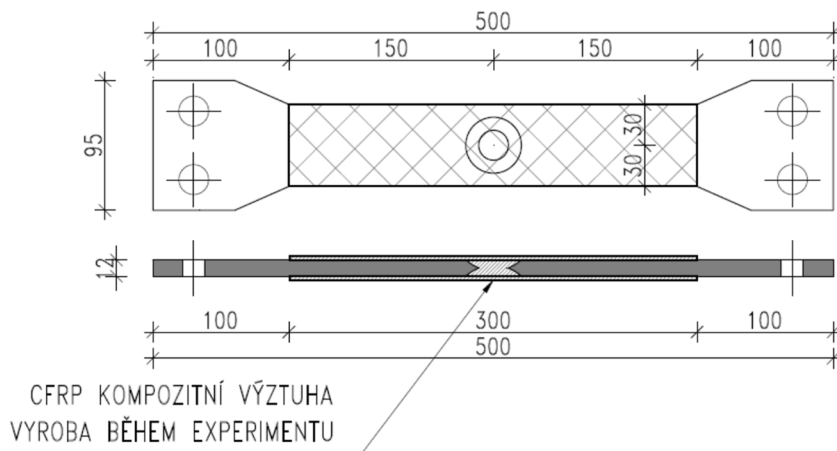
Z důvodů časové náročnosti únavových zkoušek nebyla tato sada vzorků nakonec využita pro únavové zkoušky. Byl pokusně zkoušen vzorek č. 8, ale nepodařilo se dosáhnout porušení.



Obrázek 46 Vzorek typ 1 schéma geometrie

Sada 2

Základní schéma vzorků sady č. 2 je na Obrázek 47 níže, podrobný výkres vzorků je součástí Příloh (A). V sadě č. 2 je celkem 28 vzorků. Z toho jsou 4 vzorky ponechány jako referenční nevyztužené a na zbytek bylo nanášeno kompozitní zesílení. Na vzorcích je simulováno těžké poškození ocelového prvku korozí. Otvor na vzorku představuje pozůstatek po odpadnutém nýtu s okorodovanými okraji nebo plné prokorodování ocelového prvku. Korodování otvoru je simulováno obrobením okrajů do špičky (viz Obrázek 47). Z těchto dvou scénářů je samozřejmě otvor po nýtu tou pravděpodobnější variantou, nicméně ani extrémní možnosti nelze přehlížet. Jako koncentrátor napětí slouží okraj otvoru.



Obrázek 47 Vzorek typ 2 schéma geometrie



Obrázek 48 Vzorek typ 2 vzorky z ocele S355

7.4.2 Kompozitní zesílení – pryskyřice a CFRP tkaniny

Vzorky jsou zesíleny pomocí CFRP tkanin ručně laminovaných z obou stran vzorku. Použité materiály byly určeny v první fázi přípravy experimentu. Technické listy všech uvažovaných materiálů jsou k dispozici v Příloze B.

Jako pojivo byla použita epoxidová pryskyřice SikaDur-300 od společnosti SIKA s.r.o., jelikož se jedná o nejdostupnější a nejpoužívanější výrobek na trhu. Dalším doporučením bylo navíc jeho časté využívání ve vědeckých pracích. Na určení optimálního vyztužení (tj. množství a typu uhlíkové tkaniny) byla provedena numerická studie (viz výše kap. 7.2).

Vzorky byly zesilovány metodou ruční laminace (tzv. metoda mokré laminace). Oproti využití prefabrikovaných lamel, které jsou obvykle používány při zesilování betonových konstrukcí, je tato metoda vhodnější pro použití na ocelových konstrukcích. Hlavní výhodou je tvarová flexibilita. U ocelových konstrukcí je předpokládáno použití primárně v místech náchylných na poškození únavou a korozí. To bývají zpravidla tvarově složité styčníky a obdobná špatně dostupná místa. Z tohoto důvodu by nebylo možné tuhé prefabrikované lamely efektivně použít. Je ovšem nutno uvést, že při použití ruční laminace je nutné dbát na její pečlivé provedení. Kvalita zesílení je totiž velmi závislá na důkladnosti provedení.



Obrázek 49 Tkanina CC600T-120 pásy připravené k laminaci

Použitá těžká tkanina CC600T-120 vyžaduje laminaci takzvaným mokrým procesem, aby došlo k dostatečnému prosycení celé tkaniny pojivem (epox. pryskyřicí). Postup provádění zesílení je následující. Nejprve jsou vzorky očištěny a odmaštěny. Následně byla na povrch nanesena podkladní pryskyřice SikaDur-330. Jedná se taktéž o epoxidovou pryskyřici na stejné bázi jako pryskyřice pojiva (SikaDur-300), od které se liší konzistencí. SikaDur-330 je použita jako podkladní vrstva. Jsou jí vyplněny všechny nerovnosti povrchu, zkoumané vady a povrch je tak pokryt tenkým filmem. Pokud je to možné, je nutné s nanášením vrstev uhlíkové tkaniny začít okamžitě, nejpozději ale do jedné hodiny od nanesení podkladní vrstvy. Poté se na této vrstvě pokračuje s vlastní laminací. Jedna kompozitní lamela se skládá celkem z 5+1 vrstev tkaniny. První vrstva je tvořena skelnou tkaninou a nemá nosnou funkci. Má zabránit styku uhlíkového vlákna s ocelí a vzniku galvanického článku. Zbylých pět vrstev má nosnou funkci a jsou tvořeny výše zmiňovanou uhlíkovou tkaninou. Každá vrstva tkaniny je nejprve nasycena pojivem a poté umístěna na vzorek. Nanesení všech vrstev musí proběhnout během doby zpracovatelnosti udávané výrobcem. Kompozit by měl ideálně před zatížením tvrdnout minimálně po dobu požadovanou výrobcem, v našem případě 5-7 dnů.

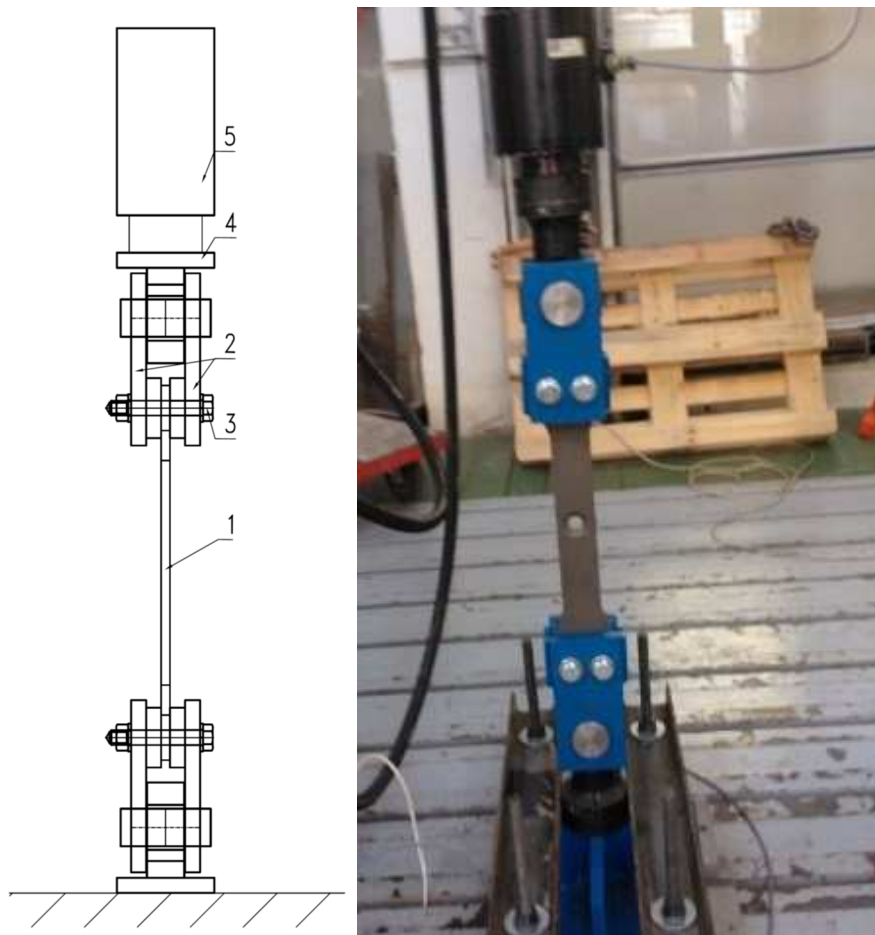


Obrázek 50 Tři stádia výroby zesílení – vzorek typ 1

Za účelem ověření chování modelu byla na několika vzorcích (č. 8 a č. 19) aplikována sada tenzometrů malých rozměrů. Byla změřena napětí před a po aplikaci zesílení v poškozených místech. Tyto tenzometry a jejich výstupy slouží pro validaci a verifikaci numerických modelů. Na ostatních vzorcích byly tenzometry v menším množství taktéž aplikovány. Zde bylo důvodem pozorování chování vzorku během únavové zkoušky. Na tenzometrech bylo ověřeno, že napětí v jednotlivých vzorcích si při použití stejné síly odpovídá. Také byly tyto tenzometry použity pro detekci růstu únavové trhliny pod zesílením.

7.4.3 Únavové zkoušky – uspořádání experimentu

Na vzorcích byly prováděny tahové únavové zkoušky. Průběh zkoušky vzorku byl následující. Vzorek byl upevněn do zkušební aparatury pomocí předepnutých šroubů. Schéma testovací soupravy viz Obrázek 51 níže.



Obrázek 51 Foto a schéma zatěžovací sestavy (1 - vzorek, 2 – upevňovací čelist – dvě části, 3 – předepnuté šrouby, 4 – ocelový kloub, 5 – zatěžovací jednotka a siloměr)

Poté byl vzorek cyklicky zatěžován tahovou silou s rozsahem určeným pomocí numerické analýzy. Cílem bylo napětí na oslabené části vzorku cca 150 MPa. Dle doporučení UIC [37] se jedná o únavový detail WII tedy kategorie

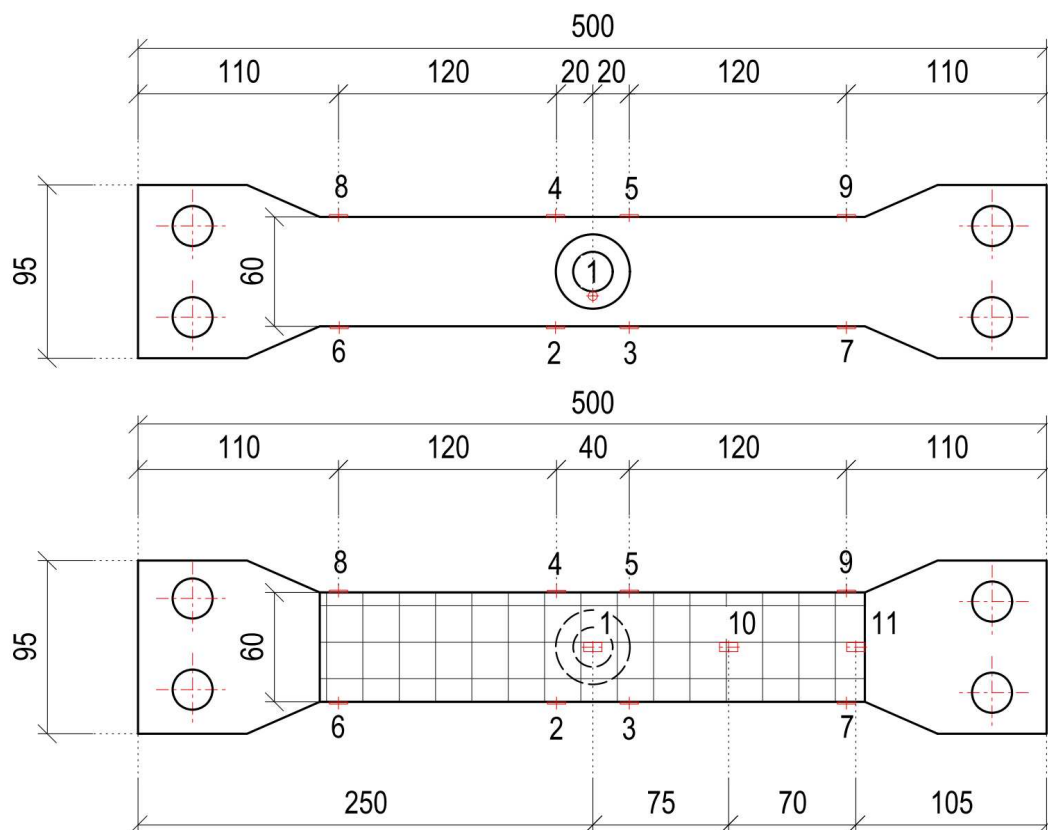
85 MPa. Zatěžování bylo prováděno při frekvenci 5 Hz. Dle posouzení únavové životnosti bylo předpokládáno, že při tomto rozsahu napětí má dojít k porušení přibližně po 260 tisících cyklech.

Experimenty byly prováděny v zkušební laboratoři Fakulty Stavební Českého vysokého učení technického v Praze.

7.5 Výsledky únavových zkoušek

7.5.1 Popis kalibračního vzorku

Před započítáním vlastních únavových zkoušek byla na vzorku č. 19 provedena zkouška tahem. Tato zkouška sloužila ke kalibraci tahové síly a k verifikaci, zda chování zatížených vzorků odpovídá předpokladům daným numerickým modelem. Při zkoušce byl vzorek postupně napínán v krocích. Při každém kroku byly změřeny hodnoty napětí na vzorku a byly porovnány s hodnotami z numerického modelu. Nejprve byl vzorek podroben testu nezesílený. Následně bylo na vzorek aplikováno zesílení, vzorek byl znovu po krocích zatěžován. Celkem bylo na vzorek aplikováno jedenáct tenzometrů (viz Obrázek 52). Tento počet byl omezen počtem dostupných měřicích kanálů. Rozložení tenzometrů na vzorku se mění při měření na nezesíleném a zesíleném vzorku.



Obrázek 52 Schéma rozmístění tenzometrů na vzorku 19

Tenzometry jsou na nezesíleném vzorku rozděleny do tří skupin podle funkce.

V první skupině je tenzometr č.1. Ten je umístěn přímo do místa nejvyššího napětí, kde je předpokládán vznik únavové trhliny. Tenzometrem je kontrolováno, zda nedochází k lokálnímu zplastizování materiálu. To by totiž mohlo ovlivnit výsledky únavových zkoušek.

Ve druhé skupině jsou tenzometry č. 2-5. Jsou umístěny 20 mm od středu vzorku. Toto umístění vyplynulo z přípravné numerické studie. V nejužším místě vzorku, na středu, dochází ke koncentraci napětí na okraji defektu a k mírnému poklesu napětí na vnějším okraji. Z tohoto důvodu bylo zvoleno umístění mírně posunutě, které ale lépe odpovídá průměrné hodnotě napětí ve středu vzorku. Jelikož není bok vzorku pokryt zesilující lamelou, lze odečtené hodnoty přímo porovnávat na nezesílených i zesílených vzorcích. V průběhu růstu únavové trhliny ve vzorku dochází na těchto tenzometrech k nárůstu napětí. Lze tak kontrolovat chování vzorku i v případě, kdy u zesílených vzorků není růst trhliny pod CFRP lamelou sledovatelný.

Ve třetí skupině jsou tenzometry č. 6-9. Ty jsou umístěny u rozšíření vzorku pro kotvení. Vzorky kontrolují, zda nedochází ke kumulaci napětí na přechodu ze zúžené části vzorku do kotevní části.

Pro vyhodnocení napínací síly jsou důležité pouze tenzometry ze skupiny 2. Ostatní slouží pouze ke kontrole, zda chování vzorku odpovídá předpokladům.

Na zesíleném vzorku došlo rozšíření skupiny tenzometrů č.1. Tenzometr 1 byl přesunut na povrch zesilující lamely a byly přidány tenzometry 10 a 11. Nově sloužila skupina 1 k ověření rozložení napětí po délce zesílení. Rozložení zbylých tenzometrů zůstalo stejné.

7.5.2 Kalibrace

Při kalibraci zatěžovací síly byla cílová hodnota napětí na tenzometrech skupiny 2 (2-5) 150 MPa. Jednotlivé teoretické zatěžovací kroky byly podle numerického modelu určeny na hodnoty síly 35 kN, 45 kN, 55 kN, 65 kN a 75 kN. Jelikož technické zařízení neumožňovalo zadání přesné hodnoty, byl vzorek nakonec zatěžován ve krocích 32 kN, 45 kN, 50 kN, 65 kN a 74 kN. Po každém zatěžovacím kroku byly naměřené hodnoty porovnány s numerickým modelem. Výsledky porovnání jsou shrnuty níže Tabulka 12:

Tabulka 12 Kalibrace modelu, nezesílený vzorek

		Tenzometry					
Síla [kN]		T1	T2	T3	T4	T5	
32	ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	837	326	287	308	318
	σ_s skutečné	[MPa]	176	68	60	65	67
	σ_m model	[MPa]	174	65	65	65	65
	σ_m / σ_s	[%]	99%	95%	108%	100%	97%
45	ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	1217	473	418	444	458
	σ_s skutečné	[MPa]	256	99	88	93	96
	σ_m model	[MPa]	240	90	90	92	91
	σ_m / σ_{sk}	[%]	94%	91%	103%	99%	95%
50	ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	-	717	683	699	699
	σ_s skutečné	[MPa]	-	151	143	147	147
	σ_m model	[MPa]	248	136	136	138	138
	σ_m / σ_{sk}	[%]	-	99%	99%	99%	99%
65	ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	-	748	697	712	712
	σ_s skutečné	[MPa]	-	157	146	150	150
	σ_m model	[MPa]	257	143	143	142	142
	σ_m / σ_s	[%]	-	91%	98%	95%	95%
74	ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	-	914	841	859	873
	σ_s skutečné	[MPa]	-	192	177	180	183
	σ_m model	[MPa]	386	178	178	180	180
	σ_m / σ_s	[%]	-	93%	101%	100%	98%

Z tabulky vyplývá, že požadavkům nejlépe odpovídá hodnota napětí při zatěžovací síle 65 kN. Tato hodnota byla proto zvolena pro cyklické zatěžování nezesílených vzorků. Na vzorku je generováno průměrné napětí 149 MPa.

Po doplnění zesílení byl vzorek znovu zatěžován. V tomto případě byly zvoleny již pouze dva zatěžovací kroky. Nejprve zatížení silou 65 kN a v druhém kroku zatížení silou 85 kN (předpoklad z numerického modelu). Výsledky jsou shrnuty v tabulce 13 níže.

Při zjišťování efektivity zesílení porovnáváme výsledky pro nezesílený a zesílený vzorek při použití síly 65 kN. Na vzorku pozorujeme pokles napětí. Z hodnoty 149 MPa kleslo naměřené napětí na hodnotu 113 MPa. Zesílení tedy snížilo napětí na vzorku na 75% původní hodnoty.

V druhém kroku určujeme sílu, při které je na vzorku generováno napětí cca 150 MPa. Při druhém zatěžovací kroku, silou 85 kN (viz Tabulka 13), odpovídají naměřené hodnoty požadavkům. Pro cyklické zatěžování zesílených vzorků byla

tudíž zvolena síla 85 kN, která na vzorku opět generuje napětí 150 MPa. Výsledky zkoušek je tak možno přímo porovnávat.

Tabulka 13 Kalibrace modelu, zesílený vzorek

Síla [kN]	Tenzometry		T1	T2	T3	T4	T5	T10	T11
	65	ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	638	587	526	512	539	445
	σ_s skutečné	[MPa]	134	123	110	108	113	93	5
	σ_m model	[MPa]	129	108	108	109	109	90	21
	σ_m/σ_s	[%]	96%	88%	98%	101%	96%	96%	400%
85	ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	754	751	667	677	699	519	24
	σ_s skutečné	[MPa]	158	158	140	142	147	109	5
	σ_m model	[MPa]	151	142	142	141	142	89	20
	σ_m/σ_s	[%]	95%	90%	101%	99%	97%	82%	397%

7.5.3 Únavové zkoušky

V únavových zkouškách byl měřen počet zatěžovacích cyklů do porušení vzorku. Proto byla zvolena odpovídající sí napětí pro nezesílené i zesílené vzorky.

Pro zatěžování vzorků byly zvoleny hodnoty harmonické síly:

- 3-65 kN při frekvenci 5 Hz pro nezesílené vzorky
- 3-85 kN při frekvenci 5 Hz pro zesílené vzorky

Pozn.: Rozkmit sil byl zmenšen o 3 kN, protože zkušební aparatura nedovoluje při cyklickém zatěžování nulovou hodnotu síly. Toto opomenutí bylo zjištěno až v průběhu zatěžování. Kvůli porovnatelnosti výsledků v zatěžování se v zatěžování pokračovalo se zmenšenými hodnotami.

Na testovaných vzorcích byly aplikovány 3 tenzometry, a to v polohách 2, 5 a 1 dle schématu (Obrázek 52) výše. Tenzometry sloužily k ověření napětí na vzorku a ke kontrole stálosti chování na vzorcích.

Jak již bylo zmíněno výše, byly pro zkoušky únavové pevnosti nakonec využity pouze vzorky sady 2. Sadu 1 nebylo možné použít z důvodu vysoké časové náročnosti experimentů. U sady 2 vede rozsáhlejší vada k většímu vrubovému účinku. S tím spojená vyšší koncentrace napětí umožňuje rychlejší vznik a vývoj trhliny. Rychleji dojde k porušení vzorku a tím pádem je možné vyzkoušení většího počtu vzorků. Vzorky sady 1 jsou uloženy ve skladu Katedry ocelových konstrukcí a je možné je využít k dalšímu výzkumu.

Celkem bylo v sadě 2 otestováno únavovou zkouškou 24 vzorků. Vzorky jsou rozděleny do tří skupin:

- skupina 1 – nezesílené, 4 kusy (č. 9-12)
- skupina 2 – zesílené, z plátkové oceli, 8 kusů (č. 17-24)

- skupina 3 – zesílené, z oceli S355, 12 kusů (č. 37, 38, 40-49)

Z výsledků zkoušky bylo nutné vyloučit vzorek č. 23. V důsledku poruchy na zkušebním zařízení byl totiž vzorek zničen.

Výsledky zkoušek jsou pro jednotlivé skupiny shrnuty v tabulkách (Tabulka 14, Tabulka 15, Tabulka 16) níže. Rozkmit napětí je brán jako průměr hodnot naměřených na tenzometrech 2 a 5. Jak bylo popsáno výše, vzorky byly zatěžovány tak aby si napětí na vzorcích odpovídalo. Přesto se ve výsledcích vyskytly odchylky. Je to dáno zejména nepřesností při výrobě vzorků, kdy otvory pro šrouby upevnění nebyly vyrobeny symetricky. V důsledku toho docházelo k přetěžování jedné ze stran vzorku a nárůstům v napětí na vzorku.

Tabulka 14 Výsledky – nezesílené vzorky

Vzorek č.	Ocel	Cyklů do porušení	Rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]
9	plávková	420218	157,29
10	plávková	311029	167,16
11	plávková	419435	149,42
12	plávková	398959	149,42

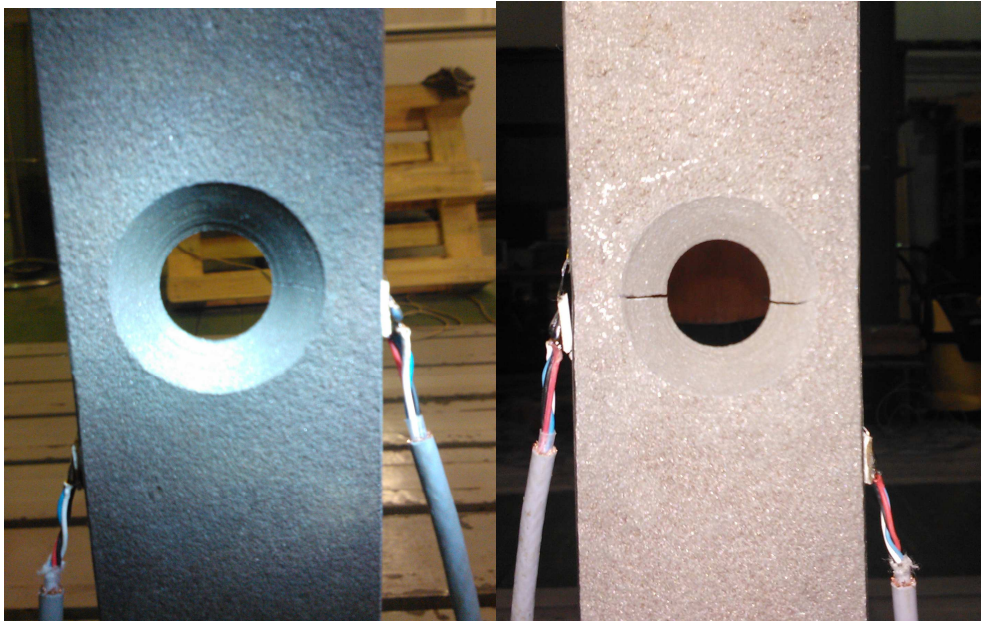
Tabulka 15 Výsledky – zesílené vzorky. plávková ocel

Vzorek č.	Ocel	Cyklů do porušení	Rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]
17	plávková	312171	194,35
18	plávková	267695	190,36
19	plávková	566911	192,88
20	plávková	415920	182,38
21	plávková	559784	150,67
22	plávková	743658	154,56
23 *	plávková	(553663)	(154,66)
24	plávková	488416	179,76

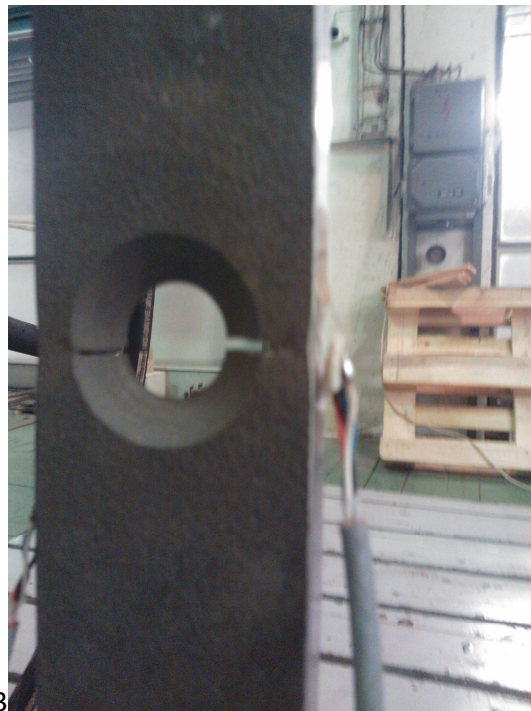
* vzorek zničen při poruše přístroje

Tabulka 16 Výsledky – zesílené vzorky. S355

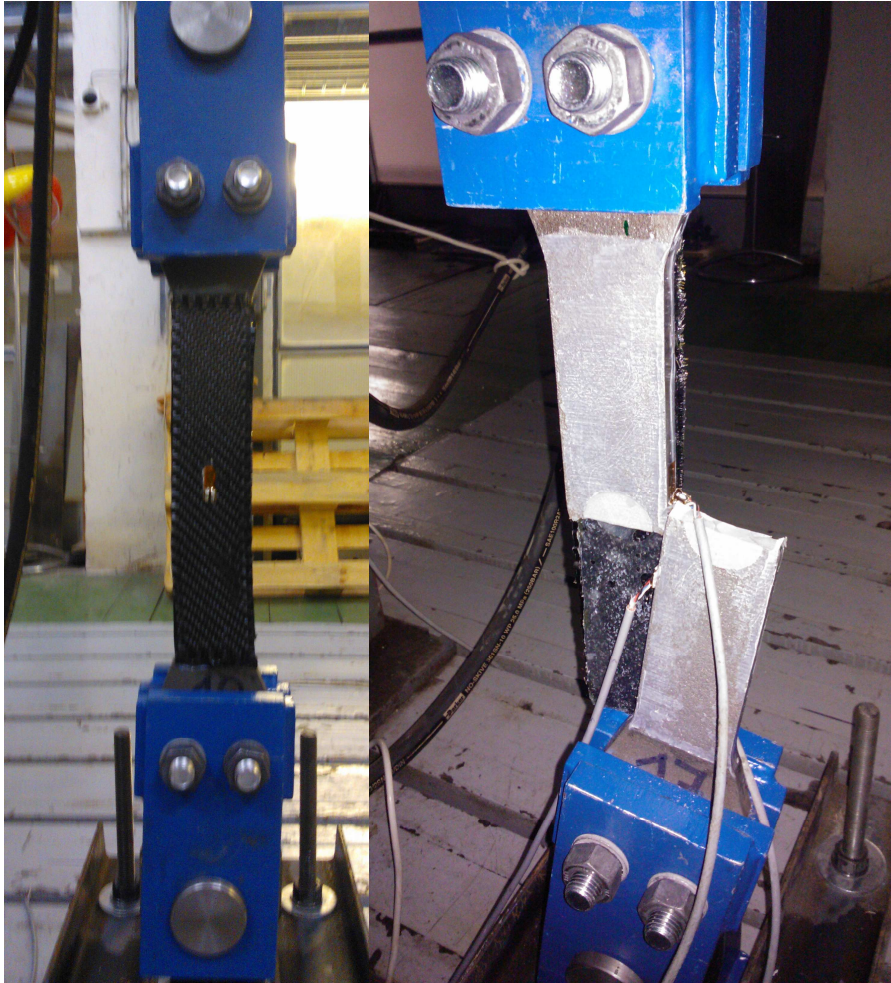
Vzorek č.	Ocel	Cyklů do porušení	Rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]
37	S355	813412	146,58
38	S355	840000	159,60
40	S355	1884210	155,51
41	S355	952783	169,26
42	S355	1200000	159,92
43	S355	965800	160,97
44	S355	827376	139,86
45	S355	912235	145,11
46	S355	792169	173,88
47	S355	807911	156,14
48	S355	863052	133,88
49	S355	997653	155,51



Obrázek 53 Foto nezesílený vzorek – růst únavové trhliny



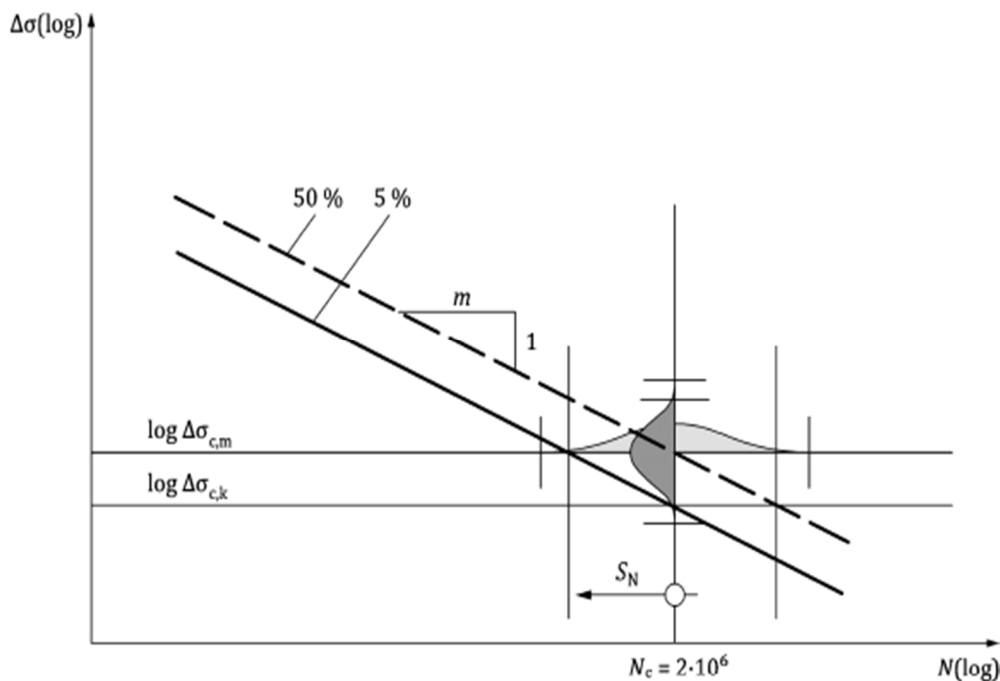
Obrázek 54 Foto nezesílený vzorek –únavová trhлина těsně před porušením



Obrázek 55 Foto zesílený vzorek – počátek zatěžování (vpravo); po porušení vzorku (vlevo)

7.5.4 Únavové zkoušky – vyhodnocení

Pro vyhodnocení zkoušek a určení únavových detailů pro zesílené prvky byla provedena analýza výsledků. Postupovalo se ve dvou krocích. Nejprve je pomocí lineární regresní analýzy určena průměrná hodnota únavového detailu pro naměřené hodnoty ($\Delta\sigma_{c,mean}$). V druhém kroku je z průměrné hodnoty určena hodnota charakteristická ($\Delta\sigma_{c,k}$), tj. hodnota pro 5% kvantil (viz Obrázek 56 níže).



Obrázek 56 Určení charakteristické hodnoty únavového detailu

Pro vyhodnocení jsou hodnoty převedeny na logaritmy

$$x_i = \log \Delta\sigma_i \quad y_i = \log N_i \quad (7-1)$$

kde:

$\Delta\sigma_i$ je naměřený rozkmit napětí na vzorku č. i

N_i je odpovídající počet cyklů do porušení pro na vzorek č. i

1) Vzorky zesílené, plávková ocel

Soubor naměřených dat je shrnut v tabulce níže (Tabulka 17). Pro zpracování jsou výsledky převedeny na logaritmy (7-1) Soubor je považován za dvourozměrný statistický soubor.

Tabulka 17 Soubor dat pro plávkovou ocel viz Tabulka 15

n	i	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta\sigma$	[Mpa]	194,35	190,36	192,88	182,38	150,67	154,555	179,755
x_i	[log $\Delta\sigma$]	2,289	2,280	2,285	2,261	2,178	2,189	2,255
N_i	[počet]	312171	267695	566911	415920	559784	743658	488416
y_i	[log N_i]	5,494	5,428	5,754	5,619	5,748	5,871	5,689

Charakteristiky souboru jsou

Průměr z hodnot x_i $\bar{x} = 2,248$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum x_i \quad (7-2)$$

Průměr z hodnot y_i $\bar{y} = 4,873$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} * \sum y_i \quad (7-3)$$

Směrodatná odchylka hodnot x_i - s_x $s_x = 0,0425$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (7-4)$$

Směrodatná odchylka hodnot y_i - s_y $s_y = 0,763$

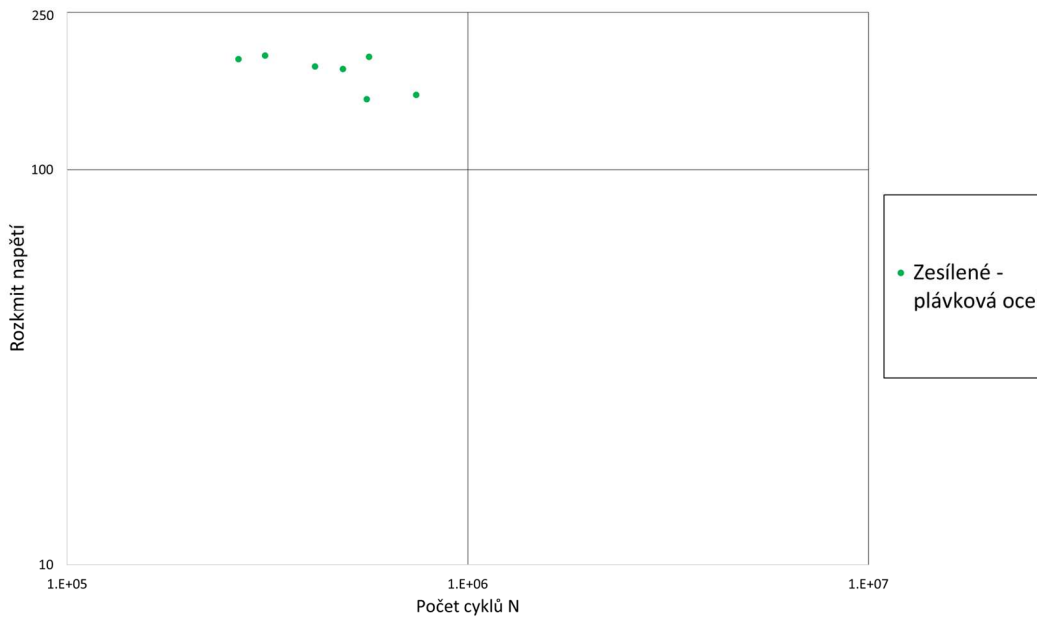
$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (7-5)$$

Kovariance souboru závislých dat s_{xy} $s_{xy} = -0,00422$

$$s_{xy} = \frac{1}{n} * (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}) \quad (7-6)$$

Korelační součinitel souboru dat $r_{xy} = -0,13027$

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\frac{1}{n} * (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n} * \frac{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}} \quad (7-7)$$



Obrázek 57 Bodový diagram výsledků zkoušek (log měřítka)

Regresní přímka zachycuje závislost jedné z veličin X a Y na druhé. Určení regresní přímky veličiny X na veličině Y je vyjádřena rovnicí:

$$X = b_0 + b_1 * Y \quad (7-8)$$

Kde hodnoty regresních koeficientů b_0 a b_1 jsou odvozeny z požadavku minima součtu čtverců reziduí, vyjádřeného vztahem:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - b_0 - b_1 y_i)^2 \quad (7-9)$$

Poté z podmínky nulových prvních parciálních derivací součtu (7-9) vyplývá, že minimum nastane pro koeficienty:

$$b_0 = \bar{x} - r_{xy} * \bar{x} * \frac{s_x}{s_y} \quad (7-10)$$

$$b_1 = r_{xy} * \frac{s_x}{s_y} \quad (7-11)$$

Dosazením hodnot do (7-10) a (7-11) tedy dostaneme regresní křivku s koeficienty:

$$b_0 = 2,25 - 0,13 * 2,25 * (0,042/0,76) = 2,264$$

$$b_1 = -0,13 * (0,042/0,76) = -0,00725$$

$$X = 2,264 + -0,00725 * Y \quad (7-12)$$

Do rovnice (7-12) dosadíme hodnotu pro $N = 2 * 10^6$ cyklů

$$Y = \log(2 * 10^6) = 6,301$$

Z (7-12) vyjde hodnota $X_{c,mean} = \log \Delta \sigma_{c,mean}$

$$X_{c,mean} = 2,264 + -0,00725 * 6,301 = 2,219$$

Potom určíme hodnotu únavové pevnosti $\Delta \sigma_{c,mean}$ ze vzorce (7-1)

$$\Delta \sigma_{c,mean} = 10^X = 10^{2,219} = 165,439 \text{ MPa}$$

Pro určení charakteristické hodnoty předpokládáme normální rozdělení pravděpodobnosti kolem hodnoty $X_{c,mean}$ s konfidencí 95%. A hledáme 5% kvantil $p_{0,05}$. Jelikož odchylka základního souboru není obecně známa, je odhadnuta na základě residuální odchylky kolem regresní přímky.

$$s_{x|y} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - b_0 - b_1 y_i)^2}{n-2}} \quad (7-13)$$

Odhad směrodatné odchylky souboru dat dosazením do (7-13)

$$s_{x|y} = 0,0574$$

Odhad charakteristické hodnoty je potom určen jako $p_{0,05}$ ze vztahu:

$$x_{p,cover} = X_{c,mean} - \kappa_p * s_{x|y} \quad (7-14)$$

$$\text{kde } \kappa_p \quad \text{pro } n=7 \text{ a } \gamma=0,95 \quad = 3,45$$

Potom dosazením do (7-14)

$$x_{p,cover} = 2,219 - 3,45 * 0,0574 = 2,0206$$

Ze vzorce (7-1) určíme hodnotu $\Delta \sigma_{c,k}$

$$\Delta \sigma_{c,k} = 10^{x_{p,cover}} = 10^{2,0206} = \mathbf{104,86 \text{ MPa}}$$

Pro únavový detail zesíleného průřezu z plávkové oceli dostáváme hodnotu 104,86 MPa.

2) Vzorok zesílené, S355

Soubor naměřených dat je shrnut Tabulka 18 níže. Pro zpracování jsou výsledky převedeny na logaritmy (viz (7-1)). Soubor je považován za dvourozměrný statistický soubor. Zpracování souboru je stejné jako souboru 1, viz výše.

Tabulka 18 Soubor dat pro ocel S355, viz Tabulka 16

n	i	1	2	3	4	5	6
$\Delta\sigma$	[Mpa]	146,58	159,6	155,505	169,26	159,915	160,965
x.i	[log $\Delta\sigma$]	2,166	2,203	2,192	2,229	2,204	2,207
Ni	[počet]	813412	840000	1884210	952783	1200000	965800
y.i	[logNi]	5,910	5,924	6,275	5,979	6,079	5,985
n	i	7	8	9	10	11	12
$\Delta\sigma$	[Mpa]	139,86	145,11	173,88	156,135	133,875	155,505
x.i	[log $\Delta\sigma$]	2,146	2,162	2,240	2,194	2,127	2,192
Ni	[počet]	827376	912235	792169	807911	863052	997653
y.i	[logNi]	5,918	5,960	5,899	5,907	5,936	5,999

Charakteristiky souboru jsou

Průměr x $\bar{x} = 2,188$

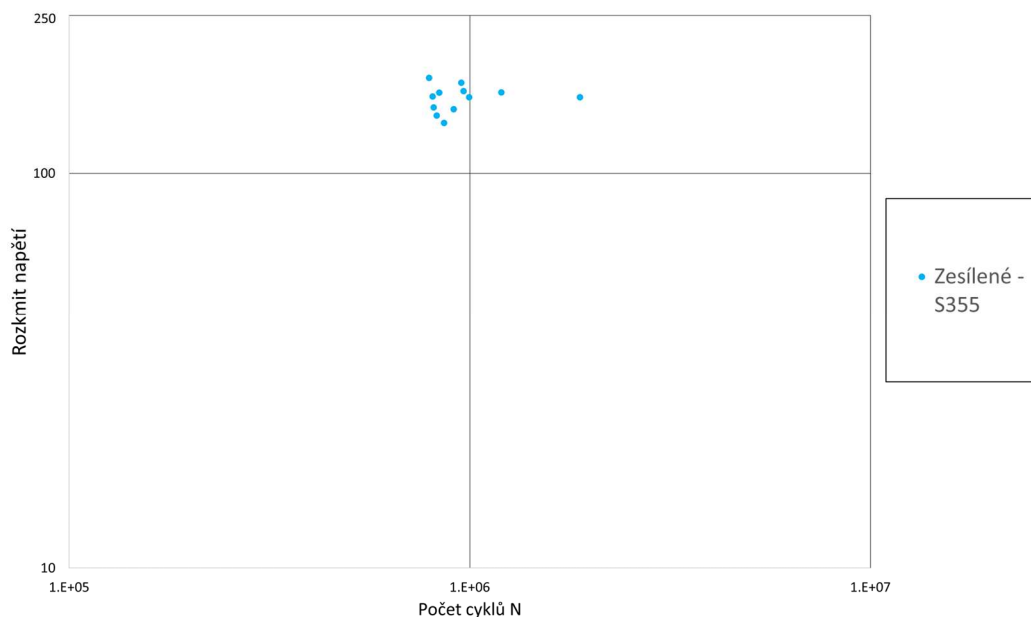
Průměr y $\bar{y} = 5,981$

Směrodatná odchylka $s_x = 0,0316$

Směrodatná odchylka $s_y = 0,8209$

Kovariance $s_{xy} = 0,0069$

Korelační součinitel $r_{xy} = 0,2652$



Obrázek 58 Bodový diagram výsledků zkoušek (log měřítka)

Určení regresní přímky z rovnice:

$$X = b_0 + b_1 * Y$$

kde:

$$b_0 = \bar{x} - r_{xy} * \bar{x} * \frac{s_x}{s_y}$$

$$b_1 = r_{xy} * \frac{s_x}{s_y}$$

$$b_0 = 2,19 - 0,26 * 2,19 * (0,032/0,82) = 2,166$$

$$b_1 = -0,26 * (0,032/0,82) = 0,01021$$

Do rovnice dosadíme hodnotu pro $N = 2 * 10^6$ cyklů

$$Y = 6,301$$

A vyjde hodnota $\log \Delta \sigma_{c,mean}$

$$X_{c,mean} = 2,166 + -0,01021 * 6,301 = 2,23$$

$$\Delta \sigma_{c,mean} = 10^X = 10^{2,23} = 169,934 \text{ MPa}$$

Pro určení charakteristické hodnoty předpokládáme normální rozdělení pravděpodobnosti s konfidencí 95%. A hledáme 5% kvantil $p_{0,05}$.

$$\text{Odhad směrodatné odchyly souboru dat} \quad s_{x|y} = 0,05466$$

$$x_{p,cover} = X_{c,mean} - \kappa_p * s_{x|y}$$

$$\kappa_p = \quad \text{pro } n=7 \text{ a } \gamma=0,95 \quad 2,859$$

$$x_{p,cover} = 2,23 - 2,859 * 0,05466 = 2,074$$

$$\Delta \sigma_{c,k} = 10^{x_{p,cover}} = 10^{2,074} = \mathbf{118,575 \text{ MPa}}$$

Pro únavový detail zesíleného průřezu oceli S355 dostáváme hodnotu 118,58 MPa.

7.5.5 Únavové zkoušky – zhodnocení výsledků

Při vyhodnocování výsledků únavových zkoušek jsem došel k těmto závěrům.

Hodnoty únavové pevnosti (kategorie detailu) jsou různé pro vzorky z plávkové ocele z roku 1882 (104 MPa) a vzorky ze současné plávkové ocele S355 (118 MPa). Tento rozdíl lze nejlépe vysvětlit rozdílnou vrubovou houževnatostí materiálů. Moderní materiál má jemnější vnitřní krystalickou strukturu, vyšší vrubovou houževnatost a tím odolává únavovému zatížení lépe. Při určování kategorie detailu zesílení bych doporučoval z hlediska bezpečnosti zvolit nižší z obou hodnot, tj 104 MPa.

Při kalibrační zkoušce byla ověřena efektivita zesílení. Tedy zda pokles napětí v zesíleném vzorku odpovídá množství použitého zesilujícího materiálu. Při zatížení vzorku stejnou tahovou silou 65 kN došlo k poklesu napětí ze 149 MPa na 113 MPa, tj. cca na 75% původní hodnoty. Což odpovídá hodnotě předpokládané při přípravě experimentu. Pro potřeby této práce to nazývám primárním efektem.

Nicméně únavové zkoušky byly koncipovány tak, aby primární efekt byl vyloučen. Jejich účelem bylo porovnat, jak se při stejném napětí chovají zesílené a nezesílené vzorky. Předpokladem bylo, že se chování nebude příliš lišit. Bude platit kategorie detailu 85 MPa a oba typy vzorků se poruší po obdobném množství cyklů.

Výsledky pokusů ovšem plánovaným předpokladům neodpovídají. Zesílené vzorky se porušovaly při vyšším počtu cyklů. Následným výpočtem jsem určil, že hodnota únavového detailu zesíleného vzorku je 104 MPa. Zesílení má tedy ještě další nepředvídaný efekt. Pro potřeby této práce jej nazývám sekundárním efektem. Toto zlepšení únavové pevnosti konstrukčního detailu je dáno změnou geometrie a tím změnou rozložení koncentrací napětí ve vzorku. Následkem toho dochází ke zlepšení vrubového působení zesílené oblasti. Změny jsou způsobeny aplikací nutné podkladní vrstvy. Tou jsou vyplněny vady, nerovnosti a trhliny existující na povrchu materiálu. To má za následek, že dojde ke zmenšení koncentrací napětí. Díky tomu se prodlužuje doba iniciace trhlín a zároveň to vede k pomalejšímu růstu trhlín. Uzavření povrchu ocele pod zesílením zároveň působí jako protikorozní ochrana. Je zabráněno dalšímu nárůstu koroze materiálu a případným negativním vlivům koroze na růst únavových trhlín.

7.6 Zkoušky klimatické odolnosti

Tato práce se zabývá aplikací CFRP zesílení na reálných konstrukcích. Proto je nedílnou součástí výzkumu chování CFRP zesílení ověření odolnosti vůči vlivům okolního prostředí. Hlavním cílem této práce je ověření chování zesílení aplikovaného na mostních objektech. Je téměř jisté, že zesílení bude někdy po dobu aplikace vystaveno nepříznivým klimatickým vlivům a agresivním chemickým sloučeninám (zde jsou míněny hlavně chloridy).

Chemické a klimatické odolnosti FRP kompozitů se věnují již výše v části kapitol 5.2.3 a 5.3.3. Z provedené state-of-the-art rešerše vyplývá, že z teplot má na materiál lamely větší vliv teplota záporná. Změny vlastností od vysokých teplot začínají až v důsledku takových hodnot, které v obvyklé situaci na zesílení nenastanou. Naopak vyšší teplota má často pozitivní vliv na zesilující lamelu, jelikož dochází k jejímu vytvrzování. Naproti tomu změny v materiálových vlastnostech kompozitu při nízkých teplotách začínají již od -10°C . K tomu je ovšem nutné poznamenat, že, na rozdíl od poškození vysokou teplotou, není úbytek pevnosti zdaleka tak dramatický. Jedná se o úbytek v řádu jednotek procent. Proto je nutné vyzkoušet testované vzorky a určit tak přesně míru ovlivnění navrženého zesílení. Současně s nízkými teplotami se často vyskytuje působení rozmrazovacích solí. Slané prostředí může kompozit dále oslabit a koroze na styku FRP lamely a oceli by mohla vést k odlupování okrajů vlivem podkorodování.

Vliv vysoké teploty se projevuje hlavně na vlastnostech adhezní vrstvy. Ta je ohřívána přímo ocelovou konstrukcí. Proto byly zkoušky smykové pevnosti rozšířeny o zkoušky za různých teplot (viz výše). Z nich vyplynulo, že na rozdíl od lamely je pokles materiálových vlastností adhezní vrstvy přibližně stejný pro nízkou i vysokou teplotu. Tento pokles je pro navrhování ošetřen v Eurokódu materiálovým součinitelem (viz výše).

Významným faktorem při návrhu je odlišný součinitel teplotní roztažnosti. Zatímco pro ocel je $\alpha = 12 \times 10^{-6}$, pro uhlíkové vlákno je cca $\alpha = -0,41 \times 10^{-6}$, přičemž pro výsledný laminát může být značně proměnný, s ohledem na použitou pryskyřici. V důsledku tohoto jevu pak dochází ke vzniku napětí na rozhraní materiálů. Cílem naplánovaných zkoušek bylo ověřit, zda toto pnutí může vést k separaci a rozpadu prvku.

Během příprav experimentů byla konzultována úprava povrchu vzorků s Ing. Kudláčkem, Ph.D., z Fakulty strojní, Ústavu strojírenských technologií, Skupiny Povrchové úpravy. Kromě úpravy povrchu vzorků před nanesení kompozitu byla rovněž konzultována ochrana povrchu s kompozitní lamelou. Z konzultací vyplynulo, že nejbezpečnější způsob úpravy povrchu je nanášet standardní protikorozní nátěry i přes kompozitní lamelu. Tím se předejde jak možnosti odloupení lamely koroze na styku s ocelí, tak i ovlivnění materiálu kompozitu chemickým působením.

Z těchto důvodů byly připraveny dvě zkoušky, vystavení vzorků mrazu v suchu a vystavení mrazovým cyklům při částečném ponoření v solném roztoku.

7.6.1 Zatěžování pouze mrazem

První bylo zatížení pouze suchým mrazem bez použití solného roztoku. Zkoušce byly podrobeny vzorky 19, 20 a 24. Během zkoušky byly vzorky vystaveny cyklickému namáhání zmražení – rozmražení v klima-komoře. Cyklus je rozdělen do čtyř částí, každá trvá 1,5 hod. Nejprve je vzorek z pokojové teploty (20 °C) ochlazován na -20 °C, následně je teplota držena na této úrovni. Poté je teplota zvedána zpět na 20 °C a opět držena na této úrovni. Poté dojde k zopakování cyklu. Celkem byly vzorky vystaveny 100 cyklům. Po ukončení cyklování byl vzorek č. 19 podroben statické zatěžovací zkoušce silou 85 kN. Výsledky přetvoření jsou porovnány se stavem před provedením zkoušky.

Tabulka 19 Výsledky – vzorek 19, porovnání měřených hodnot před/po mraz. cyklech

		Tenzometry		T1	T2	T3	T4	T5
Sila [kN]								
85	ϵ	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	754	751	667	677	699	
	σ před mraz. c.	[MPa]	158	158	140	142	147	
	ϵ	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	763	755	662	633	702	
	σ po mraz. c.	[MPa]	160	159	139	133	147	
	$\sigma_{\text{.před}} / \sigma_{\text{.po}}$	[%]	101%	101%	99%	94%	100%	

Z výsledků vyplývá že mrazové cykly nemají dlouhodobý vliv na chování vzorku. Na druhou stranu je nutné podotknout, že pokus nevypovídá nic o chování vzorku při nízké teplotě.

U vzorků 20 a 24 je zkoumáno, zda dojde k vizuálně rozpoznatelnému porušení vzorku. Byl porovnán stav vzorků před a po zkoušce. Ten je dokumentován na fotografiích níže. Aby se předešlo vzniku koroze na vzorku oceli, byly navíc vzorky opatřeny zinkovým nástřikem.



Obrázek 59 Vzorek připravený pro zkoušku mrazem



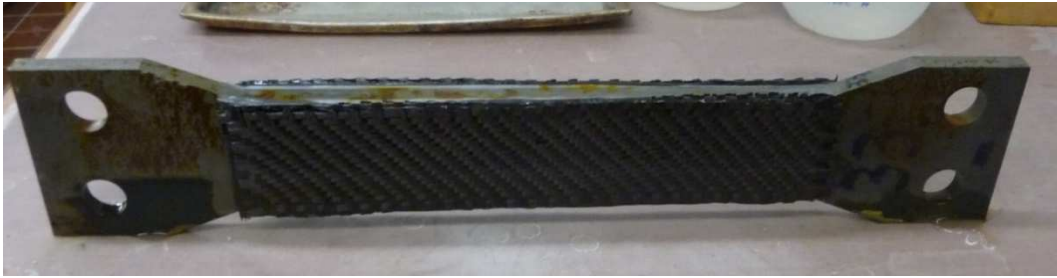
Obrázek 60 Klima-komora použitá při zmrazování – Experimentální centrum FSv ČVUT

Všechny tři vzorky byly po experimentu s mrazovými cykly podrobeny i únavovým zkouškám. Jejich výsledky jsou prezentovány výše. Z nich vyplývá, že chování vzorků během zkoušek nebylo proběhlými mrazovými cykly nijak ovlivněno.

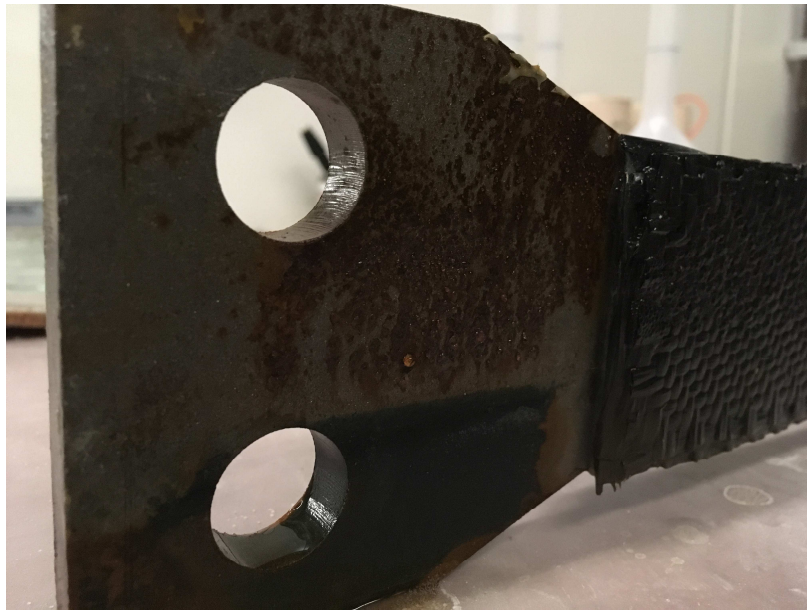
7.6.2 Zatěžování mrazem a roztokem NaCl

Druhou zkouškou bylo zatížení mrazem v 5 % solném roztoku. Zkoušce byly podrobeny vzorky 33 a 34. Během zkoušky byly vzorky vystaveny cyklickému namáhání zmražení – rozmražení v klima-komoře. Cyklus je rozdělen do čtyř částí každá trvá 1,5 hod. Nejprve je vzorek z pokojové teploty (20 °C) ochlazován na - 20 °C, následně je teplota držena na této úrovni. Poté je teplota zvedána zpět na 20 °C a opět držena na této úrovni. Poté dojde k zopakování cyklu. Celkem proběhlo cca 5 cyklů/den. Vzorky nebyly opatřeny PKO ochranou a byl sledován

vliv koroze na soudržnost lamely a podkladního materiálu. Celkem proběhlo 1830 cyklů, tj. cca 1,5 roku cyklování.



Obrázek 61 Vzorek 33 – po 2 týdnech cyklování ve slaném roztoku



Obrázek 62 Vzorek 33 – po půl roku cyklování ve slaném roztoku



Obrázek 63 Vzorek 33 – po 1 roce cyklování ve slaném roztoku

Ani po všech proběhlých cyklech nebyly pozorovány žádné známky poškození styku ocel/adhezní vrstva. Podkladní adhezní vrstva působí jako protikorozi ochrana.

7.7 Zkoušky klimatické odolnosti – dlouhodobý monitoring

Pro ověření aplikačních postupů a dlouhodobého chování zesílení v reálném provozu bylo zesílení experimentálně osazeno na používanou mostní konstrukci. Ve spolupráci se Správou železnic, státní organizací, byla vybrána mostní konstrukce, na níž bylo povoleno zesílení osadit. Na mostě byla vybrána dvě místa – diagonála a dolní pás. Diagonála byla zvolena pro snadný přístup a možnost kontroly bez nutnosti vstupu do kolejiště. Na dolním páse byl zkoušen aplikační proces zesílení na korozně degradovaném detailu. Vzhledem k požadavkům Správy železnic, státní organizace, aby nedošlo k narušení vzhledu mostu, bylo zesílení aplikováno pouze na horní povrch pásnice. Jelikož je ale materiál korozně oslaben primárně shora, neměl tento požadavek na vyzkoušení aplikačních postupů vliv.



Obrázek 64 Zesílení diagonály, před (vlevo), uhlíková lamela (střed), po aplikaci PKO (vpravo)

Nejnáročnější na provádění zesílení je koordinace jednotlivých postupů, tj. příprava povrchu, aplikace zesílení a provedení protikorozi ochrany. Ty od sebe nemohou být časově příliš vzdáleny, aby nedošlo k znehodnocení zesílení. Samotný proces aplikace byl poměrně jednoduchý a časově nenáročný. Příprava tkanin a materiálů probíhá předem. Na místě je nutné zajistit pouze dostatečný prostor pro sycení tkanin a určit vhodnou metodu přenosu z místa sycení na místo aplikace. Celkem zabral proces aplikace i s přípravou 1 hodinu. Po dvou dnech již laminát vytvrdnul natolik, že bylo možné přistoupit k povrchovým úpravám, tj. k obroušení

přečnívajících částí. Úpravy povrchu je samozřejmě možné provádět i později, na příklad před začátkem nanášení vrstev protikorozi ochrany.



Obrázek 65 Most– dolní pás po otryskání koroze



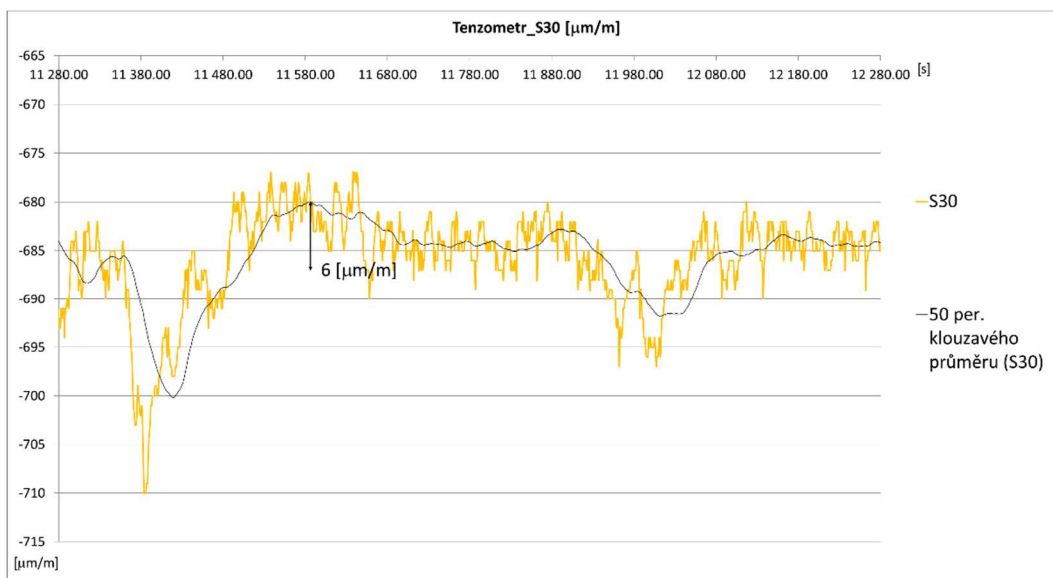
Obrázek 66 Zesílení dolního pásu



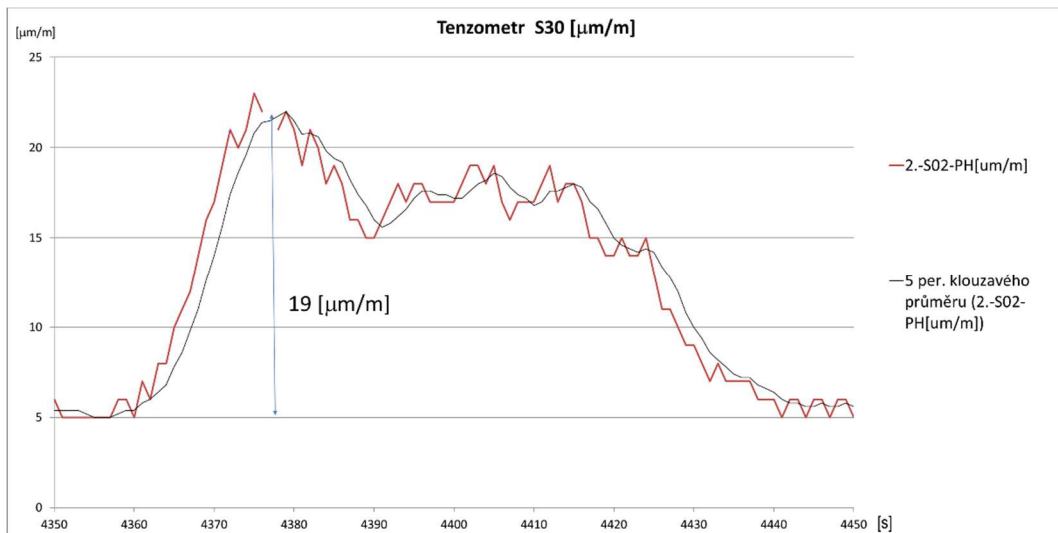
Obrázek 67 Zesílení dolního pásu po aplikaci PKO

Zkouška aplikačních postupů probíhala v době, kdy na mostní konstrukci byly prováděny zatěžovací zkoušky a příprava pro dlouhodobý monitoring konstrukce. Proto jsme využili této příležitosti a rozhodli se rozšířit zkoušku o tenzometrické měření chování zesíleného dolního pásu. Bylo předpokládáno, že s postupným tuhnutím kompozitu a aktivací zesílení budeme pozorovat pokles napětí v pásnici dolního pásu.

Na grafech (Obrázek 68, Obrázek 69) níže jsou výsledky naměřené při průjezdu soupravy CityElefant. Na rozdíl od předpokladu nedošlo k snížení napětí, ale k jeho zvýšení.



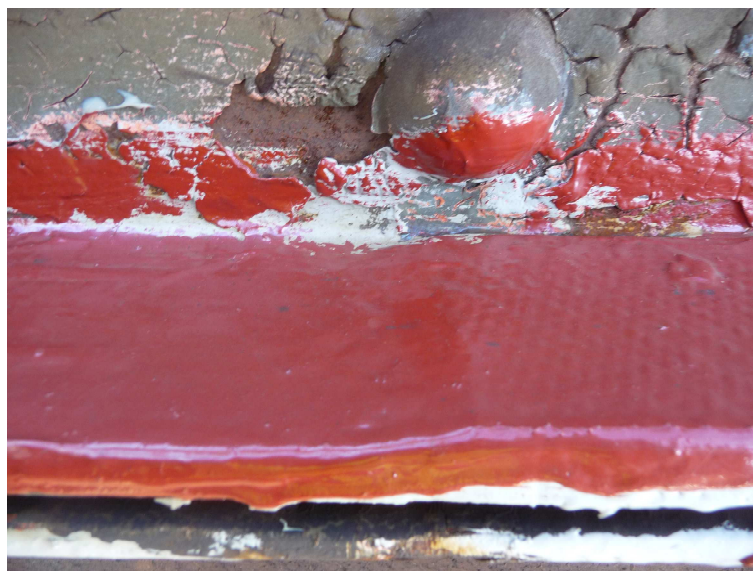
Obrázek 68 Průběh poměrné deformace 1 den po aplikování zesílení



Obrázek 69 Průběh poměrné deformace 45 dní od aplikování zesílení, tenzometr vynulován

Tento rozdíl oproti předpokladu je dán stavem mostní konstrukce. Jak je vidět na Obrázek 65 výše, je materiál pásnice dolního pásu kompletně zkorodován. Pásnice tak nemůže působit tak, jak byla navržena. V tomto případě tedy aplikací zesílení nedošlo k snížení napětí v konstrukci, neboť do odkorodované pásnice se žádné napětí nepřenáší, ale došlo k obnovení působení pásnice. Což vysvětluje nárůst napětí. Z výsledků je patrné, že zesílení může být aplikováno i na konstrukci v běžném provozu. Zesílení začíná působit postupně tak, jak epoxydová matrice tuhne a tím dochází k jeho aktivaci.

Na obrázku níže (Obrázek 70) je stav zesílení diagonály po jednom roce od aplikace. Bohužel vzhledem k plánovanému nahrazení konstrukce je možné, že tento experiment bude předčasně ukončen.



Obrázek 70 Zesílení diagonály, 1 rok od aplikace

8 Metodika aplikování CFRP zesílení

Dosavadní výzkum i mnou provedené experimenty ukazují, jaký potenciál má využití uhlíkových kompozitů pro opravy degradovaných ocelových konstrukcí. V tomto výzkumu jsem se podrobně zabýval zkoumáním použití uhlíkových kompozitů vytvořených mokřým procesem in-situ. Správné použití této metody umožňuje rychlou a flexibilní opravu konstrukcí. Popsané zesílení umožňuje snížit napětí a změnit rozložení koncentrací napětí na detailu. Díky tomu je možné prodloužit dobu iniciace a zpomalit růst únavové trhliny. Tím se prodlouží životnost konstrukce. Toto zesílení ale není samozřejmě vhodné použít ve všech případech. V následující kapitole proto popisuji rozhodovací proces pro užití a návrh zesílení z CFRP kompozitu.

8.1 Jak a kdy lze použít

8.1.1 Postup určení vhodného zesílení

V této kapitole je uveden rozhodovací proces o využití uhlíkových kompozitů. V prvním kroku je třeba stanovit rozsah závady. Uvažujeme o rozsáhlém korozním oslabení na konstrukci s případně již iniciovanou únavovou trhlinou. Rozsah závady musíme uvažovat ze dvou hledisek. Za prvé z hlediska dopadů poškození na konstrukci a za druhé z hlediska očekávané doby, po kterou bude zesílení osazeno.

Z hlediska dopadů je CFRP zesílení vhodné spíše pro opravy vedlejších a méně důležitých nosných prvků. Navrhovaný způsob využití je jako prevence dalšího poškození. Vzhledem k snadnosti a rychlosti aplikace, lze uvažovat i o využití při havarijních situacích, jako krátkodobou překlenovací opravu do aplikace trvalého řešení.

Z hlediska doby osazení je nutné mít na paměti, že chování CFRP zesílení není v dlouhodobých časových horizontech (desítek let) ještě dostatečně prozkoumáno. Nicméně jako řešení na kratší dobu, deset-patnáct let, se CFRP zesílení jeví jako vhodný a výhodný způsob opravy. Například lze použít toto zesílení na preventivní opravy konstrukcí před koncem doby životnosti, tak aby byla zajištěna spolehlivost konstrukce.

Pokud jsme rozhodli, že je v našem případě využití CFRP zesílení vhodné, pak musíme rozhodnout jakou metodu zesílení zvolíme. Metoda je přímo závislá na typu konstrukce a na umístění poškození na konstrukci.

8.1.2 Metody zesilování CFRP

Pro zesílení pomocí CFRP jsou k dispozici dvě metody.

1) Zesílení prefabrikovanou CFRP lamelou

V tomto případě se k zesílení používají komerčně dostupné CFRP lamely. Mohou být i vyrobené přímo na zakázku. S podkladem jsou spojeny pomocí adhezního pojiva, případně i šroubovaným kotevním systémem. Výhodou je, že materiálové charakteristiky jsou předem přesně známy a homogenita materiálu je garantována výrobcem. Lamely jsou dodány již jako hotové pevné kusy. Toto omezuje rozsah jejich použití. Pro pevnou lamelu je nutný rovný povrch. Neuplatní se tak při zesilování tvarově členitých prvků, např.: nýtovaných nosníků, či povrchů s rozsáhlou korozí.

Zvláštním případem zesílení prefabrikovanou lamelou je využití předpětí. To je neúčinnější metodou omezení růstu únavové trhliny. Při dostatečné předpínací síle je možné růst trhliny zcela zastavit. Jeho použití je ale omezené pouze na dostatečně dlouhé přímé prvky. Složitě je také kotvení lamely. Na konstrukci musí být prostor pro mohutné upevnění kotvení a také prostor pro aktivaci předepnutí. Z hlediska efektivity je také vhodné konstrukci při zesilování odtížit, což sebou nese omezení dopravy na konstrukci.

2) Zesílení CFRP lamelou vyrobenou in-situ

V tomto případě je k zesílení použit takzvaný mokrý proces laminace. CFRP lamela je vytvořena přímo na místě z jednotlivých vrstev uhlíkové tkaniny v epoxidové pryskyřici. S podkladem je lamela spojena pomocí adhezního pojiva. Což může být samotná epoxidová pryskyřice matrice, častěji však samostatná podkladní vrstva z vhodnějšího epoxidu. Tento proces umožňuje vysokou tvarovou variabilitu a je tak vhodný i pro členité prvky. Na druhou stranu je náročný na správné provedení. Při nevhodném provedení mohou vzniknout problémy s nehomogenitou materiálu. Nevýhodou také je, že samotné materiálové vlastnosti nejsou předem známy. Lze provést pouze kvalifikované odhady vlastností, ale ty musí být vždy ještě ověřeny experimentálně. V ideálním případě je konstrukce během tuhnutí zesílení (5-7 dnů) odtížená. Jak ale ukázalo experimentální osazení zesílení na mostě v kapitole 7.7, k aktivaci zesílení dochází i pokud je konstrukce v plném provozu. Omezení dopravy lze při této metodě minimalizovat.

Ve své práci jsem pro zesílení použil metodu mokré laminace. To je dáno zaměřením na staré ocelové konstrukce, které jsou ve své většině tvarově velmi

členité. V následujícím textu proto popíšu proces provádění pro mokrou laminaci. Tento proces lze použít i pro zesílení prefabrikovanou lamelou, pouze je na místo vrstev tkaniny lepena rovnou celá lamela.

8.1.3 Postup provádění zesilování

Máme daný problémový detail a zvolili jsme metodu mokré laminace. Jako ilustrační příklad viz Obrázek 71 níže, únavová trhлина horní pásnice nýtovaného nosníku.



Obrázek 71 Únavová trhлина v horní pásnici nýtovaného nosníku – ilustrační obrázek

Přípravné kroky lze rozdělit do následujících etap:

- 1) Určíme hodnoty rozkmitu napětí v prvku. To můžeme zjistit přímým měřením na posuzovaném prvku nebo z modelu konstrukce. Provedeme odhad zbytkové životnosti.
- 2) Zvolíme kompozici lamely, tj. počet vrstev, gramáž a způsob tkaní a materiál. Způsob tkaní ovlivňuje směr působení vláken, např. jedno/dvousměrně tkaná. Zvolíme materiál matrice. Pro určení efektivity uhlíkové tkaniny s epoxidovou matricí lze využít výsledky numerické studie viz kap. 7.2.2.
- 3) Určíme materiálové vlastnosti kompozitu. To lze buď výpočtem nebo výrobou vzorků zvolené kompozice a jejich otestováním.
- 4) Se skutečnými materiálovými vlastnostmi CFRP lamely provedeme výpočet zesílení a určíme pokles rozkmitu napětí. Pokud neodpovídá předpokladům, opakujeme postup, dokud nedosáhneme požadovaného rozkmitu.
- 5) Určíme dostatečnou kotevní délku pro zesílení

Jakmile máme specifikovaný princip zesílení a potřebný materiál, lze provést zesílení in-situ:

- 6) Úprava povrchu. Ocelový povrch musí být v celém prostoru aplikace zesílení zbaven nečistot a koroze. Je požadováno otryskání na stupeň Sa 2 1/2. Těsně před prováděním musí být povrch ještě jednou ořen a zbaven nečistot a mastnoty
- 7) Při aplikaci a manipulaci je nutné nosit ochranné pomůcky. Jednotlivé komponenty pryskyřic jsou před vytuhnutím toxické
- 8) Podkladní vrstva. Na očištěný povrch je aplikována podkladní vrstva z vhodného adhezního pojiva. Touto vrstvou jsou důkladně vyplněny všechny nerovnosti a trhliny. Na ocelovém povrchu je vyrobena rovná vrstva tloušťky 1-2 mm. Aplikace vrstev tkanin musí následovat bezprostředně po této vrstvě, jinak by mohlo dojít k odlučování na rozhraní podklad/lamela. Při provádění je nutné dodržet technické podmínky výrobce pro správnou aplikaci.
- 9) Vrstvy tkaniny. Tkanina musí být připravena ve vhodných kusech, upravených tak aby odpovídaly členitosti povrchu, např. otvor pro hlavy nýtů. V blízkosti místa zesilování je nutné připravit rovný povrch, na kterém bude probíhat nasycování pryskyřicí. Sycení probíhá tak, že se jednotlivé kusy tkaniny potřou epoxidovou pryskyřicí z obou stran a následně je pevným válečkem vtlačena pryskyřice do tkaniny. Vtlačování se musí provádět silou, aby byl zároveň z tkaniny vytlačen veškerý vzduch. Ten by mohl způsobit nehomogenitu vlastností výsledného kompozitu. (Pozn. V průmyslové výrobě je často používána podtlaková komora pro plné nasycení).
- 10) Jednotlivé vrstvy nasycené pryskyřice jsou kladeny na sebe na místo zesílení. Mezi jednotlivými vrstvami je nutné vrstvu opět na místě uhladit válečkem.
- 11) Zároveň se zesílením je nutné na místě zhotovit stejným postupem a ze stejného materiálu lamelu pro výrobu zkušebních vzorků.
- 12) Veškeré práce musí být provedeny v době zpracovatelnosti epoxidové pryskyřice udávané výrobcem.
- 13) Doba tuhnutí je udávána výrobcem, obvykle se pohybuje kolem jednoho týdne.

- 14) Po vytuhnutí pryskyřic je možné upravit nerovnosti okrajů a je nutné přes zesílení aplikovat protikorozní nátěr.

8.2 Určení materiálových vlastností kompozitu

Pro určení materiálových vlastností kompozitu je možné použít tři metody.

- 1) Za prvé přímé měření vlastností vyrobené lamely dle normy ISO 527-1:2012 [44] a dle metodiky ASTM D3039 [45]. Pro tento účel je nutné zhotovit zkušební vzorky.
- 2) Za druhé lze použít komerčně dostupné softwary pro výpočet vlastností.
- 3) Za třetí odhad vlastností na základě výpočtů. Příklad ručního výpočtu základních materiálových vlastností CFRP kompozitu, dle dostupné literatury, je součástí práce v Příloze E.

8.3 Návrh zesílení

8.3.1 Efekt zesílení – primární (přidání materiálu)

Primárním efektem zesilování rozumíme v této práci snížení namáhání původního ocelového prvku přidáním zesilujícího materiálu. Jelikož řešíme únavovou pevnost zajímá nás pouze rozkmit napětí v profilu způsobený proměnným zatížením. Předpokládáme, že poměr průměrného napětí před a po zesílení se rovná poměru napětí ve špičkách před a po zesílení.

Rozkmit napětí pro tažený prvek:

$$\Delta\sigma = \frac{F_p}{A_s} \quad (8-1)$$

F_p Síla v prvku od proměnného zatížení

A_s Plocha průřezu v posuzovaném místě

Pro zesílení ocelovými příložkami platí že:

$$\Delta\sigma = \frac{F_p}{A_s + A_{zes}} \quad (8-2)$$

A_{zes} plocha přidané oceli

V našem případě použití zesílení CFRP lamelami dojde k úpravě vzorce koeficientem n

$$n = \frac{E_{CFRP}}{E_s} \quad (8-3)$$

E_{CFRP} modul pružnosti zesilující lamely ve směru pnutí vláken

E_s modul pružnosti oceli

Rozkmit napětí pro zesílený prvek potom:

$$\Delta\sigma_{zes} = \frac{F_p}{A_s + n \cdot A_{zes}} \quad (8-4)$$

Efekt zesílení se následně procentuálně vyjádří jako:

$$S_R = \frac{\Delta\sigma_{zes}}{\Delta\sigma} \quad [\%] \quad (8-5)$$

8.3.2 Kotvení zesílení

Při návrhu délky kotvení zesílení je nutné postupovat podle doporučení ČSN EN 1999-1-1 příloha M [47] a Fib buletin N° 14 [46]

8.3.3 Efekt zesílení – sekundární (změna vrubového účinku)

Sekundárním efektem zesilování rozumíme v této práci zlepšení vlastností únavového detailu vlivem změny vrubového působení. Jak bylo popsáno výše, přidáním zesilujících lamel, a hlavně vyplněním povrchových nerovností materiálem podkladní vrstvy, došlo ke změnám v rozdělení napjatosti na vzorku. To mělo za následek změnu vrubového působení zkoumaného defektu. Díky tomu došlo ke zlepšení únavové pevnosti. Lze oprávněně předpokládat obdobný efekt i pro další konfigurace poškození zesílené metodou mokré laminace CFRP. Nicméně, bez provedení dalšího výzkumu na konkrétních detailech, nelze obecně odvodit, o kolik se jednotlivé detailylepší.

Navrhování zesílení při uvažování pouze působení zesilujícího materiálu (primární efekt), lze uvažovat jako návrh na straně bezpečné.

9 Závěry

Cílem výzkumu bylo rozšíření znalostí o praktickém využití CFRP zesílení na mostních konstrukcích. Z dosavadních laboratorních výzkumů vyplývá, že použití CFRP zesílení je jednoduchá a poměrně efektivní metoda zesilování. Z nabízených možností byla zvolena metoda laminace tzv. „na mokro“. Je to metoda, která by mohla dobře fungovat jako preventivní oprava korozně degradovaných konstrukcí pro prodloužení jejich životnosti, a to s ohledem na snadné přizpůsobení podkladu. Této metodě nebyla zatím věnována přílišná pozornost, především kvůli adheznímu propojení s podkladní konstrukcí. Dosavadní výzkum se zaměřoval spíše na CFRP zesílení upevněné k podkladu mechanicky, jelikož je považováno za spolehlivější.

Proto jsem se rozhodl svůj výzkum zaměřit na rozšíření znalostí o chování tohoto typu zesílení. Zaměřil jsem se jednak na použití na starých a korozně oslabených konstrukcích, kde je potřeba prodloužení životnosti nejpravděpodobnější. Dále jsem se snažil o simulaci situací, kterým bude zesílení vystaveno na skutečné konstrukci, tj. únavovému zatěžování a povětrnostním podmínkám. Za třetí jsem zkoumal, zda lze aplikační postup zesílení, který dobře funguje v podmínkách experimentu, jednoduše využít i při opravách skutečných konstrukcí. Při provádění preventivních oprav korozně degradovaných mostních konstrukcí je pravděpodobnější, že se bude jednat o konstrukci značného stáří. V mých experimentech jsem proto využíval vzorky vytvořené z oceli z roku 1882 a pro porovnání vzorky vytvořené ze soudobé oceli S355.

Nejdůležitějším rozdílem těchto vzorků z hlediska aplikace zesílení byla struktura povrchu. Povrch vzorků ze staré oceli je hrubý, pokrytý důlky a nerovnostmi. Při aplikaci zesílení jsou tyto důlky nicméně překryty a vyplněny podkladní vrstvou. Hrubost povrchu neměla vliv na rychlost provádění. Při experimentálním osazení na reálné konstrukci, popsaném v této práci, byla montáž zesilování velice rychlá a omezení provozu bylo minimální, i když jsem zesiloval tvarově složité a hůře přístupné detaily. Navíc díky tomu, že jsem mohl využít výsledky monitoringu konstrukce, lze ukázat, že samotný proces tuhnutí může probíhat za provozu mostu. Na naměřených hodnotách lze pozorovat postupný nárůst působení zesílení, a i v provozu nedošlo k poškození zesílení. Je třeba vyzdvihnout vysokou flexibilitu v tvarech, kterou tato metoda poskytuje. Na druhou

stranu je montáž náročná na odpovědné provádění. Je nutné přesně dodržet technické postupy dané výrobcí materiálů a správné metody laminace. Je navíc třeba experimentálně ověřit materiálové vlastnosti kompozitní lamely vytvořené in-situ, zda dosahují požadovaných a předpokládaných parametrů.

V laboratorní části výzkumu jsem se zaměřil na tři oblasti, zejména na chování zesílení při cyklickém zatížení a dále pak na chování adhezního spojení, a na klimatické vlivy prostředí na zesílení.

Hlavní část svého výzkumu jsem zaměřil na ověření chování zesílení při cyklickém zatěžování. Vzorky simulovaly korozí těžce zasaženou část konstrukce, tedy nejpravděpodobnější místo preventivní opravy. Popisu vytvořené vady (okorodovaný otvor) se věnuji v kapitole o únavových zkouškách. Cílem bylo zjistit, zda a jak se bude měnit chování vzorků po aplikaci zesílení. V první kroku jsem zkoumal, o kolik se sníží napětí ve vzorcích po aplikování zesílení. Porovnával jsem napětí od kalibračního zatížení silou 65 kN na nezesíleném a zesíleném vzorku. Naměřené hodnoty napětí na zesíleném vzorku poklesly na 75 % hodnot napětí vzorku nezesíleného. To dobře odpovídá předpokladům založeným na množství přidanému materiálu. Ve své práci toto, tj. vliv přidaného materiálu, označuji jako primární efekt zesílení. Ve druhém kroku jsem přistoupil ke zkoumání chování zesílení při cyklickém zatížení. Aby byly výsledky porovnatelné, byly zesílené i nezesílené vzorky zatěžovány tak, aby napětí vyvozené na vzorcích bylo stejné. Předpokládal jsem, že chování vzorků bude obdobné a k porušení dojde po přibližně stejném počtu cyklů. Nicméně výsledkem únavových zkoušek bylo, že cyklicky namáhaný zesílený vzorek se stejně jako vzorek nezesílený nechová. Zesílené vzorky se porušovaly po výrazně větším počtu cyklů. Příčinou byla změna geometrie vzorku, kdy nanesená podkladní vrstva vyplnila zkoumanou vadu (otvor) a tím změnila geometrii a rozložení napětí uvnitř vzorku. Vzorek se přestal chovat jako prvek s otvorem. Místo toho fungoval jako plný průřez s vnitřní částí s menším modulem pružnosti. Tím došlo k zásadní změně vrubového působení zkoumaného detailu. Prodloužila se doba iniciace a prodloužila se doba růstu únavové trhliny. Po vyhodnocení jsem došel k závěru, že došlo k nárůstu únavové pevnosti (kategorie únavového detailu) z 85 MPa pro nezesílený vzorek s otvorem na hodnotu 105 MPa pro vzorek zesílený. Ve své práci toto, tj. změnu vrubového účinku, označuji jako sekundární efekt zesílení.

Lze tedy dojít k závěru že zesílením vzorku dojde k výraznému zlepšení odolnosti prvku vůči cyklickému zatěžování. A to nejen díky poklesu napjatosti vlivem primárního efektu, ale i díky změně chování samotného vzorku vlivem sekundárního efektu. Na druhou stranu je nutno poznamenat, že vliv změny vrubového efektu nelze jednoduše kvantifikovat. Pro popis chování uvnitř zesílení na rozhraní dvou materiálů je třeba složitých výpočtů. Ty jsou navíc ovlivněny okrajovými podmínkami (typ vady, konstrukční detail apod.). Z hlediska návrhu zesílení doporučuji omezit se v tuto chvíli na zahrnutí pouze primárního efektu zesílení. Návrh tak bude na straně bezpečné. Rozšíření znalostí o chování dalších zesílených detailů považuji za vhodnou oblast pro další výzkum.

Přes své výhody z hlediska tvarové flexibility může být adhezní spojení zásadní slabinou tohoto systému zesilování. Jak již bylo ukázáno předchozími výzkumy je vliv adhezní vrstvy zásadní. Při špatném provedení nemusí dojít k dostatečnému propojení podkladu s lamelou a tím je negativně ovlivněno spolupůsobení zesílení a konstrukce. Také nedodržení správného časového postupu provádění může vést ke vzniku diskontinuity na rozhraní ocel/lepidlo nebo lepidlo/CFRP lamela. Proto jsem ve svém výzkumu provedl zkoušky smykové pevnosti zesílení na sérii malých vzorků. Bylo porovnáno chování adhezního spojení na oceli staré a nové, a také chování při různých teplotách. Výsledky zkoušek adhezního spojení na soudobé oceli při různých teplotách se dobře shodují s předpokládaným chováním a s předpokládanou smykovou pevností, tak jak je popsáno v normách. Naproti tomu při porovnání výsledků stará/soudobá ocel při pokojové teplotě se objevil rozpor. Hodnoty smykové pevnosti zesílení na starém materiálu byly cca čtyřikrát menší než smyková pevnost na materiálu novém. Je tedy otázkou, zda smyková vrstva funguje správně i na starém materiálu s hrubým a členitým povrchem. Možným vysvětlením naměřeného rozdílu by mohla být neoptimální úprava povrchu ocele. Při přípravě vzorků smykových zkoušek byl materiál mechanicky očištěn, nikoliv otryskán jako u vzorků pro únavu. Je tedy možné, že pro starou ocel s narušeným povrchem je mechanické očištění nedostatečné. Nicméně, vzhledem k nízkému počtu zkoumaných vzorků, nelze vyslovit jednoznačný závěr. Vliv členitosti podkladu na efektivnost adhezní vrstvy je tedy rovněž vhodným námětem pro další výzkum.

Při zkoumání ovlivnění zesílení okolním prostředím jsem se zaměřil na vliv nízké teploty. V prvním experimentu byly vzorky určeny pro únavové zkoušky

podrobeny střídavému zmrazování a tání. Zkoumal jsem, zda vystavení nízké teplotě bude mít vliv na materiál zesílení a tím na následné chování při únavových zkouškách. Na jednom ze vzorků jsem navíc zkoumal změnu rozložení napětí při kalibračním zatížení únavového experimentu. Ani rozložení napětí při kalibračním zatížení ani následné únavové zkoušky vzorků neukázaly žádnou změnu v chování oproti běžným vzorkům. Ve druhém experimentu jsem zkoumal, zda nedojde k poškození zesílení vlivem koroze a agresivního prostředí. Vzorky byly podrobeny zmrazovacím cyklům ve slaném roztoku. I po více než 1,5 roku mrazových cyklů, kdy byl holý ocelový povrch již silně korozně zasažen, nedošlo k ovlivnění zesílené části vzorku např. podkorodováním. Výsledky obou těchto experimentů naznačují, že zesílení funguje v nízkých teplotách relativně dobře. Na druhou stranu byl rozsah zkoušek omezený. I s přihlédnutím k dříve publikovaným rozporuplným výsledkům si nedovolím vyvozovat obecně platné závěry.

Přestože jsem se snažil o co nejširší záběr, prezentované závěry samozřejmě nepokrývají kompletně možnosti využití, či vlivů působících na zkoumané zesílení. Vzhledem k časové náročnosti experimentů byla zkoumána pouze jedna z možných konfigurací. Nicméně poznatky z mých pokusů poskytují základ pro další výzkum chování CFRP zesílení v reálných situacích. V budoucnosti je možné na tyto výsledky navázat na příklad výzkumem, který se bude zabývat odlišnými konstrukčními detaily, jinou konfigurací poškození povrchu či aplikací zesílení na již existující únavovou trhlinu.

Příprava a provádění experimentů přispěly k získání cenných zkušeností, ověření předpokládaných výhod, ale i odhalení nepředvídaných slabin celého systému.

10 Literatura

- [1] Jančář, J., Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, VUT v Brně, 2003.
- [2] Xu Jiang: ISIS Mechanical Behaviour and Durability of FRP-to-steel Adhesively-bonded Joints, Oktober 2013
- [3] Bisby L.A.: ISIS Educational Module 8: Durability of FRP Composites for Construction, March 2006
- [4] International Federation for Structural concrete (fib): FRP reinforcement in RC structures, September 2007
- [5] Schmit K.: Fiberglass Reinforced Plastic (FRP) Piping Systems Designing Process / Facilities Piping Systems With Frp Comparison To Traditional Metallic Materials, Specialty Plastics, Los Angeles, May 29 1998
- [6] Park B. K, Hwang Y., Lee Y.: Experimental Study on Durability Comparison of the GFRP Decks by Resin Types, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 11, No. 5, September 2007, s. 261-267
- [7] Cusson R., Yunping Xi: The behavior of fiber-reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates, 2002
- [8] Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch. Journal of Structural Engineering, ASCE 2003;129(2):186–96.
- [9] Bakis CE, Bank LC, Brown VL, Cosenza E, Davalos JF, Lesko JJ, et al. Fibre-reinforced polymer composites for construction: State-of-the Art review. Journal of Composites Construction, ASCE 2002;6(2):73–87.
- [10] Hollaway LC, Head PR. Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure. Oxford (UK): Elsevier; 2001.
- [11] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. FRP—strengthened RC structures. West Sussex (UK): John Wiley and Sons Ltd; 2002.
- [12] Bank LC. Composites for construction: structural design with FRP materials. John Wiley & Sons; 2006.
- [13] ACI-440. Report on fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures. ACI-440; 2007.
- [14] Hollaway LC, Teng JG. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. England: Woodhead Publishing and Maney Publishing; 2008.
- [15] Xiao-Ling Zhao, Lei Zhang State of the art review of FRP strengthened steel structures, 2006 Elsevier Ltd.
- [16] J.G. Teng , T. Yu , D. Fernando, Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites, Journal of Constructional Steel Research 78 (2012) 131–143 2012
- [17] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. FRP—strengthened RC structures. West Sussex (UK): John Wiley and Sons Ltd; 2002.
- [18] Nanni A. North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: Principles, applications and unresolved Issues. Construction and Building Materials 2003;17(6–7):439–46.
- [19] Vistasp M. Karbhari et al., Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites, 2014 Woodhead Publishing Limited.

- [20] Peshkam , V. and Leeming , M. (1994) ‘ Application of composites to strengthening of bridges: Project ROBUST ’, Proceedings 19th British Plastics Federation Composites Congress , 22–23 Nov Birmingham, British Plastics Federation.
- [21] Hollaway L C and Cadei J (2002), ‘ Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites ’, Progress in Structural Engineering and Materials , 4 (2), 131 – 148 .
- [22] Shaat A , Schnerch , D , Fam , A and Rizkalla S (2004), ‘ Retrofit of steel structures using fiber-reinforced polymers (FRP): state-of-the-art ’, Transportation Research Board (TRB) 83rd Annual Meeting , Washington, DC 11–15 January.
- [23] Jones S C and Civjan S A (2003), ‘ Application of fibre reinforced polymer overlays to extend steel fatigue life ’, Journal of Composites for Construction, 7 (4), 331 – 338 .
- [24] Liu H B , Al-Mahaidi R and Zhao X L (2009a), ‘ Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures ’, Composites Structures , 90 (1), 12 – 20 .
- [25] Liu H B , Xiao Z G , Zhao X L and Al-Mahaidi R (2009b), ‘ Prediction of fatigue life for CFRP strengthened steel plates ’, Thin-Walled Structures , 47 (10), 1069 – 1077 .
- [26] Wu C , Zhao X L , Al-Mahaidi R , Emdad M and Duan W H (2012), ‘ Fatigue tests of cracked steel plates strengthened with UHM CFRP plates ’, Advances in Structural Engineering – An International Journal , 15 (10), 1801 – 1816 .
- [27] Taljsten B , Hansen C S and Schmidt J W (2009), ‘ Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates ’, Construction and Building Materials , 23 (4), 1665 – 1677 (P).
- [28] Huawen Y , Konig C , Ummenhofer T , Shizhong Q and Plum R (2010), ‘ Fatigue performance of tension steel plates strengthened with pre-stressed CFRP laminates ’, Journal of Composites for Construction , 14 (5), 609 – 615 .
- [29] Mehran Gholami, Abdul Rahman Mohd Sam, Jamaludin Mohamad Yatim, Mahmood Md Tahir, A review on steel/CFRP strengthening systems focusing environmental performance, Construction and Building Materials 47, 2013
- [30] Jančář, J., Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, VUT v Brně, 2003.
- [31] Foster, S.K., Bisby, L.A., High temperature residual properties of externally-bonded FRP systems, American Concrete Institute, Vol. ACI-SP230, No. 7, 2005, p. 1235-1252.
- [32] Bisby, L.A., Stratford, T., Opportunities for performance-based fire resistance design of FRP reinforced concrete slabs, Bisby, L.A., Stratford, T., Opportunities for performance-based fire resistance design of FRP reinforced concrete slabs, 2012
- [33] Cusson R., Yunping Xi: The behavior of fiber-reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates, Materials Science, Engineering 2002
- [34] Schmit K.: Fiberglass Reinforced Plastic (FRP) Piping Systems Designing Process / Facilities Piping Systems With Frp Comparison To Traditional Metallic Materials, Specialty Plastics, Los Angeles, May 29 1998

- [35] International Federation for Structural concrete (fib): FRP reinforcement in RC structures, September 2007
- [36] Bisby L.A.: ISIS Educational Module 8: Durability of FRP Composites for Construction, March 2006
- [37] UIC 778-2 R “Recommendations for determining the carrying capacity and fatigue risks of existing metal bridges”
- [38] Gangel , R. (2011) Use of CFRP Overlays to Repair Fatigue Damage in Steel Bridge Girders and Components , thesis, presented to the University of Kansas, at Lawrence, KS, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering.
- [39] Pipinato A. (2012) Fatigue behaviour of Steel Bridge Joints Strengthened with FRP laminates, Modern Applied Science, vol 6, no. 10
- [40] Heshmati et al (2015) Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: State of the art, Composites Part B
- [41] Macho, M., Ryjáček, P.(2016) The impact of the severe corrosion on the structural behavior of steel bridgemembers Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies - Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT 2015, pp. 123-128.
- [42] Vůjtěch, J., Ryjáček, P, Application of CFRP as a reinforcement of deteriorated steel structures – numerical analysis, Interdisciplinaryty in theory and practise No 11 (2016)
- [43] Vůjtěch, J., Ryjáček, P, Application of carbon FRP for fatigue strengthening of old steel structures, ic-cmtp4 4TH international conference on competitive materials and technology processes (2016)
- [44] ISO-527-1 (2012). Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles
- [45] ASTM D3039 / D3039M – 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- [46] Fib bulettin N° 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report (138 pages, ISBN 978-2-88394-054-3, October 2001)
- [47] ČSN EN 1999-1-1 Eurokód 9: Navrhování hliníkových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro konstrukce
- [48] Klesnil M., Lukáš P., Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia - Fyzikálně metalurgická řada, 1975
- [49] Paris, P.C. and Erdogan, F. (1963) A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering, 85, 528-533
- [50] ČSN EN 1993-1-9 Eurokód 3 Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9 Únava
- [51] Pluhař, J, Nauka o materiálech, Nakladatelství technické literatury, 1989
- [52] Miner, M.A. (1945) Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, 3, 159-164

Seznam tabulek

Tabulka 1 Materiály vláken základní charakteristiky	17
Tabulka 2 Typické vlastnosti termosetů	19
Tabulka 3 Materiálové vlastnosti pultrudovaných profilů	21
Tabulka 4 Materiálové vlastnosti kompozitní lamely (pokojová teplota +23 °C)	46
Tabulka 5 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, T=-40 °C	48
Tabulka 6 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, T= 23 °C (RT = room temperature)	50
Tabulka 7 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, plávková, T= 23 °C (RT = room temperature)	52
Tabulka 8 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, T= 45 °C	54
Tabulka 9 Výsledky zkoušek smykové pevnosti, S355, T= 60 °C	56
Tabulka 10 Výsledky zkoušek smykové pevnosti – shrnutí průměrných hodnot	57
Tabulka 11 Označení vzorků	58
Tabulka 12 Kalibrace modelu, nezesílený vzorek	65
Tabulka 13 Kalibrace modelu, zesílený vzorek	66
Tabulka 14 Výsledky – nezesílené vzorky	67
Tabulka 15 Výsledky – zesílené vzorky. plávková ocel	67
Tabulka 16 Výsledky – zesílené vzorky. S355	67
Tabulka 17 Soubor dat pro plávkovou ocel viz Tabulka 15	70
Tabulka 18 Soubor dat pro ocel S355, viz Tabulka 16	73
Tabulka 19 Výsledky – vzorek 19, porovnání měřených hodnot před/po mraz. cyklech ..	77

Seznam obrázků

Obrázek 1 Pracovní diagram vláken používaných v FRP.....	17
Obrázek 2 Výsledky materiálových zkoušek při účinku různých teplot [6]	23
Obrázek 3 Zesilovaný vzorek použitý ve výzkumu dvojice Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. [8]	25
Obrázek 4 Další příklady zkušebních vzorků [15].....	25
Obrázek 5 Módy porušení zesílení pomocí CFRP lamely [15].....	26
Obrázek 6 Vlivy různé tuhosti (vlevo) CFRP vyztužení na maximální napětí ve vzorku (vpravo), dle Gangel, 2011 [38].....	26
Obrázek 7 Vlivy různé tloušťky (vlevo) CFRP vyztužení na maximální napětí ve vzorku (vpravo), dle Gangel, 2011 [38].....	27
Obrázek 8 Iron bridge, Shropshire [19]	28
Obrázek 9 Postup zesilování konstrukce [19], (a) revize konstrukce, (b) očištění materiálu – otryskání, (c) aplikace podkladní vrstvy, (d) aplikace lepidla na CFRP lamelu, (e) zesílená konstrukce	29
Obrázek 10 King Street Railway Bridge [19]	30
Obrázek 11 Slattocks Canal Bridge, instalace CFRP lamel (vlevo), dočasné připevnění lamel před vytvrdnutím lepidla (vpravo) [19].....	30
Obrázek 12 Efekt klasického zesílení (příšroubovaný plech) (horní) a zesílení CFRP (spodní), je patrné velké zpomalení růstu trhliny [19]	32
Obrázek 13 Nejdůležitější studie chování CFRP s ohledem na extrémní účinky prostředí [29].....	33
Obrázek 14 Železniční ocelový příhradový most v Holubově.....	36
Obrázek 15 Snímání staré konstrukce, most v Holubově	37
Obrázek 16 Některé z odebraných vzorků	37
Obrázek 17 Model vzorku s poškozením typu 1, šedá – kompozit, 2D shell; červená – epoxid, solid elementy (C3D6); modrá – ocel, solid elementy (C3D6).....	38
Obrázek 18 Modelování kompozitního materiálu, řešič Abaqus.....	39
Obrázek 19 Rozložení napětí na vzorku s poškozením typu 2, bez zesílení.....	40
Obrázek 20 Rozložení napětí na vzorku s poškozením typu 2, s 5 vrstvami CC160P	40
Obrázek 21 Vada typ 2 – pokles maximálního napětí dle objemu vyztužení	41
Obrázek 22 Schéma vzorků pro tahovou zkoušku	42
Obrázek 23 Vzorky připravené pro tahovou zkoušku.....	43
Obrázek 24 Upevnění vzorku v aparatuře.....	43
Obrázek 25 Schéma vzorku pro určení smykové pevnosti	44
Obrázek 26 Vzorky připravené pro zkoušku	45
Obrázek 27 Vzorek upevněný v aparatuře	45
Obrázek 28 Pracovní diagram tahových zkoušek	46
Obrázek 29 Zapojení potenciometrů na vzorku	47
Obrázek 30 Vzorky po zkouškách	47
Obrázek 31 Pracovní diagram zkoušky, S355, -40 °C.....	48
Obrázek 32 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře.....	49
Obrázek 33 Vzorky po zkouškách	49
Obrázek 34 Pracovní diagram zkoušky, S 355, + 23 °C (RT = room temperature).....	50
Obrázek 35 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře.....	51
Obrázek 36 Vzorky po zkouškách	51
Obrázek 37 Pracovní diagram zkoušky, plávková ocel (1882), +23 °C, (RT = room temperature)	52
Obrázek 38 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře.....	53
Obrázek 39 Vzorky po zkouškách	53

Obrázek 40 Pracovní diagram zkoušky, S355, +45 °C.....	54
Obrázek 41 Vzorky při zkoušce v teplotní komoře.....	55
Obrázek 42 Vzorky po zkouškách	55
Obrázek 43 Pracovní diagram zkoušky, S355, +60 °C.....	56
Obrázek 44 Vzorky po zkouškách	56
Obrázek 45 Vývoj hodnot smykové pevnosti v závislosti na teplotě.....	57
Obrázek 46 Vzorek typ 1 schéma geometrie	59
Obrázek 47 Vzorek typ 2 schéma geometrie	59
Obrázek 48 Vzorek typ 2 vzorky z ocele S355.....	60
Obrázek 49 Tkanina CC600T-120 pásky připravené k laminaci.....	61
Obrázek 50 Tři stádia výroby zesílení – vzorek typ 1.....	61
Obrázek 51 Foto a schéma zatěžovací sestavy (1 - vzorek, 2 – upevňovací čelist – dvě části, 3 – předepnuté šrouby, 4 – ocelový kloub, 5 – zatěžovací jednotka a siloměr).....	62
Obrázek 52 Schéma rozmístění tenzometrů na vzorku 19.....	63
Obrázek 53 Foto nezesílený vzorek – růst únavové trhliny	68
Obrázek 54 Foto nezesílený vzorek –únavová trhлина těsně před porušením	68
Obrázek 55 Foto zesílený vzorek – počátek zatěžování (vpravo); po porušení vzorku (vlevo).....	69
Obrázek 56 Určení charakteristické hodnoty únavového detailu.....	70
Obrázek 57 Bodový diagram výsledků zkoušek (log měřítka)	71
Obrázek 58 Bodový diagram výsledků zkoušek (log měřítka)	73
Obrázek 59 Vzorek připravený pro zkoušku mrazem.....	78
Obrázek 60 Klima-komora použitá při zmrazování – Experimentální centrum FSv ČVUT	78
Obrázek 61 Vzorek 33 – po 2 týdnech cyklování ve slaném roztoku.....	79
Obrázek 62 Vzorek 33 – po půl roku cyklování ve slaném roztoku	79
Obrázek 63 Vzorek 33 – po 1 roce cyklování ve slaném roztoku.....	79
Obrázek 64 Zesílení diagonály, před (vlevo), uhlíková lamela (střed), po aplikaci PKO (vpravo).....	80
Obrázek 65 Most– dolní pás po otryskání koroze.....	81
Obrázek 66 Zesílení dolního pásu.....	81
Obrázek 67 Zesílení dolního pásu po aplikaci PKO	82
Obrázek 68 Průběh poměrné deformace 1 den po aplikování zesílení	82
Obrázek 69 Průběh poměrné deformace 45 dní od aplikování zesílení, tenzometr vynulován.....	83
Obrázek 70 Zesílení diagonály, 1 rok od aplikace	83
Obrázek 71 Únavová trhлина v horní pásnici nýtovaného nosníku – ilustrační obrázek ...	86
Obrázek 72 Teoretická koncentrace vláken	163

11 Přílohy:

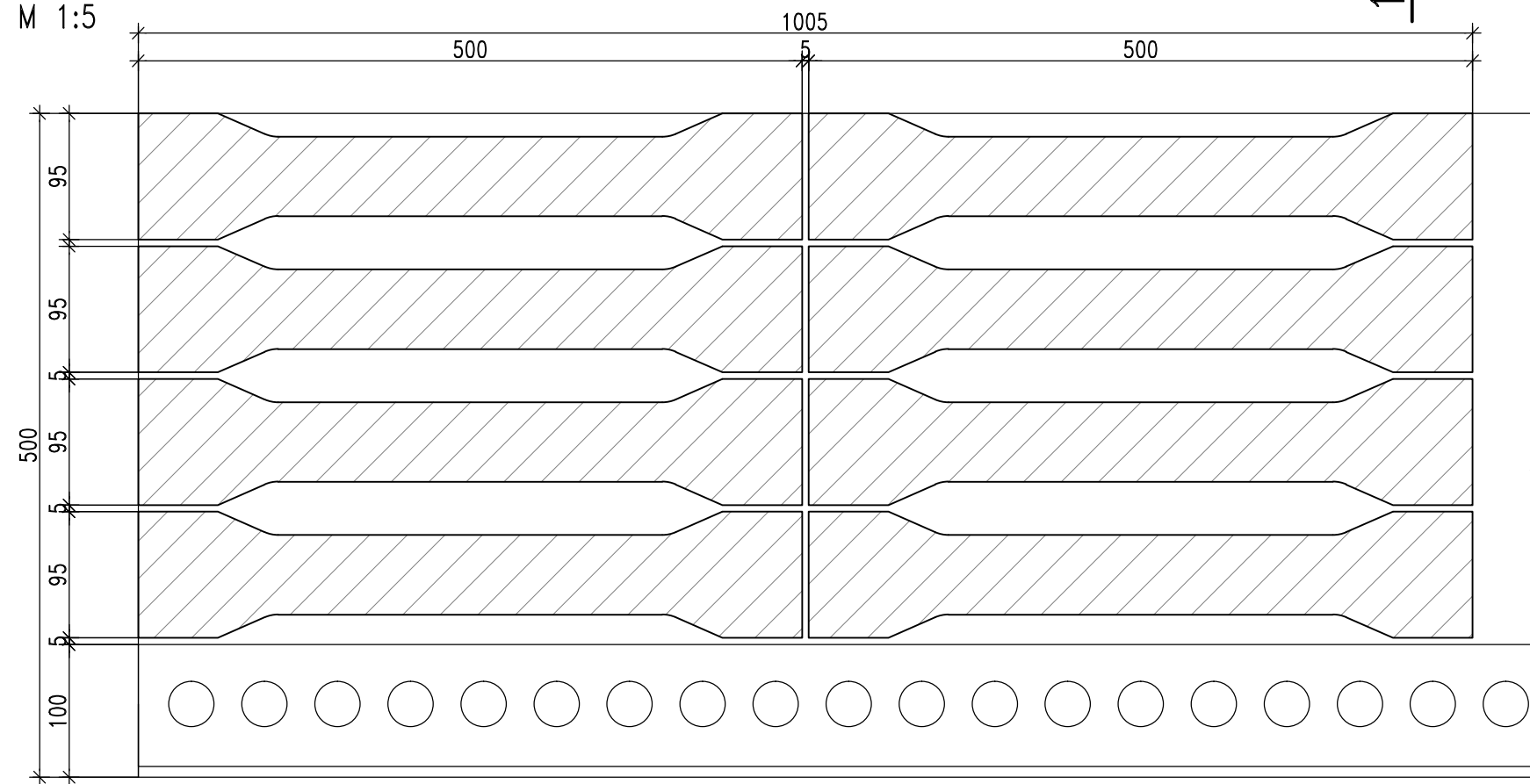
- A. Výkresy únavových zkoušek
- B. Technické listy pryskyřice a uhlíkové tkaniny
- C. Materiálové vlastnosti použité plávkové oceli
- D. Protokoly zkoušek kompozitu
- E. Výpočet základních materiálových vlastností FRP kompozitu

A. Výkresy únavových zkoušek – vzorky a zkušební zařízení

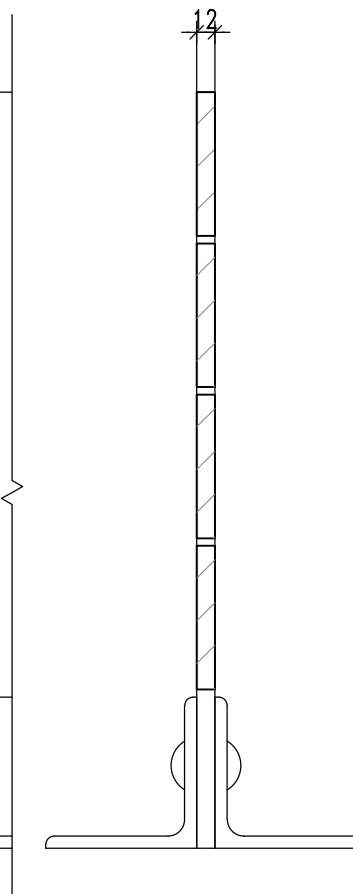
VÝKRES VÝŘEZU VZORKŮ

POHLED, ZDROJ – ČÁSTI STARÉ OC. KONSTRUKCE

M 1:5



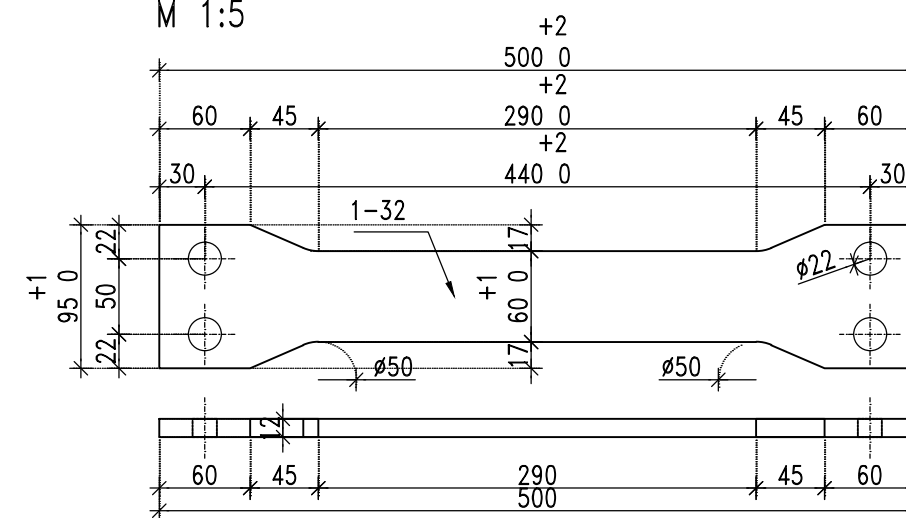
ŘEZ 1-1



VZOREK – POLOŽKY 1, 2

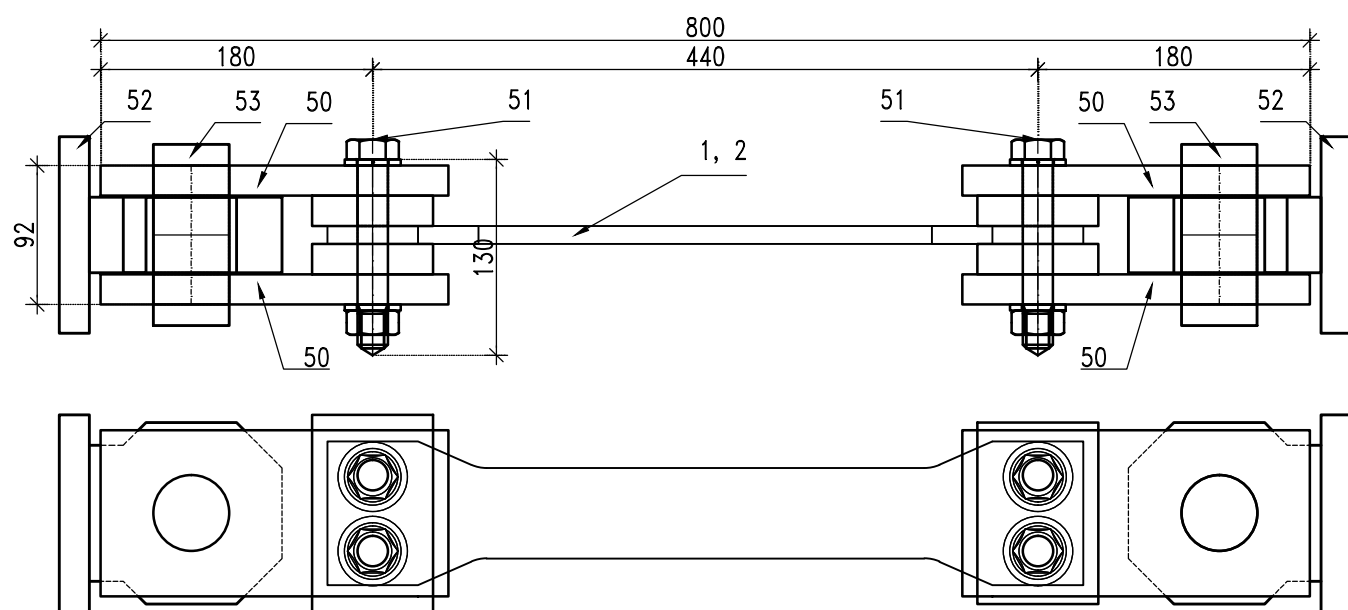
ROZMĚRY VZORKU, STARÁ OCEL

M 1:5



TESTOVACÍ SOUPRAVA – UPEVNĚNÍ VZORKU

M 1:5



Číslo změny:	Obsah změny:	Datum změny:
01	-	-
02	-	-
03	-	-

Objednatel:

Zpracovatel:  ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
 FAKULTA STAVEBNÍ – KATEDRA OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ
 THÁKUROVA 7
 166 29 PRAHA 6

Odpovědný řešitel: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D. *Ryjáček* Vypracoval: Ing. Jan Vůjtěch

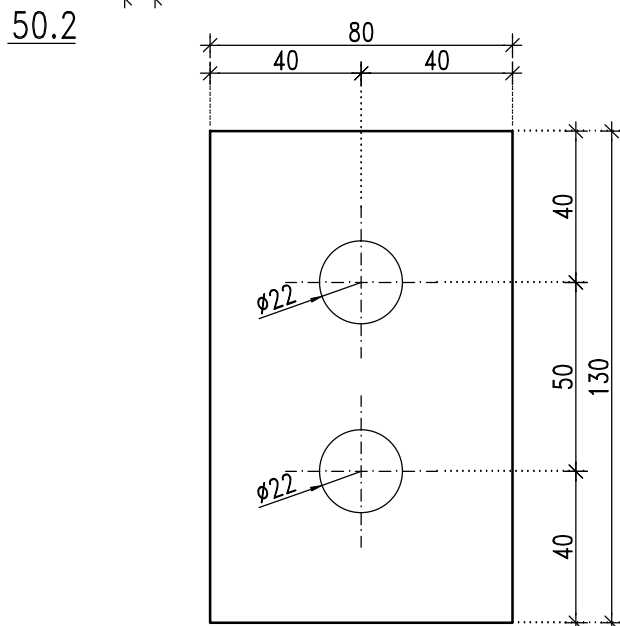
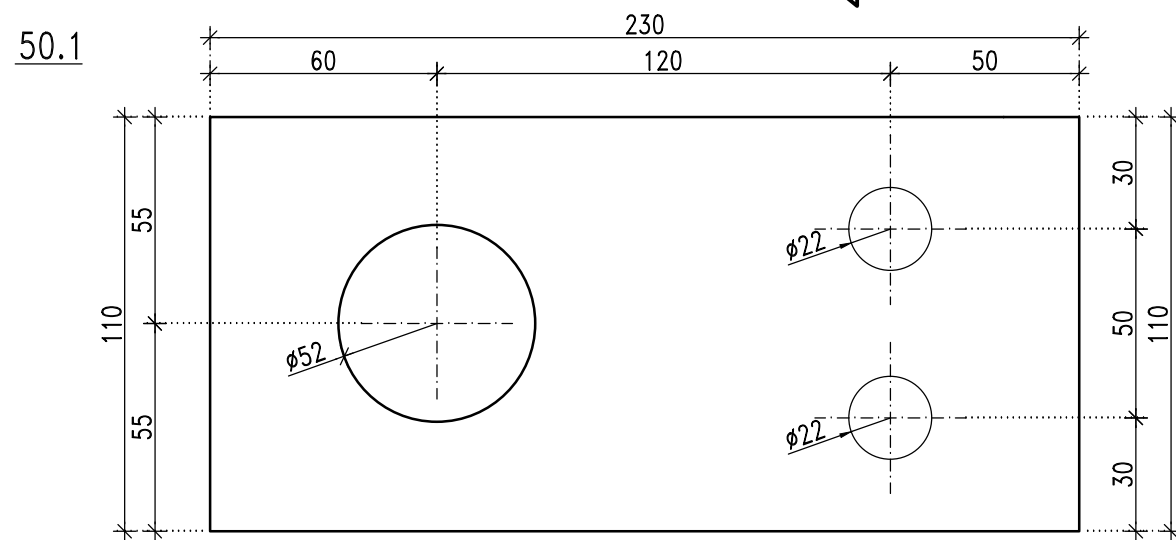
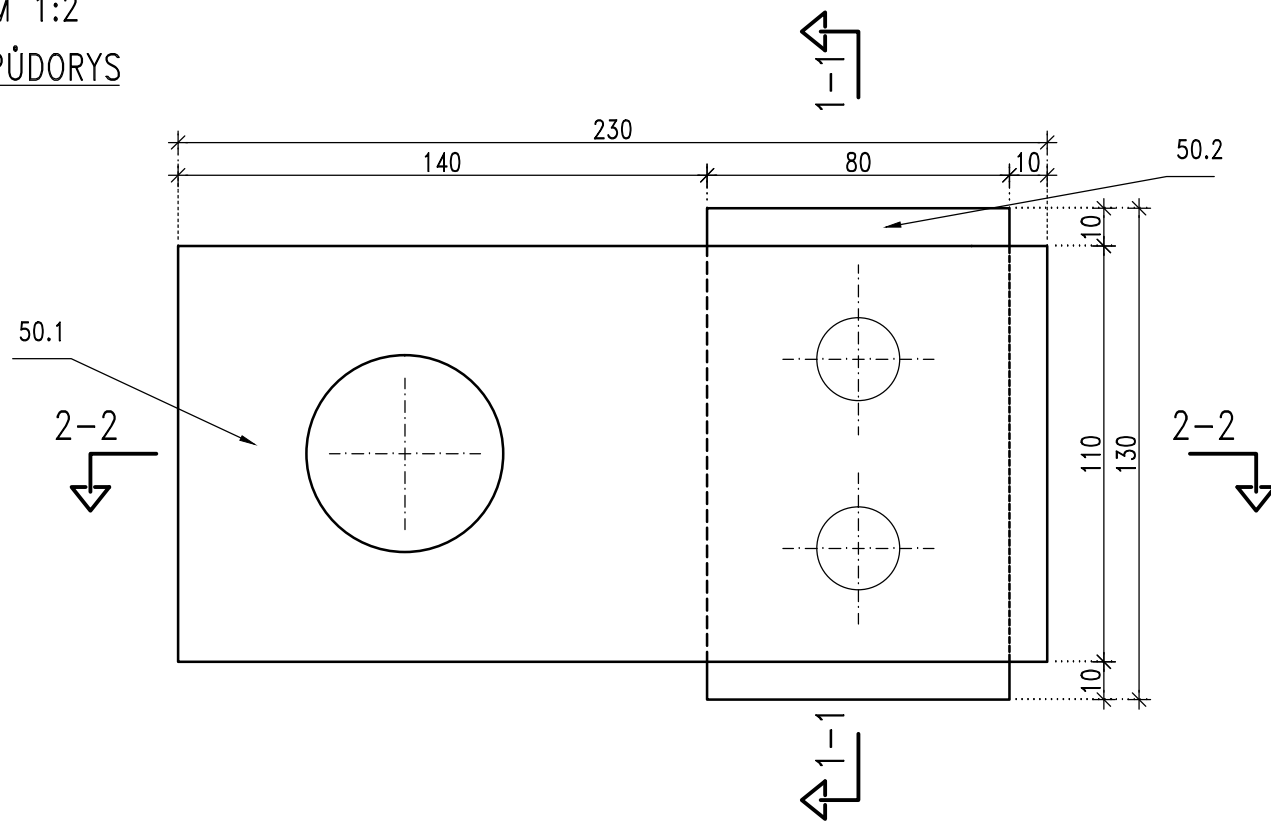
Název akce: LD15131 – Chování ocelových konstrukcí zesílených FRP při náročných účincích prostředí	Číslo akce ČVUT:	---
	Stupeň dokumentace:	Projekt
název PS/SO: Testování únavové pevnosti ocelových vzorků vyztužených CFRP	Datum:	03/2016
	Číslo částí:	-
Název přílohy: PŘEHLEDNÝ VÝKRES	Měřítko:	Počet formátů: 2x A4
	Číslo přílohy:	1

UPEVNĚNÍ VZORKU

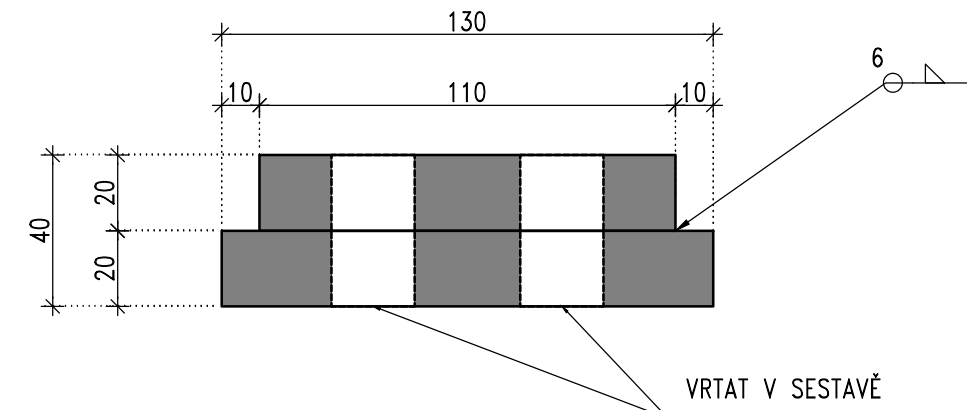
POLOŽKA 50, S355J+N, 4 ks NA VZOREK

M 1:2

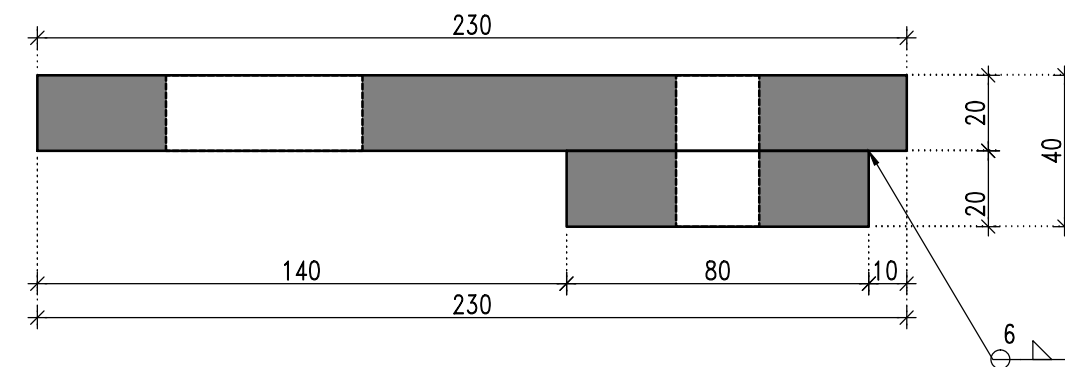
PŮDORYS



ŘEZ 1-1



ŘEZ 2-2



Číslo změny:	Obsah změny:	Datum změny:
01	-	-
02	-	-
03	-	-

Objednatel:

Zpracovatel:  ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ – KATEDRA OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ
THÁKUROVA 7
166 29 PRAHA 6

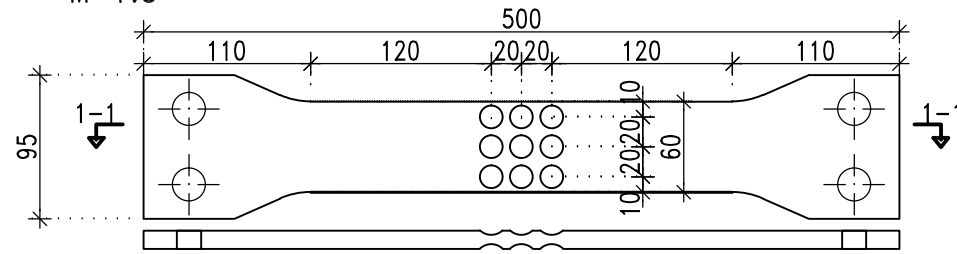
Odpovědný řešitel: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D. *Ryjáček* Vypracoval: Ing. Jan Vůjtěch

Název akce:	LD15131 – Chování ocelových konstrukcí zesílených FRP při náročných účincích prostředí	Číslo akce ČVUT:	---
název PS/SO:	Testování únavové pevnosti ocelových vzorků vyztužených CFRP	Stupeň dokumentace:	Projekt
Název přílohy:	VÝKRES UPEVNĚNÍ	Datum:	03/2016
		Číslo částí:	-
		Měřítko:	Počet formátů:
			2x A4
		Číslo přílohy:	2

POŠKOZENÍ TYP 1, POLOŽKA 1

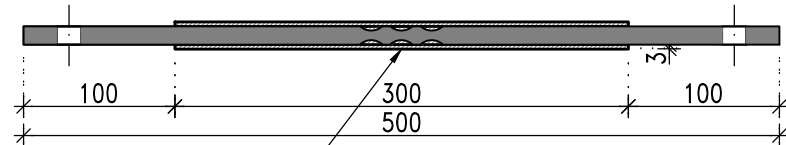
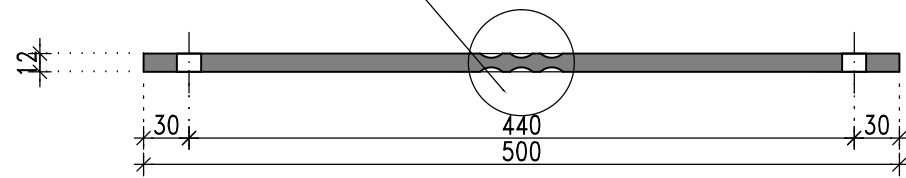
HLOUBKOVÁ KOROZE, VZORKY 1-8

M 1:5



ŘEZ 1-1

DETAIL D1

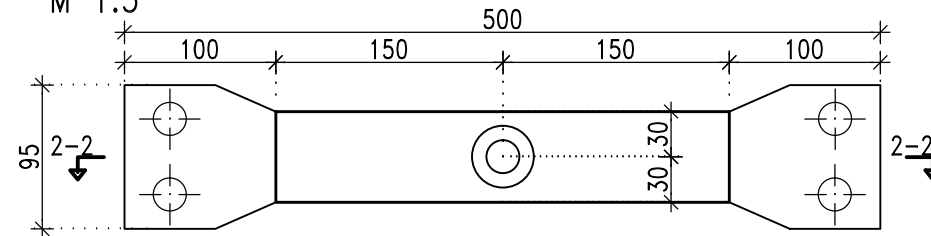


CFRP KOMPOZITNÍ VÝZTUHA
VYROBA BĚHEM EXPERIMENTU

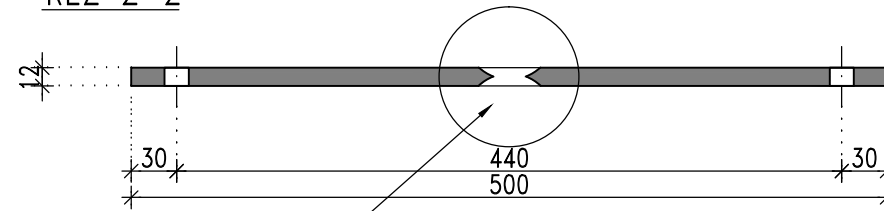
POŠKOZENÍ TYP 2, POLOŽKA 2

PROKORODOVANÁ OTVOR, VZORKY 9-32

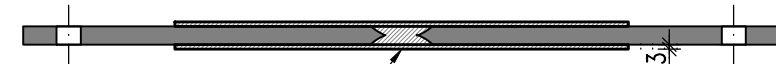
M 1:5



ŘEZ 2-2



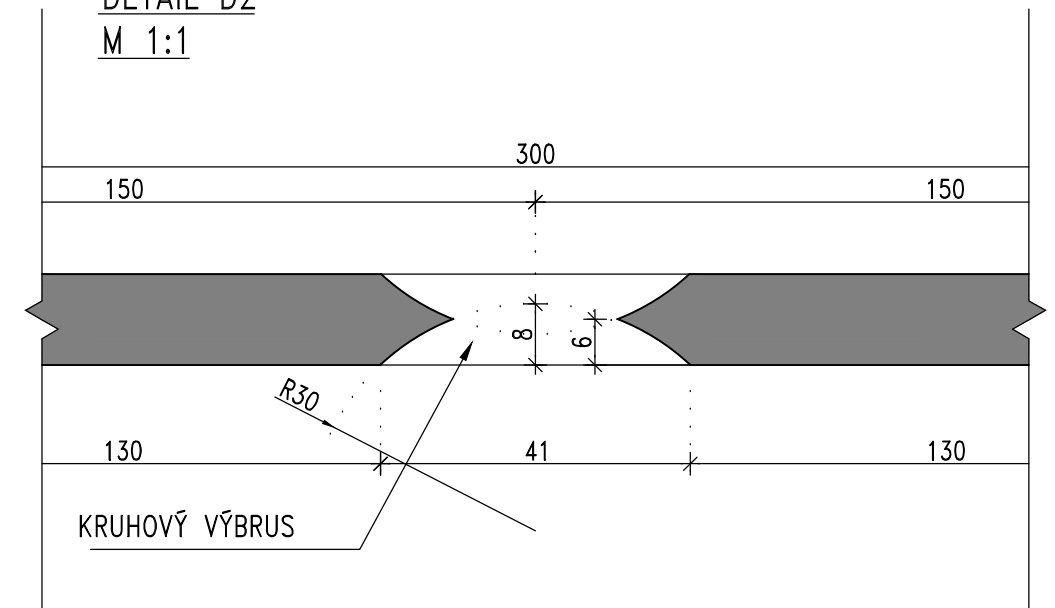
DETAIL D2



CFRP KOMPOZITNÍ VÝZTUHA
VYROBA BĚHEM EXPERIMENTU

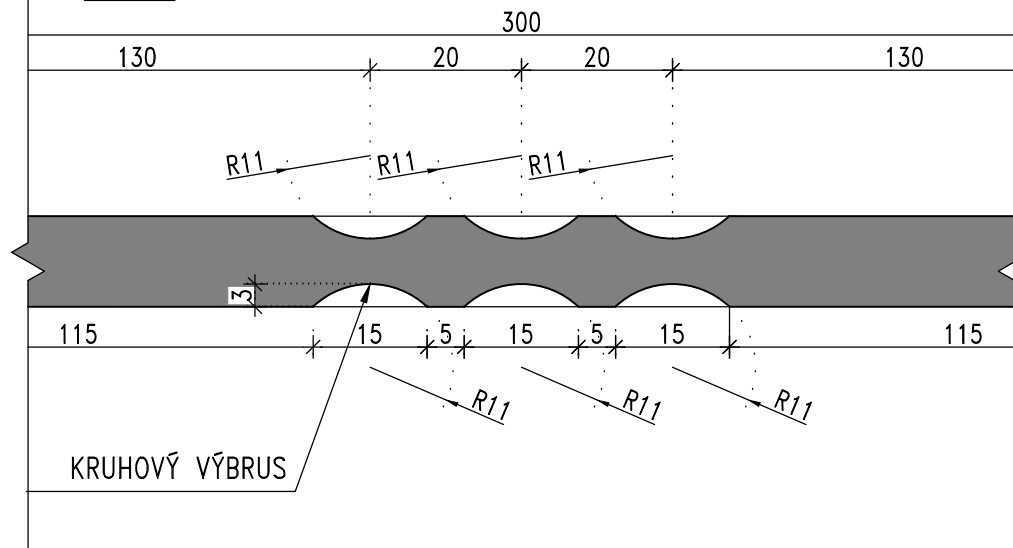
DETAIL D2

M 1:1



DETAIL D1

M 1:1



Číslo změny:	Obsah změny:	Datum změny:
01	-	-
02	-	-
03	-	-

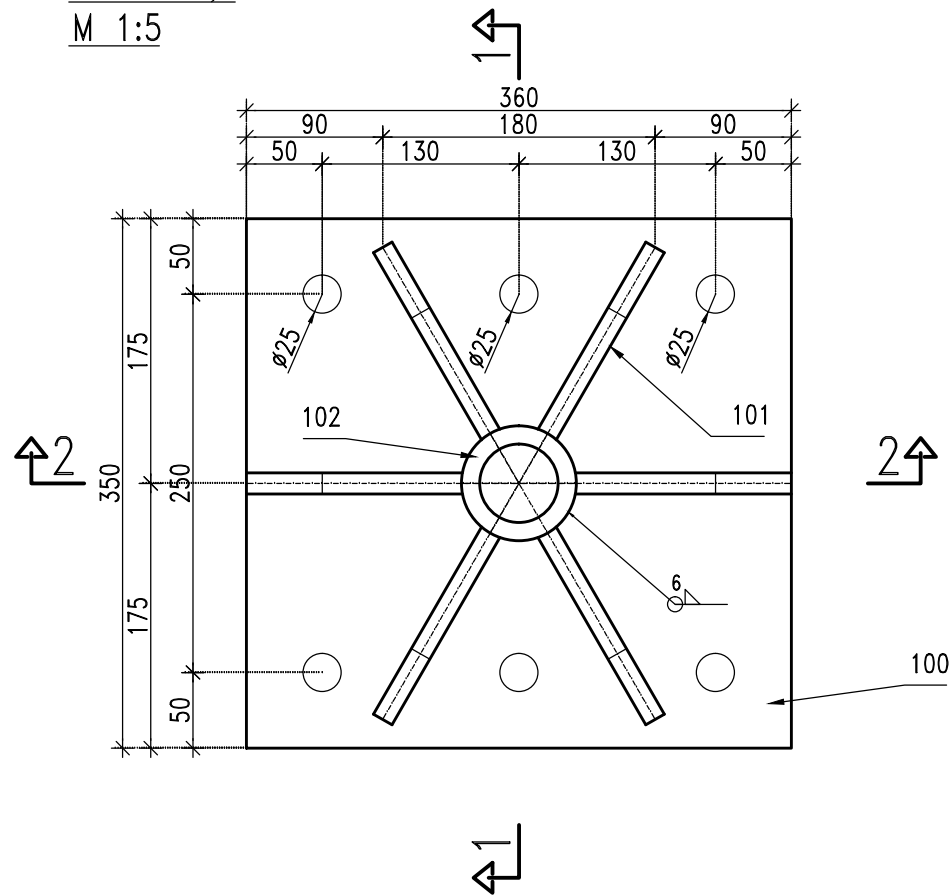
Objednatel:

Zpracovatel:  ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ – KATEDRA OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ
THÁKUROVA 7
166 29 PRAHA 6

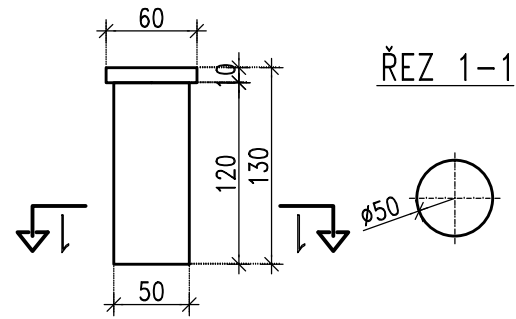
Odpovědný řešitel: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D. *Ryjáček* Vypracoval: Ing. Jan Vůjtěch

Název akce:	Číslo akce ČVUT:
LD15131 – Chování ocelových konstrukcí zesílených FRP při náročných účincích prostředí	---
název PS/SO:	Stupeň dokumentace:
	Projekt
Testování únavové pevnosti ocelových vzorků vyztužených CFRP	Datum:
	03/2016
Název přílohy:	Číslo částí:
	-
	Měřítko:
	Počet formátů:
	2x A4
	Číslo přílohy:
VZORKY	3

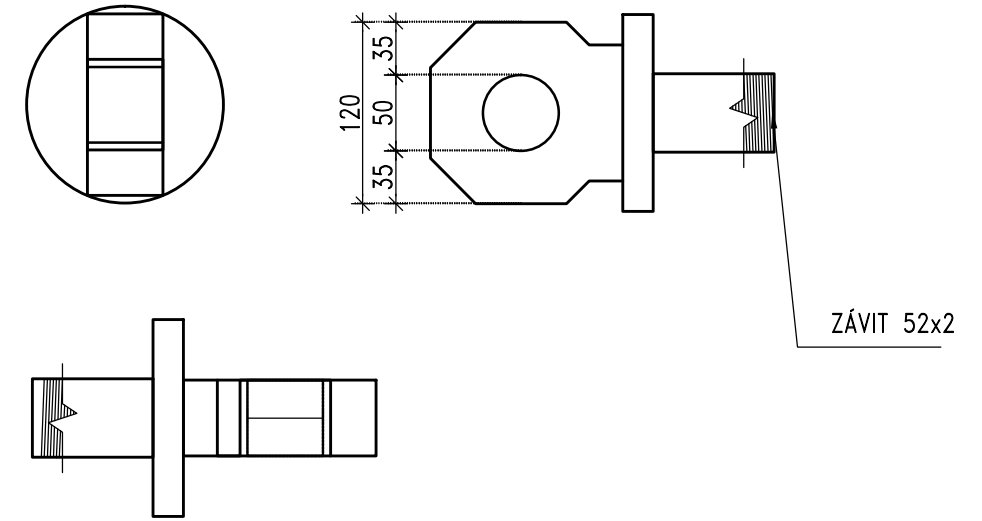
UPEVNĚNÍ DO PODLAHY
PŮDORYS, S355J+N
M 1:5



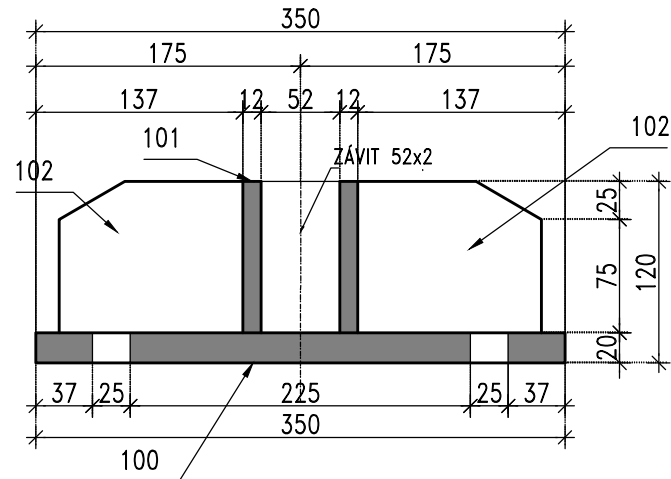
ČEP PRO UPEVNĚNÍ VZORKU, POLOŽKA 53
S355J+N, 2ks
M 1:5



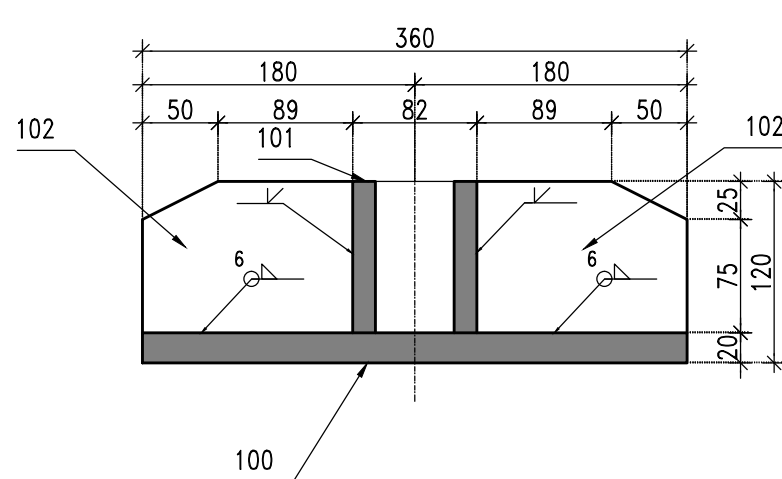
UPEVŇOVACÍ KLOUB, POLOŽKA 52
- EXPERIMENTÁLNÍ CENTRUM



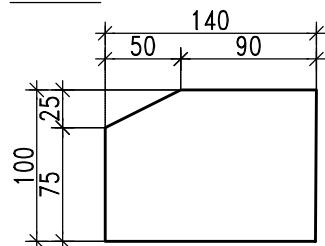
ŘEZ 1-1
M 1:5



ŘEZ 2-2
M 1:5



VÝZTUHA, POLOŽKA 102
M 1:5



Číslo změny:	Obsah změny:	Datum změny:
01	-	-
02	-	-
03	-	-

Objednatel:

Zpracovatel:  ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ – KATEDRA OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ
THÁKUROVA 7
166 29 PRAHA 6

Odpovědný řešitel: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D. *Ryjáček* Vypracoval: Ing. Jan Vůjtěch

Název akce:	LD15131 – Chování ocelových konstrukcí zesílených FRP při náročných účincích prostředí	Číslo akce ČVUT:	---
název PS/SO:	Testování únavové pevnosti ocelových vzorků vyztužených CFRP	Stupeň dokumentace:	Projekt
Název přílohy:	PODLAHOVÉ UPEVNĚNÍ	Datum:	03/2016
		Číslo části:	-
		Měřítko:	Počet formátů: 2x A4
		Číslo přílohy:	4

B. Technické listy pryskyřice a uhlíkové tkaniny

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0062101

Material Code: TOR003401
Material Designation: **CC 160 T - 120**
Manufacturing Date: 27.5.2014
Article no.: CA0046-641-0001
Test roll No.: C0062101
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.: TOR003401

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	400	395	410	* 400	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	400	395	410	* 400	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,34	0,31	0,37	* 0.39	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	160	155	170	161	DIN EN 12127
Width	cm	120	119,5	120,5	* 120.4	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C00621

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0040101

Material Code: TOR000102
Material Designation: **CC 200 P - 100**
Manufacturing Date: 24.1.2014
Article no.: CA0001-641-0001
Test roll No.: C0040101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxide resin
Binding: Plain

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000102

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 510	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 510	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,32	0,27	0,37	* 0.37	DIN EN 5084
Area weight	g/m ²	200	190	210	203	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.0	DIN EN 1773
Density	g/cm ³	1,76				

* orientation value

0

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, kuceraj@kordarna.cz

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0039101

Material Code: TOR000202
Material Designation: **CC 200 T - 100**
Manufacturing Date: 23.1.2014
Article no.: CA0004-641-0001
Test roll No.: C0039101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxide 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	* 510	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 510	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,32	0,27	0,37	* 0.42	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	200	190	210	201	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.0	DIN EN 1773
Density	g/cm3	1,76				

* orientation value

 Corresponding rolls:
 C0039102,

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0128101

Material Code: TOR003901
Material Designation: **CC 600 T - 120**
Manufacturing Date: 4.3.2015
Article no.: CA0054-641-0001
Test roll No.: C0128101
Finish: loomstate

Kind of material - warp Toray 12K 800 tex
Kind of material - weft Toray 12K 800 tex
Compatibility epoxid, vinylester, polyester
Binding twill 2/2

Results of specific tests according to Specification No.: TOR003901

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	370	365	375	* 370	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	370	365	375	* 372	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,9	0,8	1	* 0.93	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	600	595	620	615	DIN EN 12127
Width	cm	120	119,5	121	* 119.8	DIN EN 1773
Density TOR 12 K 800 tex	g/cm3	2				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C01281

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0106101

Material Code: AKS000101
Material Designation: **CCA 200 P - 100**
Manufacturing Date: 16.12.2014
Article no.: CA0053-641-0001
Test roll No.: C0106101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: AKS 3K 200 tex
Kind of material - weft: AKS 3K 200 tex
Compatibility: Epoxi resin
Binding: plain

Results of specific tests according to Specification No.: AKS000101

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 500	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 500	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,32	0,27	0,37	* 0.32	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	200	190	210	202	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.4	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C01061

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0110101

Material Code: AKS000201
Material Designation: **CCA 200 T - 100 Industry**
Manufacturing Date: 6.1.2015
Article no.: CA0057-641-0001
Test roll No.: C0110101
Finish: loomstate

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

Results of specific tests according to Specification No.: AKS000201

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 500	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	* 0.37	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	200	190	210	204	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.3	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C01101

Article: Style 461
Setting (Thr/cm): 6,0/6,0
Weave: Plain
Finish: loomstate

<u>Construction:</u>	<u>Warp</u>	<u>Weft</u>
Yarn material ¹⁾ :	Carbon 1K	Carbon 1K
Yarn number ¹⁾ :	67 tex	67 tex

<u>Technical Data:</u>		<u>Unit</u>	<u>Target</u>	<u>+/-</u>	<u>Tolerance</u>
Fibre density ^{1) 3)}	Warp	g/cm ³	n.G.	+/-	n.G.
	Weft	g/cm ³	n.G.	+/-	n.G.
Linear density ¹⁾	Warp	tex	67	+/-	4
	Weft	tex	67	+/-	4
Twist ¹⁾	Warp	T/m		+/-	
	Weft	T/m		+/-	
Setting	Warp	Thr./cm	6,0	+/-	0,3
	Weft	Thr./cm	6,0	+/-	0,3
Weave			Plain		
Weight		g/m ²	80	+/-	4
Dry weight		g/m ²	80	+/-	4
Moisture content		%	0,5	+/-	max.
Thickness ²⁾		mm	0,12	+/-	
Width		cm	as ordered	+/-	1

¹⁾ = n.G. = depending on order and yarn specification

²⁾ = approximate value, not for release

³⁾ = no measure, certified by supplier

Remarks:

TECHNICAL DATASHEET

Article: **Style 493**
 Setting (Thr/cm): **5,0/5,0**
 Weave: **Plain**
 Finish: **loomstate**

<u>Construction:</u>	<u>Warp</u>	<u>Weft</u>
Yarn material ¹⁾ :	Torayca® T300B 1000-50B	Torayca® T300B 1000-50B
Yarn number ¹⁾ :	67 tex	67 tex

<u>Technical Data:</u>		<u>Unit</u>	<u>Target</u>	<u>+/-</u>	<u>Tolerance</u>
Fibre density ^{1) 3)}	Warp	g/cm ³	1,76	+/-	0,04
	Weft	g/cm ³	1,76	+/-	0,04
Linear density ¹⁾	Warp	tex	67	+/-	3
	Weft	tex	67	+/-	3
Twist ¹⁾	Warp	T/m		+/-	
	Weft	T/m		+/-	
Setting	Warp	Thr./cm	5,0	+/-	0,3
	Weft	Thr./cm	5,0	+/-	0,3
Weave			Plain		
Weight		g/m ²	68	+/-	3
Dry weight		g/m ²	68	+/-	3
Moisture content		%	0,5	+/-	max.
Thickness ²⁾		mm	0,10	+/-	0,03
Width		cm	as ordered	+/-	1

¹⁾ = n.G. = depending on order and yarn specification

³⁾ = no measure, certified by supplier

²⁾ = approximate value, not for release

Remarks:

Date 04.04.02	Q.A. Monika Kampen	This Datasheet does not include Revision Service.
-------------------------	------------------------------	--

HIGH-PERFORMANCE CARBON FIBER
TORAYCA

T300/FT300 COMMERCIAL DOCUMENTATION

1) Product

The fibre is produced by the treatment of an acrylic fibre precursor, with pyrolysis, surface treatment and sizing processes.

Each bobbin of TORAYCA carbon fibre is protected against dust and packed in container to prevent damage during transportation.

2) Requirements

The fibre shall comply with the requirements given in the table (see overleaf) for a period of 24 months after production if stored under normal conditions. The fibre shall be used after a minimum of 48 hours, conditioned between 20°C and 35°C in 40% to 80% relative humidity. The fibre shall be uniform in appearance and substantially free from yarn breakage and foreign bodies.

3) Quality control

Fibre properties: all fibre properties are established on a single production lot basis

1) Definition of lot (TY-020B)

A "lot" of fibre is carbonized from one creel load of precursor and carbonized on the same equipment under one set of processing conditions.

2) Sampling plan

The sampling plan for inspection is based on ISO-3951 "Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for percent Defective".

3) Testing methods

Testing methods are based on the following TORAYCA standards:

Tensile properties	TY-030B-01 (current version)
Density	TY-030B-02 (current version)
Yield	TY-030B-03 (current version)
Sizing amount	TY-030B-05 (current version)
Twist	TY-030B-06 (current version)

4) Presentation of properties

Lot properties are obtained by taking the average values of each bobbin in the sampling plan. Tensile properties of each bobbin are the mean values of measurements taken on five specimens.

4) Certification

Each lot of fibre is certified by the manufacturer as fulfilling the requirements of this specification. A conformity certificate is sent to the customer with each delivery.

5) Fibre Properties

Property	Unit	Number of filaments	Nominal Value*
Tensile Strength	MPa (kgf/mm ²)		3530 (360)
Tensile Modulus	GPa (10 ³ kgf/mm ²)		230 (23.5)
Elongation	%		1.5
Density	g/cm ³	1000 3000 6000 12000	1.76
Yield	g/1000 m	1000 3000 6000 12000	66 198 396 800
Sizing Type & Amount		40A, 40B 40D 50A, 50B	1.0 % 0.7 % 1.0 %
Twist		Twisted, Untwisted	

*The stated values are typical values. For design purposes, please contact us.

6) Functional Properties

Property	Unit	Number of filaments	Nominal Value
Specific Heat	Cal/g.°C		0.19
Electric Resistivity	x 10 ⁻³ Ω.cm		1.7
CTE	α.10 ⁻⁶ /°C		-0.41
Thermal Conductivity	Cal/cm.s.°C		0.025
Cross Sectional Area	mm ²	1000 3000 6000 12000	0.04 0.11 0.23 0.45
Filament Diameter	µm		7

7) Composite Properties *

Property	Unit	Number of filaments	Nominal Value
Tensile Strength	MPa (kgf/mm ²)		1760 (180)
Tensile Modulus	GPa (10 ³ kgf/mm ²)		132 (13.5)
Tensile Strain	%		1.3
Compressive Strength	MPa (kgf/mm ²)		1570 (160)
Flexural Modulus	GPa (10 ³ kgf/mm ²)		125 (13.0)
ILSS	MPa (kgf/mm ²)		110 (11)

* Toray 3631- 180°C resin system. Measured temperature: RT. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS EUROPE

Marketing & Sales Division

Le Sequana II – 87, quai Panhard et Levassor

75 634 Paris Cedex 13 - France

Tel: 33 (0)1 56 61 12 80

Fax: 33 (0)1 53 79 99 01

Head Office & Plant

Route de Lagor

64150 Abidos - France

Tel: 33 (0)5 59 60 71 00

Fax: 33 (0)5 59 60 71 10

3K A-38

TECHNICAL DATA SHEET

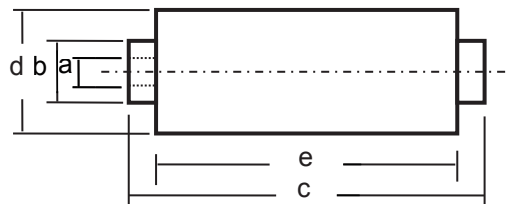
FIBER PROPERTIES

	English		Metric		Test Method
Tensile Strength	552	ksi	3800	MPa	ISO 10618
Tensile Modulus	34.8	Msi	240	GPa	ISO 10618
Strain	1.6	%	1.6	%	ISO 10618
Density	0.064	lbs/in ³	1.78	g/cm ³	ISO 10119
Yield	7,448	ft/lbs	200	g/1000m	ISO 1889
Sizing Type & Amount	D012		1.0 - 1.5	%	ISO 10548
Twist	Never twisted				

PACKAGING

The table below summarizes the standard packaging; other bobbin sizes can be supplied to satisfy special needs.

Tow Sizes	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
		a	b	c	d	e		
3K	1	76	83	280	110	250	13	13



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0024101

Material Code: TOR000501
Material Designation: **CC 160 P - 100**
Manufacturing Date: 8.1.2014
Article no.: CA0005-641-0001
Test roll No.: C0024101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxide resin
Binding: Plain

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000501

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	400	395	410	* 400	EN 1049-2
Sett of weft	n/m	400	395	410	* 410	EN 1049-2
Thickness	mm	0,3	0,26	0,34	* 0.32	EN 5084
Area weight	g/m ²	160	155	170	162	EN 12127
Width	cm	100	99,5	100,5	* 100.2	EN 1773
Density	g/cm ³	1,76				

* orientation value

 Corresponding rolls:
 C0024103,C0024102,

Technický list

Datum vydání: 12/2014

Identifikační č.:

02 02 06 04 001 0 000004

Sikadur®-330

Sikadur®-330**2komponentní epoxidová impregnační pryskyřice****Popis výrobku**

Sikadur®-330 je 2komponentní tixotropní impregnační / laminační pryskyřice na epoxidové bázi.

Použití

- impregnační / laminační pryskyřice pro SikaWrap® vyztužovací tkaniny určené pro suchý způsob aplikace
- základní pryskyřice pro mokry způsob aplikace
- konstrukční lepidlo na lepení Sika® CarboDur® lamel do zářezů

Vlastnosti / výhody

- jednoduché míchání a aplikace pomocí zednické lžice a impregnačního válečku
- speciálně vytvořena pro ruční aplikaci
- vynikající aplikace i na svislé plochy a plochy nad hlavou
- dobrá přilnavost k různým povrchům
- dobré mechanické vlastnosti
- nevyžaduje použití speciálního základního nátěru

Zkušební zprávy**Testy**

Road and Bridges Research Institute (Poland): IBDiM No AT/2008-04-336/1.

Vyhovuje požadavkům EN 1504-4: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 4: Konstrukční spojování.

Vydáno Prohlášení o vlastnostech č. 02 02 06 04 001 0 000004, certifikováno Oznamovým subjektem č.0921-CPR-2054 a označeno CE značkou

Údaje o výrobku**Vzhled / barva**

Komponent A – pryskyřice:	pasta
Komponent B – tvrdidlo:	pasta
Barva:	
Komponent A:	bílá
Komponent B:	šedá
Směs A+B:	světle šedá

Balení

Standard:
5 kg (A+B) předem dávkované nevratné obaly

Pro průmysl:
Komponent A: 24 kg
Komponent B: 6 kg

Skladování**Podmínky skladování /
Trvanlivost**

24 měsíců od data výroby v neporušeném originálním balení v suchu a při teplotách +5 °C až +30 °C.

Chraňte před přímým slunečním zářením.



Technické údaje

Chemická báze Epoxidová pryskyřice.

Objemová hmotnost 1,30 kg/l ± 0,1 kg/l (směs A+B) (při teplotě +23 °C)

Viskozita Rychlost smyku: 50 /s

teplota	viskozita
+10 °C	~ 10000 mPas
+23 °C	~ 6000 mPas
+35 °C	~ 5000 mPas

Koeficient teplotní roztažnosti $4,5 \times 10^{-5}$ na °C (-10 °C do +40 °C)

Teplotní stabilita Heat Deflection Temperature (HDT) – teplotní deformace (ASTM D648)

Doba zrání	Teplota	HDT
7 dní	+10 °C	+36 °C
7 dní	+23 °C	+47 °C
7 dní	+35 °C	+53 °C
7 dní (při +10 °C) + 7 dní (při +23 °C)	-	+43 °C

Pracovní teplota -40 °C do +45 °C

Mechanické / Fyzikální vlastnosti

Pevnost v tahu 30 N/mm² (po 7 dnech zrání, při teplotě +23 °C) (DIN EN ISO 527-3)

Přidrženost porušení v betonu (> 4 N/mm²) na pískovaném podkladu: > 1 den (DIN EN ISO4624)

Modul pružnosti V ohybu: 3800 N/mm² (po 7 dnech, při teplotě +23 °C) (DIN EN 1465)

V tahu: 4500 N/mm² (po 7 dnech, při teplotě +23 °C) (DIN EN ISO 527-3)

Protážení při přetržení 0,9 % (po 7 dnech, při teplotě +23 °C) (DIN EN ISO 527-3)

Odolnosti

Chemická odolnost Tento produkt není odolný vůči chemickému zatížení.

Teplotní odolnost Dlouhodobě odolává teplotnímu zatížení do +45°C.


Informace o systému

Skladba systému Základní nátěr: Sikadur®-330
Impregnační / laminační pryskyřice: Sikadur®-330
Tkanina pro zesilování konstrukcí: SikaWrap® - typ dle požadavků

Aplikační podrobnosti

Spotřeba Více informací naleznete v Metodické příručce pro aplikaci tkanin SikaWrap® suchým způsobem.

Přibližná spotřeba: 0,7 – 1,5 kg/m².

Kvalita podkladu	Podklad musí být pevný a musí mít dostatečnou pevnost pro zajištění minimální pevnost v tahu 1,0 N/mm ² nebo podle konkrétního projektu pro zesilování. Více informací naleznete v Metodické příručce pro aplikaci tkanin SikaWrap [®] suchým způsobem.												
Příprava podkladu	Více informací naleznete v Metodické příručce pro aplikaci tkanin SikaWrap [®] suchým způsobem.												
Aplikační podmínky / Omezení													
Teplota podkladu	+10 °C min. / +35 °C max.												
Teplota prostředí	+10 °C min. / +35 °C max.												
Vlhkost podkladu	≤ 4 % (hmotnostně) – testovací metoda: Sika-Tramex.												
Rosný bod	Pozor na kondenzaci! Teplota podkladu během aplikace musí být alespoň o 3 °C vyšší, než je rosný bod.												
Aplikace													
Poměr míchání	Komponent A : komponent B = 4 : 1 (hmotnostně) Při míchání většího množství směsi musí být přesně hmotnostně nadávkován každý komponent.												
Míchání	<u>Předem nadávkované množství:</u> Míchejte komponenty A+B dohromady minimálně 3 minuty elektrickým míchadlem (při nízkých otáčkách, max. 300 ot./min.) tak dlouho, až má hmota jednotnou konzistenci a nejsou patrné žádné barevné šmouhy. Vyvarujte se provzdušnění během míchání. Následně přemístěte celý obsah směsi do čisté nádoby a ještě jednou promíchejte nízkou rychlostí, aby došlo k odstranění vzduchu ze směsi. Namíchejte pouze takové množství, které jste schopni spotřebovat před zатуhnutím. <u>Nenadávkové množství:</u> Nejprve důkladně promíchejte každý komponent zvlášť. Nadávkujte jednotlivé složky ve správném poměru do přiměřené velké nádoby a následně míchejte elektrickým míchadlem při nízké rychlosti, dokud nebude mít hmota jednotnou konzistenci a bude bez barevných šmouh.												
													
Aplikace / Nářadí	Více informací naleznete v Metodické příručce pro aplikaci tkanin SikaWrap [®] suchým způsobem.												
Čištění nářadí	Očistěte veškeré použité nářadí ihned po ukončení práce pomocí Sika [®] Colma Cleaner. Vytvrzený materiál lze odstranit pouze mechanicky.												
Doba zpracovatelnosti	Doba zpracovatelnosti: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Teplota</th> <th>Čas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+10 °C</td> <td>90 minut (5 kg)</td> </tr> <tr> <td>+35 °C</td> <td>30 minut (5 kg)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Doba zpracovatelnosti začíná smícháním obou komponentů (pryskyřice a tvrdidla). Při nižších teplotách dochází k prodloužení doby zpracovatelnosti, naopak při vyšších teplotách dochází ke zkrácení doby zpracovatelnosti. Čím je větší množství namíchaného materiálu Sikadur[®]-330, tím je kratší doba zpracovatelnosti. K dosažení delší doby zpracovatelnosti za vyšších teplot, míchejte menší množství materiálu nebo ochlaďte jednotlivé komponenty před mícháním.</p> <p>Otevřená doba:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Teplota</th> <th>Čas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+10 °C</td> <td>60 minut</td> </tr> <tr> <td>+35 °C</td> <td>30 minut</td> </tr> </tbody> </table>	Teplota	Čas	+10 °C	90 minut (5 kg)	+35 °C	30 minut (5 kg)	Teplota	Čas	+10 °C	60 minut	+35 °C	30 minut
Teplota	Čas												
+10 °C	90 minut (5 kg)												
+35 °C	30 minut (5 kg)												
Teplota	Čas												
+10 °C	60 minut												
+35 °C	30 minut												

Čekací doba / Převrstvení

Produkt	Teplota povrchu	Minimum	Maximum
Sikadur®-330 x Sikadur®-330	+10 °C	24 hodin	Vytvrzená pryskyřice starší než 7 dní může být odmaštěna pomocí Sika® Colma Cleaner a jemně obroušena smirkovým papírem před dalším nátěrem.
	+23 °C	12 hodin	
	+35 °C	6 hodin	

Produkt	Teplota povrchu	Minimum	Maximum
Sikadur®-330 x Sikagard®- barevné nátěry	+10 °C	5 dní	Vytvrzená pryskyřice starší než 7 dní může být odmaštěna pomocí Sika® Colma Cleaner a jemně obroušena smirkovým papírem před dalším nátěrem.
	+23 °C	3 dny	
	+35 °C	1 den	

Časy jsou přibližné a mohou být ovlivněny okolními podmínkami.

Poznámky k aplikaci / Omezení

Tento produkt mohou zpracovávat pouze odborně proškolené osoby.

Sikadur®-330 musí být ochráněn před deštěm minimálně 24 hodin po aplikaci.

Zajistěte rozmístění tkaniny a laminační pryskyřice během otevřeného času.

Při nízkých teplotách a/nebo vysoké relativní vlhkosti vzduchu, se mohou na povrchu vytvrzené pryskyřice Sikadur®-330 objevit lepivé zbytky pryskyřice. Při aplikaci další vrstvy tkaniny SikaWrap® nebo nátěru musí být tyto lepivé pozůstatky nejdříve odstraněny, aby bylo dosaženo požadované pevnosti povrchu. Tyto zbytky mohou být odstraněny pomocí vody. V tomto případě musí být povrch před aplikací další vrstvy tkaniny SikaWrap® dostatečně vysušený.

Pro aplikaci za nižších nebo vyšších teplot je třeba zajistit po dobu 24 hodin skladování materiálů v kontrolovaných podmínkách, popřípadě upravit míchání, aplikaci a dobu zpracovatelnosti.

Více informací naleznete v Metodické příručce pro aplikaci tkanin SikaWrap® suchým způsobem.

Sikadur® pryskyřice jsou formulovány s nízkým dotvarováním pod trvalým zatížením. Avšak vzhledem k tomuto parametru a jeho chování při zatížení, musí návrh projektant počítat - obecně platí, že dlouhodobé konstrukční zatížení musí být menší než 20-25 % z kritického zatížení při poruše. Konzultujte prosím tuto záležitost se statikem pro statický výpočet zatížení.

Detaily vytvrzování

Doba vytvrzení

Teplota	Plně vytvrzené
+10 °C	7 dní
+23 °C	5 dní
+35 °C	2 dny

Časy vytvrzení jsou přibližné a mohou být ovlivněny okolními podmínkami.

Platnost hodnot

Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu.

Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.

Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz.

Bezpečnostní předpisy

Ochranná opatření

- Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci.
- Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice.
- Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.
- Odstraňování odpadu
- Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.
- Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci.
- Fólie je možné recyklovat.

Místní omezení

V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Právní dodatek

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikacemi v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, vždy zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Veškerá doporučení firmy Sika CZ, s.r.o. jsou nezávazná. Aplikátor musí prokázat, že předal písemně včas a úplné informace, které jsou nezbytné k řádnému a úspěšnému zaručujícímu posouzení firmou Sika. Aplikátor musí přezkoušet výrobky, zda jsou vhodné pro plánovaný účel aplikace. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení nebo na www.sika.cz.



Sika CZ, s.r.o.
Bystrcká 1132/36,
CZ 624 00 Brno

tel: +420 546 422 464
fax: +420 546 422 400
e-mail: sika@cz.sika.com
<http://www.sika.cz>



Technický list
Datum vydání 11/2014
Identifikační č.:
02 02 06 04 001 0 000006
Sikadur®-300

Sikadur®-300

2komponentní impregnační pryskyřice

Popis výrobku	Sikadur®-300 je 2komponentní impregnační pryskyřice na epoxidové bázi.	
Použití	<ul style="list-style-type: none">■ impregnační pryskyřice pro vyztužovací tkaniny SikaWrap®, určená pro mokry způsob aplikace■ penetrační pryskyřice pro mokry způsob aplikace	
Vlastnosti / výhody	<ul style="list-style-type: none">■ snadné míchání a aplikace pomocí zednické lžice a laminovacího válečku■ speciálně vytvořena pro ruční nebo strojní aplikaci■ dobrá přilnavost k různým povrchům■ dobré mechanické vlastnosti■ dlouhá doba zpracovatelnosti	
Zkušební zprávy		
Testy	Road and Bridges Research Institute (Poland): IBDiM No AT/2008-03-336/1. Vyhovuje požadavkům EN 1504-4: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 4: Konstrukční spojování. Vydáno Prohlášení o vlastnostech č. 02 02 06 04 001 0 000006, certifikováno Oznámeným subjektem č.0921-CPR-2054 a označeno CE značkou	
Údaje o výrobku		
Vzhled / barva	Komponent A – pryskyřice: Komponent B – tvrdidlo: Barva: Komponent A: Komponent B: Směs A+B:	kapalina kapalina světle žlutá až okrová bledě žlutá až průsvitná světle žlutá až průsvitná
Balení	Komponent A: Komponent B: Směs A+B:	22,305 kg 7,695 kg 30 kg
Skladování		
Podmínky skladování / Trvanlivost	24 měsíců od data výroby v neporušeném, uzavřeném, originálním balení v suchu a při teplotách +5 °C až +30 °C. Chraňte před přímým slunečním zářením.	
Technické údaje		
Chemická báze	Epoxidová pryskyřice.	
Objemová hmotnost	1,16 kg/l (směs A+B) (při teplotě +23 °C)	



Viskozita	Rychlost smyku: 50 /s	
	teplota	viskozita
	+15 °C	~ 2000 mPas
	+23 °C	~ 700 mPas
	+40 °C	~ 200 mPas
Koeficient teplotní roztažnosti	6,0 x 10 ⁻⁵ na každý °C (-20 °C do +40 °C)	
Teplotní stabilita	Heat Distortion Temperature (HDT) – teplotní deformace (ASTM D648)	
	Doba zrání	Teplota
	7 dní	+15 °C
	7 dní	+23 °C
	3 dny	+40 °C
	7 dní	+40 °C
Pracovní teplota	Od -40°C do +45°C.	
Mechanické / Fyzikální vlastnosti		
Pevnost v tahu	45 N/mm ² (po 7 dnech zrání, při teplotě +23 °C)	(DIN EN ISO 527-3)
Přídržnost	Porušení v betonu (> 4 N/mm ²) na pískovaném podkladu.	(DIN EN ISO 4624)
Modul pružnosti	V ohybu: 2800 N/mm ² (po 7 dnech, při teplotě +23 °C)	(DIN EN1465)
	V tahu: 3500 N/mm ² (po 7 dnech, při teplotě +23 °C)	(DIN EN ISO 527-3)
Protažení při přetržení	1,5 % (po 7 dnech, při teplotě +23 °C)	(DIN EN ISO 527-3)
Odolnosti		
Chemická odolnost	Tento produkt není odolný vůči chemickému zatížení.	
Teplotní odolnost	Dlouhodobě odolává teplotnímu zatížení do +45 °C.	
Informace o systému		
Skladba systému	Penetrace:	Sikadur®-330 / Sikadur®-300
	Impregnační / laminační pryskyřice:	Sikadur®-300
	Tkanina pro zesilování konstrukcí:	SikaWrap® - typ dle požadavků
Aplikační podrobnosti		
Spotřeba	Více informací naleznete v Metodických příručkách pro aplikaci tkanin SikaWrap® mokrým způsobem. Přibližná spotřeba: 0,4 – 1,0 kg/m ² .	
Kvalita podkladu	Podklad musí být pevný a musí mít dostatečnou pevnost pro zajištění minimální pevnost v tahu 1,0 N/mm ² nebo podle konkrétního projektu pro zesilování. Více informací naleznete v Metodických příručkách pro aplikaci tkanin SikaWrap® mokrým způsobem.	
Příprava podkladu	Více informací naleznete v Metodických příručkách pro aplikaci tkanin SikaWrap® mokrým způsobem.	

Aplikační podmínky / Omezení

Teplota podkladu	+15 °C min. / +40 °C max.
Teplota prostředí	+15 °C min. / +40 °C max.
Vlhkost podkladu	≤ 4% (hmotnostní) - testovací metoda: Sika-Tramex.
Rosný bod	Pozor na kondenzaci! Teplota podkladu během aplikace musí být alespoň o 3 °C vyšší, než je teplota rosného bodu.

Návod k aplikaci

Mísící poměr	Komponent A : komponent B = 100 : 34,5 (hmotnostně) Při míchání většího množství směsi musí být přesně hmotnostně nadávkován každý komponent.
Míchání	<u>Předem nadávkované množství:</u> Míchejte komponenty A+B dohromady minimálně 3 minuty elektrickým míchadlem. Vyvarujte se provzdušnění během míchání. Následně přemístěte celý obsah směsi do čisté nádoby a ještě jednou promíchejte cca 1 minutu nízkou rychlostí, aby došlo k odstranění vzduchu ze směsi. <u>Nenadávkované množství:</u> Nadávkujte jednotlivé složky ve správném poměru do přiměřeně velké nádoby a následně míchejte elektrickým míchadlem při nízké rychlosti dle postupu jako pro nadávkovaná balení.
Aplikace / Nářadí	Více informací naleznete v Metodických příručkách pro aplikaci tkanin SikaWrap® mokrým způsobem.
Čištění nářadí	Očistěte veškeré použité nářadí ihned po ukončení práce pomocí Sika® Colma Cleaner. Vytvrzený materiál lze odstranit pouze mechanicky.

Doba zpracovatelnosti

Doba zpracovatelnosti:

Teplota	Čas
+15 °C	6 hodin
+23 °C	4 hodiny
+40 °C	90 minut

Doba zpracovatelnosti začíná smícháním obou komponentů (pryskyřice a tvrdidla). Při nižších teplotách dochází k prodloužení doby zpracovatelnosti, naopak při vyšších teplotách dochází ke zkrácení doby zpracovatelnosti.
Čím je větší množství míchaného materiálu, tím je kratší doba zpracovatelnosti.

Otevřená doba:

Teplota	Čas
+15 °C	3 hodiny
+40 °C	60 minut

**Čekací doba /
Převrstvení**

Produkt	Teplota povrchu	Minimum	Maximum
Sikadur®-300	+15 °C	36 hodin	Vytvrzená pryskyřice starší než 7 dní může být odmaštěna pomocí Sika® Colma Cleaner a jemně obroušena smirkovým papírem před dalším nátěrem.
Sikadur®-300	+23 °C	24 hodin	
Sikadur®-300	+40 °C	12 hodin	

Produkt	Teplota povrchu	Minimum	Maximum
Sikadur®-300	+15 °C	7 dní	Vytvrzená pryskyřice starší než 7 dní může být odmaštěna pomocí Sika® Colma Cleaner a jemně obroušena smirkovým papírem před dalším nátěrem.
Sikagard®- barevné nátěry	+23 °C	5 dní	
Sikagard®- barevné nátěry	+40 °C	3 dny	

Časy jsou přibližné a mohou být ovlivněny okolními podmínkami.

**Poznámky k aplikaci /
Omezení**

Tento produkt smí zpracovávat pouze odborně proškolené osoby.

Sikadur®-300 musí být ochráněn před deštěm minimálně 24 hodin po aplikaci.

Zajistěte rozmístění vyztužovacích tkanin a jejich laminaci pryskyřicí během zpracovací doby.

Pro aplikaci za nižších nebo vyšších teplot je třeba sledovat skladování materiálů, popřípadě upravit míchání, aplikaci a dobu zpracovatelnosti.

Více informací naleznete v Metodických příručkách pro aplikaci tkanin SikaWrap® mokrým způsobem.

Sikadur® pryskyřice jsou formulovány s nízkým dotvarováním pod trvalým zatížením. Avšak vzhledem k tomuto parametru a jeho chování při zatížení, musí návrh projektant počítat - obecně platí, že dlouhodobé konstrukční zatížení musí být menší než 20-25 % z kritického zatížení při poruše. Konzultujte prosím tuto záležitost se statikem pro statický výpočet zatížení.

**Vytvrzující
podrobnosti****Doba vytvrzení**

Teplota	Plně vytvrzené
+15 °C	14 dní
+23 °C	7 dní
+40 °C	5 dny

Časy vytvrzení jsou přibližné a mohou být ovlivněny okolními podmínkami.

Platnost hodnot

Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu.

Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.

Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz.

Bezpečnostní předpisy

Ochranná opatření

- Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci.
- Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice.
- Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.
- Odstraňování odpadu
- Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.
- Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci.
- Fólie je možné recyklovat.

Místní omezení

V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Právní dodatek

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikacemi v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, vždy zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Veškerá doporučení firmy Sika CZ, s.r.o. jsou nezávazná. Aplikátor musí prokázat, že předal písemně včas a úplné informace, které jsou nezbytné k řádnému a úspěšnému zaručujícímu posouzení firmou Sika. Aplikátor musí přezkoušet výrobky, zda jsou vhodné pro plánovaný účel aplikace. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení nebo na www.sika.cz.



Sika CZ, s.r.o.
Bystrcká 1132/36,
CZ 624 00 Brno

tel: +420 546 422 464
fax: +420 546 422 400
e-mail: sika@cz.sika.com
<http://www.sika.cz>



C. Materiálové vlastnosti použité plávkové oceli

ZKUŠEBNÍ VZORKY PRO URČENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ OCELI

ČVUT Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Martin Macho

Vzorek mostu	Zkušební vzorek pro materiálovou zkoušku					Druh zkoušky			
	Číslo	Označení	Popis		Min. rozměry odebraného vz. (délka x šířka x tloušťka)	Zkouška tahem + vyhodnocení E	Zkouška rázem	Zkouška mikrostruktury	Chemické složení
S1	1	S1-1	Krční úhelník	L100x100x12	120x20x12	X		X	X
	2	S1-2	Krční úhelník	L100x100x12	120x20x12	X			
	3	S1-3	Krční úhelník	L100x100x12	180x15x12		X (20°)		
	4	S1-4	Krční úhelník	L100x100x12	180x15x12		X (-20°C)		
	5	S1-5	Stěna (plech)	P14	120x20x14	X		X	X
	6	S1-6	Pásnice (plech)	P9	120x20x9	X			
S2	1	S2-1	Krční úhelník	L100x100x12	120x20x12	X			
	2	S2-2	Krční úhelník	L100x100x12	120x20x12	X			
	3	S2-3	Stěna (plech)	P14	120x20x14	X			
	4	S2-4	Pásnice (plech)	P9	120x20x9	X			

Zkušební protokol vystavit v anglickém jazyce, jeden pro všechny vzorky.

CZ FERMET s.r.o.
LABORATORY CZ FERMET

Testing laboratory No. 1409 accredited by CAI according to ČSN EN ISO/IEC 17025

Buštěhradská 283, Kladno 272 03



L 1409

page 1/11

Test Certificate

No. 325/2016/LAZ-m

Customer : České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Address : Thákurova 7
166 29 Praha 6

Order No. : 1113460040

TENSILE TEST according to PP – M – 01 (ČSN EN ISO 6892-1)
CHARPY PENDULUM IMPACT TEST according to PP-M-02 (ČSN ISO 148-1)

Specimen No. : S1-1, S1-2, S1-3, S1-4, S1-5, S1-6
S2-1, S2-2, S2-3, S2-4

Pages : 11
Supplements : 8

Results are related only to the samples under the test.
This protocol is not allowed to be reproduced incomplete without Laboratory CZ FERMET agreement.

Kladno, 6.6.2016

Customer	Received	Specimen No.	Order No.	Tested
ČVUT v Praze Fakulta stavební	6.6.2016	S1-1, S1-2, S1-3, S1-4, S1-5, S1-6	1113460040	6.6.2016
Note	S1-1, S1-2, S1-3, S1-4	Carvical square	L100x100-12	
	S1-5	Wall (sheet)	P14	
	S1-6	Flange (sheet)	P9	

Results:

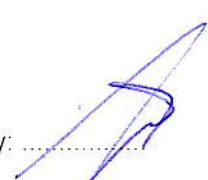
Standard For Testing		ČSN EN ISO 6892-1:2009; A113							
Testing Method		Tensile Test							
Apparatus		INSTRON 1196, serial number H2068							
Specimen No.	Specimen Orientation	Dimension \varnothing [mm]	Gage Length L_0 [mm]	Yield Strength R_{eH} [MPa]	Yield Strength $R_{p0,2}$ [MPa]	Tensile Strength R_m [MPa]	Elongation A5 [%]	Reduction in Area Z [%]	E (GPa)
S1-1	L	8,01	40	268	240	388	40,8	69,4	205,826
S1-2	L	8,00	40	244	229	382	38,3	68,8	206,782
S1-5	L	8,00	40	220	212	322	44,0	79,6	207,201
S1-6	L	6,01	30	267	253	414	40,0	67,6	208,567

Standard For Testing		ČSN ISO 148-1			
Testing Method		Charpy Pendulum Impact Test			
Apparatus		Charpy Impact Machine AMSLER RKP 300, serial number 93			
Specimen No.	Testing Bar	Specimen Orientation	Initial Potential Energy [J]	Testing Temperature [°C]	Absorbed Energy [J]
S1-3	KV ₂ 300	L	300	20	73
	KV ₂ 300	L	300	20	101
	KV ₂ 300	L	300	20	37
S1-4	KV ₂ 300	L	300	-20	5
	KV ₂ 300	L	300	-20	6
	KV ₂ 300	L	300	-20	5

Written by: 

K LAZ-m Martin Bambas




Checked and approved by: 

VL Ing. L. Procházka, Ph.D.


Customer	Received	Specimen No.	Order No.	Tested
ČVUT v Praze Fakulta stavební	6.6.2016	S2-1, S2-2, S2-3, S2-4	1113460040	6.6.2016
Note	S2-1, S2-2	Carvical square	L100x100-12	
	S2-3	Wall (sheet)	P14	
	S2-4	Flange (sheet)	P9	

Results:

Standard For Testing		ČSN EN ISO 6892-1:2009; A113							
Testing Method		Tensile Test							
Apparatus		INSTRON 1196, serial number H2068							
Specimen No.	Specimen Orientation	Dimension \varnothing [mm]	Gage Length L_0 [mm]	Yield Strength R_{eH} [MPa]	Yield Strength $R_{p0.2}$ [MPa]	Tensile Strength R_m [MPa]	Elongation A 5 [%]	Reduction in Area Z [%]	E (GPa)
S2-1	L	8,00	40	299	261	396	32,0	65,6	208,568
S2-2	L	8,01	40	267	265	400	31,8	63,8	207,386
S2-3	L	8,00	40	241	216	375	40,8	69,5	207,986
S2-4	L	6,01	30	299	252	388	41,7	73,0	209,809

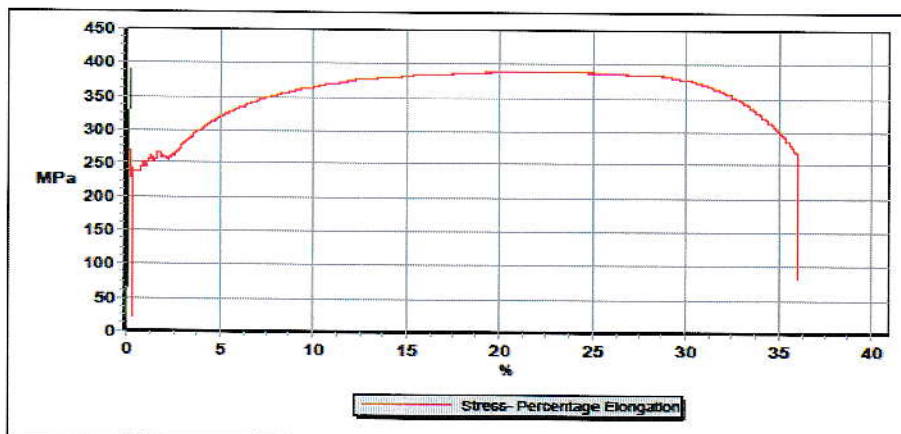
Written by: 

K LAZ-m Martin Bambas

Checked and approved by: 

VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.1



results ČVUT Pha -KO 64 exA:

	ReH [MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z* [%]	E [GPa]
S1-1	268	240	388	40,8	69,4	205,826

Written by:

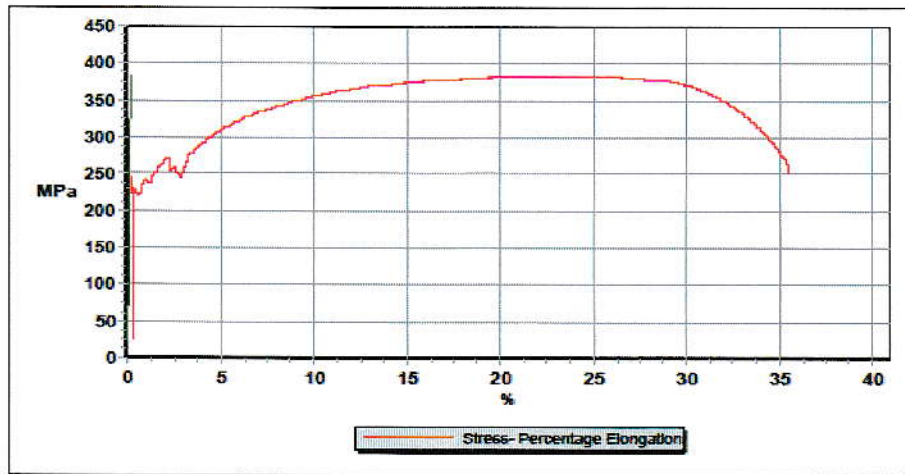
K LAZ-m Martin Bambas



Checked and approved by:

VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.2




results ČVUT Praha -KO 64 exA:

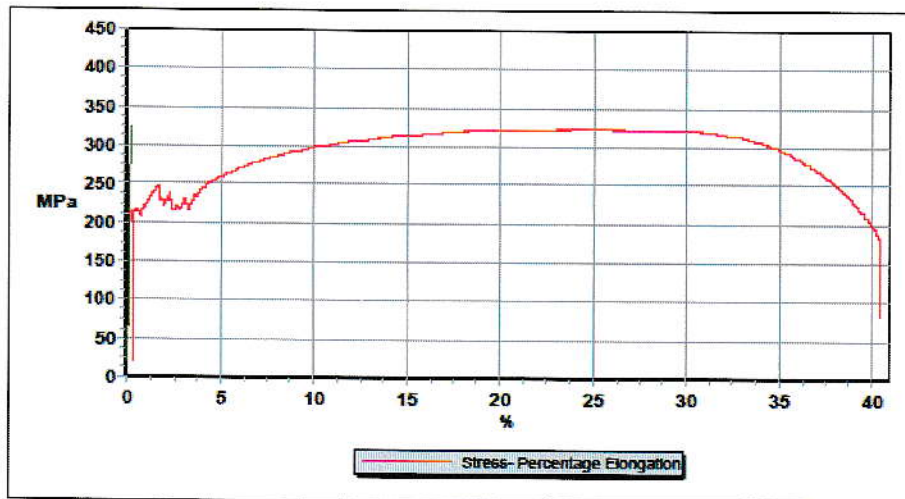
	ReH [MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z* [%]	E [GPa]
S1-2	244	229	382	38,3	88,8	206,782

Written by: 
K LAZ-m Martin Bambas



Checked and approved by: 
VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.3



results ČVUT Praha -KO 64 exA:

	ReH [MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z* [%]	E [GPa]
S1-5	220	212	322	44,0	79,6	207,201

Written by:

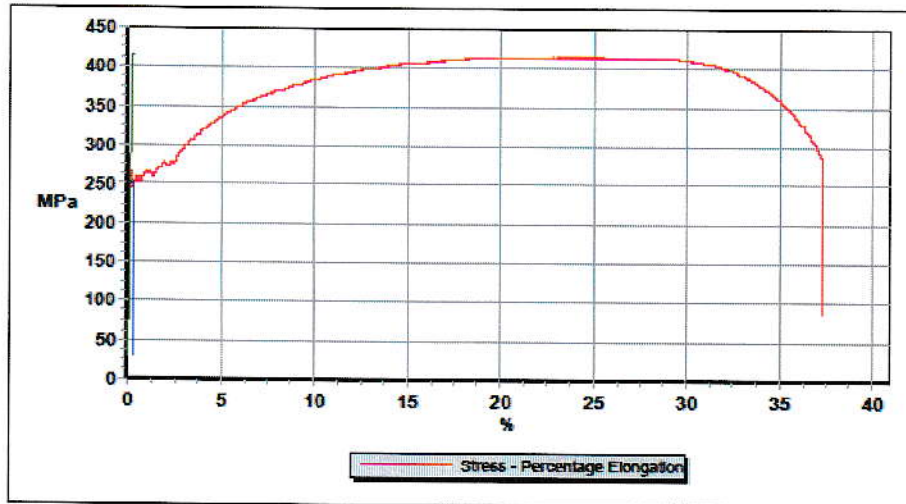
K LAZ-m Martin Bambas



Checked and approved by:

VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.4



results ČVUT Pha - KO 65 exA:

	ReH [kN/m]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z ² [%]	E [GPa]
S1-6	267	253	414	40,0	67,6	208,567

Written by:

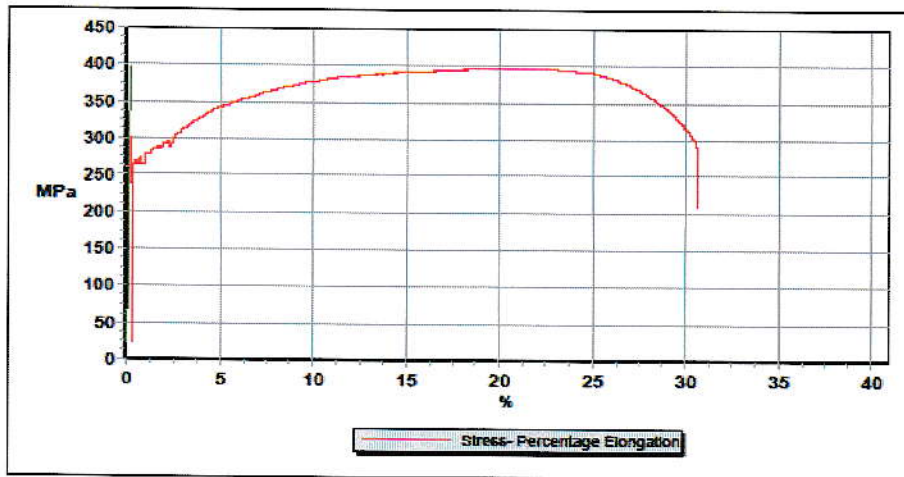
K LAZ-m Martin Bambas



Checked and approved by:

VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.5



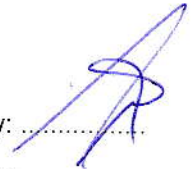
results ČVUT Pha -KO 64 exA:

	ReH [MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z* [%]	E [GPa]
S2-1	299	281	396	32.0	65,8	208,568

Written by: 

K LAZ-m Martin Bambas



Checked and approved by: 


VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.6

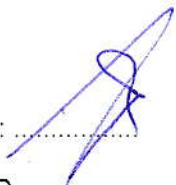


results CVUT Pha -KO 64 exA:

	ReH [MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z* [%]	E [GPa]
S2-2	267	265	400	31,8	63,8	207,386

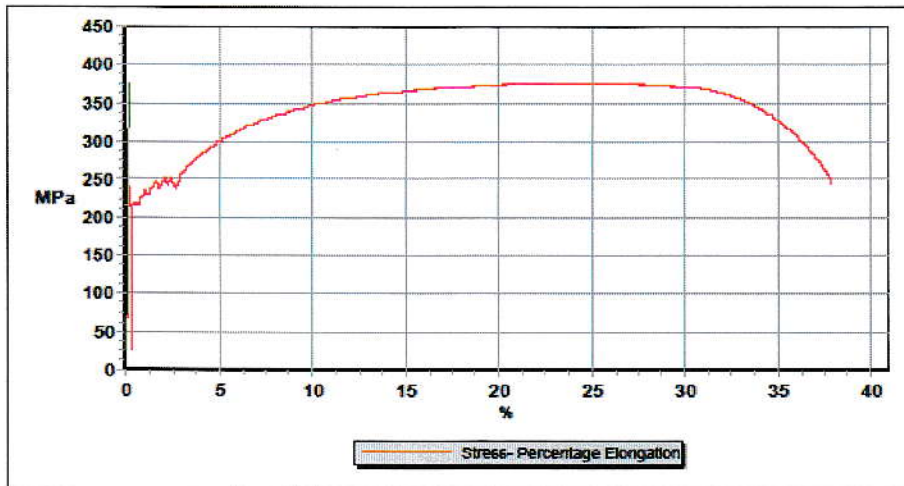
Written by: 

K LAZ-m Martin Bambas

Checked and approved by: 

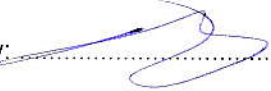
VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.7



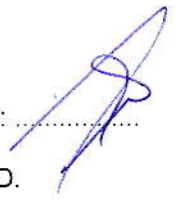
results ČVUT Pha -KO 64 exA:

	ReH [MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z' [%]	E [GPa]
S2-3	241	216	375	40.8	69.5	207.986

Written by: 

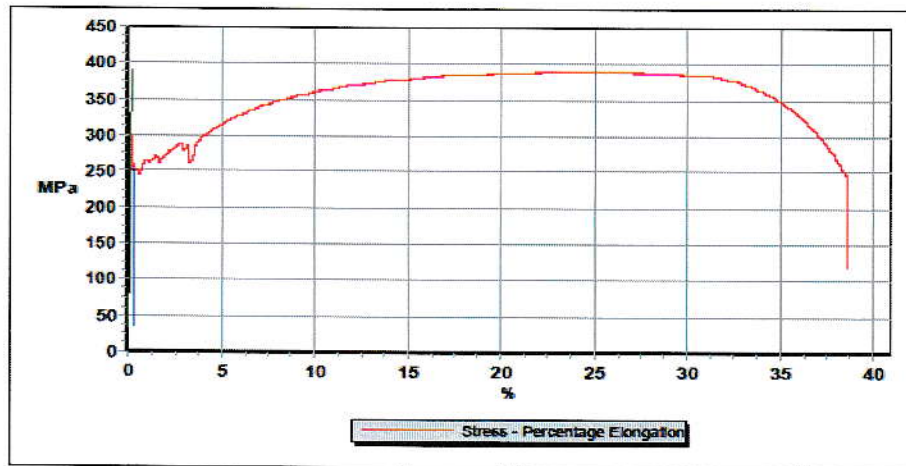
K LAZ-m Martin Bambas



Checked and approved by: 


VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Supplement No.8



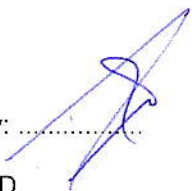
results ČVUT Pha - KO 65 exA:

	ReH [kN/m]	[MPa]	[MPa]	[%]	Z* [%]	E [GPa]
S2-4	299	252	388	41,7	73,0	209,809

Written by: 

K LAZ-m Martin Bambas



Checked and approved by: 

VL Ing. L. Procházka, Ph.D.

Test Certificate
No.98/2016/LAZ-c

Chemical analysis

Customer : České vysoké učení technické v Praze Fakulta stavební
Address : Thákurova 7
166 29 Praha 6

Received : 2.6.2016
Tested : 2.6.2016
Apparatus : QUANTRON Magellan
Testing Method optical emission spectrometric method
Pages : 1
Supplements : 0

Order	Specimen	Steel	Heat	Product
1113460040	S1-1	----	----	120x20x12
Element	[%]	Element	[%]	
C	0,17	Cu	0,02	
Si	0,00	Nb	<0,002	
Mn	0,30	Ti	0,004	
P	0,032	V	<0,001	
S	0,030	W	<0,005	
Cr	0,01	Pb	0,000	
Mo	<0,01	Sn	<0,001	
Ni	0,02	As	0,025	
Al	0,002	Sb	<0,001	
Co	0,014	B	0,0015	

Results are related only to the samples under the test.
This certificate is prohibited to reproduce incomplete without Laboratory CZ FERMET agreement.

Kladno:
2.6.2016

Written by:
Žofie Ziková
K



Checked and approved by:
T.Štefanová
K



Test Certificate

No.99/2016/LAZ-c

Chemical analysis

Customer : České vysoké učení technické v Praze Fakulta stavební
Address : Thákurova 7
166 29 Praha 6

Received : 2.6.2016
Tested : 2.6.2016
Apparatus : QUANTRON Magellan
Testing Method optical emission spectrometric method
Pages : 1
Supplements : 0

Order	Specimen	Steel	Heat	Product
1113460040	S1-5	----	----	120x20x14
Element	[%]	Element	[%]	
C	0,03	Cu	0,04	
Si	0,000	Nb	<0,002	
Mn	0,19	Ti	0,004	
P	0,029	V	0,001	
S	0,023	W	<0,005	
Cr	0,01	Pb	0,000	
Mo	<0,01	Sn	0,002	
Ni	0,02	As	0,047	
Al	0,001	Sb	<0,001	
Co	0,015	B	0,0014	

Results are related only to the samples under the test.

This certificate is prohibited to reproduce incomplete without Laboratory CZ FERMET agreement.

Kladno:
2.6.2016

Written by:
Žofie Zíková
K

Zíková



Checked and approved by:
T.Štefanová
K

Štefanová

CZ FERMET s.r.o.
LABORATORY CZ FERMET

Buštěhradská 283, Kladno 272 03

Page 1/2

Test Certificate
No. 141/2016/LAZ-g

Customer : České vysoké učení technické v Praze

Address : Fakulta stavební Thákurova 7
166 29 PRAHA 6

Order No : 1113460040

MICROSTRUCTURE TEST

Specimen No. : S1-1, S1-5

Pages : 4

Supplements : 2

Results are related only to the samples under the test

This protocol is not allowed to be reproduced incomplete without Laboratory CZ FERMET agreement.

Kladno, 3.6.2016

Microstructure Test:

Customer	Received	Order No.	Heat No.	Product	Size
ČVÚT PRAHA	2.6.2016	1113460040	---	L100x100x12	120x20x12
Specimen No.	Steel Grade	Test			Tested
S1-1	---	Microstructure test.			3.6.2016
Test					
Preparing specimen	Mechanically grinding and polishing				
Etching	Nital 5%				
Result	Ferrite + pearlite + tertiary cementite (Fig.1,2).				
Magnification	Microscope	Tested by		Distribution List	
100x,500x	NEOPHOT 32	Ing.M.Barinková		1 x LAZg	

Microstructure Test:

Customer	Received	Order No.	Heat No.	Product	Size
ČVÚT PRAHA	2.6.2016	1113460040	---	L100x100x12	120x20x12
Specimen No.	Steel Grade	Test			Tested
S1-5	---	Microstructure test.			3.6.2016
Test					
Preparing specimen	Mechanically grinding and polishing				
Etching	Nital 5%				
Result	Ferrite + tertiary cementite (Fig.3,4).				
Magnification	Microscope	Tested by		Distribution List	
100x,500x	NEOPHOT 32	Ing.M.Barinková		1 x LAZg	

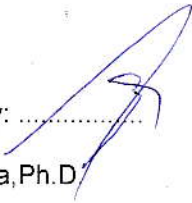
Written by: and liable for technical accuracy
VK LAZ-g Ing.M.BarinkováChecked and approved by: Ing.L.Procházka, Ph.D.
VL

Fig.1, 100x

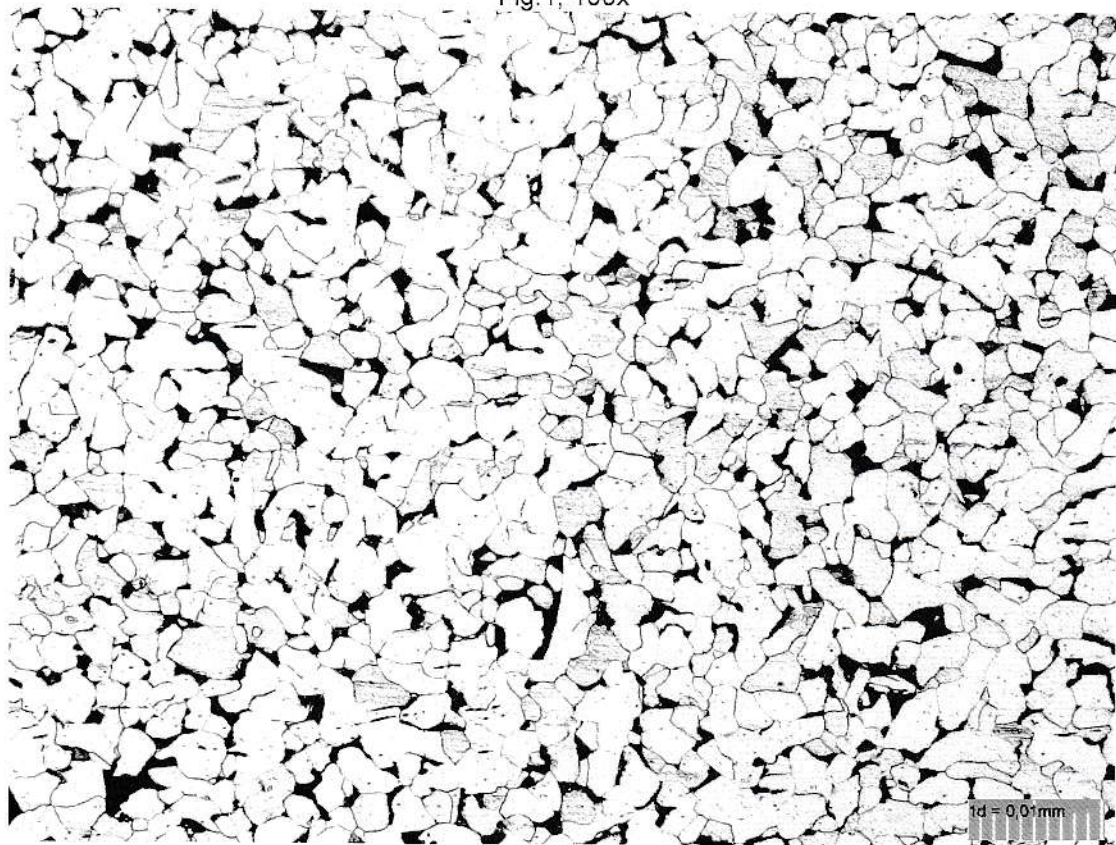


Fig.2, 500x

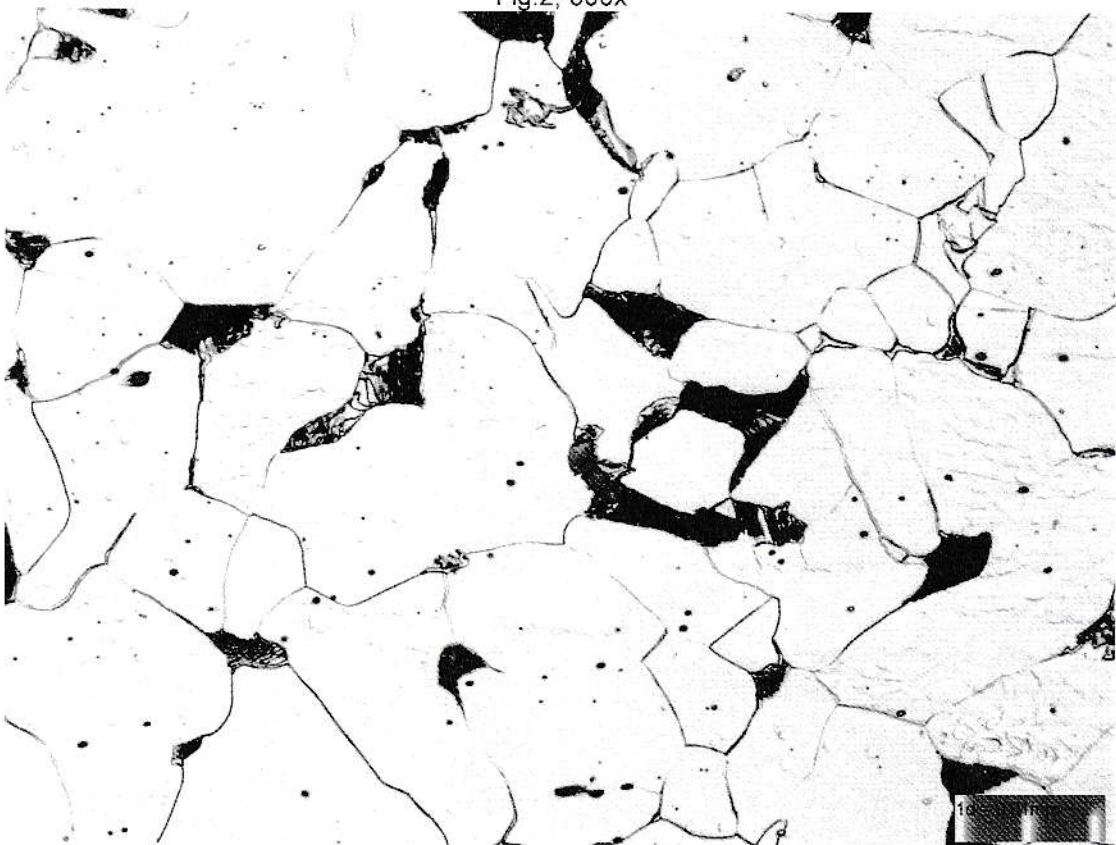


Fig.3, 100x

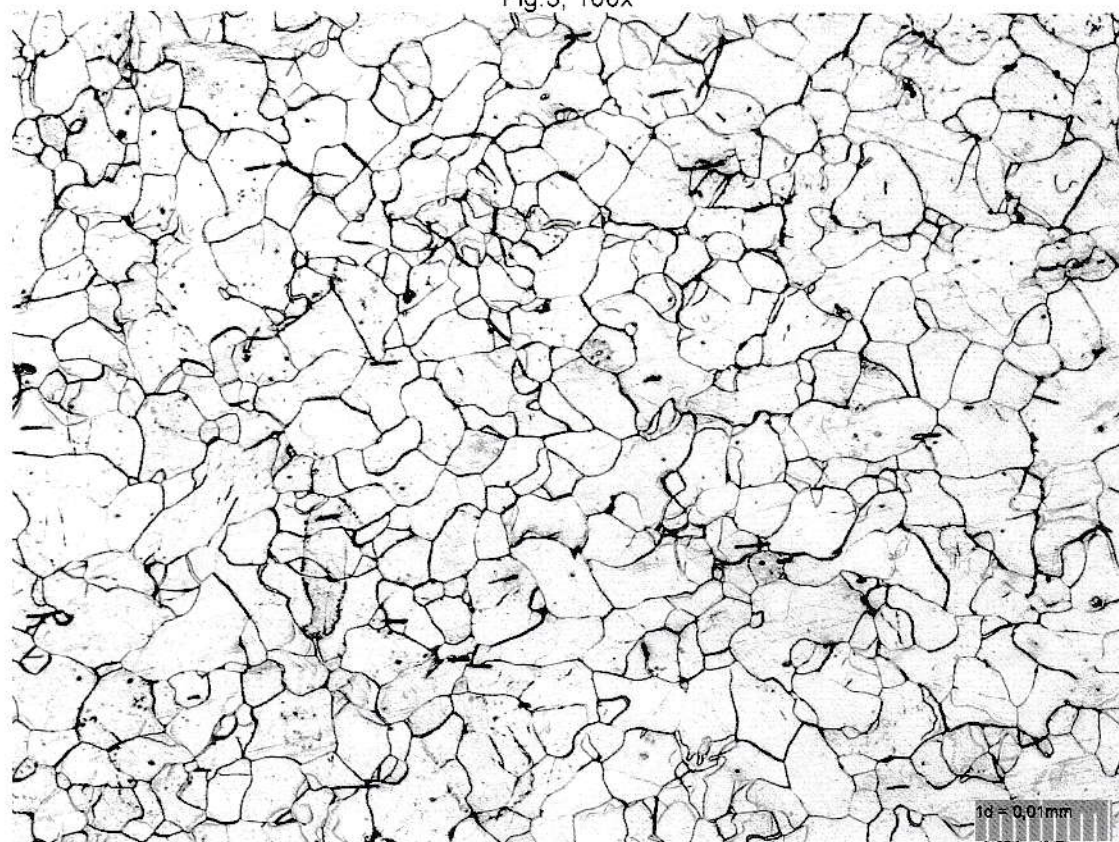
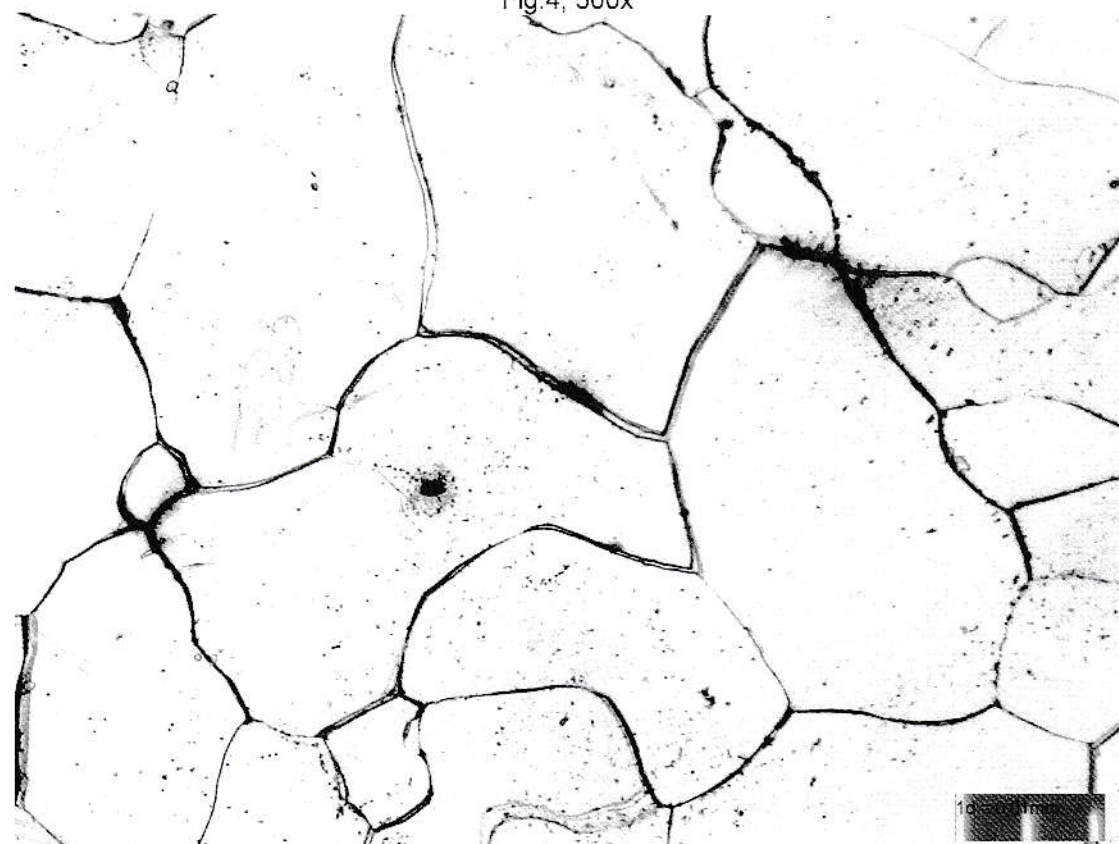


Fig.4, 500x



D. Protokoly zkoušek kompozitu



VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

TENSILE TEST

Sample file name: SCH 140 18 CVUT laminat typ 1.is_tens

Tensile Machine: SCHENCK 250

Extenzometr: Instron I 3560-BIA 025M-010-ST

Material: CFRP

Set: laminat typ 1

Test method: ASTM D3039

Croshead speed: 2.0 mm/min

Test date: 2.10. 2018

Operator name: M.Kakos

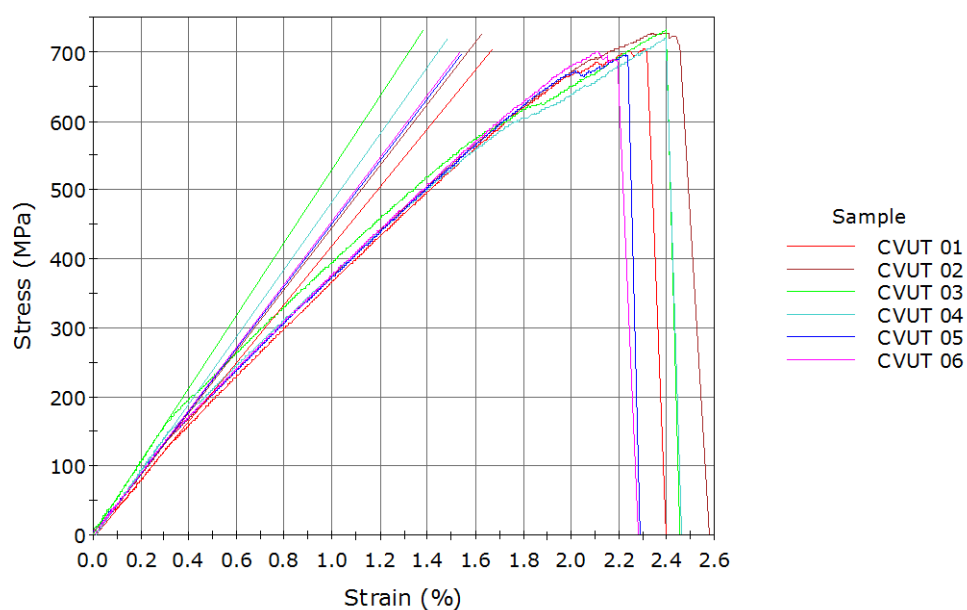
Temperature: 24.4 °C

Humidity: 29.2 %R.H.

	Sample	Failure mode	Width (mm)	Thickness (mm)	E Modulus (GPa)	Poisson's no. (1)	Max. Load (kN)	Strength (MPa)
1	CVUT 01	LGM	20.26	4.13	42.5	0.03352	59.032	705.5
2	CVUT 02	LGB	20.09	4.10	44.8	0.04709	59.994	728.4
3	CVUT 03	LGB	20.11	4.13	53.0	0.02780	60.787	731.9
4	CVUT 04	LGB	20.24	4.18	49.0	0.09069	60.976	720.7
5	CVUT 05	LGM	20.15	4.17	45.3	0.04699	58.497	696.2
6	CVUT 06	LGM	20.19	4.10	45.9	0.05658	57.988	700.5
Mean			20.17	4.14	46.7	0.05044	59.546	713.9
S.D.			0.069	0.034	3.700	0.022	1.231	15.1
C.V.			0.342	0.820	7.915	44.151	2.068	2.1
Min.			20.09	4.10	42.5	0.02780	57.988	696.2
Max.			20.26	4.18	53.0	0.09069	60.976	731.9

NOTE: The E modulus was determined using a linear regression (a least square fit of a linear function) between the strain values of 0.1 and 0.3%

Failure mode: LGM – lateral gage middle; LGB – lateral gage bottom.



VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

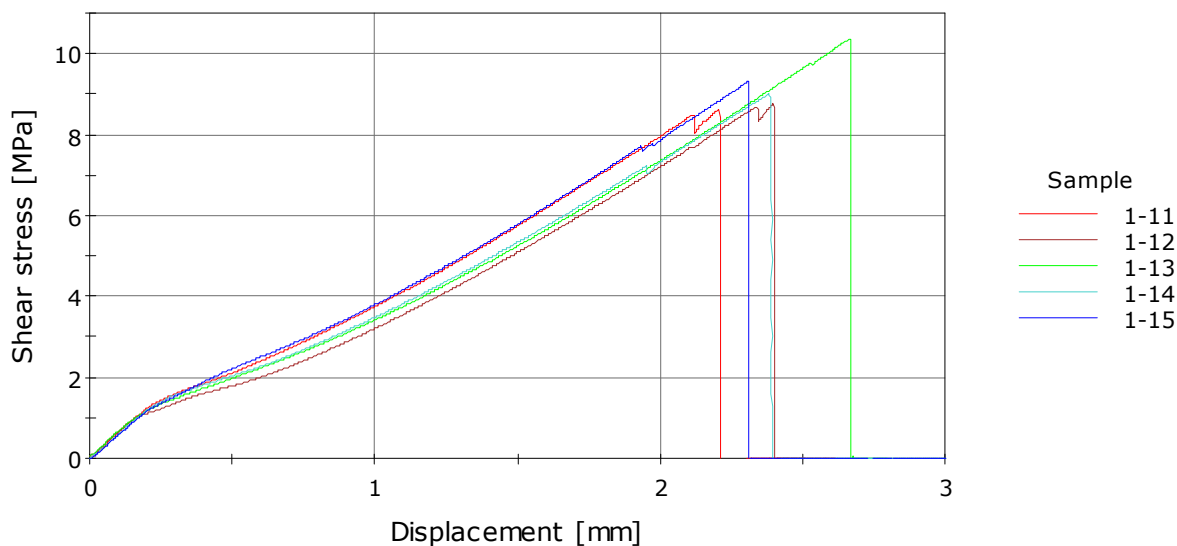
DOUBLE LAP JOINT SHEAR STRENGTH TEST

Sample file name: INST 473-18.is_tens

Tensile Machine: Instron 55R1185
 Material: CFRP + steel
 Set: 1
 Test method: ASTM D3528
 Crosshead speed: 2.0 mm/min
 Test date: 17.12. 2018
 Operator name: R. Hron
 Temperature: -40 °C
 Humidity: -

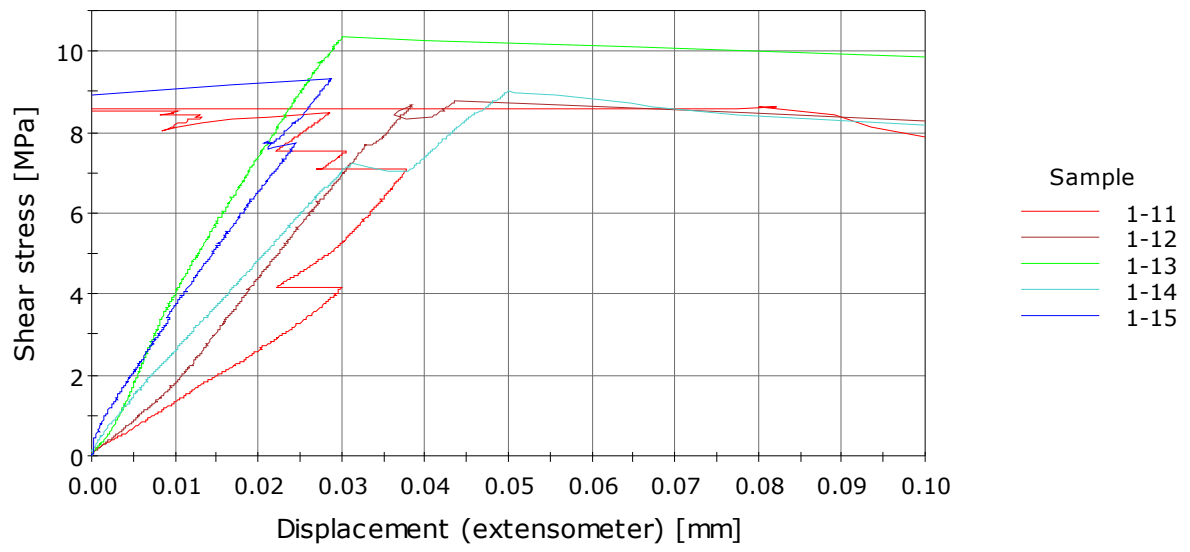
	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-11	30.34	49.10	25.69	8.62
2	1-12	30.23	50.46	26.70	8.75
3	1-13	30.26	50.43	31.67	10.38
4	1-14	30.38	50.68	27.72	9.00
5	1-15	30.37	48.18	27.24	9.31
Mean		30.32	49.77	27.80	9.21
S.D.		0.067	1.087	2.289	0.701
C.V.		0.222	2.184	8.231	7.614
Min.		30.23	48.18	25.69	8.62
Max.		30.38	50.68	31.67	10.38

-40 °C





-40 °C



VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

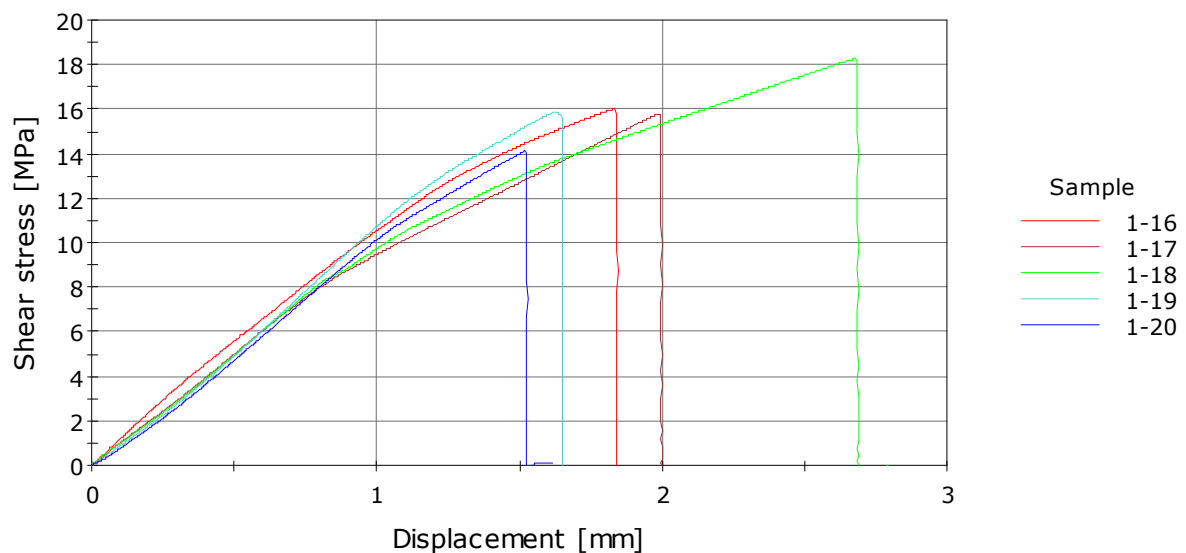
DOUBLE LAP JOINT SHEAR STRENGTH TEST

Sample file name: INST 474-18.is_tens

Tensile Machine: Instron 55R1185
 Material: CFRP + steel
 Set: 1
 Test method: ASTM D3528
 Crosshead speed: 2.0 mm/min
 Test date: 17.12. 2018
 Operator name: R. Hron
 Temperature: 23.0 °C
 Humidity: 21.9 %R.H.

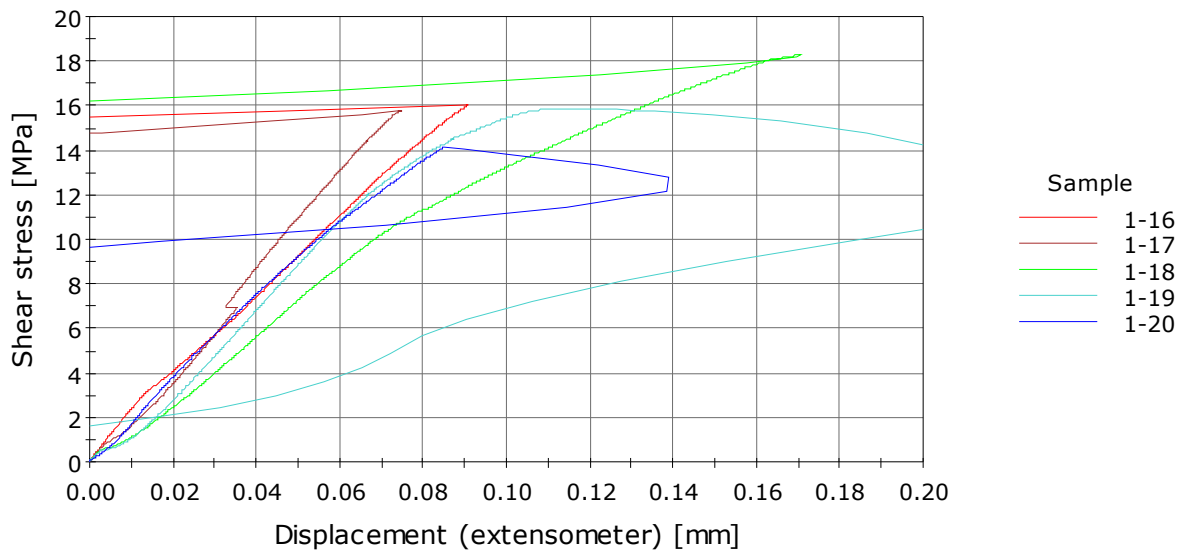
	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-16	30.41	49.81	48.57	16.03
2	1-17	30.38	49.59	47.57	15.79
3	1-18	30.31	49.12	54.48	18.30
4	1-19	30.37	49.87	48.14	15.89
5	1-20	30.42	49.57	42.59	14.12
Mean		30.38	49.59	48.27	16.03
S.D.		0.043	0.295	4.225	1.488
C.V.		0.142	0.595	8.753	9.282
Min.		30.31	49.12	42.59	14.12
Max.		30.42	49.87	54.48	18.30

RT





RT



VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

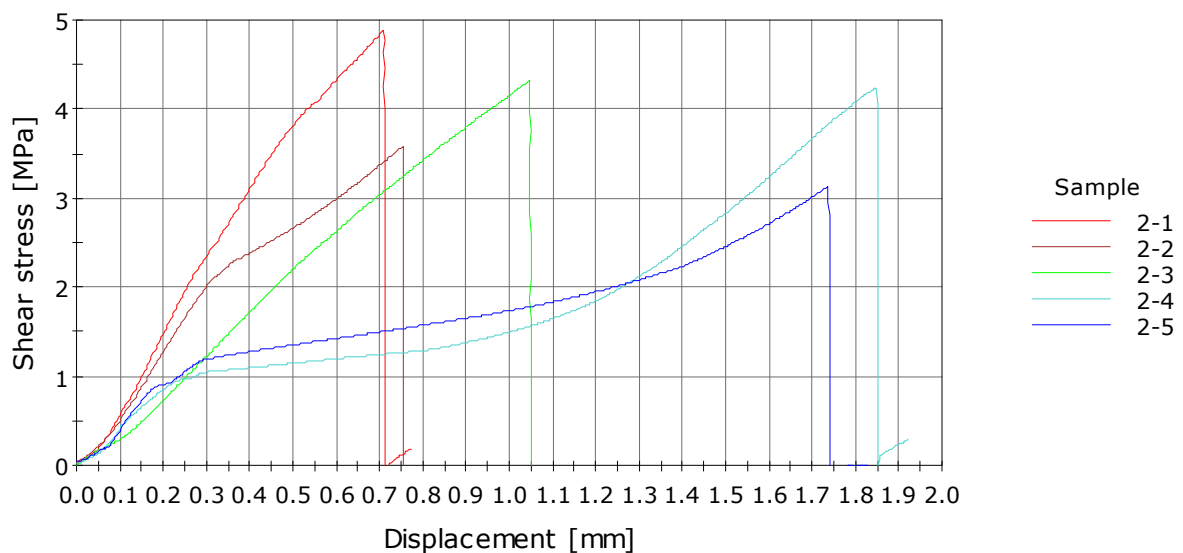
DOUBLE LAP JOINT SHEAR STRENGTH TEST

Sample file name: INST 475-18.is_tens

Tensile Machine: Instron 55R1185
 Material: CFRP + steel
 Set: 2
 Test method: ASTM D3528
 Crosshead speed: 2.0 mm/min
 Test date: 17.12. 2018
 Operator name: R. Hron
 Temperature: 23.2 °C
 Humidity: 22.5 %R.H.

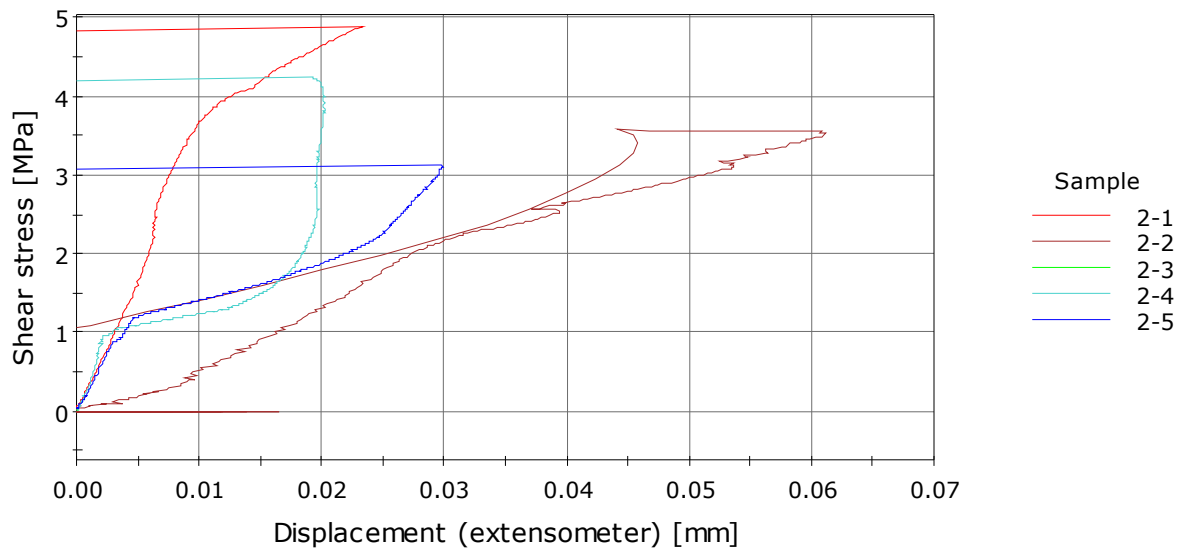
	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	2-1	30.13	53.36	15.68	4.88
2	2-2	30.02	51.64	11.09	3.58
3	2-3	29.88	53.21	13.72	4.31
4	2-4	29.83	50.27	12.73	4.24
5	2-5	30.00	50.00	9.36	3.12
Mean		29.97	51.70	12.52	4.03
S.D.		0.119	1.579	2.425	0.685
C.V.		0.397	3.055	19.374	17.018
Min.		29.83	50.00	9.36	3.12
Max.		30.13	53.36	15.68	4.88

RT





RT





VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

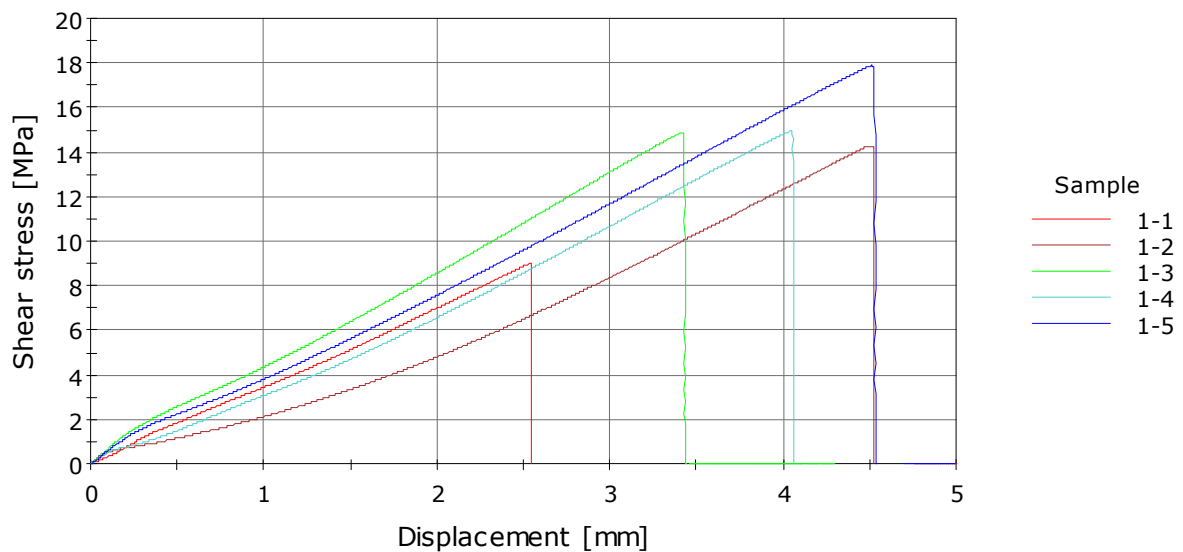
DOUBLE LAP JOINT SHEAR STRENGTH TEST

Sample file name: INST 471-18.is_tens

Tensile Machine: Instron 55R1185
Material: CFRP + steel
Set: 1
Test method: ASTM D3528
Crosshead speed: 2.0 mm/min
Test date: 17.12. 2018
Operator name: R. Hron
Temperature: 45 °C
Humidity: -

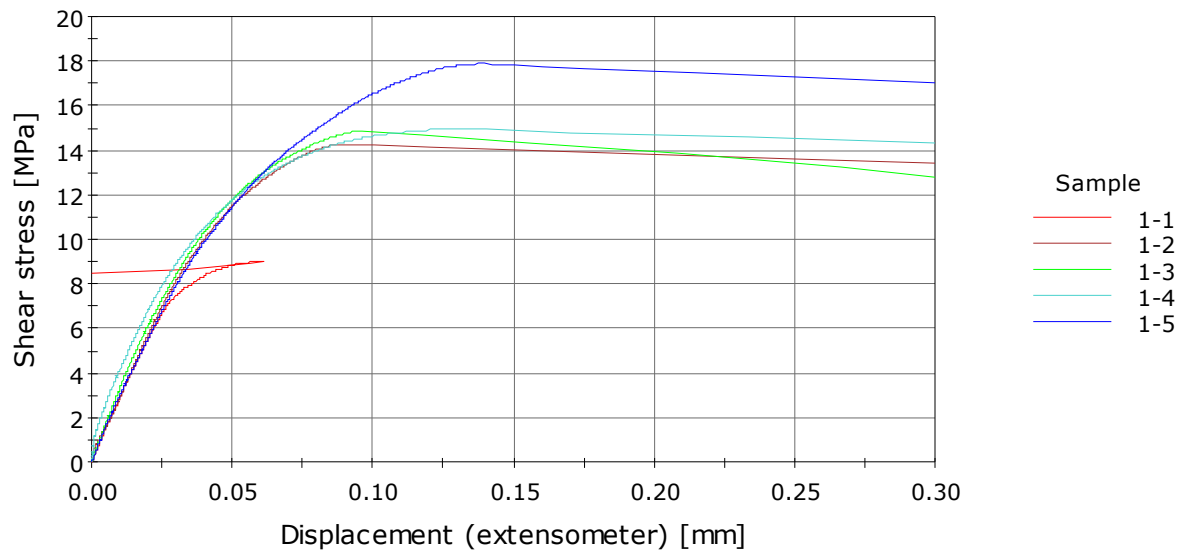
	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-1	30.54	51.26	28.19	9.00
2	1-2	30.57	52.21	45.54	14.27
3	1-3	30.36	46.46	42.00	14.89
4	1-4	30.30	50.94	46.15	14.95
5	1-5	30.36	51.25	55.66	17.89
Mean		30.43	50.42	43.51	14.20
S.D.		0.121	2.266	9.946	3.226
C.V.		0.397	4.493	22.860	22.718
Min.		30.30	46.46	28.19	9.00
Max.		30.57	52.21	55.66	17.89

45 °C





45 °C



VZLU - Czech Aerospace Research Centre
Laboratories - Strength of Structures Division
MTN Group

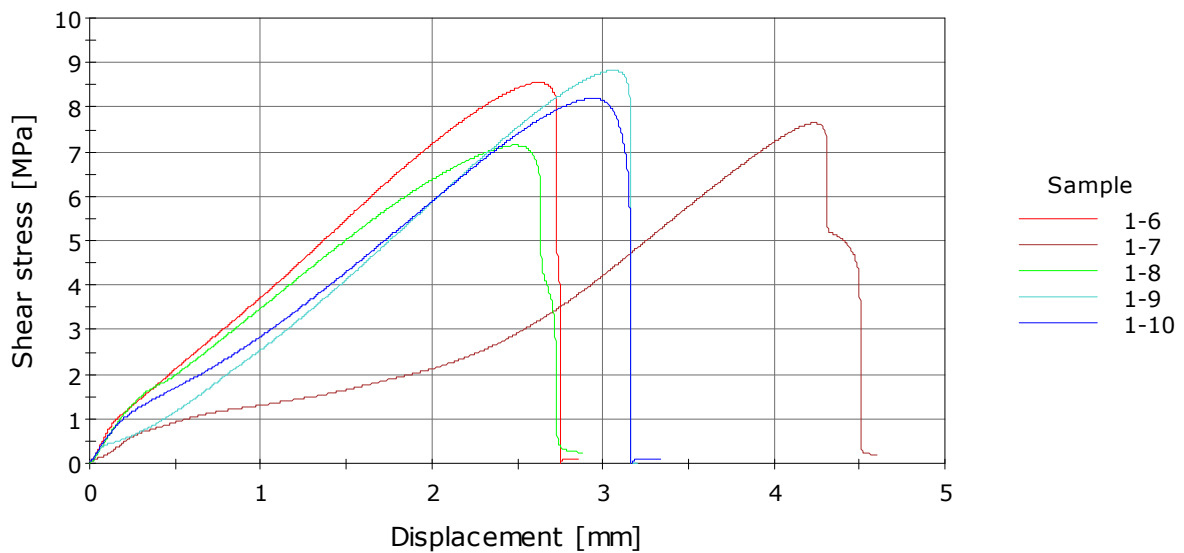
DOUBLE LAP JOINT SHEAR STRENGTH TEST

Sample file name: INST 472-18.is_tens

Tensile Machine: Instron 55R1185
 Material: CFRP + steel
 Set: 1
 Test method: ASTM D3528
 Crosshead speed: 2.0 mm/min
 Test date: 17.12. 2018
 Operator name: R. Hron
 Temperature: 60 °C
 Humidity: -

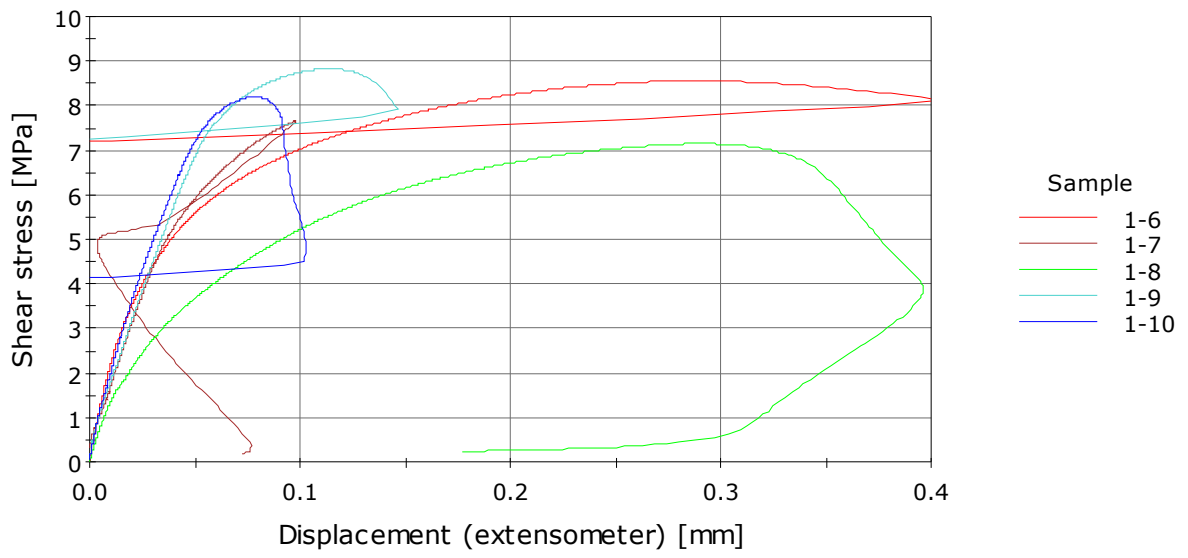
	Sample	Width [mm]	Overlap [mm]	Max. Load [kN]	Shear strength [MPa]
1	1-6	30.38	49.24	25.61	8.56
2	1-7	30.45	49.30	22.94	7.64
3	1-8	30.50	50.96	22.21	7.14
4	1-9	30.41	48.32	25.94	8.83
5	1-10	30.48	51.80	25.89	8.20
Mean		30.44	49.92	24.52	8.07
S.D.		0.049	1.414	1.797	0.684
C.V.		0.162	2.833	7.330	8.466
Min.		30.38	48.32	22.21	7.14
Max.		30.50	51.80	25.94	8.83

60 °C





60 °C



E. Výpočet základních materiálových vlastností FRP kompozitu

Pro výpočet materiálových vlastností je nutné určit následující hodnoty:

1. Objemové poměry

v_c – objem kompozitu (composite)

v_f – objem vláken (fibre)

v_m – objem matrice (matrix)

$$V_f - \text{poměr objemu vláken} \quad V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (1)$$

$$V_m - \text{poměr objemu matrice} \quad V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2)$$

$$\text{Kde platí} \quad V_f + V_m = 1 \quad (3)$$

$$a \quad v_f + v_m = v_c \quad (4)$$

2. Hmotnostní poměry

w_c – hmotnost kompozitu (composite)

w_f – hmotnost vláken (fibre)

w_m – hmotnost matrice (matrix)

$$W_f - \text{poměr hmotnost vláken} \quad W_f = \frac{w_f}{w_c} \quad (5)$$

$$W_m - \text{poměr hmotnost matrice} \quad W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (6)$$

$$\text{Kde platí} \quad W_f + W_m = 1 \quad (7)$$

$$a \quad w_f + w_m = w_c \quad (8)$$

3. Hustota

ρ_c – hustota kompozitu (composite)

ρ_f – hustota vláken (fibre)

ρ_m – hustota matrice (matrix)

Vychází z (7.7): $w_f + w_m = w_c$

$$w_c = q_c * v_c \quad (9)$$

$$w_f = q_f * v_f \quad (10)$$

$$w_m = q_m * v_m \quad (11)$$

Potom pro hustotu kompozitu platí:

$$\rho_c * v_c = \rho_f * v_f + \rho_m * v_m \quad (12)$$

$$\rho_c = \rho_f * v_f / v_c + \rho_m * v_m / v_c \quad (13)$$

$$\rho_c = \rho_f * V_f + \rho_m * V_m \quad (14)$$

4. Objem vzduchu

Při ruční výrobě kompozitů nedokážeme z materiálu odstranit veškerý vzduch. Ten způsobuje, že skutečná hustota výrobku je nižší než teoretická a negativně ovlivňuje všechny materiálové vlastnosti. Výskyt vzduchových bublin v materiálu je nutné omezit na nejmenší možnou míru.

(pozn. obvykle dochází k poklesu hodnot materiálových vlastností o 2-10% na každé 1% objemu vzduchu)

v_v – objem vzduchu

V_v – poměr objemu vzduchu

$$V_v = v_v / v_c \quad (15)$$

Doplním do vzorce (4) příspěvek

$$v_f + v_m + v_v = v_c \quad (16)$$

Skutečný poměr objemu vzduchu získávám změřením hustoty hotového vzorku:

$$V_v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (17)$$

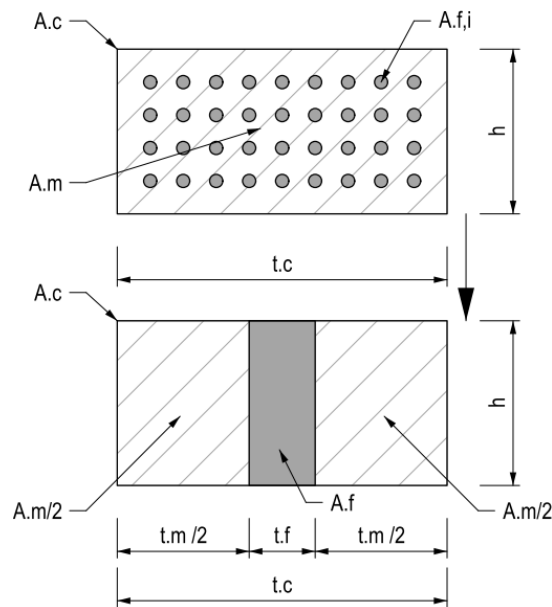
ρ_{ce} – změřená hustota vzorku

ρ_{ct} – teoretická hustota vzorku

5. Modul pružnosti, poissonovo číslo, smykový modul

Při určování hodnot předpokládáme následující zjednodušení:

- vlákna a matrice jsou plně spojena
- vlastnosti materiálů, průřezy a odsazení vláken jsou jednotné
- vlákna jsou rovnoběžná a průběžná
- vlákna mají jednotnou pevnost
- kompozit v sobě nemá žádné bublinky vzduchu ($V_v = 0$)
- předpokládáme teoretickou koncentraci vláken do jednoho proužku (viz Obrázek 72)



Obrázek 72 Teoretická koncentrace vláken

Potom z podmínky koncentrace vláken můžeme plochu průřezu kompozitu popsat jako:

$$A_f = t_f * h \quad \text{plocha vláken} \quad (18)$$

$$A_m = t_m * h \quad \text{plocha matrice} \quad (19)$$

$$A_c = t_c * h \quad \text{plocha kompozitu} \quad (20)$$

$$A \text{ zároveň} \quad A_c = A_f + A_m \quad (21)$$

poměr objemu vláken (1) upravíme na

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} = \frac{A_f}{A_c} = \frac{t_f}{t_c} \quad (22)$$

poměr objemu matrice (2) upravíme na

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} = \frac{A_m}{A_c} = \frac{t_m}{t_c} = 1 - V_f \quad (23)$$

Modul pružnosti ve směru zatížení E_1

Vycházíme z toho, že se zatížení se dělí mezi příspěvek matrice a vláken

$$F_c = F_f + F_m \quad (24)$$

Rozepíšeme (24) si rovnici tak, aby obsahovala napětí

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (25)$$

Jednotlivá napětí rozepíšeme jako:

$$\sigma_c = E_1 \cdot \varepsilon_c; \quad (26)$$

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f; \quad (27)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (28)$$

Dosazením vzorců (26-28) do rovnice (25) dostáváme:

$$E_1 \cdot \varepsilon_c \cdot A_c = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f + E_m \cdot \varepsilon_m \cdot A_m \quad (29)$$

Jelikož předpokládáme plně spojený materiál, bereme že poměrná přetvoření

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (30)$$

Za tohoto předpokladu poté vyjádříme modul pružnosti kompozitu ve směru pnutí vláken E_1 jako:

$$E_1 = E_f \cdot A_f / A_c + E_m \cdot A_m / A_c \quad (31)$$

nebo

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (32)$$

Modul pružnosti kolmo na směr zatížení E_2

Předpokládáme, že příčné napětí v kompozitu je stejné pro vlákna i matrici

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (33)$$

Příčné přetvoření kompozitu Δ_c je součet přetvoření vláken Δ_f a matrice Δ_m

$$\Delta_c = \Delta_f + \Delta_m \quad (34)$$

Kde příčná přetvoření se rovnají

$$\Delta_c = t_c \cdot \varepsilon_c \quad (35)$$

$$\Delta_f = t_f \cdot \varepsilon_f \quad (36)$$

$$\Delta_m = t_m \cdot \varepsilon_m \quad (37)$$

Z Hookova zákona vyjádříme

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_2} \quad (38)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (39)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (40)$$

Dosadíme do rovnice (34)

$$t_c * \frac{\sigma_c}{E_2} = t_f * \frac{\sigma_f}{E_f} + t_m * \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (41)$$

Z předpokladu (32) můžeme z rovnice (41) odstranit napětí a zůstává nám hodnota pro modul pružnosti kolmo k vláknům E_2

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E_f} * \frac{t_f}{t_c} + \frac{1}{E_m} * \frac{t_m}{t_c} \quad (42)$$

Což se dá zapsat rovněž jako:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (43)$$

Poissonovo číslo

Předpokládáme, že pro příčnou deformaci platí:

$$\delta_c^T = \delta_f^T + \delta_m^T \quad (44)$$

Poměrné příčné deformace jsou poté vyjádřeny:

(horní index T – transversal)

$$\varepsilon_c^T = \frac{\delta_c^T}{t_c} \quad (45)$$

$$\varepsilon_f^T = \frac{\delta_f^T}{t_f} \quad (46)$$

$$\varepsilon_m^T = \frac{\delta_m^T}{t_m} \quad (47)$$

Poissonova čísla jednotlivých součástí kompozitu se vyjádří jako:

(horní index T – transversal, L – longitudinal))

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_c^T}{\varepsilon_c^L} \quad (48)$$

$$\nu_f = -\frac{\varepsilon_f^T}{\varepsilon_f^L} \quad (49)$$

$$\nu_m = -\frac{\varepsilon_m^T}{\varepsilon_m^L} \quad (50)$$

Dosazením výrazů (45-.50) do rovnice (44) získáme výraz

$$-t_c * \nu_{12} * \varepsilon_c^L = -t_f * \nu_f * \varepsilon_f^L - t_m * \nu_m * \varepsilon_m^L \quad (51)$$

Jelikož předpokládáme: $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ viz výraz (30), můžeme výraz (51) upravit na:

$$t_c * v_{12} = t_f * v_f + t_m * v_m \quad (52)$$

Poissonovo číslo kompozitního materiálu tedy vyjádříme jako:

$$v_{12} = v_f * \frac{t_f}{t_c} + v_m * \frac{t_m}{t_c} \quad (53)$$

Což se dá zapsat rovněž jako:

$$v_{12} = v_f * V_f + v_m * V_m \quad (54)$$

Smykový modul

Vztah smykových deformací kompozitu δ_c , vláken δ_f a matrice δ_m lze vyjádřit jako:

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \quad (55)$$

Smykové deformace lze vyjádřit pomocí poměrných smykových přetvoření

$\gamma_{c,f,m}$

$$\delta_c = \gamma_c * t_c \quad (56)$$

$$\delta_f = \gamma_f * t_f \quad (57)$$

$$\delta_m = \gamma_m * t_m \quad (58)$$

Poměrná smyková přetvoření se vyjádří vzorci:

$$\gamma_c = \frac{\tau_c}{G_{12}} \quad (59)$$

$$\gamma_f = \frac{\tau_f}{G_f} \quad (60)$$

$$\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_m} \quad (61)$$

Obdobně jako u normálového napětí předpokládáme, že i smykové napětí je konstantní

$$\tau_c = \tau_f = \tau_m \quad (62)$$

Dosazením vzorců (56-60) do výrazu (55) získáme výraz:

$$\frac{\tau_c}{G_{12}} * t_c = \frac{\tau_f}{G_f} * t_f + \frac{\tau_m}{G_m} * t_m \quad (63)$$

Z podmínky (62) upravíme výraz (63) a získáme vzorec pro smykový modul:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_f} * \frac{t_f}{t_c} + \frac{1}{G_m} * \frac{t_m}{t_c} \quad (64)$$

Což se dá zapsat rovněž jako:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (65)$$

6. Tahová pevnost ve směru pnutí vláken:

Při určování hodnot předpokládáme následující zjednodušení:

- vlákna a matrice jsou isotropní, homogenní a pružné až do porušení
- přetvoření vláken při porušení je nižší než přetvoření matrice, porušení nastává při přetržení vláken

Přetvoření jednotlivých komponent (vlákna, matrice) při porušení:

$$\varepsilon_{f,ult} = \frac{\sigma_{f,ult}}{E_f} \quad (66)$$

$$\varepsilon_{m,ult} = \frac{\sigma_{m,ult}}{E_m} \quad (67)$$

Napětí v prvku při porušení lze vyjádřit jako součet příspěvků komponent:

$$\sigma_{1,ult} = \sigma_{f,ult} * V_f + \sigma_{m,ult} * V_m \quad (68)$$

Kde jsou:

$$\sigma_{f,ult} * V_f \quad \text{příspěvek vláken} \quad (69)$$

$$\sigma_{m,ult} * V_m \quad \text{příspěvek matrice} \quad (70)$$

Z předpokladu prvního porušení vláken vyplývá

$$\varepsilon_{1,ult} = \varepsilon_{f,ult} \quad (71)$$

Potom napětí při porušení v matrici se rovná

$$\sigma_{m,ult} = \varepsilon_{f,ult} * E_m \quad (72)$$

Poměr objemu matrice zapíšeme podle vzorce (23) jako

$$V_m = 1 - V_f$$

Konečný vzorec pro výpočet tahové pevnosti kompozitu tedy po dosazení do výrazu (68) vypadá:

$$\sigma_{1,ult} = \sigma_{f,ult} * V_f + \varepsilon_{f,ult} * E_m * (1 - V_f) \quad (73)$$