

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Analýza použití kompozitních materiálů jako náhrada oceli v
konstrukcích používaných v pozemním stavitelství**

Plzeň 2023

Bc. Karolína Záhrubská

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Karolína ZÁHRUBSKÁ**
Osobní číslo: **A21N0107P**
Studijní program: **N0732P260002 Stavební inženýrství – Moderní budovy**
Specializace: **Navrhování a provádění budov**
Téma práce: **Analýza použití kompozitních materiálů jako náhrada oceli v konstrukcích používaných v pozemním stavitelství**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte textové části dle zadání práce s obecným popisem a rozbohem ocelových a kompozitních konstrukcí a to po stránce návrhové tak po stránce konstrukční a to pro konstrukce přestřešení pro OS se statickým schématem zatížení a řešením vnitřních sil s následným určením a jejich použití v konstrukčních systémech pro analýzu konstrukce.
2. Zpracujte a připravte modely pro experimentální porovnání vzorků ocelových a kompozitních prvků na testování materiálových charakteristik s únosností řešeného materiálu dle vzorků na dané testovací zařízení jako experimentální část práce.
3. Zpracujte a vyhodnoťte testovací vzorky pro konstrukci přestřešení dle únosnosti, jejich vhodnosti či nevhodnosti s určením vhodnosti daného materiálu pro používání v konstrukčních systémech.

Rozsah diplomové práce: **úvodní část 50 – 60 stran A4**
Rozsah grafických prací: **práce se skládá ze schémat, textových částí a experimentální části**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

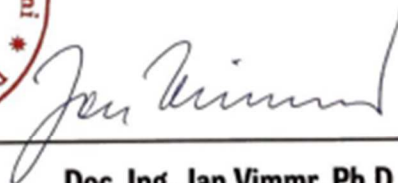
1. ČSN EN 1990 – Zásady navrhování stavebních konstrukcí
2. ČSN EN 1991 – Zatížení stavebních konstrukcí
3. ČSN EN 1993 – Navrhování ocelových konstrukcí
4. Navrhování kompozitních konstrukcí. ČKAIT, 2009
5. Frick / Knoll – Stavební konstrukce I. a II., JAGA 2005

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesi, Ph.D.**
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **26. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2023**



Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 26. října 2022

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji a svým podpisem ztvrzuji, že diplomovou práci na téma „Analýza použití kompozitních materiálů jako náhrada oceli v konstrukcích používaných v pozemním stavitelství“ jsem vyhotovila sama pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce Ing. Petra Kesla, Ph.D. za použití nezbytných softwarů k vytvoření modelu a zhodnocení konstrukce a dalších částí mé práce, jejichž zdroj jsem uvedla.

V Plzni dne 31.5.2023

.....

Bc. Karolína Záhrubská

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování bych velice ráda vyjádřila svému vedoucímu Ing. Petrovi Keslovi, Ph.D. za jeho cenné rady při vytváření diplomové práce, za jeho nadšení a aktivní přístup při konzultacích, vstřícnost, a hlavně za jeho čas a energii, kterou mi během uplynulých měsíců věnoval. Dále bych tímto chtěla velmi poděkovat panu Ing. Janu Krystkovi, Ph.D. za technickou a odbornou pomoc, jeho rady a čas strávený při měření experimentu v laboratoři, který je obsažen v praktické části této práce. Poděkování směřuje také panu doc. Ing. Vladislavu Lašovi, CSc. za předání jeho znalostí z oboru mechaniky kompozitních materiálů při studiu a také za poskytnutí jeho odborné literatury, která byla jedním z podkladů pro tuto práci.

ANOTACE

Diplomová práce se zaměřuje na ocelové a kompozitní materiály používané jako konstrukční prvky v pozemním stavitelství. Teoretická část práce řeší obecný popis obou materiálů, jejich historie, složení, výroba a spojování. Praktická část práce řeší experiment v laboratoři, jehož náplní bylo zkoumání vzorků oceli a kompozitů a jejich pevností v tahu, tlaku, ohybu a porovnání experimentálních hodnot s hodnotami od výrobců. Součástí je také návrh, posouzení a porovnání jednoduché konstrukce přístřešku z obou materiálů.

Vypracování je plně v souladu s platnými ČSN normami, za použití statických a jiných softwarů zmíněných v seznamu použitých softwarů na konci diplomové práce.

KLÍČOVÁ SLOVA:

kompozit, kompozitní materiál, ocel, konstrukce, model

ANNOTATION

The diploma thesis focuses on steel and composite materials used as structural elements in building construction. The theoretical part of the work deals with the general description of both materials, their history, structure, production, and connections. The practical part of the work deals with an experiment in the laboratory, the content of which was the examination of steel and composite samples and their tensile, compressive, and bending strengths and the comparison of experimental values with values from manufacturers. It also includes the design, assessment and comparison of a simple shelter structure made of both materials.

The development is fully in accordance with valid ČSN standards, using static and other software mentioned in the list of used software at the end of the thesis.

KEYWORDS:

composite, composite material, steel, structure, model

Obsah

Úvod	10
Cíl práce.....	11
Motivace	11
Hypotéza	11
TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE	12
1. Ocel	12
Historie.....	12
Ocel a její základní rozdělení.....	13
Vlastnosti oceli	15
Druhy oceli	17
Ocel betonářská	17
Ostatní výrobky z oceli	20
Ocel a její výroba.....	23
Spojování oceli	27
Svařování.....	27
Šroubové spoje.....	29
Nýtové spoje	30
Čepové spoje	31
2. Kompozity	31
Historie.....	31
Druhy kompozitů a jejich vlastnosti.....	32
Výroba kompozitních vláken.....	36
Výroba materiálů z kompozitu	40
Výroba pultruzí.....	41
Výroba ručním kladením	42
Výroba navíjením	42
Výroba lisováním.....	43
Výroba stříkáním	43
Spojování kompozitních materiálů	44
Spoje mechanické	44
Spoje lepené.....	46
3. Porovnání oceli a kompozitu.....	47
4. Použití kompozitů ve stavitelství.....	48

5. Referenční stavby z kompozitních materiálů	49
PRAKTICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE	52
1. Příprava vzorků	52
2. Pomůcky a nástroje	55
3. Popis experimentu	56
4. Naměřené hodnoty vzorků	57
KOMPOZITY (TAH – pásky – materiál A)	57
KOMPOZITY (TAH – pásky – materiál B).....	60
KOMPOZITY (OHYB – pásky – materiál B)	62
KOMPOZITY (TAH – tyčinky, materiál C)	64
KOMPOZITY (OHYB – trubky – šedá/žluté)	66
KOMPOZITY (OHYB – O profil – materiál lávka).....	69
KOMPOZITY (TLAK – L profil).....	71
OCEL (TAH – pásky)	73
OCEL (TAH – tyčinky).....	75
OCEL (OHYB – trámy)	77
5. Model referenční konstrukce.....	79
6. Zhodnocení.....	83
7. Závěr.....	84
Seznam použitých software	85
Reference	86
Seznam obrázků	88
Seznam grafů.....	90
Seznam tabulek.....	90
8. Přílohy	91

Úvod

Tato práce má za účel informovat o možnostech využití kompozitních materiálů jako náhrada ocelových prvků, které mají na rozdíl od kompozitních materiálů výrazně vyšší hmotnost. V moderní době je nutné zkoušet perspektivní nové materiály, které by mohly mít podobné či stejné vlastnosti, ale budou výhodnější než ty, které už dobře známe.

Teoretická část práce obsahuje informace o obecných vlastnostech oceli i kompozitů, jejich historii, složení, výrobě a možnostech spojování. Hlavním stavebním prvkem diplomové práce, jsou ale především kompozity, které v poslední době nabírají na popularitě, avšak mnoho lidí o nich nevědí moc informací a nechtějí se příliš pouštět do konstrukcí z nich, což nás v rozvoji moderního stavebního inženýrství brzdí. Kompozitní materiály jsou složeninou více materiálů, které mají rozdílné vlastnosti, ale dohromady dávají vlastnosti, které nemá žádný z jednotlivých materiálů, proto jsou tak zajímavé a odlišné.

Účelem praktické části je provedení a zhodnocení experimentu v laboratoři se vzorky z obou materiálů, které byly zkoušeny pro pevnost v tahu, tlaku i ohybu. Z ocele byla zkoušena betonová výztuž o různých průměrech, dále čtvercové trámečkové profily a ocelové pásky. Z kompozitních materiálů byly zkoušeny kompozitové pásky, prutová výztuž obsahující čedičová vlákna různých průměrů, čtvercové trámečkové profily, trubky a profil tvaru „L“. Součástí je také návrh a posouzení jednoduchého modelu konstrukce přístřešku pro osobní automobil. Model je vyhotoven zvlášť z oceli a zvlášť z kompozitu z důvodu porovnání obou konstrukcí mezi sebou. Kompozitové materiály použité v této práci obsahují převážně podélná vlákna (výztuž) v jednom směru.

Cíl práce

Hlavním cílem bylo zanalyzovat kompozitní materiály pro využití v konstrukcích pozemních staveb a zhodnotit je jako náhradu oceli v odůvodněných případech jak z hlediska únosnosti, tak z hlediska ekonomického. K analýze byly vybrány kompozity s podélnou výztuží. Zkoušení vzorků proběhlo v laboratoři za odborného dohledu.

Motivace

Motivací k vytvoření diplomové práce bylo hlavně nízké využití kompozitních materiálů ve stavbách a informování o jejich vlastnostech a výhodách oproti oceli, jako například nízká hmotnost, vysoká pevnost a výrazně vyšší požární odolnost, což může být v některých ohledech vhodnějším řešením při řešení konstrukčních detailů.

Hypotéza

Hypotéza diplomové práce je následující: **Použití kompozitních materiálů místo oceli.**

TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

1. Ocel

Historie

Dle známých informací z historie lidského života je známo, že po době kamenné následovaly období tří kovů, a to doba měděná, bronzová a železná. Lze s nadsázkou říci, že do dnešní doby naše lidstvo žije v době „nejmladší železné“ i když počátek této doby je datován 4000 let před Kristem.

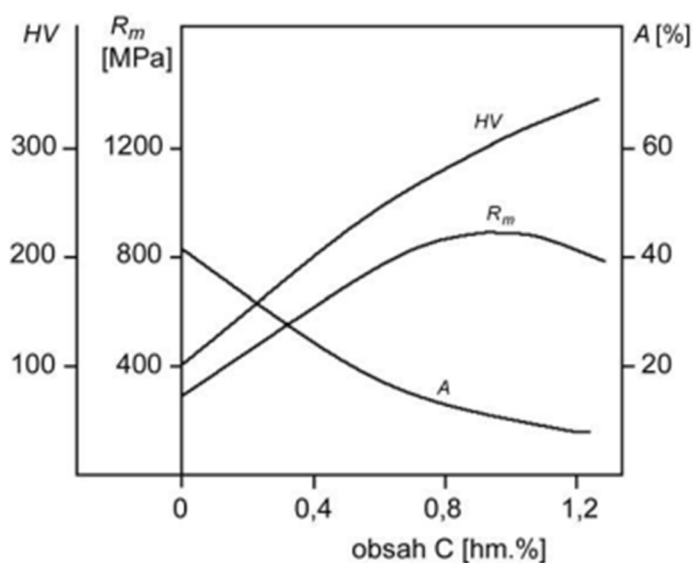
Z prvu byly kovy používány zejména pro nástroje na opracování či zpracování stavebních hmot jako kámen nebo dřevo. Z dob antiky byly nalezeny skoby z mědi, později ze železa, nebo také hmoždinky, které spojovaly kamenné zdivo, jež bylo dříve spojováno na sucho. Při budování starých antických sloupů byly tyto hmoždinky využívány pro spojení válcových kamenných tamburů, které byly používány jako prefabrikáty. Aby byly hmoždinky utěsněny zalévaly se roztaveným olovem.

Ve stavebnictví absolvovaly kovy dlouhý vývoj z hlediska historie a jejich uplatnění. Až na počátku 18. století začínaly být budovány stavební konstrukce čistě z kovu, a to z litiny vzhledem k vyspělosti hutního průmyslu. Avšak začátkem 19. století začala výstavba stavebních konstrukcí z oceli, díky pokroku ve výrobě. Nejprve byla ocel používána pro montáže úchvatných stavebních objektů, poté začalo využití oceli i jako výztuž do betonu v podobě tyčí. Ocel byla využívána hlavně z důvodů jejích kladných vlastností jako vysoká homogenita, pevnost v tahu a houževnatost. Výhodou tohoto materiálu je také velmi dobrá spojovatelnost pomocí mnoha technologií (šroubové spoje, nýty, svary, pájení a lepení) a je možno použít ochranné nátěry různých typů. Ocel je také snadno recyklovatelná, lze využít železný šrot a znovu ho použít to nové stavby.

Ovšem největší nevýhodou je jejich náchylnost ke korozi, kterou má za vinu především vliv prostředí. Mezi další nevýhody je řazena snížená odolnost vůči ohni, vyšší pružné deformace, zvuková a tepelná vodivost, při které pak vznikají tepelné mosty. Na celkové produkci kovů ve světě se slitiny železa podílejí 95 procenty. [1]

Ocel a její základní rozdělení

Ocel je nejpoužívanější kovový materiál. Ocel patří mezi 90 % slitin železa, zbývajících 10 % jsou litiny, které obsahují více než 2,14 % uhlíku. Ocel lze definovat také jako slitinu uhlíku s železem, ale i s dalšími legujícími prvky obsahující méně než 2,14 % uhlíku, které jsou tvárné za vysokých teplot. Je známo, že čím více uhlíku ocel obsahuje, tím více je ocel tvrdší, ale klesá její tažnost viz obr. 1. [2]



Obrázek 1 - Informativní hodnoty tvrdosti (HV), meze pevnosti v tahu (R_m) a tažnosti (A) uhlíkových ocelí v závislosti na obsaženém uhlíku [2]

Dle chemického složení ocelí je dělíme do dvou skupin na:

1. Nelegované oceli (uhlíkové)
2. Legované oceli

Nelegované oceli (uhlíkové)

Slitiny železa a uhlíku jejichž obsah dalších složek nepřekročí stanovenou mezní hodnotu viz tab. 1. Můžeme u nelegovaných ocelí hovořit i o mikrolegování oceli. To nastává ve chvíli, kdy se některé složky přidávají do slitiny v záměrně nižších množstvích, než jsou uvedené v tab. 1. [2]

Tabulka 1 - Mezní hodnoty prvků v nelegované oceli [2]

prvek	mezní obsah [hm. %]	prvek	mezní obsah [hm. %]
Al	0,10	Ni	0,30
Co	0,10	Pb	0,40
Cr	0,30	Si	0,50
Cu	0,40	Ti	0,05
Mn	1,65	V	0,10
Mo	0,08	W	0,10
Nb	0,06	Zr	0,05

Nelegované oceli můžeme rozlišovat dle obsahu uhlíku jako:

1. Pódeutektoidní (obsahují méně než 0,8 % uhlíku)
2. Eutektoidní (obsahují přibližně 0,8 % uhlíku)
3. Nadeutektoidní (obsah uhlíku je nad 0,8 %)

Pódeutektoidní oceli jsou využívány jako materiály pro konstrukce, kdežto nadeutektoidní jsou spíše využity jako materiály pro nástroje. Nelegovaná ocel představuje většinu všech vyrobených ocelí a největší procento z nich patří právě pódeutektoidní oceli.
[2]

Legované oceli

U legovaných ocelí překračují legující prvky hodnoty obsáhlé v tab. 1. Legování je prováděno hlavně za účelem navýšení mechanických vlastností jako je mez kluzu, mez pevnosti, tvrdost nebo houževnatost za nízkých teplot. Dále také zvýšení odolnosti proti korozi, technologických vlastností a fyzikálních vlastností. Legované oceli dělíme dle celkového obsahu legujících prvků na:

1. Nízkolegované (méně než 5 % legujících prvků)
2. Střednělegované (5-10 % legujících prvků)
3. Vysocelegované (více než 10 % legujících prvků) [1]

Nejvíce používané legující prvky jsou: Cr, Ni, Mn, Si, Cu, Zr, Nb, V, Mo, Al, W, Ti, P, S, Co.
[2] [3]

Podle použití ve stavebnictví se ocel dělí na:

- Ocel pro stavební konstrukce (nelegované, neuklidněná ocel obsahující 0,06 až 0,2 % uhlíku, válcovaná za tepla. Méně se používá legovaná ocel jako jemnozrnná svařitelná, nerezavějící, odolná atmosférické korozi nebo ocel na ploché výrobky za studena tvářené.)
- Ocel určená jako výztuž do betonu (nelegovaná, neuklidněná, obvyklé jakosti, za tepla válcovaná nebo za studena tvářená kroucením či tažením)
- Ocel určena jako předpínací výztuž do betonu (nelegovaná, ušlechtilá ocel, válcovaná za tepla, tvářená za studena s tepelným zpracováním)
- Ocel na štetovnice, kolejnice a dolní výztuž (jakostní, nelegovaná a legovaná ocel, válcovaná za tepla)
- Ocel určena pro klempířské prvky, plechy a pokrývačské práce (jakostní, nelegovaná ocel na výrobu plechů pozinkovaných či s jiným povlakem.) [3]

Vlastnosti oceli

Vlastnosti oceli lze rozdělit do dvou kategorií. V první jsou zahrnuty vlastnosti, které jsou jen málo závislé na zpracování a složení oceli. Tyto vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2. [3]

Tabulka 2 - Základní vlastnosti oceli – vlastní zpracování [3]

Vlastnost	Hodnota
Hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 830 – 7 880
Modul pružnosti (MPa) - v tahu - ve smyku	210 000 81 000
Součinitel teplotní délkové roztažnosti (K^{-1})	$10 \cdot 10^{-6}$ – $12 \cdot 10^{-6}$
Poissonův součinitel	0,27 – 0,30
Měrná tepelná kapacita ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	450

Výpočtové hodnoty dle Eurokódu 3 (ČSN EN 1993-1-1) [4]

Modul pružnosti v tlaku a tahu:

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$$

Modul pružnosti ve smyku:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81\,000 \text{ N/mm}^2$$

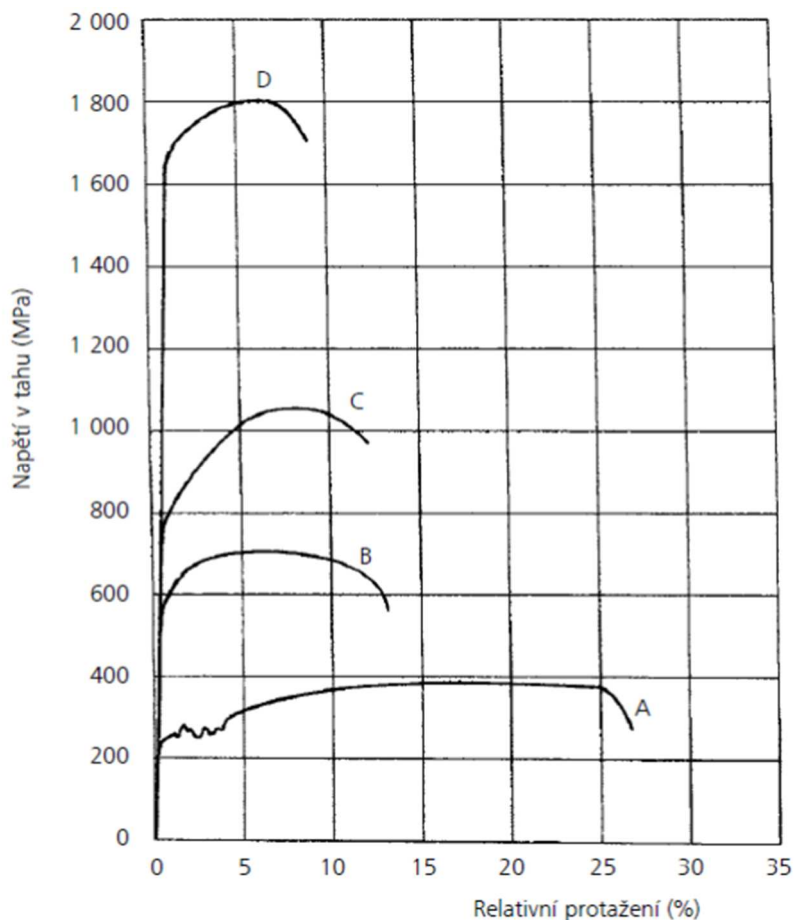
Součinitel příčné deformace v pružné oblasti:

$$\nu = 0,3$$

Součinitel délkové tepelné roztažnosti:

$$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} / \text{K} \quad (\text{pro } T \leq 100^\circ\text{C})$$

Do druhé kategorie jsou zařazeny vlastnosti, jež jsou závislé na složení oceli, zejména na obsahu uhlíku v ní (pevnostní a deformační charakteristiky). Stavební ocel obsahující 0,1–0,15 % uhlíku zaručuje pevnost v tahu 340–450 MPa s mezí kluzu 210–280 MPa a tažností min. 28 %. Deformační a mechanické vlastnosti jsou znázorněny pomocí deformačních diagramů na obr. 2. [3]



Obrázek 2 - Deformační diagramy oceli (A – konstrukční ocel 11 375, B – ocel pro výztuž do betonu 10 505, C – ocel na tyče pro předpínání 10 607, D – ocelový drát tažený za studena pro předpínací výztuž) [3]

S rostoucí teplotou (více než 300 °C) klesá pevnost oceli. Při teplotě vyšší než 500 °C klesne cca na 50 % a ztrácí i mez kluzu. Při vyšších teplotách klesá též modul pružnosti a mění se tažnost (nejprve začne klesat, poté roste). Během opakovaného namáhání klesne pevnost oceli na mez únavy, která činí 30-40 % původní meze pevnosti. [3]

Druhy oceli

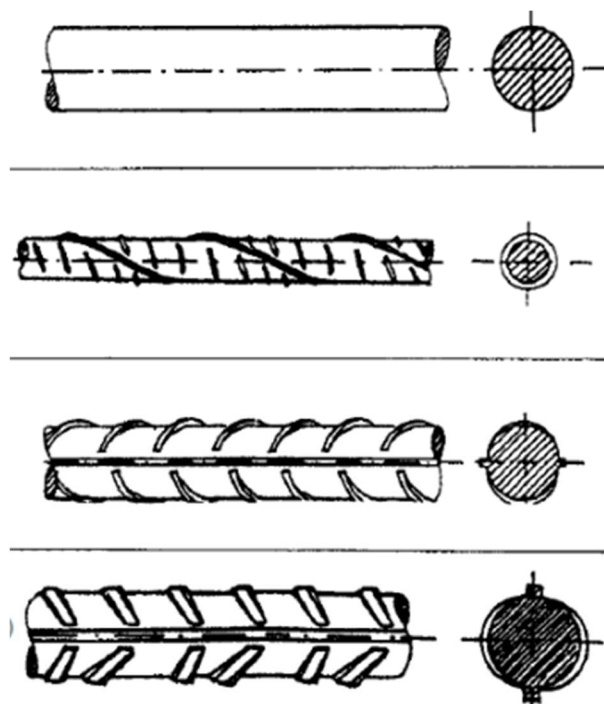
Ocel betonářská

Do betonu se přidává výztuž z důvodu zlepšení vlastností především v tahu a ve smyku, které samotnému betonu chybí, avšak spolupůsobí a doplňují se, protože beton má velkou pevnost v tlaku. Je ukládána jak do běžných železobetonových konstrukcí, tak i do předpjatých konstrukcí.

Existují různé druhy výztužné oceli jako např. betonářská výztuž, která není tuhá, je měkká a je volně ložená do betonové směsi, ve které nevyvozuje žádné napětí. U betonářské výztuže nepočítáme s její ohybovou tuhostí. Předpínací výztuž je naopak tvrdá a v konstrukci vyvozuje záměrně napětí. Tuhá výztuž je v podobě válcovaných profilů pro spřažené konstrukce a počítáme s její ohybovou tuhostí. Dále se provádí vyztužení pomocí ocelových drátků, které působí jako rozptýlená výztuž. [1]

Pro vyztužení železobetonových konstrukcí se vyrábějí dráty a tyče z oceli válcováním za tepla. Mohou být však také válcované a tažené za studena. Svařením drátů se následně pak vyrábějí sítě, známé jako karisítě.

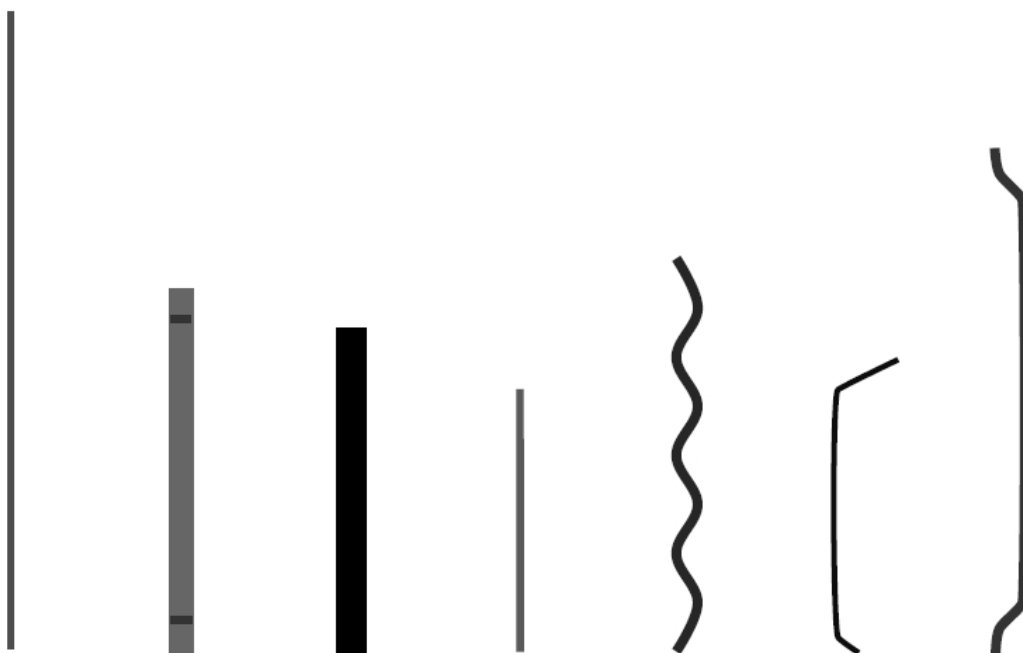
Tyče a dráty jsou dodávány v průměrech 4-50 mm, obvykle však do 32 mm, rovné tyče v délce 6-14 m (lze po dohodě s výrobcem až do 22 m). Dodávány jsou ve svitcích do průměru 16 mm po 100-2000 kg. [3] Oceli na výrobu betonářské výztuže jsou z nelegované oceli s přibližným obsahem 0,2 % uhlíku. Pevnostní vlastnosti u těchto ocelí většinou zaručuje jejich výrobce. [2] Na obr. 3 jsou vyobrazeny základní druhy betonářské oceli.



Obrázek 3 - příklady betonářské oceli [3]

Pro předpínací výztuž jsou vyráběny dráty, spletnice, ocelová lana anebo i tyče. Dráty jsou dodávány v průměrech 2–7,5 mm. Lana se skládají ze 7 drátů, vyrábějí se svinutím ocelových drátů o průměrech 2,5–5,5 mm, přičemž vždy jeden vnitřní drát, ten uprostřed je většího průměru a bývá ovinut zbývajícími šesti dráty mající menší průměr. Existují buď spletnice dvojdrátové, trojdrátové, nebo lana sedmipramenná či sedmipramenná navíc s korozní ochranou využívaná především pro výztuž, která není soudržná s betonovou směsí. Protikorozní plášť z polyetylénu mívá většinou černou barvu a její tloušťka se pohybuje mezi 1–2 mm. Posledním výrobkem patřícím do předpínací betonářské výztuže jsou tyče, které se vyrábějí válcováním za tepla a jsou buď žebříkové a nebo hladké.

Pro výztuž rozptýlenou do betonové směsi, malt či injektážních malt s funkcí statickou nebo bez ní se vyrábějí sekáním hladkého, tenkého drátu taženého za studena, stříháním plechu, oddělením taveniny, frézováním bloků z ocele či protahováním z drátů za studena tažených. Drátky dosahují délek od 1,2 cm až do 6 cm. Příklady používaných drátků viz obrázek 4 a 5. [3]



Obrázek 4 - Příklady tvarů drátků používaných jako rozptýlená výztuž [5]

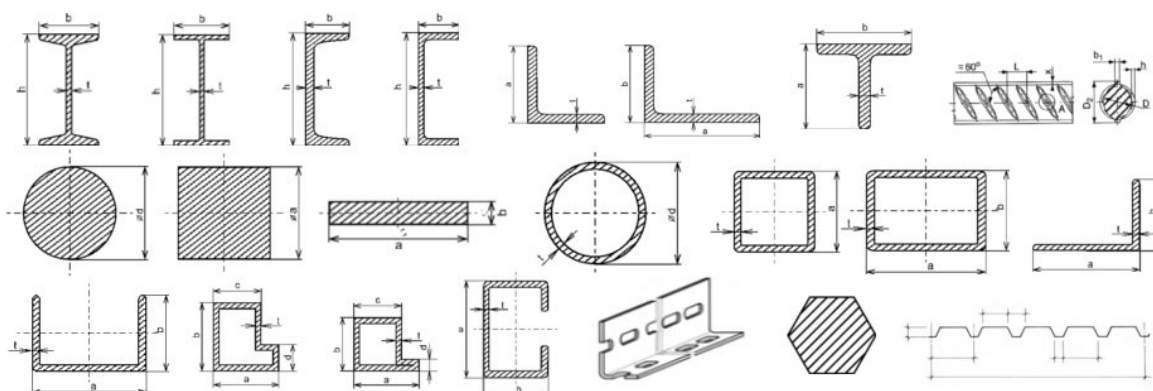


Obrázek 5 - Fotografie používaných ocelových drátků [6]

Ostatní výrobky z oceli

Kromě výztuží do betonu se z oceli vyrábí velmi velký sortiment ocelových výrobků k využití ve stavebnictví. Např. měkké vázací dráty pro upevňování výztuže, polotvrdé dráty určené pro výrobu pletiva, sítí (např. ploty, gabiony). Dráty pro pletivové ploty jsou opatřeny protikorozní pozinkovou nebo PVC ochranou, pro gabiony musí být ochrana zvláště důkladná v ohledu na požadovanou životnost.

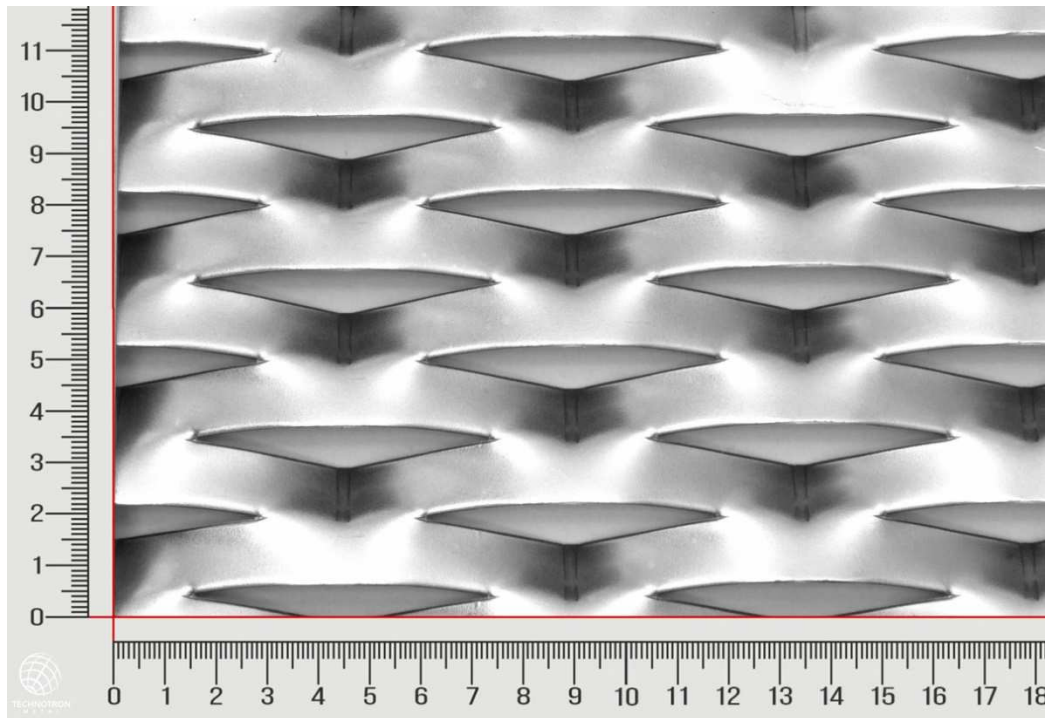
Dále se vyrábějí dlouhé výrobky, jež jsou válcovány za tepla jako dráty, kruhové, šestihranné a čtvercové tyče, pásková ocel tloušťek od 5 až do 50 mm. Úhelníky rovnoramenné i nerovnoramenné, tyče průřezů typu I, IPE, HEA, HEB, U, UE, pásy tenké a široké. Vyjma uvedených tvarových ocelí, které jsou nejběžněji používané se válcují také tyče v průřezu Z a T, koleje, svodnice, štetovnice a další. Vyráběny jsou také ocelové plechy bez povlaku nebo pozinkované, které se používají na klempířské prvky a pokrývačské práce, smaltované plechy, profilované nebo lisované do různých tvarů vln (trapézové, vlnité plechy) [3] Příklady válcovaných profilů jsou na obrázku č. 6.



Obrázek 6 - Příklady válcovaných profilů [7]

Z ocelových plechů, protahováním a stříháním tabulí z hlubokotažného plechu se dělají mřížoviny, nazývané „tahokový“. Dodávají se v možnostech buď bez povrchové úpravy nebo lakovaná či zároveň pozinkovaná. Jsou využívány zejména na ozdobné kryty, bezpečnostní kryty, rošty, schodišťové stupně, výztuž do betonu, jako výplň zábradlí, pro různé typy mříží, lávky anebo podhledy stropů a architektonické elementy. [3]

Na obrázku č. 7 je možné vidět příklad struktury a velikosti mřížoviny, použití těchto mřížovin jako oplocení rodinného domu je vyobrazeno na obr. 8.



Obrázek 7 - Příklad mřížoviny (tahokovu) [8]



Obrázek 8 - Příklad použití mřížoviny na oplocení [9]

Mezi hojně využívané ocelové výrobky patří tenkostěnné profily, které jsou válcované za tepla nebo tvářené za studena. Nazývají se též jako „Jäcklový“ profily a jsou používány na lehké konstrukce, obvodové pláště budov, závěsné stěny, vrata, dveře, zábradlí, oplocení apod. Tenkostěnné profily se dělí na otevřené a uzavřené. Otevřené se vyrábí z pásové oceli tvářením za studena a uzavřené profily z trubek různých průřezů.

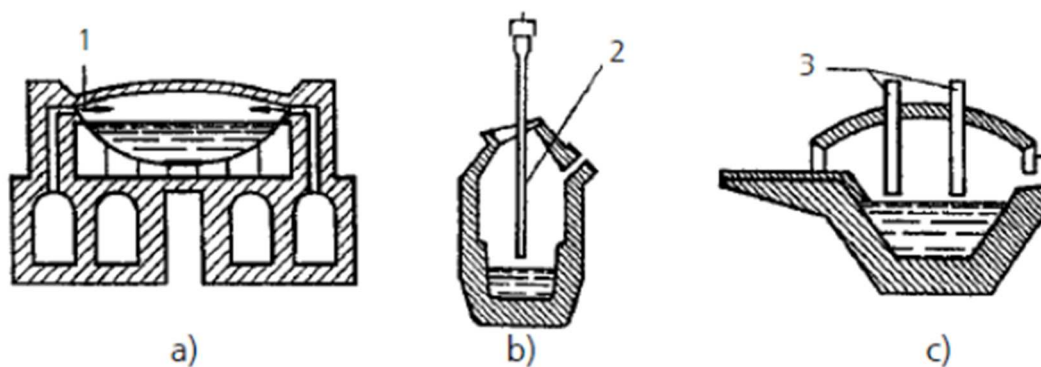
Nedílnou součástí výrobků z oceli patří i spojovací prvky, které tvoří významnou součást veškerých stavebních konstrukcí. Dodávány jsou především vruty, šrouby, matice, nýty, podložky, hmoždinky a hřebíky různých velikostí a jakostí. [3]



Obrázek 9 - Spojovací materiál z oceli [10]

Ocel a její výroba

Ocel se vyrábí za vysokých teplot dosahujících až 2000 °C ve specializovaném prostředí zvaném ocelárna a je součástí hutnického provozu. Vysoké teploty vzniknou buď spalováním přímo některých přísad surového tekutého železa (konvektorové pochody), nebo ohřátím vsázky pomocí spalování plynu (pochody martinské), popřípadě ohříváním vsázky elektrickým teplem. [1] Tavením v elektrických pecích, kyslíkových konvektorech dříve spíše v Siemens-Martinských pecích se snižuje množství uhlíku u surového železa ze zhruba 4 % na nižší hodnotu, než je 1 % a tím se železo stává ocelí, tento proces se nazývá zkujňování oceli. Ještě před tím se zbaví surové železo škodlivých látek jako je síra, fosfor, křemík a jiné. [3] Po dokončení procesu zkujňování obsahuje roztavené železo poměrně hodně kyslíku, a proto následuje proces zvaný dezoxidace, kdy po přidání např. hliníku se rozpuštěný kyslík v tavenině převede na pevný oxid hlinitý, který odchází do strusky. Výsledným produktem je poté slitina železa a uhlíku, kterou nazýváme ocel. Z té jsou pak odlévány ingoty jako meziprodukt, které jsou dále zpracovávány ve válcovnách. [2] V dnešní době se ocel z velké části recykluje nebo se jako další surovina používá šrot ze železa.

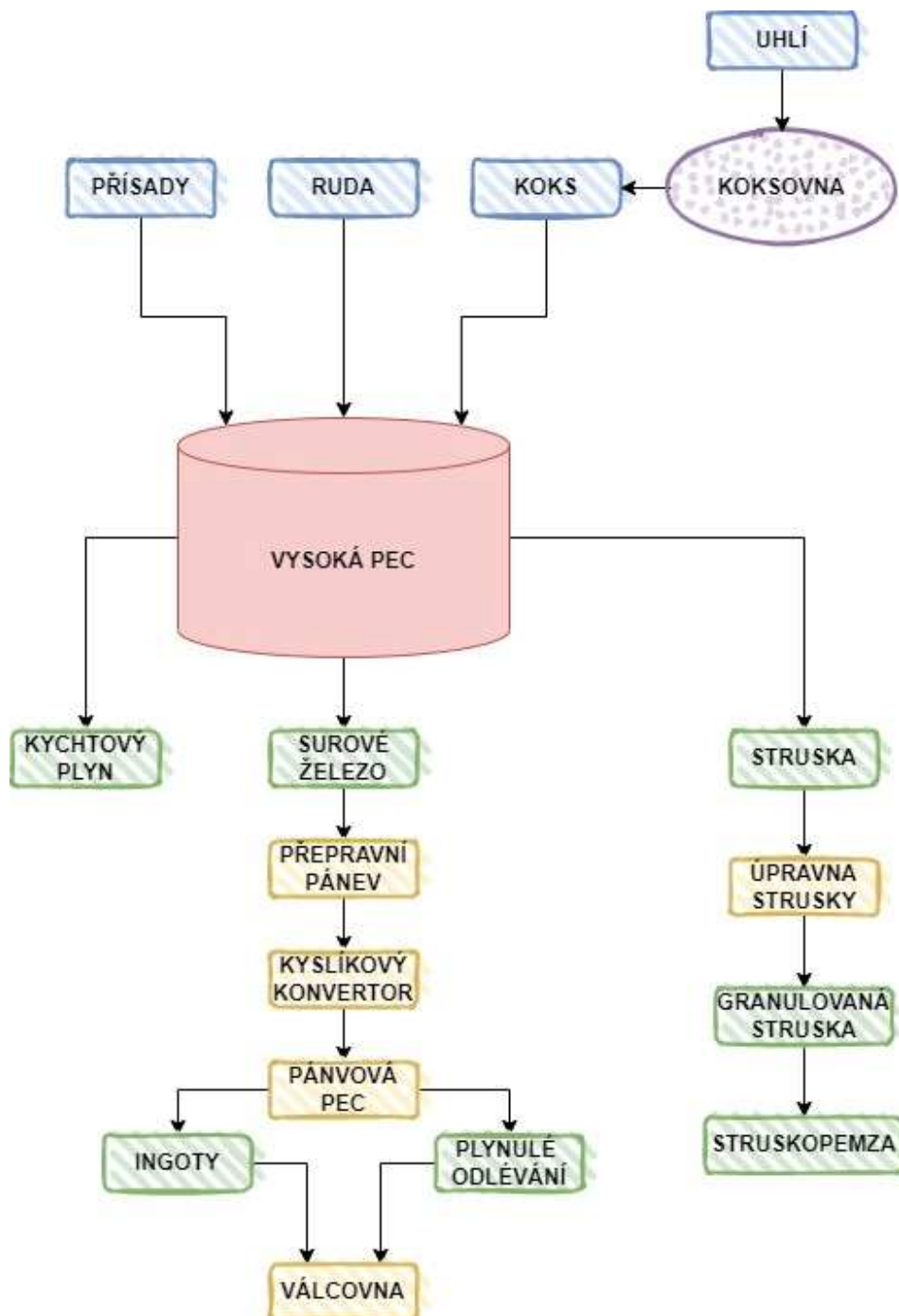


Obrázek 10 - Ocelárenské pece [3]

a – Siemens-Martinská pec, b – kyslíkový konvektor, c – elektrická pec

1 – vhánění horkých plynů, 2 – tryska pro dmýchání kyslíku, 3 - elektrody

Siemens-Martinské pece byly v Evropské Unii vyřazeny a koncem roku 1993 byl ukončen jejich provoz. V dnešní době se na výrobě oceli podílí ze 2/3 kyslíkové konvektory a ze zbývajících 1/3 elektrické pece obloukové. [3]



Obrázek 11 - Schéma hutnické výroby – vlastní zpracování [3]

V současnosti je kladen důraz na vývoj jiných způsobů výroby, jako např. technika „redukčního tavení“, která používá jako hlavní palivo uhlí namísto koksu. Jedna z nových technik nahrazuje také aglomerát a pelety železnou rudou v podobě prášku. [3]

Výroba oceli pomocí kyslíkového pochodu je nepřerušovaný proces, jež zahrnuje přepravu a také skladování horké kovové taveniny dále její předúpravu, která se nazývá odsíření. Následně proběhne proces oxidace v konvektoru, která se postará o oxidaci nečistot a oduhličení. Poté následuje úprava sekundární metalurgií, kontinuální odlévání nebo odlévání do ingotů.

Při výrobě oceli uhlíkové nebo nízkolegované oceli pomocí elektrických pecí jsou prováděny úkony jako přeprava a skladování horké taveniny stejné, poté se mění. Po zavážce šrotu do pece včetně předehřívání, nebo také bez něj se začne šrot v peci tavit, následně začne odpichování strusky a oceli. Dále se směs upraví na požadovanou jakost na pecní pánvi, proběhne odsíření a odplynění. Nastává manipulace se struskou a kontinuální odlívání.

Z pece se vytavená ocel odlévá do tzv. kokil (forem) pro další její zpracování, díky tomu se pak vyzískají ingoty. V průběhu samotného odlévání vytavené oceli a jejího tuhnutí se uvolňují některé plyny, většinou oxid uhličitý, který čerí ocel a ta poté tuhne na ocel neuklidněnou. Pokud do taveniny přidáme přísady, které obsahují křemík, dojde k odstranění vývinu plynu a ocel ztuhne na ocel uklidněnou, pokud přidáme hliník vznikne vysoce uklidněná ocel. Ocel uklidněná je dražší a její složení je stejnoměrnější. Pro účely stavebního inženýrství se využívá především ocel neuklidněná. Odlité ingoty či bloky se pak dále zpracovávají ve válcovně nebo na dokončovací výrobní lince.

V současnosti rekonstruované nebo nové hutní provozy provozují kontinuální provozy od výroby ve vysokých pecích až po zpracování ve válcovnách bez ingotů, tyto provozy se přezdívaly jako systém integrovaného hutního podniku nebo minihutě. Tyto na sobě závislá propojení byla vytvořena z důvodu optimalizace produktivity výroby, ale také, aby byla snížena náročnost energetická, snížily se emise a náklady na výrobu.

Pro stavebnictví se výrobky z oceli vyrábí především tvářením za tepla (válcování) za teploty startující na 1300 °C a končící na stupnici 900 °C při dosažení konečného tvaru, nebo také dalším tvářením za studena (válcování, tažení, kroucení), při kterém se v materiálu vytváří napětí převyšující mez kluzu. [3]

Ocel začne ztrácet hodnotu meze kluzu, následuje snížení tažnosti a ocel se díky tomu dá využít při vyšším namáhání, na úkor její křehkosti, která se zvyšuje. Tento druh oceli je nestabilní z hlediska termodynamiky a při zahřívání na větší teploty se snaží vrátit zpět do původního stavu. Z tohoto důvodu není tento typ oceli tvářené za studena vhodný ke svařování. Mechanické vlastnosti jako křehkost, tvrdost, tažnost a houževnatost je možno upravovat ještě jedním způsobem a to tak, že ocel vystavíme ještě dalším tepelným zpracováním jako např. popuštění drátů (tažených) pro výztuž do betonu a sítí pro výztužování při výrobě za studena. Dráty používané pro předpínací výztuž nebo na výrobu lan jsou žhána na teplotu 900 °C a jsou protahovány lázní z olova, jejíž teplota dosahuje 450-550 °C. Tento proces je přezdívaný jako tzv. patentování. [3]

Ocel se dá také povrchově tvrdit. Existují tři způsoby povrchového tvrzení a to cementování, nitridování a povrchové kalení. Při cementování dříve nazývaným poocelováním se povrch oceli sytí uhlíkem. Tento typ tvrzení povrchu oceli je ale vhodný jen u některých druhů oceli. Během cementování práškem se části oceli, které jsou určeny pro cementování vloží do plechových krabic, jež se zasypou práškem, který je vytvořen z dřevěného uhlí a uhličitanu barnatého (sloužící jako katalyzátor). Poté je krabice uložena do pece a je ohřívána na stanovenou hodnotu teploty 900 až 930 °C. Při cementační vrstvě 0,5 – 1 mm je potřeba, aby sycení probíhalo 2 až 4 hodiny. Lázně pro cementování mohou být buď předem zmíněné práškové anebo tekuté či plynné.

Proces tvrzení povrchu oceli pomocí dusíku je nazýván jako nitridování. Ocel je sycena dusíkem, díky němuž jsou na povrchu oceli vytvářeny velice tvrdé nitridy. Z důvodu netečnosti dusíku je nutno tento pochod vytvářet za zvýšených teplot, které dosahují 500 °C v atmosféře ze čpavku. Nitridace oceli je pomalá, trvá dlouho a je vysoce nákladná. Přibližně za 30 hodin je dosaženo tloušťky nitridu 0,3 mm. Nitridace konstrukční oceli je prováděna v plynném prostředí, na rozdíl od nitridace nástrojů, jejichž nitridace je prováděna v solných lázních obsahující kyanidy a kyanatany, které jsou zahřáty na 500–560 °C.

Kalení povrchu oceli je realizováno ohřátím povrchu oceli pomocí acetylenokyslíkového plamenu do požadované hloubky a povrch je ihned zkalen. Pro velké výrobní série prvků je jako modernější způsob používáno vysokofrekvenční povrchové kalení. [2]

Indukované energie jsou soustředěny na povrchu dle frekvence, tzn., že čím více stoupá frekvence, tím více jsou indukované energie na povrchu soustřeďovány, dle toho je možno volit podle indukovaného proudu a jeho frekvence hloubku ohřevu. Ohřev je uskutečňován během několika vteřin, poté jsou součástky kaleny v olejových lázních. [2]

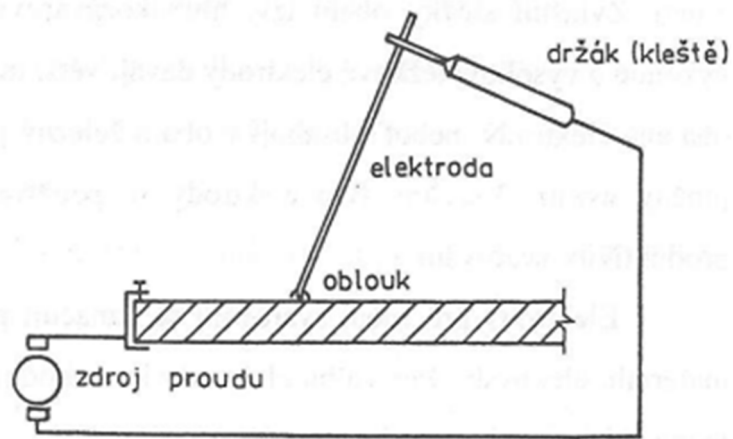
Spojování oceli

Svařování

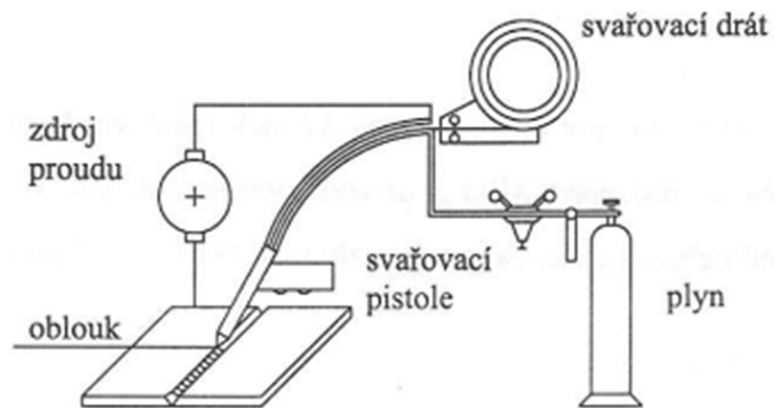
Nejdůležitějším způsobem spojování ocelových prvků je svařování. Tento proces je založen na spojení kovů působením tepla či tlaku a tepla s možností přidání jiného kovu stejného nebo podobného složení co spojovaný materiál. Existují více druhů svařování, rozlišují se podle zdroje tepla, způsobu svařování, ochraně před vzduchem nebo podle přidaného materiálu a oboru pro využití v praxi. Druhy svařování se rozlišují do dvou hlavních skupin, a to na tavné svařování (v místě svarů je spojovaný materiál v tekutém stavu) a na svařování tlakem (v místě svarů je spojovaný materiál v těstovitém stavu) při kterém jsou obě části materiálu spojeny stlačením k sobě. [11]

Mezi jednotlivé typy svařování patří:

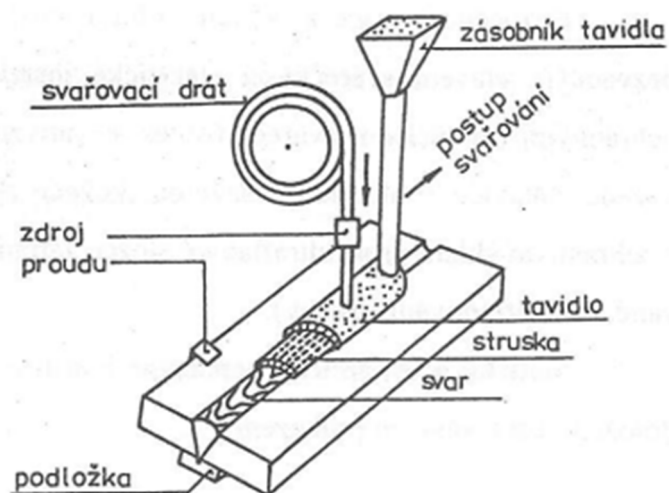
- Svařování elektrickým obloukem (obrázek 12)
- Ruční svařování
- v ochranné atmosféře (MAG, MIG) (obrázek 13)
- pod tavidlem (obrázek 14)
- plazmou
- plamenem
- elektrickým odporem
- poloautomatické přivařování pistolí



Obrázek 12 - Svařování elektrickým obloukem [11]



Obrázek 13 - Svařování v ochranné atmosféře [11]

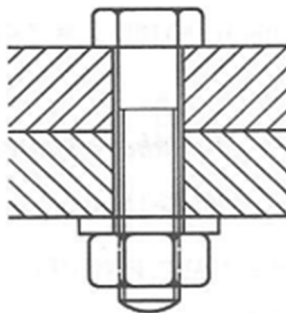


Obrázek 14 - Svařování pod tavidlem [11]

Šroubové spoje

Šroubové spoje jsou složeny zpravidla ze šroubu se šestihrannou hlavicí, ze šestihranné matice a z podložky. Podložky jsou používány pod matice a zřídka pod hlavu šroubů k zabránění odírání při utahování či k rozdělení tlaku matice a tím zabránění porušení otvoru pro šroub. Spoje jsou rozlišovány na nosné, spínací nebo těsnící. Spoje nosné jsou určeny k přenášení sil, kdežto spínací spoje mají za úkol zabraňovat korozi a její možnosti vyskytovat se uprostřed spojovaných částí. Těsnící spoje jsou určeny k utěsnění spoje z důvodu možného vniknutí kapaliny či plynu.

Vzdálenost neboli rozteč šroubů je určena podle účelu, pro který je spoj vytvořen. U nosných spojů je nutné, aby síly působící na jednotlivé šrouby byly, pokud možno rozděleny stejnoměrně, aby bylo zabráněno příliš velkému namáhání některých šroubů více než těch ostatních. Při návrhu je důležité také dbát na proveditelnost navržených spojů z důvodu manipulace s náradím pro to určená. [11] Rozteče šroubů jsou udány v normě ČSN EN 1993-1-8. [12]



Obrázek 15 - Příklad šroubového spoje [11]

Šroubové spoje jsou dle normy ČSN EN 1993-1-8 rozděleny do dvou kategorií na spoje ve smyku (A, B, C) a spoje v tahu (C, D):

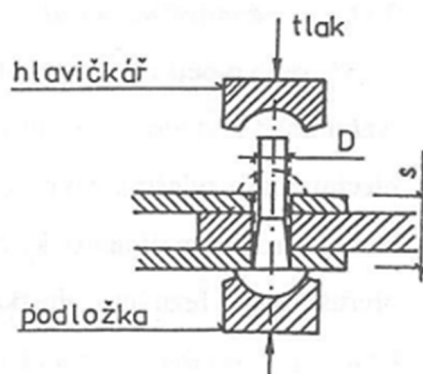
- A – namáhané ve stříhu a v otláčení
- B – odolné prokluzu v mezním stavu použitelnosti
- C – odolné prokluzu v mezním stavu únosnosti
- D – nepředpjaté šroubové spoje
- E – předpjaté šroubové

Nýtové spoje

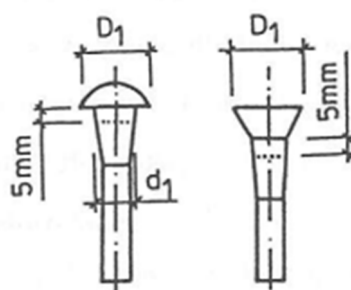
Nýtové spoje, byly využívány dříve jako primární způsob spojování ocelových konstrukcí. V současnosti je tento druh spoje až na výjimky nepoužíván, jelikož byly později vynalezeny spoje šroubové a svarové, které jsou jednodušeji proveditelné a rozebíratelné. Avšak konstrukce spojované nýtováním jsou stále v provozu.

Nýtování spočívá ve vsazení ohřátého nýtu do otvoru spojovaných částí a tzv. hlavičkářem je vykována hlava z obou stran spoje. Ohřívání nýtu probíhalo v kovářských výhních či elektrickém nebo plynovém ohříváči až do bílého žáru. Vytvořený nýt pak dokonale vyplňoval otvor pro spoj a spojované části spojil velmi pevně a účinně.

Nýty byly vyráběny z ocele tak, aby nýt byl méně pevný než materiál jím spojovaný, aby v případě potřeby výměny jej bylo možno odsekat. Většinou byly využívány nýty s hlavou půlkulatou, ale v případech, kdy hlava nýtu překážela, byly použity zápusťné nýty. [11]



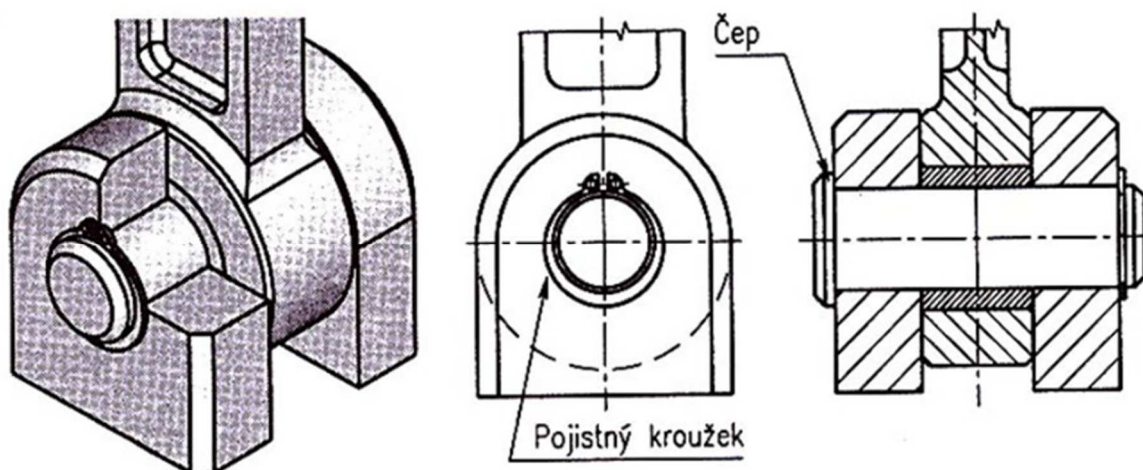
Obrázek 16 - Nýtování [11]



Obrázek 17 - Příklady nýtů [11]

Čepové spoje

Čepy jsou používány v kloubových spojkách, kde je vyžadován větší rozsah pohybu. Tyto spoje jsou velkého průměru a ve styčném místě spoje jsou opatřeny vazelínou. K zabránění vysunutí čepu z otvoru, je čep zajištěn maticemi, zvláštními kryty nebo závlačkami. [11]



Obrázek 18 - Čepový spoj [11]

2. Kompozity

Kompozit je směs, spojení dvou či více materiálů různého typu o rozdílných fyzikálních či mechanických vlastnostech, které společně vytvářejí nový materiál s novými vlastnostmi, které nenáleží ani jedné z jeho součástí. [13]

Historie

Vývoj kompozitního materiálu je datován již do roku 1500 př. nl. V té době bylo jako kompozitní materiál Egypťany a Mezopotámskými osadníky použito spojení bláta a slámy ke stavbě trvanlivých obydlí, pevnost tohoto materiálu je odhadována na 7MPa. Později byly Mongoly vynalezeny kompozitní luky. Ty byly vytvářeny spojením kostí, dřeva a „zvířecího lepidla“ a následně obaleny kůrou z břízy, tato kombinace materiálu vytvořila přesné a silné luky, které měly dostřel až 300 metrů. [14]

Dalším historickým pokrokem byla Damascenská ocel, která je složena vysokouhlíkové a nízkouhlíkové oceli. [14] Po první světové válce byly použity první kompozity na trupy lodí. V 70. letech se kompozitní průmysl začal více rozvíjet. Byly vynalezeny vylepšené pryskyřice z plastu a vylepšená vlákna pro vyztužení, např. vlákninu z armidu, která je nazývána jako Kevlar. Došlo také k vyvinutí vlákna z uhlíku, které nahrazuje části, jež byly dříve vyráběny z ocele. [15]



Obrázek 19 - Hliněné cihly s příměsí slámy [16]

Druhy kompozitů a jejich vlastnosti

Kompozitní materiály určené pro konstrukce jsou složeny z nosných částí (výztuže) a z matrice, která slouží jako spojovací materiál a vytváří tvar kompozitu. Kompozity jsou výhodné pro použití tam, kde je potřeba splnit určité deformační a pevnostní požadavky v konkrétním místě, konkrétního tělesa použitím vhodné kombinace jednotlivých složek kompozitu a také výrobní technologie.

Kompozity lze dělit dle materiálu použité výztuže na kovy (Fe, W, Mo, Cr, Ti, Ni včetně jejich slitin) nebo nekovy anorganické jako keramika, sklo, čedič anebo organické jako polymery např. kevlar a nylon. Mezi nejpoužívanější materiály pro výrobu výztužných vláken patří skleněná vlákna, aramidová (kevlarová) a uhlíková. [17]

Tabulka 3 - Vlastnosti vybraných typů vláken [13]

Typ vlákna	Sklo	Aramid	HS - uhlík	HM - uhlík
Modul pružnosti v podélném směru E_{L} (MPa)	74 000	130 000	230 000	390 000
Modul pružnosti v příčném směru E_{T} (MPa)	74 000	5 400	15 000	6 000
Modulu pružnosti ve smyku G_{LT} (Mpa)	30 000	12 000	50 000	20 000
Pevnost v tahu σ_{L} (MPa)	2 100	3 000	5 000	3 800
Hustota ρ (kgm^{-3})	2 500	1 500	1 600	1 700

Hodnoty nejpoužívanějších materiálů pro výrobu vláken jsou uvedeny v tabulce č. 3. Dále jsou kompozity děleny dle materiálu matrice, a to na kovy v podobě Fe, Ag, Mg, Al, Co, Ti, Cu, Ni včetně jejich slitin a na nekovy jako keramické materiály, sklo, uhlík a polymery (pryskyřice, epoxidy, polyester). [17]

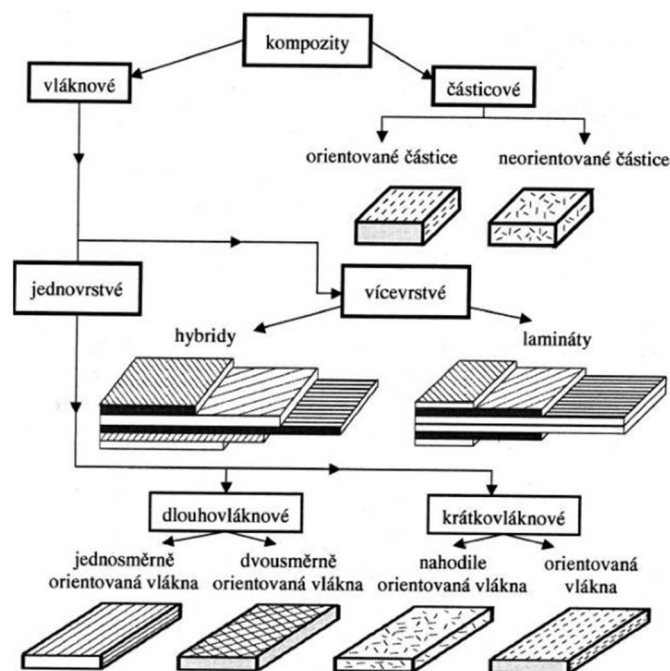
Mezi ty nejčastěji používané materiály pro matrice kompozitních materiálů se řadí epoxidové, polyesterové, fenolové a polyamidové pryskyřice. Matrice udržuje výztužná vlákna ve správné pozici, pomáhá přenášet napětí, chrání vlákna před poškozením abrazií, kontroluje elektrické a chemické vlastnosti a také zajišťuje interlaminární pevnost. V hotovém kompozitu se předpokládá a vyžaduje, aby byla splněna adhezní pevnost, teplotní odolnost, únavová pevnost, chemická a vlhkostní odolnost a vysoký poměr deformace a pevnosti.

Materiály matric a vláken je možno kombinovat jakýmkoli způsobem, existují kompozity jejichž materiály matrice a výztuže jsou dokonce stejného materiálu, avšak jiné formy. Nutné ovšem je, aby byla splněna dobrá přilnavost obou fází (matrice a výztuže) a výsledný kompozit dosahoval požadovaných deformačních a napěťových vlastností. Vlastnosti vybraných typů matric jsou uvedeny v tabulce č. 4. [13]

Tabulka 4 - Vlastnosti vybraných typů matric [13]

Druh pryskyřice	Epoxidové	Polyesterové	Fenolové	Polyimidové
Modul pružnosti E_m (MPa)	4 500	4 000	3 000	4 000 - 19000
Poissonova konst. ν_m (-)	0.4	0.4	0.4	0.35
Modulu pružnosti ve smyku G_m (MPa)	1 600	1 400	1 100	1 100
Pevnost v tahu σ_{pm} (MPa)	130	80	70	70
Hustota ρ (kgm^{-3})	1 200	1 200	1 300	1 400
Maximální teplota T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	90 - 200	60 - 100	120 - 200	250 - 300

Dalším kritériem, podle kterého se kompozity dělí, je geometrický tvar nosné části, tedy výztuže. Dle tvaru výztuže jsou kompozity rozděleny na vláknové (nejrozšířenější), částicové anebo skeletové. Závěrem kompozity rozdělujeme z hlediska jejich použití na žáruvzdorné, žárupevné, korozi vzdorující, kompozity užívané v letectví, strojírenství, stavebnictví apod. [17]



Obrázek 20 - Základní rozdělení kompozitů [13]

Ve stavebnictví se používají nejčastěji vláknové a částicové kompozitní materiály. Kompozity vyztužené částicemi, jsou kompozity naplněny nevláknitými krátkými útvary. Jejich tvary mohou být různé např. krychlové, kulaté či jiné tvary. Částice se podílejí na přenášení napětí, avšak ne tak velkou mírou jako vlákna. [13]

Jejich hlavním úkolem je zlepšit mechanické vlastnosti jako tepelná vodivost nebo elektrická vodivost, mechanickou odolnost, ale také snížit koeficient tření apod. Částice jsou v matici buď náhodně orientované anebo přednostně orientované, a to v případě, kdy chceme dosáhnout v určitém místě určité mechanické vlastnosti.

Kompozitní vláknové materiály jsou vyztuženy pomocí vláken, jejichž průřezové hodnoty jsou mnohem menších rozměrů než jejich délkové hodnoty. Jsou děleny do dvou skupin, a to na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity, jsou kompozity obsahující jednu vrstvu nebo obsahují několik samostatných vrstev a každá samostatná vrstva má stejné vlastnosti a orientaci. Lze je také dělit na krátkovláknové a dlouhovláknové podle délky vlákna.

V případě dlouhovláknových kompozitů jednovrstvých jsou vlákna umístěna jedním směrem, tím se z kompozitu stává kompozit jednosměrový tzv. lamina. Tento typ kompozitů je vyráběn ukládáním vláken v rovnoběžném směru a následným prolitím pryskyřicí, která tak vytváří matici a udržuje vlákna na svém místě. Dosahují vysoké pevnosti rovnoběžně s vlákny, avšak kolmo na vlákna je pevnost velmi výrazně menší, tato pevnost je pak dána především vlastnostmi matrice. K dosažení stejných či podobných vlastností v celém kompozitu je prováděno vyztužení i v druhém směru. Dvousměrně orientovaná výztuž kompozitů je tvořena rohoží např. tkaninou obsahující na sebe vzájemně kolmá vlákna.

Krátkovláknové kompozity obsahují vlákna krátkých délek někdy označující se jako „sekaná vlákna“. Tyto vlákna jsou orientovány v daném směru, či náhodně. Nejčastěji se tato vlákna orientují náhodně a jsou často vstříkována spolu s tekutou pryskyřicí do forem. V případě orientovaných vláken se vlákna při výrobě svážou v rohož, která se následně impregnuje pryskyřicí.

Nejvíce využívanými kompozity v praxi jsou kompozity vícevrstvé. Vícevrstvé kompozity jsou složeny z několika štíhlých nestejně orientovaných jednosměrových kompozitů z vláken – lamin. Pokud každá vrstva obsahuje stejné materiály (jako např. skelná vlákna v pryskyřici z epoxidu) je tento druh kompozitu nazýván laminát.

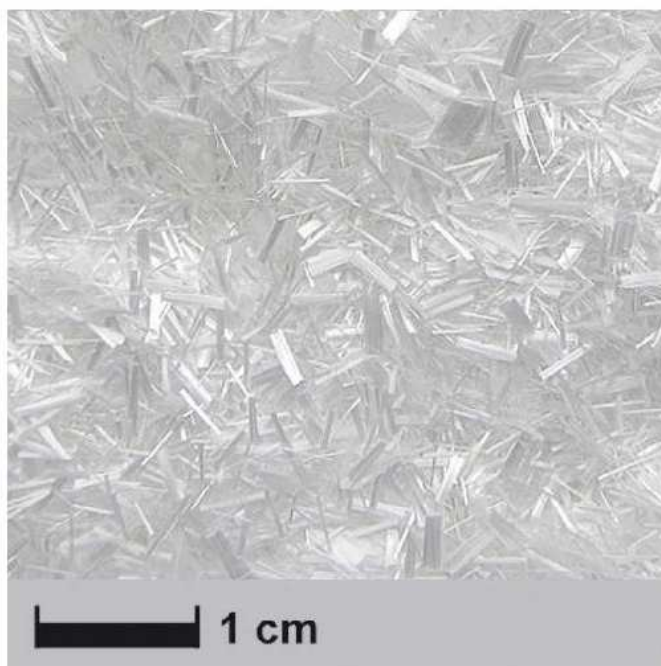
Pokud jsou vrstvy z rozdílných materiálů (např. jedna vrstva vyztužena uhlíkovými a druhá skelnými vlákny) jde o kompozity nazývané jako hybridní lamináty. [13]

Vláknové kompozity mají jednu významnou vlastnost a to, že vzhledem k jejich nízké hmotnosti mají vysokou pevnost a tuhost, dále je jejich velkou výhodou možnost výroby materiálu dle požadovaných vlastností v konkrétních směrech. [13]

Výroba kompozitních vláken

- Vlákna ze skla

Patří mezi nejvíce používaná vlákna pro vyztužení kompozitů užívaná v kombinaci s matricí z polymeru hlavně díky vysoké měrné pevnosti, nízké teplotní roztažnosti, vysoké odolnosti proti nárazu, nehořlavosti, nízké ceně a také díky výborným vlastnostem ve směru tepelné a zvukové izolace. Vzhledem k hydrofilnímu povrchu skleněných vláken, dochází k úpravě jejich povrchu z důvodu zlepšení mechanických vlastností. Jejich nejběžnější využití je v automobilovém a leteckém průmyslu či pro výrobu sportovního vybavení. [18] [19]



Obrázek 21 - Příklad skelného vlákna [20]

Tyto vlákna jsou vyráběna pomocí kontinuální technologie, kde dochází k tažení sklářského kmene, přičemž v podobě vějířových vláken vytéká sklovina z trysek vyrobených z platiny a rhodia. Vějířová vlákna jsou průměru pohybující se od 3,5 až do 20 mikrometru. Konečný průměr vychází z rozdílů rychlosti odtahování vlákna a vytékání skloviny. Vlákna je nutno poté ostříkat vodou, nanést lubrikačním přípravkem v lubrikačním zařízení a tím zmírnit abrazi a lámavost vláken. Takto ošetřená vlákna je nutno ještě opatřit tzv. apretační vrstvou z organických silanů (amino, vinyl apod.), díky které vzroste adheze vláken k matrici, především z pryskyřice, se kterou tyto prvky dobře reagují. Následně jsou vlákna skladována v podobě zásobních cívek, do kterých jsou kontinuálně navíjeny ve sdružených pramencích. [18] [19]

- Vlákna z kovu

Kovová vlákna jsou většinou používána v kombinaci s kovovou matricí, ale jsou vhodná i v kombinaci s keramickou či polymerní matricí. Tyto kompozitní materiály mají nevýhodu ve vyšší měrné hmotnosti. Nejčastěji jsou využívána ocelová vlákna z uhlíkové oceli pro výztuž matrice z lehkých slitin, z důvodu jejich charakteristické teplotní odolnosti do 300° C. Pro zpevnění matrice, která je vytvořena ze žárupevné slitiny jsou používány kovy o vysoké teplotní odolnosti jako je wolfram nebo molybden. V případě požadavku na kompozity mechanicky namáhané, je používáno vyztužení z kovového skla. V současnosti je vývoj směřován především na organokovová vlákna či kovo-keramická. [21]



Obrázek 22 - Příklad kovového vlákna [22]

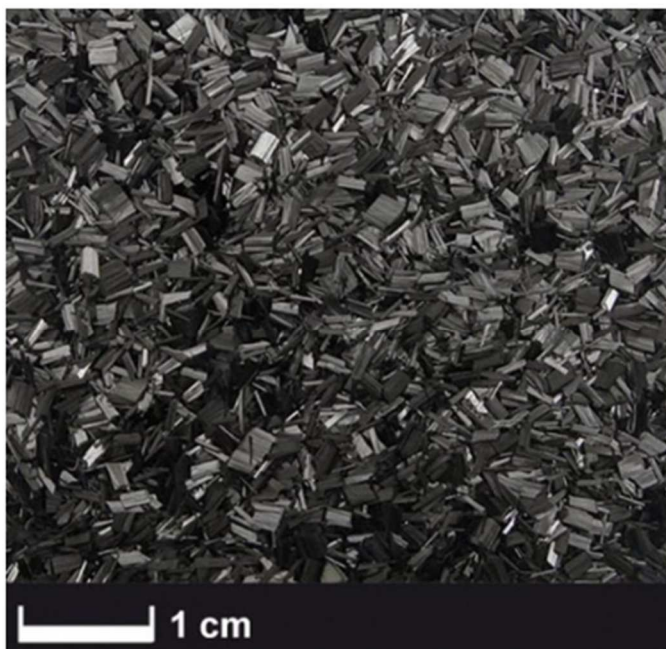
- Vlákna z keramiky

Tento typ vláken má vysoký modul pružnosti, vysokou pevnost a nízkou měrnou hmotnost. Keramická vlákna jsou využívána především pro svoji žáruvzdornost, odolnosti vůči chemikáliím a tepelně zvukové izolační schopnosti. Mezi nejčastěji používaná vlákna se řadí vlákna z boru, vlákna na bázi karbidů, oxidů či nitridů. [21] [23]

Výroba borových vláken je vysoce ekonomicky nákladná, jelikož tvárnost boru je obtížná. Pro jejich kontinuální výrobu je používána metoda tzv. chemické depozice, kdy bor plynného skupenství je nanášen na tenké wolframové dráty. Tyto vlákna jsou následně ošetřena povrchovou úpravou z karbidu boru nebo křemíku, neboť bor je schopen s kovy chemicky reagovat. [23] [24]

- Vlákna z uhlíku

Výztužná vlákna z uhlíku jsou vysoce teplotně odolná, pevná, lehká a jejich modul pružnosti je vysoký. Tyto vynikající vlastnosti plynou ze struktury grafitu a jsou vyráběna v grafitizovaném či karbonizovaném stavu. Uhlíkové atomy jsou v těchto vláknech orientovány ve směru osy vláken a vedle sebe prostorově už ne tak pravidelně. [19] [21] [24] [25]



Obrázek 23 - Příklad uhlíkových vláken [20]

Vysokopevnostní karbonizovaná vlákna mají menší modul pružnosti, ale větší pevnost oproti grafitizovaným vláknům nazývaných také jako vysokomodulová vlákna. Tyto dva typy vláken jsou rozdělována dle teploty zpracování. Karbonizace vláken je prováděna za nižších teplot 900 až 1500 °C na rozdíl od grafitizace, která probíhá při 2600 až 2800 °C. Dále jsou uhlíková vlákna dělena na UHS (ultrapevnostní vlákna), IM (středněmodulová vlákna) a UHM (ultravysokomodulová). [19] [21] [24] [25]

- Vlákna z aramidu

Tyto vlákna jsou formována z polyamidů, jejichž řetězce obsahují aromatické a amidové skupiny. Jejich charakteristickou vlastností je vysoká odolnost vůči rozpouštědlům, vysokým teplotám, abrazi, ale také značnou pružností a pevností v tahu. Jedním nejznámějším typem aramidových vláken je tzv. Kevlar (para-aramid).

Nevýhodou těchto vláken je zvýšená citlivost na UV (ultrafialové) záření, které vlákna ničí a poté rozkládá. Jsou především používána v textilním průmyslu na výrobu ochranných pomůcek a oděvů, ale také při výrobě letadel, kabelů nebo brzdících systémů. [24]



Obrázek 24 - Příklad aramidového vlákna [20]

- Vlákna z přírodních materiálů

Vlákna z přírodních materiálu jsou rozdělena na anorganická, živočišná či rostlinná vlákna. Vlákna z anorganických materiálů jsou tvořena nerosty jako azbest či polosyntetickými materiály jako čedič nebo struska. Rostlinná vlákna jsou získávána například ze semen bavlny, ze stonků juty, bambusu nebo konopí, z plodů kokosů (kokosová vlákna) a také z listů banánovníku nebo sisalu. Vlákna živočišná jsou vyráběna ze srstí lam, koní, velblouda nebo z ovčí vlny, či sekretů hmyzu.

Význam těchto vláken je především recyklovatelnost a snadné zpracování. Vlákna přírodního původu mají také nízkou hustotu a jejich produkce není náročná. Mezi jejich nevýhody patří hlavně náchylnost vůči klimatickým podmínkám a nízká odolnost vůči teplotám větším než 200 °C. [19] [26]



Obrázek 25 - Příklad přírodních Iněných vláken [27]

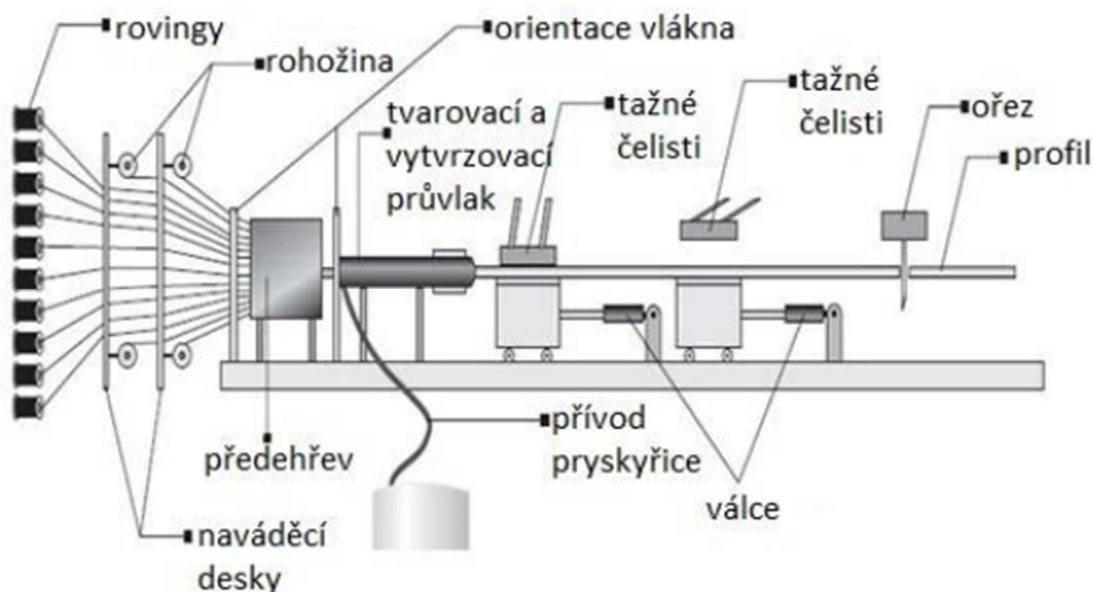
Výroba materiálů z kompozitu

Při výrobě materiálů z kompozitu je dbáno na jednoduché technologie výroby, její hospodárnost, dobré spolupůsobení výtzuže s matricí, rovnoměrné uložení výtzuží a také možnost změny jejího objemového množství. Při výběru technologického postupu výroby je důležité zohlednit rozměry a typ prvku, požadovanou kvalitu povrchu, sériovost prvků, požadované vlastnosti a také náklady. [21] [28]

Výroba pultruzí

Jde o vysokoobjemovou kontinuální výrobu kompozitních materiálů s reaktoplastickou matricí z polymeru na bázi pryskyřic z epoxidu, polyesteru, metakrylátu, polyuretanu či vinylesteru. Tento proces výroby umožňuje rozsáhlé možnosti úpravy konečných vlastností materiálu jako např. chemické, mechanické, elektrické či protipožární ve vazbě na cenu nebo aplikaci výsledného prvku.

Výroba pultruzí je používána zejména na jednoduché a tenké profily, ale i na rozměrné a tvarově náročné trubky a tyče. Pro vyztužení jsou využívána uhlíková, skleněná či aramidová vlákna, ale použity mohou být i rohože, které však musí tvořit maximálně 80% obsahu výsledného kompozitu. Výztuž z rovingových vláken nebo ve spojení s tkaninou či rohožemi prostupuje lázní s iniciovanou pryskyřicí, kde se směs prosytí a dojde k odstranění nadbytečné pryskyřice. Lázeň povětšinou obsahuje příměsy jako plnivo, barvivo nebo retardéry hoření pro zvýšení vlastností konečného kompozitu. Poté je směs vtažena do forem, kde se směs tvaruje a vytvrzuje do požadovaných tvarů. Vytvrzování pryskyřice ve formě probíhá za zvýšených teplot díky elektrickému ohřevu, vysokofrekvenčnímu poli nebo pomocí topného tělesa. Po dokončení vytvrzovacího procesu jsou výsledné kompozitové profily protahovány hydraulickými čelistmi a řezány do požadovaných formátů. [28] [29] [30]



Obrázek 26 - Schéma pultruzní linky [28]

Výroba ručním kladením

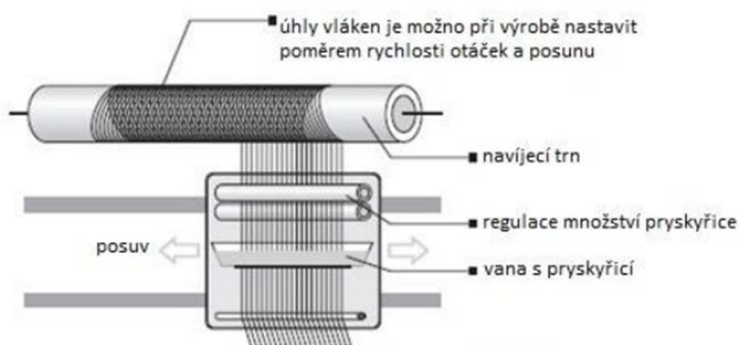
Tato metoda je založena na postupném a prostém kladení vrstev výztužné vložky do předem ošetřeného povrchu formy, která je naplněna iniciovanou pryskyřicí. K vytvrzení dochází poté, co dojde k vytlačení a odstranění nadbytečné pryskyřice a vzduchových bublin za pomoci válečků. Pro matrice jsou nejčastěji využívány polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. Výztuž matrice zpravidla tvoří uhlíková, skleněná nebo aramidová vlákna převážně v podobě tkanin. Tento druh metody je používán k výrobě jak prostých, tak i tvarově komplikovanějších kompozitních profilů jako např. poklopy, části karoserií aut. Ruční kladení je nízkonákladové a je často využíváno i pro zkušební prototypy. [28]



Obrázek 27 - Schéma ručního kladení [28]

Výroba navíjením

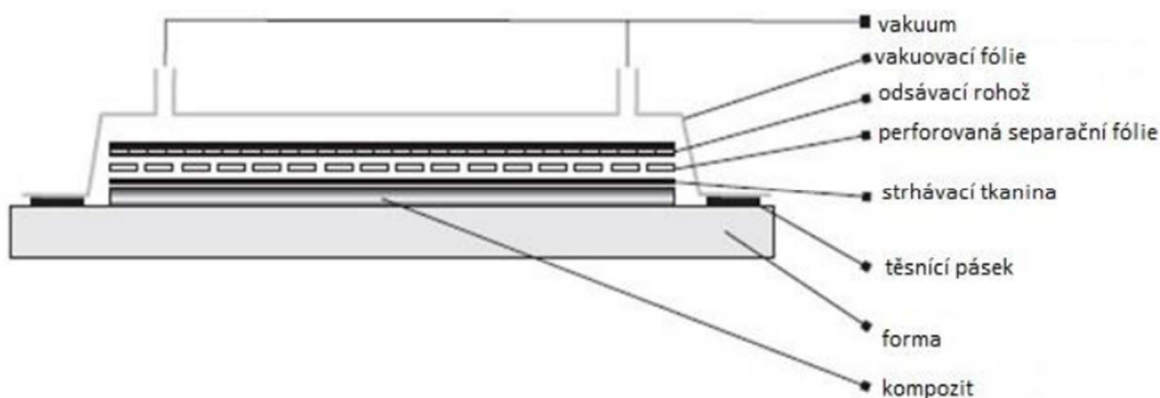
Technologie navíjením je určena k výrobě dutých profilů jako např. nádoby, nádrže nebo trubky, kde dochází k postupnému navíjení uhlíkových, skleněných či aramidových vláken prostoupených pryskyřicí na trn. Úhel kladení výztužných vláken je koordinován vztahem rychlosti posunu zařízení sloužícímu k posunu a rychlosti otáčení trnu. K vytvrzení pryskyřice z epoxidu, polyesteru nebo vinylesteru dochází až po konečném navinutí na trn za zvýšené teploty a následné demontáže z trnu. Velkou nevýhodou této metody je vysoká investice na výrobní linku. [19] [28]



Obrázek 28 - Schéma navíjení [28]

Výroba lisováním

Při lisování je materiál umístěn do formy, kde dochází k působení tlaku a tím následujícímu formování výrobku do požadovaných rozměrů, tvarů a poté ke konečnému vytvrzení. Mezi největší výhodu tohoto procesu je vysoká kvalita a automatizace. Lisování je vhodné pro velkosériovou výrobu drobných až středně velkých prvků jako např. lišty. [19] [28] [31]



Obrázek 29 - Schéma lisování pomocí vakua [28]

Výroba stříkáním

Tato technologie je využívána zejména pro výrobu rozměrově jednodušších prvků. Do formy je vstřikována směs nasekaných vláken ze skla spolu s pryskyřicí prostřednictvím speciální stříkací pistole. Tloušťka materiálu je ovlivněna počtem nanesených vrstev, kde každá vrstva je jednotlivě zhutněna pomocí válečků o různých velikostech, nebo také rýhováním, jež zároveň vytlačí nežádoucí vzduchové bubliny ze směsi ven. Jako výztuž bývá nejčastěji používán roving ze skla (svazek nekonečných vláken), či s příměsí odlehčených mikrokuliček expandovaného polymeru. Pro matrice jsou používány polyesterové pryskyřice. Při výrobě stříkáním je nutno zajistit odvětrávání pracoviště. Další nevýhodou je vysoká investice do zařízení na odvětrání, stříkacích zařízení a také velké množství odpadu z výroby. [19] [28]



Obrázek 30 - Schéma stříkání [28]

Spojování kompozitních materiálů

Možnosti spojování kompozitů jsou podobné s těmi pro ocelové materiály. Spoje mohou být v podobě mechanických spojů (šroubů, nýtů) nebo lepení. Existuje i spoj hybridní, který je kombinací šroubového či nýtového spoje se spojem lepeným.

Spoje mechanické

Mechanické spoje v podobě nýtů a šroubů mají stejné znaky. Pro oba tyto spoje je nutno vytvořit otvory pro spojení spojovaných prvků. Tyto otvory soustřeďují napětí ve struktuře kompozitního materiálu a dochází v tomto místě k narušení či přerušování vláken vyztuže, jež jsou zpravidla orientována vodorovně k hlavnímu směru napětí. V případě jednosměrně vyztužených kompozitů se tento typ spojování nepoužívá.

Spojováním pomocí šroubů a nýtů vyvolává kontaktní tlak, který může zapříčinit narušení povrchu kompozitního prvku. Při použití vhodně zvolených podložek, lze tento jev eliminovat. Pokud je použit hybridní spoj i s podlepením, pevnost výsledného spoje je navýšena o 25 %. Dalším nežádoucím účinkem při použití mechanického spojování kompozitu je otláčení, které může delaminovat jednotlivé vrstvy. K tomuto nepříznivému jevu může docházet také při vytváření otvorů v kompozitu. Při montáži těchto prvků spojovaných mechanicky je nutno dbát na technologii zejména ve výškách z důvodu složitosti montáže a použití montážního nářadí. Výhodou je okamžitá pevnost spoje. [32]

- **Spoje nýtové**

Nýtový spoj je druh mechanického spoje s nutností vytvoření otvoru pro spojení prvků. Při provádění technologie nýtování kompozitů je nutno se vyvarovat vzniku nadměrných rázů, tyto rázové impulzy poškozují křehkou strukturu kompozitního materiálu, jež byl dále oslaben vytvořením otvoru pro nýt. Spojovacím materiálem jsou nejčastěji používány slitiny hliníku a tento spoj je nerozebíratelný. Nevýhodou nýtování kompozitů je rozdílná teplotní roztažnost hliníku a spojovaného kompozitu. Spoj je vhodné použít v případě méně náročných spojů na životnost a únosnost. [32]

- **Spoje šroubové**

Hlavním rozdílem mezi nýtovým spojem, je jeho možná rozebíratelnost. Tato výhoda umožňuje montáž konstrukce v uzavřeném prostředí, následnou demontáž z důvodu přepravy a následně montáž na místě stavby. Spojovacím materiálem jsou šrouby z oceli opatřeny různými druhy povrchové úpravy. V případě požadované vyšší požární odolnosti, či možné degradaci spoje při použití ocelových šroubů je možné použití kompozitních šroubů. [32]

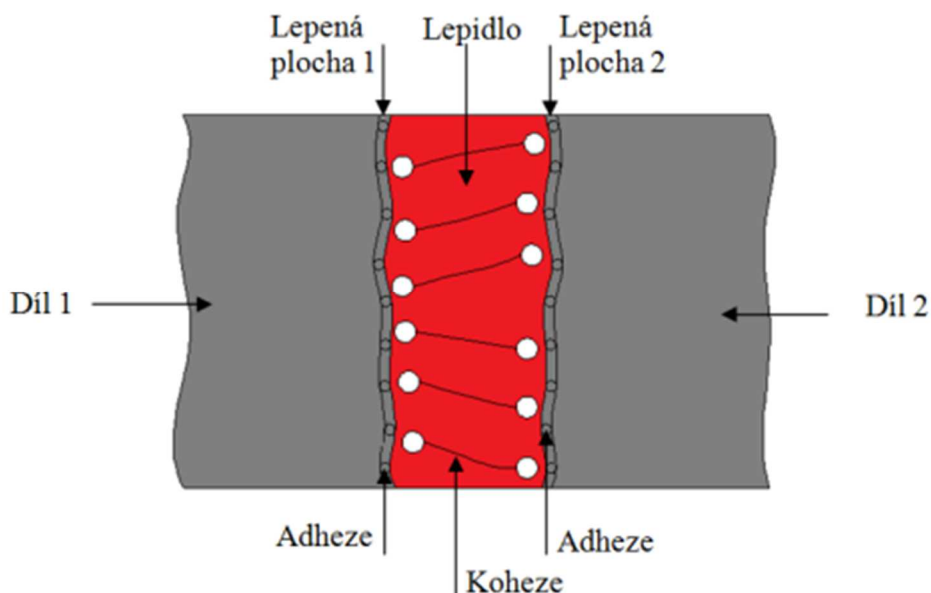


Obrázek 31 - Příklad kompozitních šroubů [33]

Spoje lepené

Tento druh spoje patří stejně jako nýtové mezi nerozebíratelné. Lepit je možno materiály rozdílné i stejné. Spoje lepené jsou popisovány kohezivní a adhezivní pevností. Lepené prvky jsou nazývány jako tzv. adherendy.

Adhezivní pevnost je schopnost přilnutí lepidla k povrchu prvku a je ovlivněna řadou faktorů, jež závisí na typu povrchu a materiálu. Mezi tyto faktory je řazena drsnost povrchu, nerovnosti či pórovitost. Důležité je, aby oba povrchy byly před nanesením lepidla vždy řádně odmaštěny a zbaveny částic prachu. Kohezivní pevností se rozumí soudržnost samotného lepidla. Výhodami lepených spojů jsou možnosti spojování různých druhů materiálu, které mohou být např. nesvařitelné, spojování i velmi tenkých povrchů, těsnost spoje a tím zamezení infiltrace kapalin do spoje, snížení náročnosti na spojovací prostředky a k tomu potřebné nářadí, vyloučení poškození materiálu v důsledku vrtání otvorů pro mechanické spoje a tím i zlepšení estetiky spoje, tlumení chvění a hluku, nižší hmotnost (méně materiálu), spojení větší plochy, možnost ovlivnění tepelné či elektrické vodivosti spoje. Oproti tomu jejich nevýhodami je doba vytvrzování, spoje jsou nerozebíratelné, nízká odolnost vůči normálovému a dynamickému namáhání (odlupu) a malá odolnost vůči vyšším teplotám. [32]



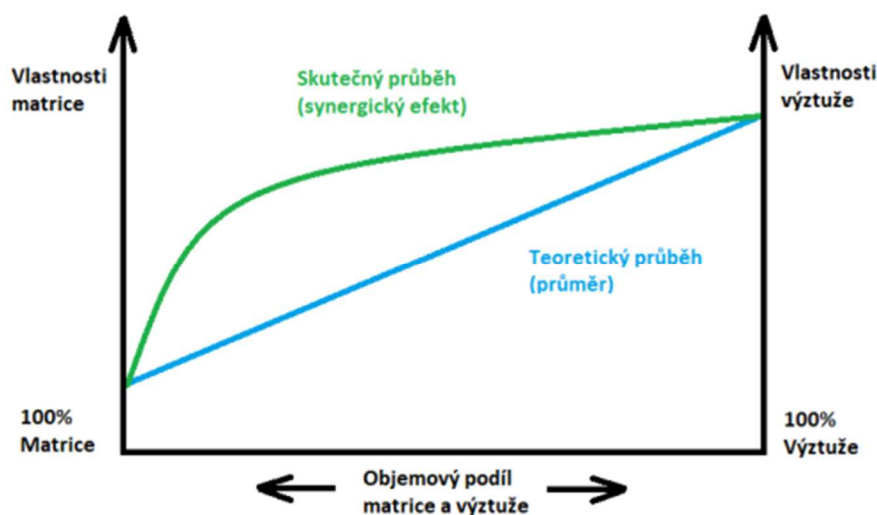
Obrázek 32 - Schéma lepení dvou prvků [34]

3. Porovnání oceli a kompozitu

Tabulka 5 - Porovnání vlastností oceli a obecného kompozitu [autor diplomové práce]

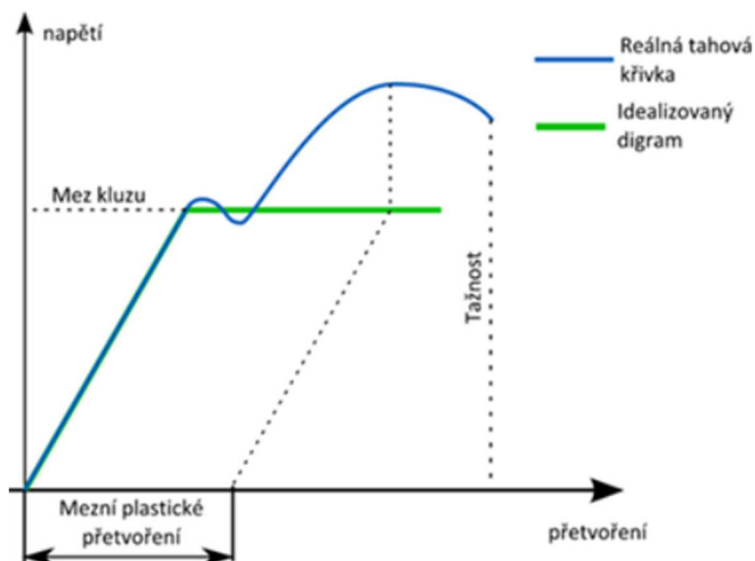
Vlastnosti	Jednotka	Hodnota (Ocel S235)	Hodnota (Kompozit)
Modul pružnosti v tahu	GPa	210	18 až 40
Modul pružnosti v tlaku	GPa	210	19
Modul pružnosti ve smyku	GPa	81	2,9
Součinitel teplotní délkové roztlačnosti	K^{-1}	$10 \cdot 10^{-6}$ až $12 \cdot 10^{-6}$	6
Poissonovo číslo	-	0,27 až 0,30	0,33
Hustota	kg/m ³	7830 až 7880	1700 až 1900

Všechny vlastnosti kompozitů popisuje tzv. synergický efekt. Obrázek č. 33 zobrazuje jev synergického efektu, kdy je docíleno materiálu s vlastnostmi lepšími, než vlastní jednotlivé složky kompozitu samostatně.



Obrázek 33 - Schéma synergického efektu v kompozitech [35]

Na druhou stranu vlastnosti oceli jsou popsány pracovním diagramem. Ve stavební praxi je reálný diagram oceli nahrazován materiálem ideálně plastickým pro potřeby návrhu viz obr. 34. Výhodou tohoto materiálu je, že je nutno znát pouze modul pružnosti a mez kluzu pro popsání pracovního diagramu. Použitím tohoto diagramu není možné překročit vyznačenou mez kluzu.



Obrázek 34 - Modely pracovního diagramu oceli [36]

4. Použití kompozitů ve stavitelství

Kompozitní materiály se vyznačují výhodami především jako tepelná nevodivost, vysoká tuhost, snadná opracovatelnost a nízká hmotnost. Vzhledem k těmto výhodám nacházejí kompozity využití nejen u pasivních či nízkoenergetických objektů, ale všude, kde investor či stavebník chce dosáhnout nižších tepelných ztrát. Ke zlepšení estetičnosti kompozitů je možné použít povrchové úpravy jako nátěry, laky nebo probarvení přímo kompozitové hmoty zejména na viditelných místech jako jsou zábradlí, okapnice dřevěných oken či dveří, konstrukce přístřešků (pergol), lávek nebo schodišť. Velkou předností kompozitů je bezúdržbovost a velmi dlouhá životnost, avšak největší nevýhodou je vysoká cena. Pokud se ale porovnájí finanční náklady a investovaný čas do ošetřování a údržby kovových či dřevěných konstrukcí, nevýhoda vysoké ceny kompozitů vymizí.

Prvky z kompozitů nalézají využití jak v občanské výstavbě, tak také ve vodním hospodářství, chemickém průmyslu, energetice, u silničních a železničních staveb či při výstavbě přístavišť a mol. [31]

5. Referenční stavby z kompozitních materiálů



Obrázek 35 - kompozitní molo se zábradlím – Ostrava Poruba [31]



Obrázek 36 - detail kompozitní konstrukce mola – Blansko [31]



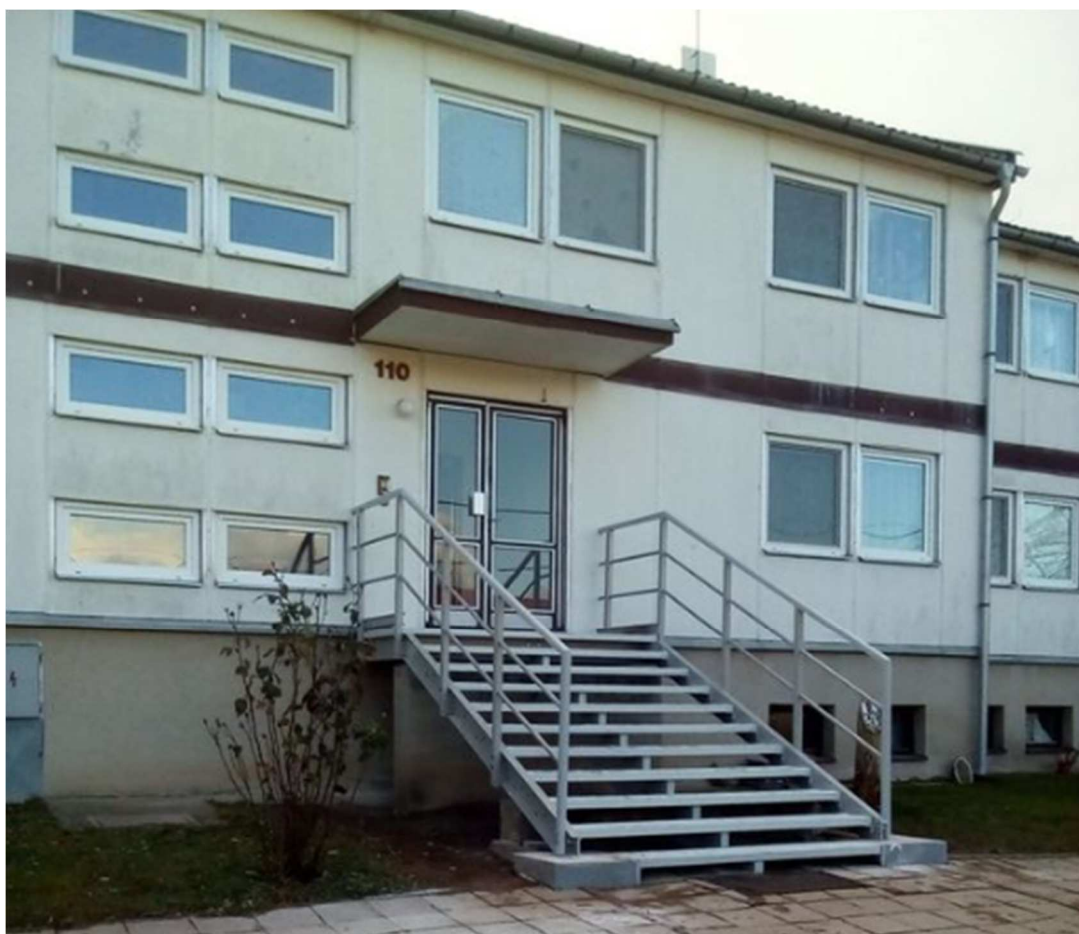
Obrázek 37 - Kompozitní konstrukce pergoly [31]



Obrázek 38 - Celokompozitní nosná konstrukce schodiště – ČOV Budapešť [31]



Obrázek 39 - Kompozitní lávka – Štěpánovice [31]



Obrázek 40 - Kompozitní schodiště k bytovému domu – Valtovice [31]

PRAKTICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

Praktická část práce se zabývala experimentem v laboratoři pod odborným dohledem pana Ing. Jana Krystka, PhD. V laboratoři proběhlo zkoušení vzorků z oceli a kompozitů v tahu, tlaku a ohybu. Laboratorní hodnoty pak sloužily k porovnání mezi hodnotami od výrobce a k dimenzi prvků na modelu referenční konstrukce přístřešku. Byly vyhotoveny celkem 3 modely za pomoci programu FIN EC stejné konstrukce, avšak jeden z oceli s hodnotami od výrobce poté dva modely z kompozitu, z nichž jeden s hodnotami z laboratoře a druhý s daty od výrobce.

1. Příprava vzorků

Nejprve bylo třeba z dostupného materiálu vytvořit jednotlivé vzorky. Většinu vzorků bylo třeba nařezat či vyfrézovat do příslušného tvaru a rozměrů, aby bylo možné vzorky mezi sebou porovnávat. Dále bylo nutno vzorky zbrousit, abychom předešli zranění při jejich manipulaci a také popsat, aby byla zaručena identifikace jednotlivých vzorků. V první fázi došlo k jednoduchému značení, avšak později se ukázalo, že bude vhodnější je přejmenovat jak z důvodu lepší orientace v typu vzorku, tak také v jejich číselném pořadí, jelikož došlo ještě před zkoušením k vyřazení pár vzorků z důvodu vizuálních poruch a díky tomu by jistě došlo ke zkresleným výsledkům. Fyzické vzorky mají tedy jiné označení, než tytéž vzorky zanesené již do výsledných dat. Ke snadné identifikaci fyzických vzorků a jejich výsledných dat je staré a nové značení popsáno v tabulce č. 6.



Obrázek 41 - Nevyříděné vzorky připravené ke zkoušce [autor diplomové práce]

Tabulka 6 - Staré a nové označení vzorků [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (TAH - pásy - materiál A)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
KP1	KO_T_PA_01
KP2	KO_T_PA_02
KP3	KO_T_PA_03
KP4	KO_T_PA_04
KP5	KO_T_PA_05
KP6	KO_T_PA_06
KP7	KO_T_PA_07
KP8	KO_T_PA_08
KP9	KO_T_PA_09
KP10	KO_T_PA_10
KOMPOZITY (TAH - pásy - materiál B)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
KP11	KO_T_PB_01
KP12	KO_T_PB_02
KP13	KO_T_PB_03
KP14	KO_T_PB_04
KOMPOZITY (OHYB - pásy - materiál B)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
KP15	KO_B_PB_01
KP16	KO_B_PB_02
KP17	KO_B_PB_03
KP18	KO_B_PB_04
KOMPOZITY (OHYB - trubky - šedá/žluté)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
K03	KO_B_TR_S_1
K04	KO_B_TR_Z_1
K04'	KO_B_TR_Z_2
KOMPOZITY (OHYB - O profil - materiál lávka)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
K11	KO_B_OL_1
K11'	KO_B_OL_2

KOMPOZITY (TLAK - L profil)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
K07''''	KO_C_L_1
KOMPOZITY (TAH - tyčinky, materiál C)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
K11	KO_T_TC_1
K13	KO_T_TC_2
K14	KO_T_TC_3
K15	KO_T_TC_4
K17	KO_T_TC_5
OCEL (TAH - pásy)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
OC10	OC_T_P_1
OC10'	OC_T_P_2
OC9	OC_T_P_3
OC9'	OC_T_P_4
OCEL (TAH - tyčinky)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
OC4	OC_T_T_1
OC4'	OC_T_T_2
OC5	OC_T_T_3
OC5'	OC_T_T_4
OC6	OC_T_T_5
OC8	OC_T_T_6
OCEL (OHYB - trámy)	
STARÉ OZN.	NOVÉ OZN.
OC1	OC_B_TR_1
OC2	OC_B_TR_2

Rozměrové hodnoty a váhy vzorků jsou popsány u příslušných podkapitol jednotlivých typů vzorků a jejich zkoušek.



Obrázek 43 - Frézování kompozitních pásků do požadovaných rozměrů [autor diplomové práce]



Obrázek 42 - Pokosová pila použita pro řezání kompozitů [autor diplomové práce]

2. Pomůcky a nástroje

Pro přípravu vzorků bylo použito ochranných pracovních pomůcek, jako respirátor, ochranné brýle, rukavice a pracovní oděv. Seznam použitých nástrojů a strojů při celém experimentu:

- Úhlová bruska
- Pokosová pila (Toolson KGZ34000)
- Stolní pila (Scheppach HS100S)
- Kapsový odsávač (Vzduchotechnik Chrastava POC 14)
- CNC frézka (Shenzhen Scotle Technology LTD. 3040Z-DQ)
- Digitální posuvné měřítko (Extol Premium 8825223)
- Posuvné měřítko oboustranné s jemným stavěním (Kmitex DIN 862)
- Smirkový papír
- Digitální váha
- Zkušební stroj (Zwick Roell Z050) + software (TestXpert II)
- Magnetická digitální vodováha (Beast X)
- Světla + fotoaparáty se stativy (Canon)



Obrázek 44 - Fototechnika [autor diplomové práce]

3. Popis experimentu

Zkoušení probíhalo v laboratořích na Fakultě aplikovaných věd na zkušebním stroji Zwick Roell Z050 s pomocí Ing. Jana Krystka, PhD. kde jsme připravili vhodné upínací čelisti do stroje. Následovalo upnutí vzorků a v průběhu testů změny upínacích čelistí dle profilů a typu vzorků a typu zkoušky. Jednotlivé vzorky jsme vyrovnali a vystředili. Poté jsme nastavili osvětlovací zařízení včetně fotoaparátů pro zajištění foto dokumentace zkoušky a případné vytvoření videa ze snímků. Dalším krokem před samotným testem bylo nastavení extenzometru pro změření deformace a nastavení zatěžování či rychlosti posuvu tlačné hlavy stroje.

Rychlost posuvu pro kompozity a ocel byla ve většině případů nastavena na 2 mm/min, výjimkou byly vzorky s označením KO_T_PB zkoušené na ohyb, kde byla rychlost nastavena na 5 mm/min. a vzorek oceli s označením OC_B_TR_1, kde rychlost byla pouze 0,5 mm/min. a to z důvodu testu nastavení adekvátní rychlosti. Velikost předzatížení jsme nastavili na hodnotu 10 N. Hodnota předzatížení představuje zatížení, od kterého stroj začne zaznamenávat hodnoty posuvů a zatížení. Při testu se měřila doba zkoušky, prodloužení a síla.

Zkoušení ocelových vzorků bylo výhradně pro ověření vlastností, které jsou udávány pro návrh ocelových konstrukcí. Zkoušky kompozitních materiálů byly z důvodu jak ověření vlastností dle výrobce, tak byly také použity pro dimenzování prvků ve výpočtovém modelu referenční konstrukce přístřešku.

Při zkoušení kompozitních vzorků byl využit maximální počet použitelného materiálu. Důvodem neměření většího počtu a typů vzorků je nedostatek dostupného materiálu pro rozsáhlejší měření.

Veškeré změřené hodnoty pomocí softwaru TextXpert II zkušebního stroje a grafy byly zpracovány v pomoci skriptů v programu Python.

4. Naměřené hodnoty vzorků

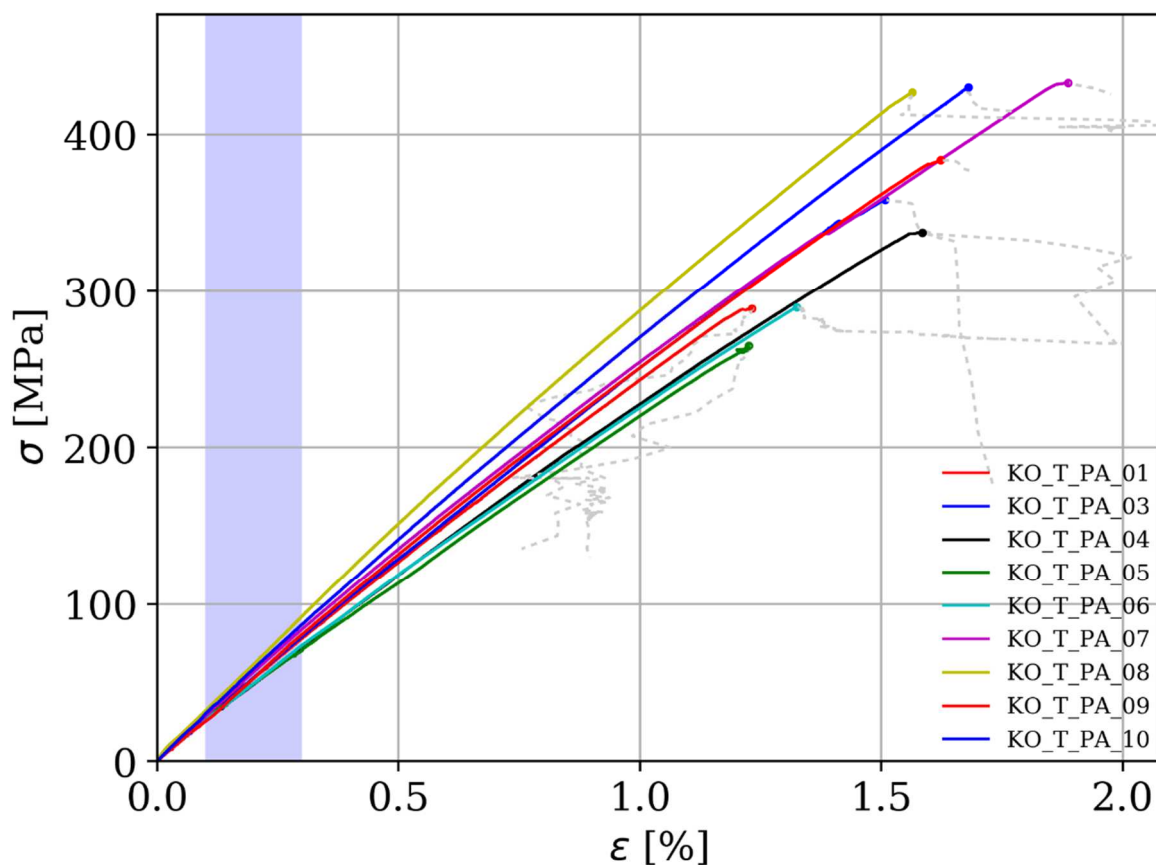
KOMPOZITY (TAH – pásky – materiál A)

Jedná se o vzorky kompozitu ve formě pásků zkoušené na tah. V tabulce č. 7 jsou zaznamenána rozměrová data změřená před experimentem. Jednalo se o pásky vyztužené v jednom směru uhlíkovými vlákny, a to ve směru působení tahu. Označení „materiál A“ je pouze pro odlišení tloušťky pásků od pásků s označením „materiál B“.

Tabulka 7 - Rozměrové veličiny vzorků KO_T_PA [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (TAH - pásky - materiál A)				
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Ø Šířka [mm]	Ø Tloušťka [mm]	Váha [g]
KO_T_PA_01	226,10	19,61	3,98	32,36
KO_T_PA_02	226,40	19,81	3,98	31,40
KO_T_PA_03	183,40	19,72	3,91	26,19
KO_T_PA_04	182,90	19,65	3,83	25,27
KO_T_PA_05	226,10	19,73	3,82	31,07
KO_T_PA_06	226,10	19,86	3,76	30,43
KO_T_PA_07	188,10	19,57	5,82	41,30
KO_T_PA_08	188,00	19,83	5,82	42,25
KO_T_PA_09	188,00	19,53	5,85	41,12
KO_T_PA_10	188,00	19,69	5,82	42,05

Datum a čas zkoušky:	11.11.2022 (16:04-17:43)
Rychlost zatěžování:	2 mm/min.
Vzdálenost čelistí:	100 mm
Nastavení extenzometru:	50 mm
Průměrná hodnota maximálního napětí:	$\sigma_{\max} = 336,2 \text{ MPa}$

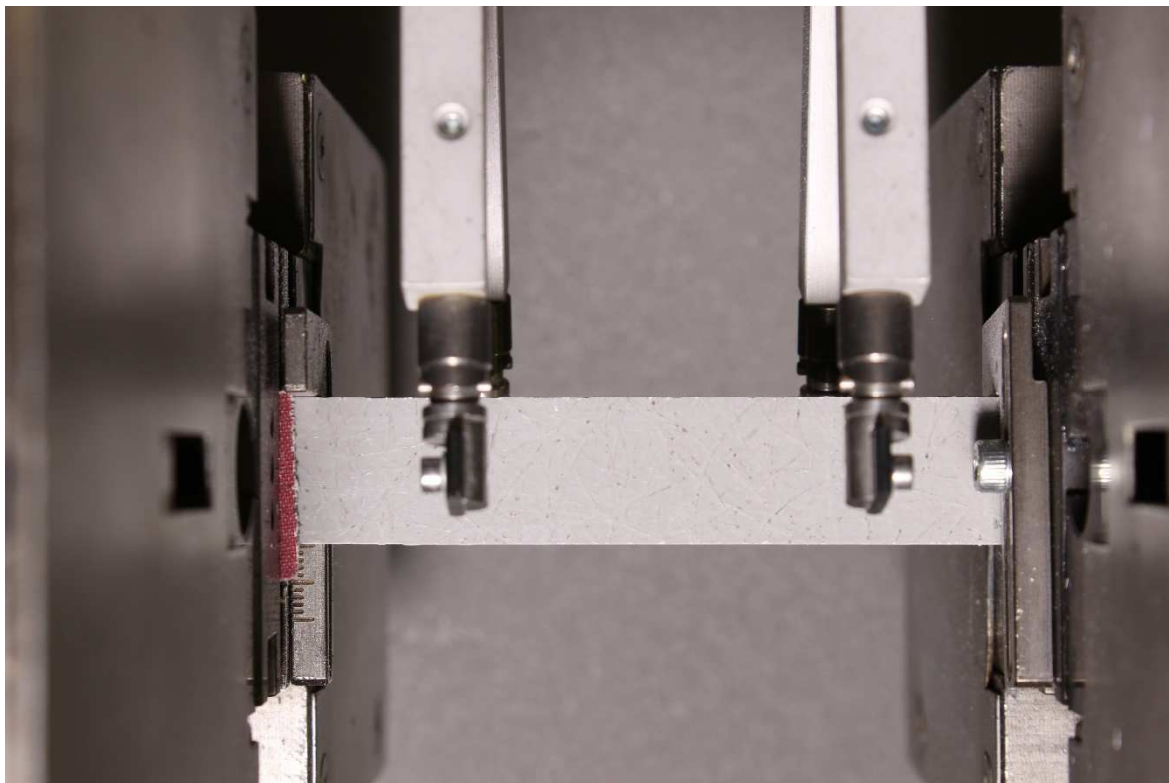


Graf 1 - Výsledky vzorků KO_T_PA (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]

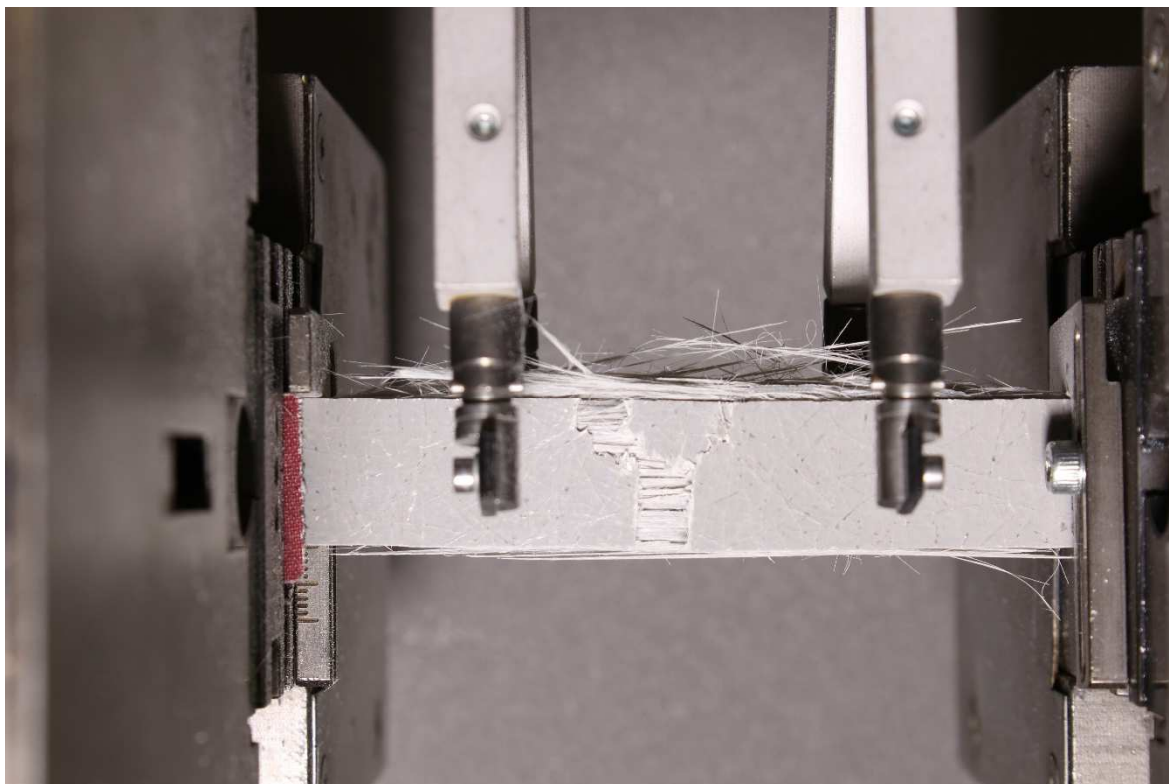


Obrázek 45 - Příklad kompozitního pásku [autor diplomové práce]

Na obrázku č. 45 je vidět kompozitní pásek vyfrézovaný pomocí CNC frézky. K jeho uchycení do čelistí bylo z důvodu kluzu mezi čelistí a páskem nutno vložit smirkový papír k zamezení vyklouznutí pásku při tahu, a tak zabránění možných chyb v měření.



Obrázek 47 - KO_T_PA_07 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]



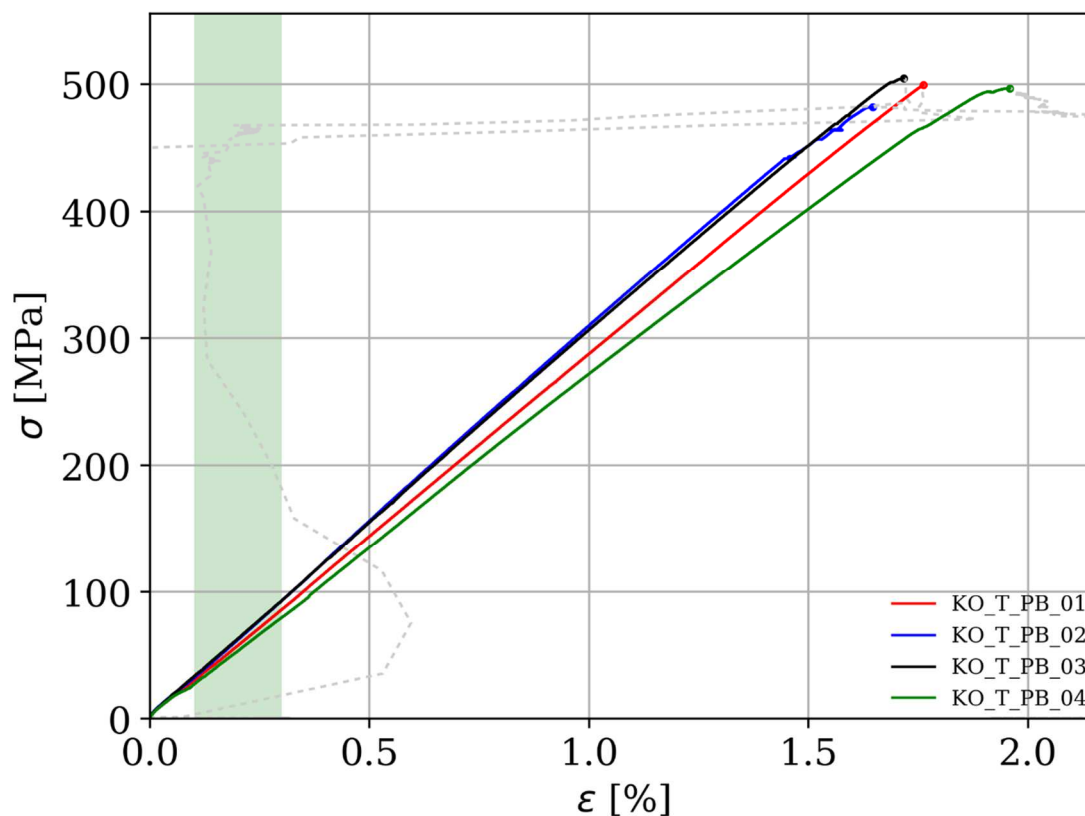
Obrázek 46 - KO_T_PA_07 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (TAH – pásy – materiál B)

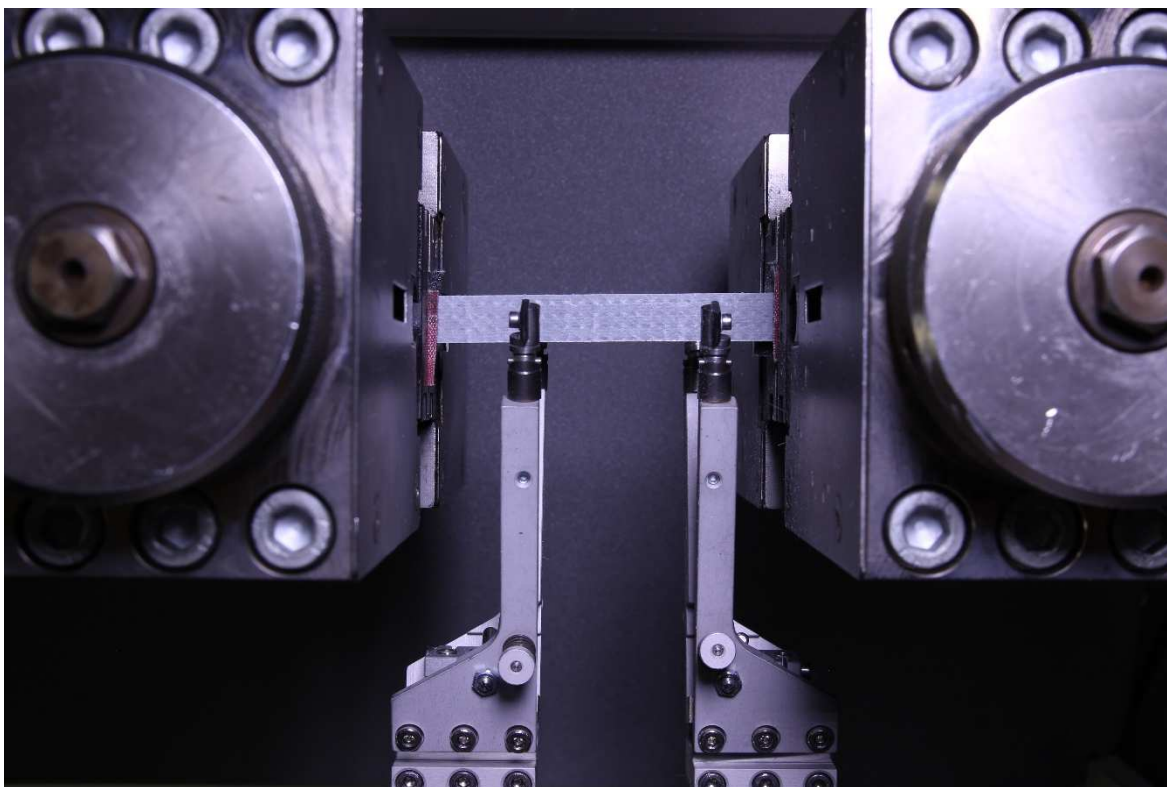
Tabulka 8 - Rozměrové veličiny vzorků KO_T_PB [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (TAH - pásy - materiál B)				
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Ø Šířka [mm]	Ø Tloušťka [mm]	Váha [g]
KO_T_PB_01	214,70	13,27	6,61	33,96
KO_T_PB_02	212,40	13,56	6,41	33,97
KO_T_PB_03	212,20	13,67	6,50	34,77
KO_T_PB_04	214,20	13,62	6,32	32,85

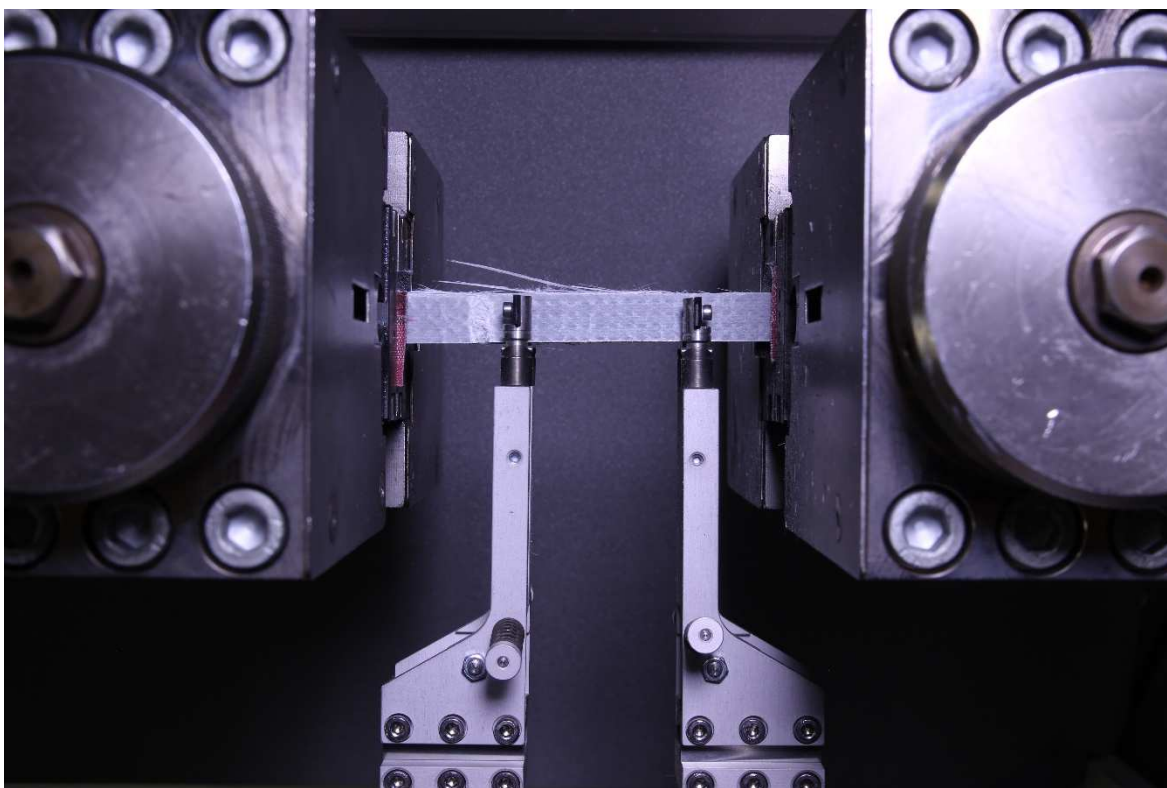
Datum a čas zkoušky:	11.11.2022 (15:17-14:53)
Rychlost zatěžování:	2 mm/min.
Vzdálenost čelistí:	100 mm
Nastavení extenzometru:	50 mm
Průměrná hodnota maximálního napětí:	$\sigma_{\max} = 496 \text{ MPa}$



Graf 2 - Výsledky vzorků KO_T_PB (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]



Obrázek 48 - KO_T_PB_03 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]



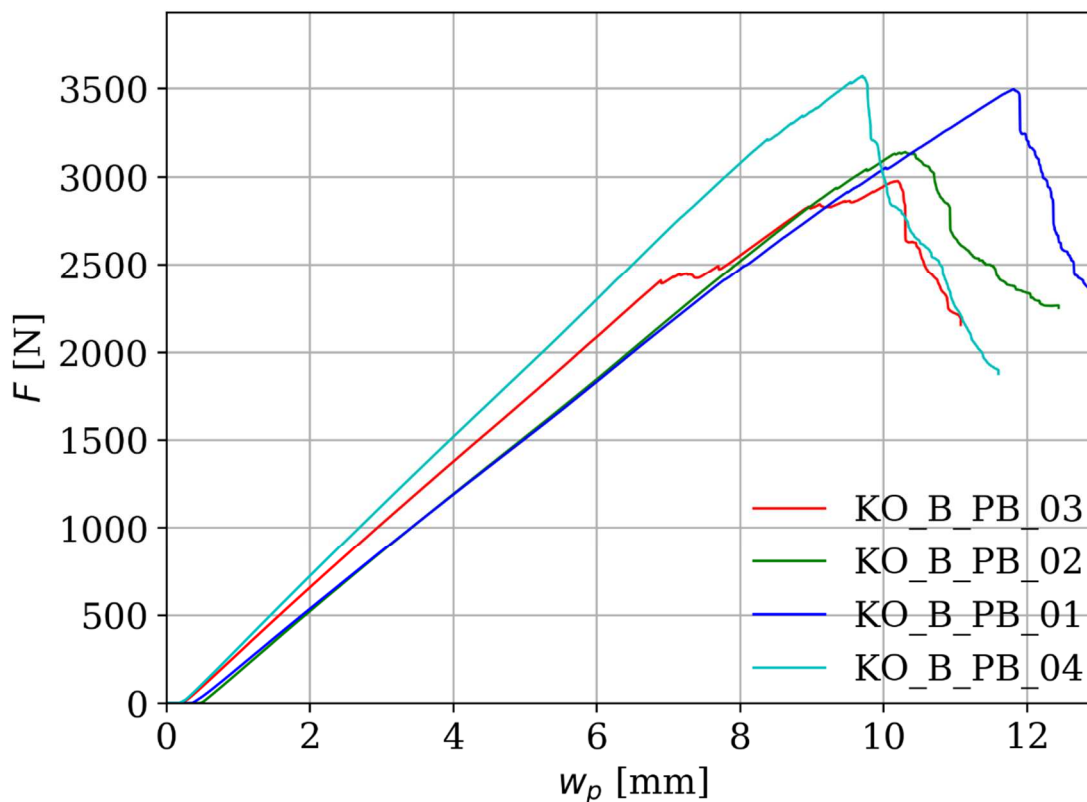
Obrázek 49 - KO_T_PB_03 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (OHYB – pásy – materiál B)

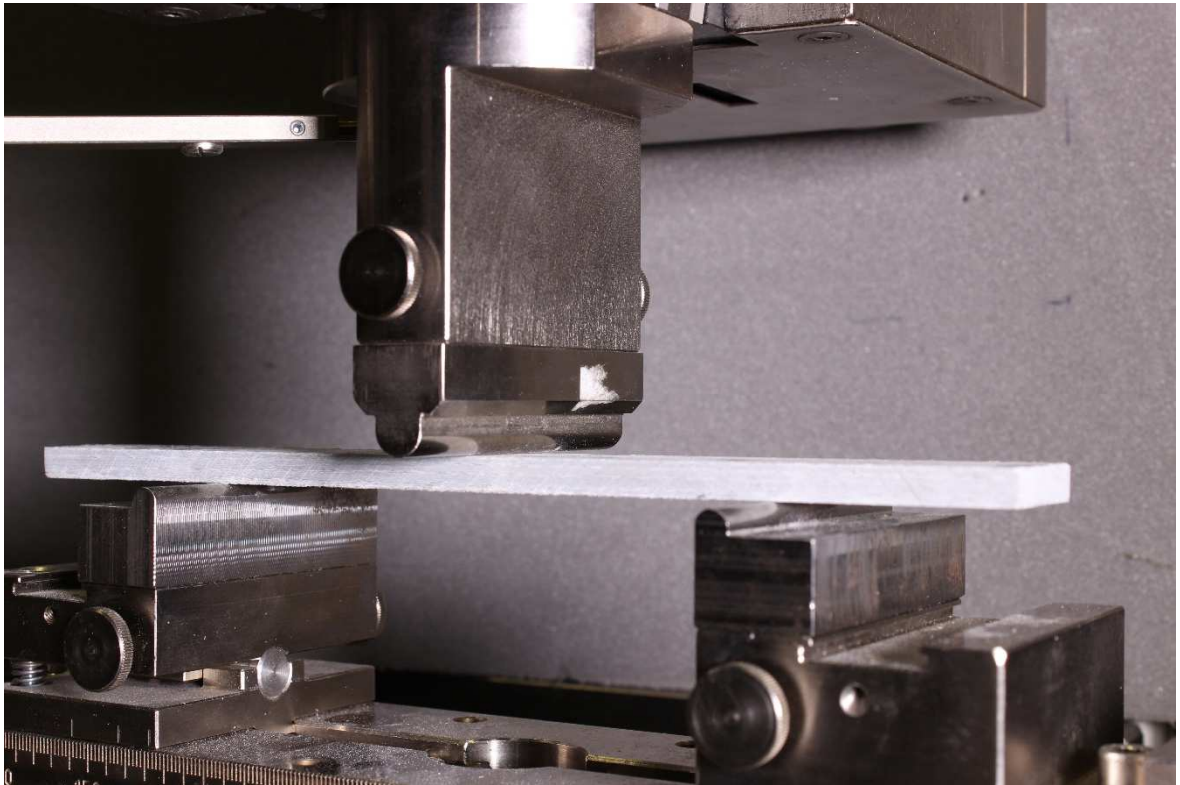
Tabulka 9 - Rozměrové veličiny vzorků KO_B_PB [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (OHYB - pásy - materiál B)				
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Ø Šířka [mm]	Ø Tloušťka [mm]	Váha [g]
KO_B_PB_01	214,30	25,86	6,24	63,93
KO_B_PB_02	212,20	27,56	6,20	67,46
KO_B_PB_03	212,20	26,35	6,51	67,64
KO_B_PB_04	213,90	27,64	6,52	71,15

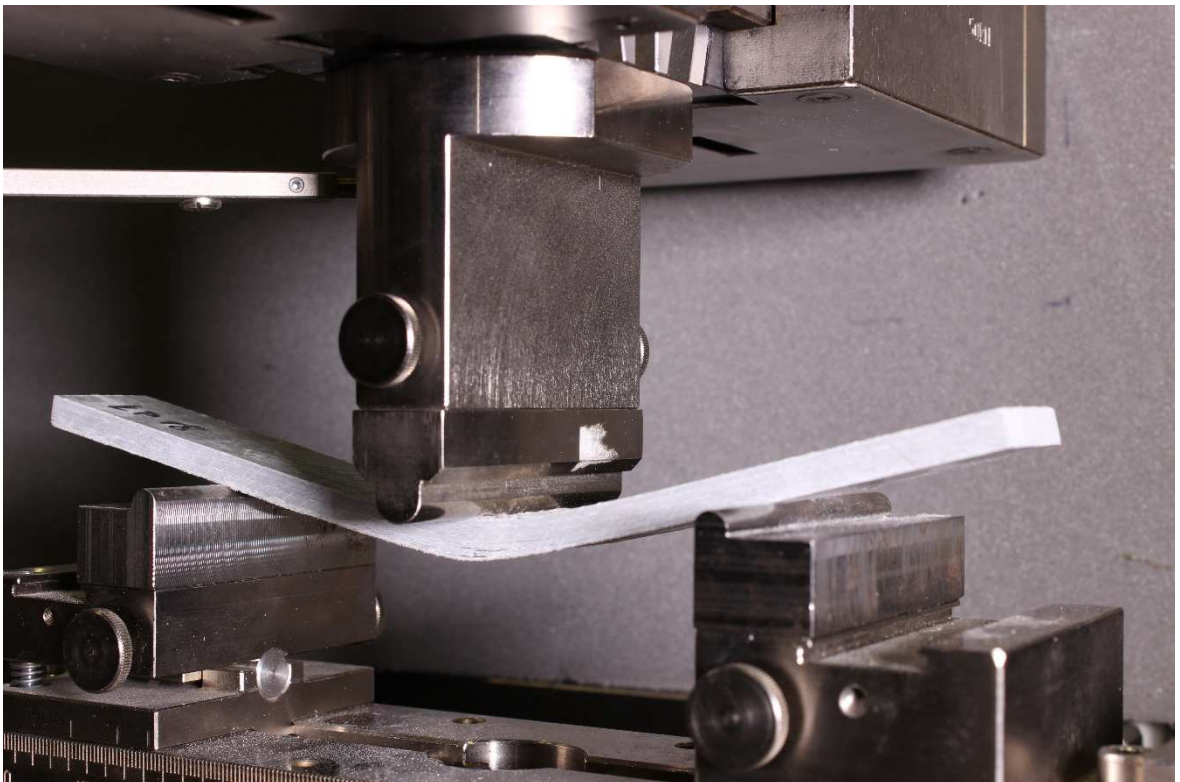
Datum a čas zkoušky:	1.12.2022 (18:49-19:19)
Rychlost zatěžování:	2 mm/min.
Rozteč dolních podpor:	120 mm
Hodnota síly dosažená při maximálním průhybu:	$F_{\max} = 3495 \text{ N}$
Maximální dosažená hodnota průhybu:	$w_{p,\max} = 11,8 \text{ mm}$



Graf 3 - Výsledky vzorků KO_B_PB (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce]



Obrázek 50 - KO_B_PB_04 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]



Obrázek 51 - KO_B_PB_04 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]

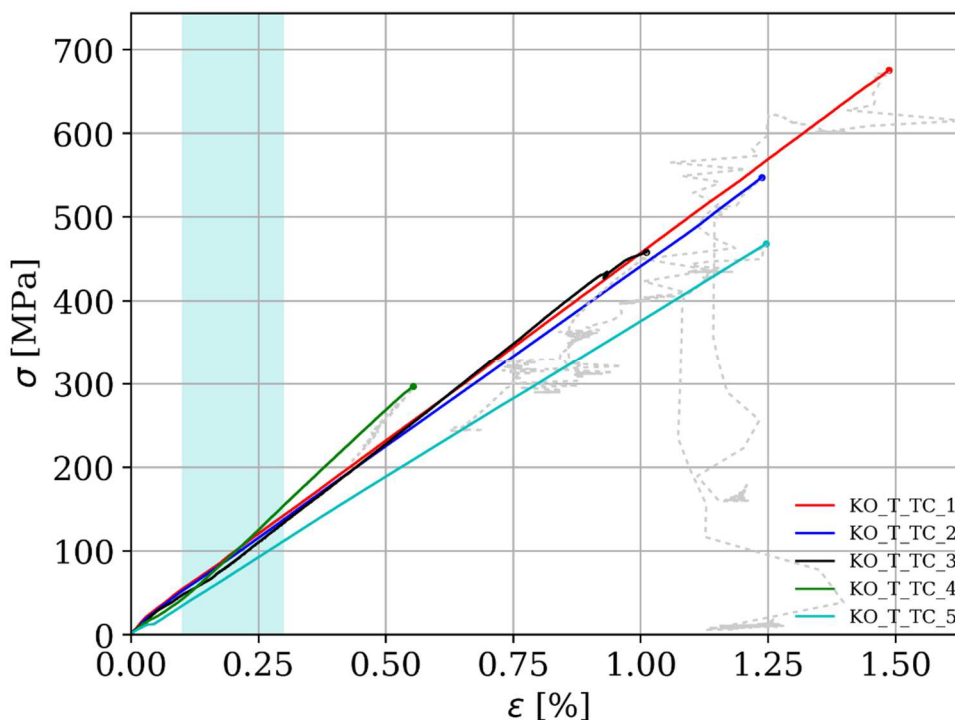
KOMPOZITY (TAH – tyčinky, materiál C)

Tyto vzorky zkoušené na tah představují kompozitní tahovou výztuž s pracovním názvem „tyčinky“ s čedičovými vlákny a povrchovým posypem. Do popisu zkoušky pod tabulkou č. 10 byl vybrán vzorek č. 1, který byl vyhodnocen jako vzorek s ideálním průběhem napětí.

Tabulka 10 - Rozměrové veličiny vzorků KO_T_TC [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (TAH - tyčinky, materiál C)			
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Průměr [mm]	Váha [g]
KO_T_TC_1	19,17	6,00	11,76
KO_T_TC_2	40,00	8,00	40,37
KO_T_TC_3	19,00	8,00	20,39
KO_T_TC_4	19,91	10,00	35,54
KO_T_TC_5	39,64	9,00	45,73

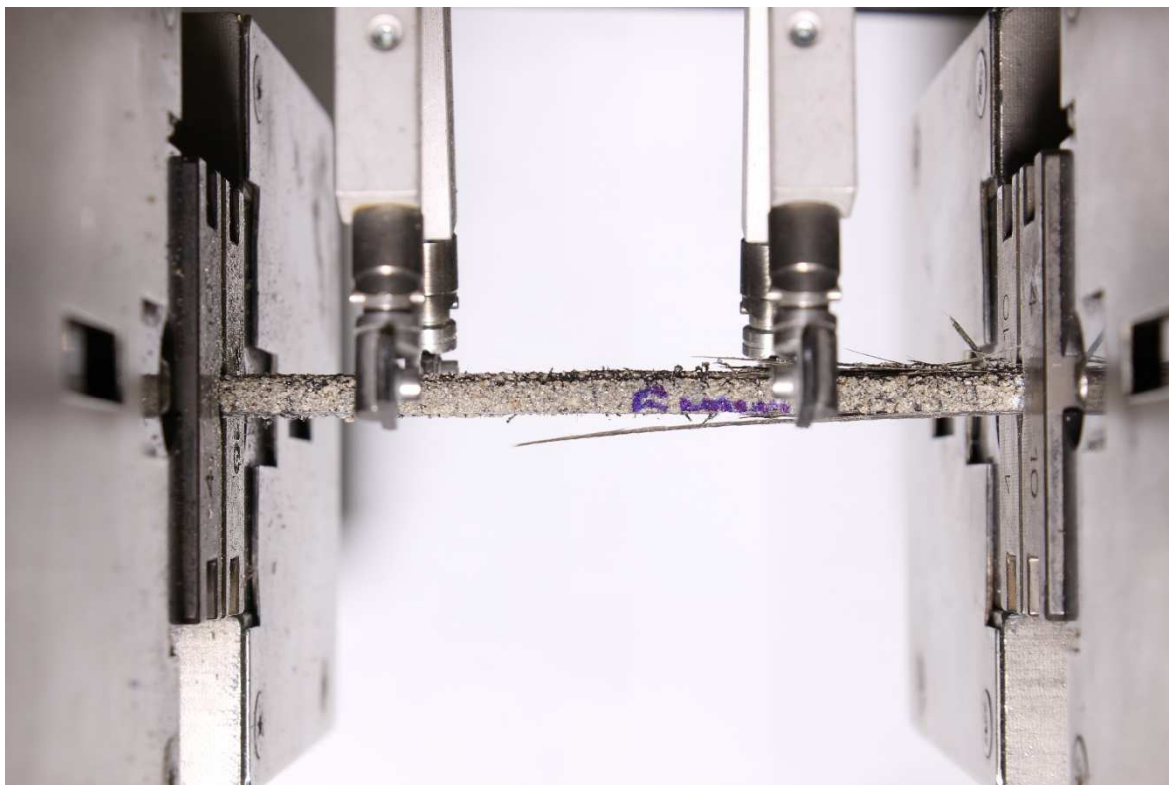
Datum a čas zkoušky:	16.11.2022 (12:44-15:38)
Rychlost zatěžování:	2 mm/min.
Vzdálenost čelistí (pro vzorek č. 1):	230 mm
Nastavení extenzometru (pro vzorek č. 1):	100 mm
Hodnota maximálního napětí (pro vzorek č. 1):	$\sigma_{\max} = 675,7 \text{ MPa}$



Graf 4 - Výsledky vzorků KO_T_TC (závislost napětí na poměrném přetvoření) [autor diplomové práce]



Obrázek 52 - KO_T_TC_1 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]



Obrázek 53 - KO_T_TC_1 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]

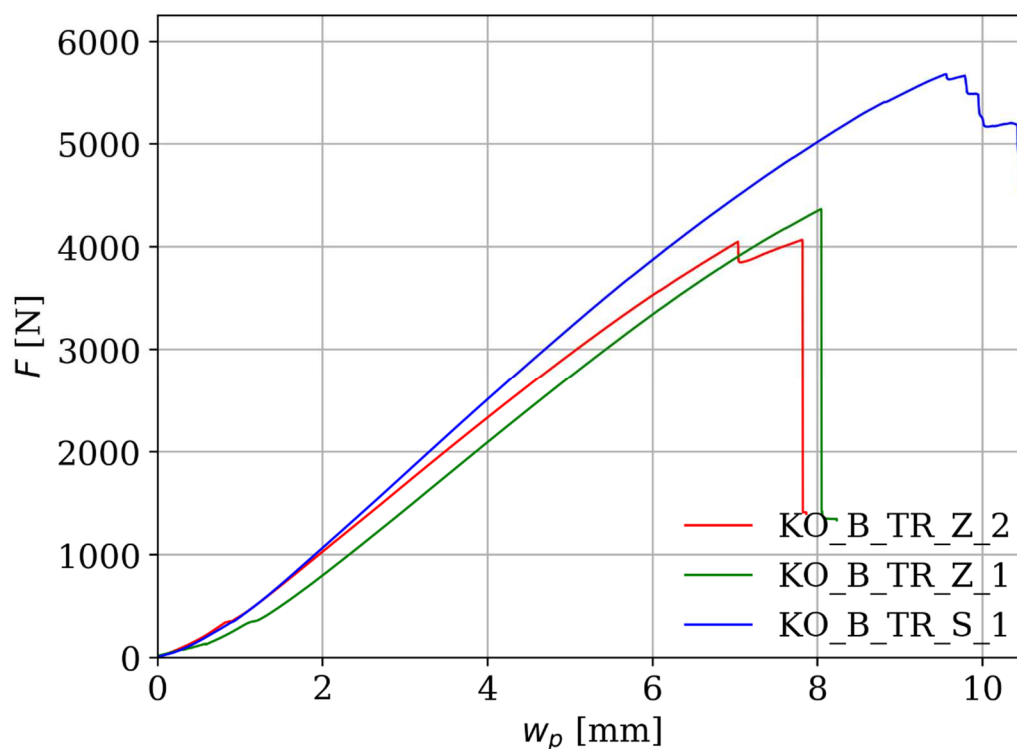
KOMPOZITY (OHYB – trubky – šedá/žluté)

Tyto zkoušené vzorky byly trubkového profilu ze dvou různých druhů kompozitu, barvy a tloušťky stěny profilu. Vzorky obsahovaly šedou trubku větší tloušťky stěny a dvě žluté slabší tloušťky. Vlákna v těchto vzorcích byla z uhlíku v případě šedé trubky a skleněných vláken v případě žlutých trubek.

Tabulka 11 - Rozměrové veličiny vzorků KO_B_TR [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (OHYB - trubky - šedá/žluté)			
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Průměr [mm]	Ø Tloušťka stěny [mm]
KO_B_TR_S_1	45,00	31,67	3,11
KO_B_TR_Z_1	45,00	31,70	1,91
KO_B_TR_Z_2	45,00	31,52	1,82

Datum a čas zkoušky:	23.11.2022 (11:27-11:46)
Rychlost zatěžování:	2 mm/min.
Rozteč horních podpor:	90 mm
Rozteč dolních podpor:	360 mm
Hodnota síly dosažená při maximálním průhybu:	$F_{\max} = 5700 \text{ N}$
Maximální dosažená hodnota průhybu:	$w_{p,\max} = 9,5 \text{ mm}$



Graf 5 - Výsledky vzorků KO_B_PB (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce]



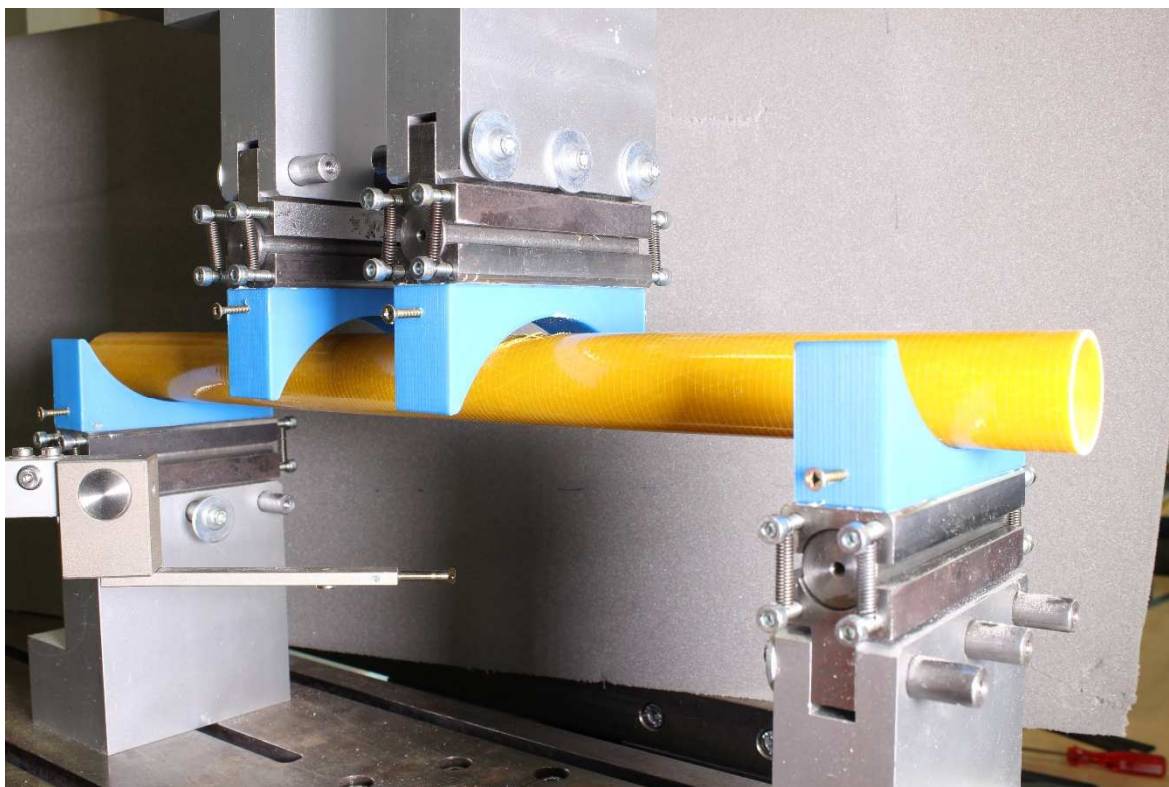
Obrázek 54 - KO_B_TR_S_1 před zkouškou [autor diplomové práce]



Obrázek 55 - KO_B_TR_S_1 po zkoušce [autor diplomové práce]



Obrázek 57 - KO_B_TR_Z_1 před zkouškou [autor diplomové práce]



Obrázek 56 - KO_B_TR_Z_1 po zkoušce [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (OHYB – O profil – materiál lávka)

Tyto vzorky byly nařezány ze zbytků kompozitního materiálu, který byl využit při jiném experimentu na konstrukci kompozitové lávky. Kompozit obsahoval skleněná vlákna obousměrně ložená.

Tabulka 12 - Rozměrové veličiny vzorků KO_B_OL [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (OHYB - O profil - materiál lávka)			
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Vnější rozměr [mm]	Ø Tloušťka stěny [mm]
KO_B_OL_1	45,00	60x30	2,50
KO_B_OL_2	45,00	60x30	2,50

Datum a čas zkoušky: 23.11.2022 (09:55-10:20)

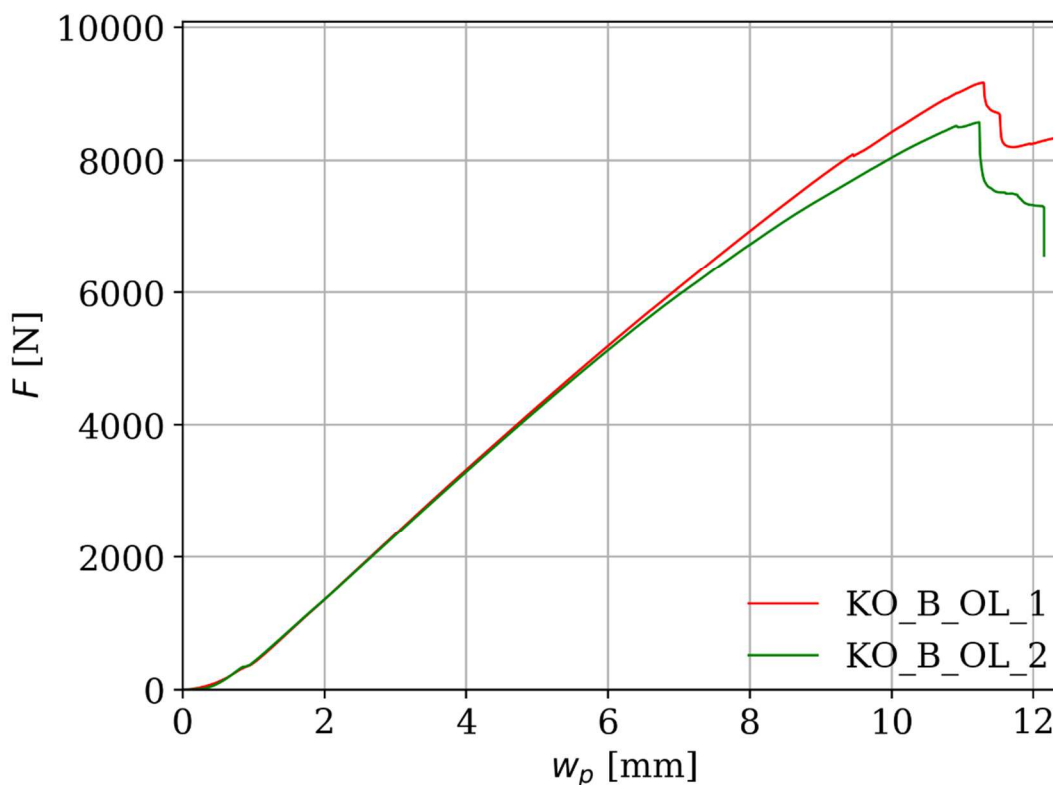
Rychlost zatěžování: 5 mm/min.

Rozteč horních podpor: 90 mm

Rozteč dolních podpor: 360 mm

Hodnota síly dosažená při maximálním průhybu: $F_{\max} = 9100 \text{ N}$

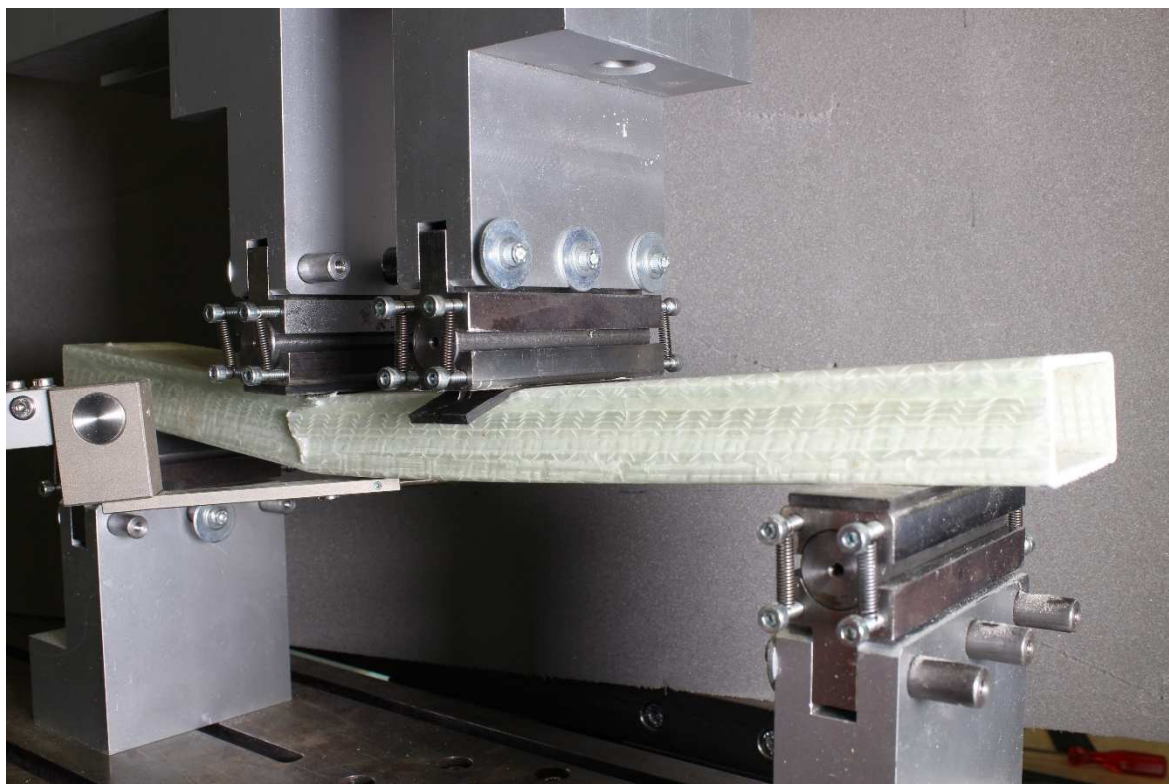
Maximální dosažená hodnota průhybu: $w_{p,\max} = 11,2 \text{ mm}$



Graf 6 - Výsledky vzorků KO_B_OL (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce]



Obrázek 58 - KO_B_OL_1 před zkouškou [autor diplomové práce]



Obrázek 59 - KO_B_OL_1 po zkoušce [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (TLAK – L profil)

Profily ve tvaru „L“ jsou vyztuženy jednosměrně, vlákna jsou uhlíková. Vzhledem k maximální působící síle stroje 50 000 N bylo při zkoušce tlaku dosaženo mezní hranice a u vzorku nebylo možno zjistit přesnou hodnotu maximálního dosaženého napětí. Avšak lze říci, že vzorek je schopen odolat hodnotě působící síly přesahující 50 000 N. Tato zkouška probíhala jen v rámci volného času v laboratoři, nebyla tedy součástí nutného zkoušení a slouží jen pro informační účely.

Tabulka 13 - Rozměrové veličiny vzorků KO_C_L_1 [autor diplomové práce]

KOMPOZITY (TLAK - L profil)			
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Vnější rozměr [mm]	Ø Tloušťka stěny [mm]
KO_C_L_1	45,00	50x50	6,40

Datum a čas zkoušky:

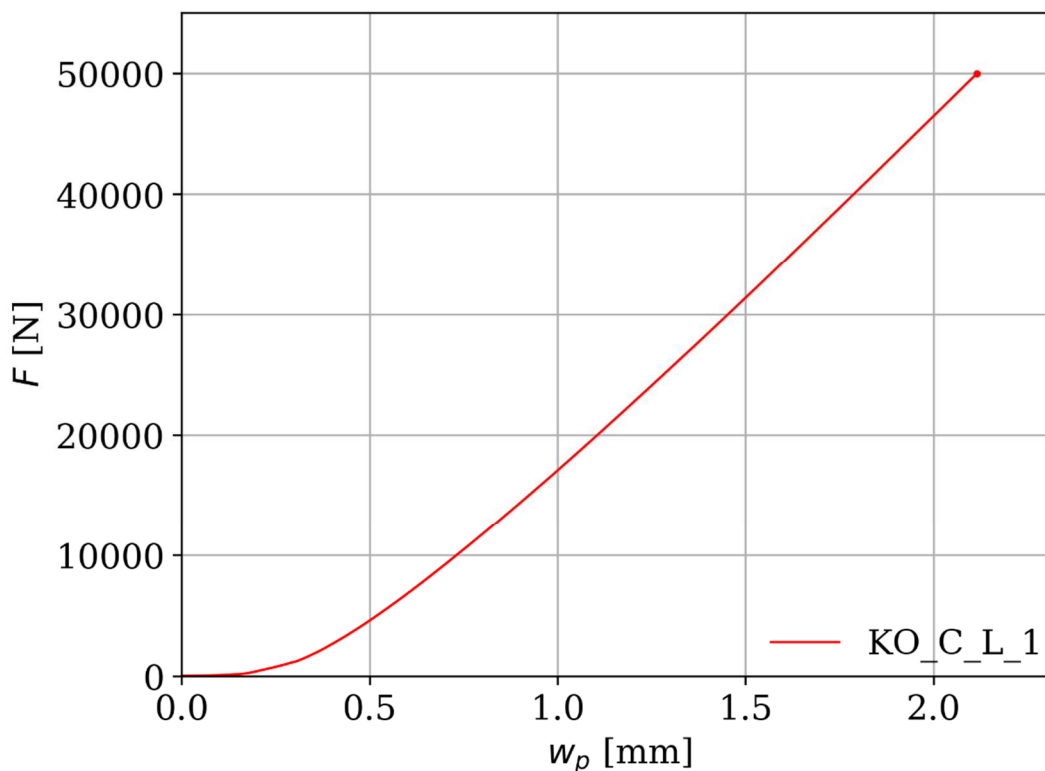
1.12.2022 (17:28-17:35)

Rychlost zatěžování:

2 mm/min.

Průměrná hodnota maximálního napětí:

$$\sigma_{\max} = \frac{50000}{A} \text{ MPa}$$



Graf 7 - Výsledky vzorků KO_C_L_1 (závislost působící síly na posuvu) [autor diplomové práce]



Obrázek 60 - KO_C_L_1 před zkouškou [autor diplomové práce]



Obrázek 61 - KO_C_L_1 po zkoušce [autor diplomové práce]

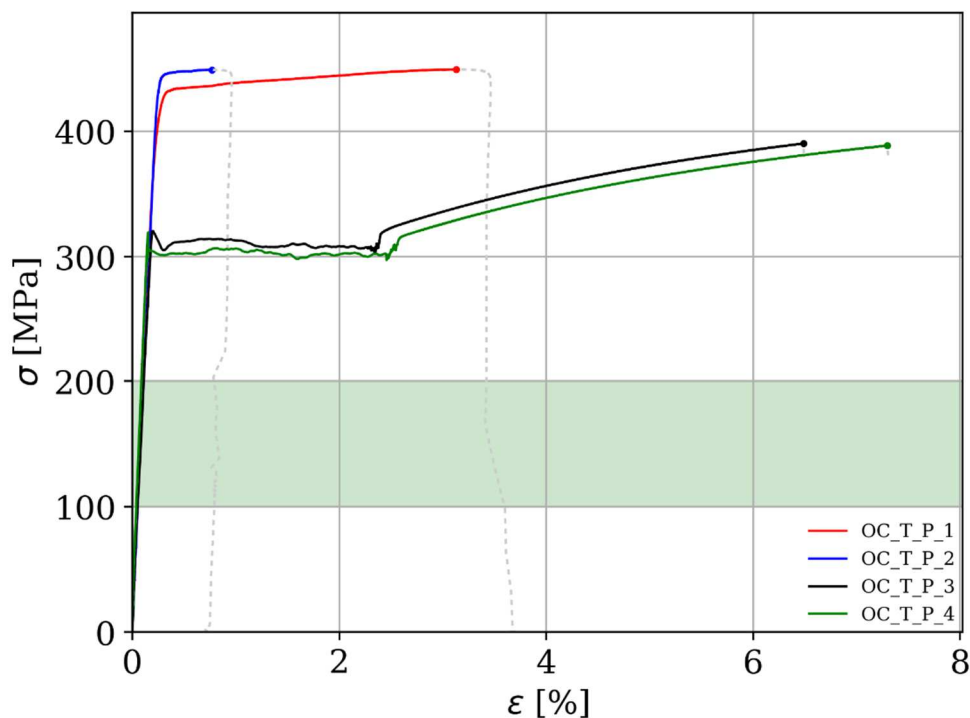
OCEL (TAH – pásky)

Pro tahovou zkoušku ocele byly vybrány 4 vzorky o dvou různých tloušťkách viz tabulka č. 14. Pro vzorek OC_T_P_3 byla vzdálenost mezi čelistmi jiná, než u ostatních nastavena na 290 mm místo 200 mm z důvodu větší délky vzorku. Ve výsledcích zkoušky pod tabulkou č. 14 je zmíněn vzorek s nejpříznivějšími výsledky.

Tabulka 14 - Rozměrové veličiny vzorků OC_T_P [autor diplomové práce]

OCEL (TAH - pásky)				
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Ø Šířka [mm]	Ø Tloušťka [mm]	Váha [g]
OC_T_P_1	250,90	20,53	2,96	115,00
OC_T_P_2	249,60	21,30	2,97	120,00
OC_T_P_3	448,10	20,54	6,15	424,00
OC_T_P_4	355,10	20,53	6,18	336,00

Datum a čas zkoušky:	16.11.2022 (10:42-11:54)
Rychlost zatěžování:	2 mm/min.
Vzdálenost čelistí:	200 mm
Nastavení extenzometru:	100 mm
Hodnota maximálního napětí (pro vzorek č. 3):	$\sigma_{\max} = 390,2 \text{ MPa}$



Graf 8 - Výsledky vzorků OC_T_P (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]



Obrázek 62 - OC_T_P_2 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]



Obrázek 63 - OC_T_P_2 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]

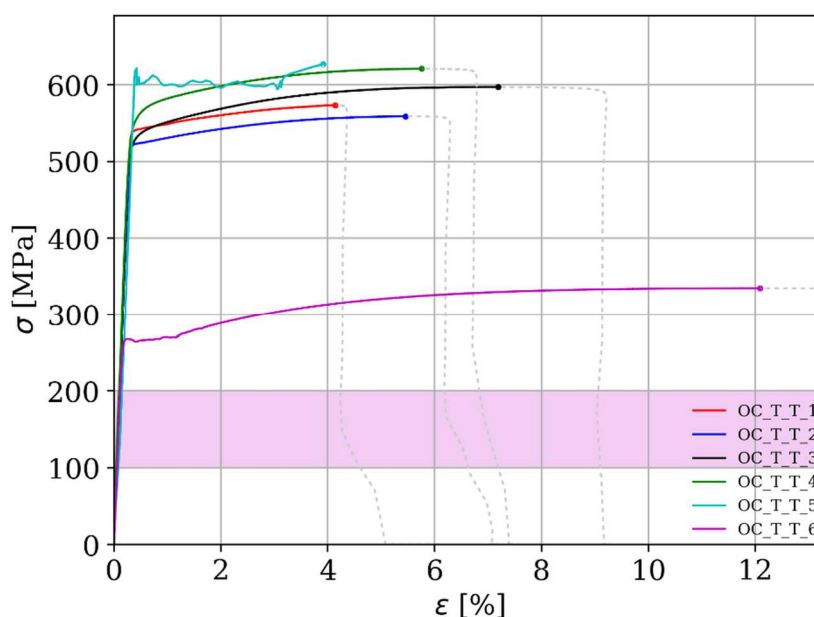
OCEL (TAH – tyčinky)

Při zkoušce tahem byly vybrány ocelové pruty s pracovním názvem „tyčinky“ stejně jako u kompozitní prutové výztuže. Profily ocelových prutů byly vybrány tak, aby se daly porovnávat s profily kompozitních prutů. Do výsledků zkoušky pod tabulkou č. 15 byl vybrán vzorek o průměru 6 mm (ten s lepším výsledkem), vzhledem k porovnání s výsledky kompozitního prutu pod tabulkou č. 10.

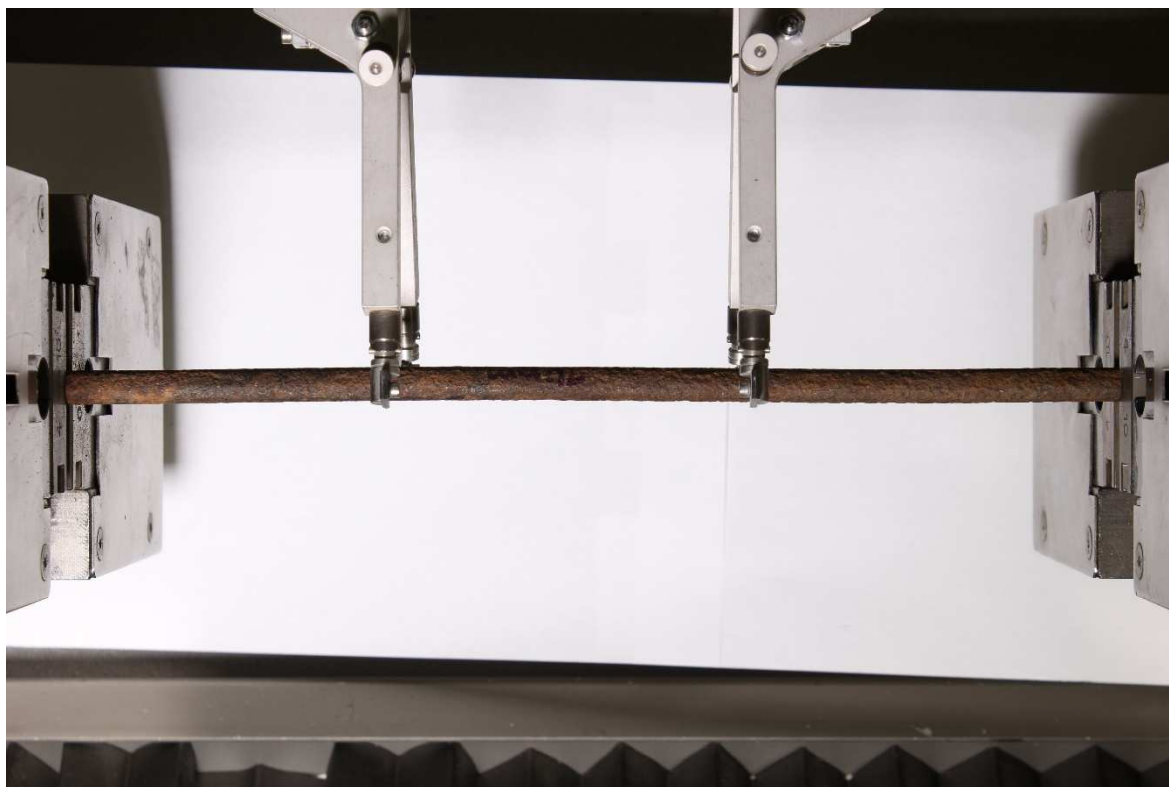
Tabulka 15 - Rozměrové veličiny vzorků OC_T_T [autor diplomové práce]

OCEL (TAH - tyčinky)			
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Průměr [mm]	Váha [g]
OC_T_T_1	286,10	6,00	61,03
OC_T_T_2	271,50	6,00	57,93
OC_T_T_3	249,10	8,00	95,09
OC_T_T_4	250,70	8,00	96,57
OC_T_T_5	247,90	10,00	154,31
OC_T_T_6	442,50	10,00	258,00

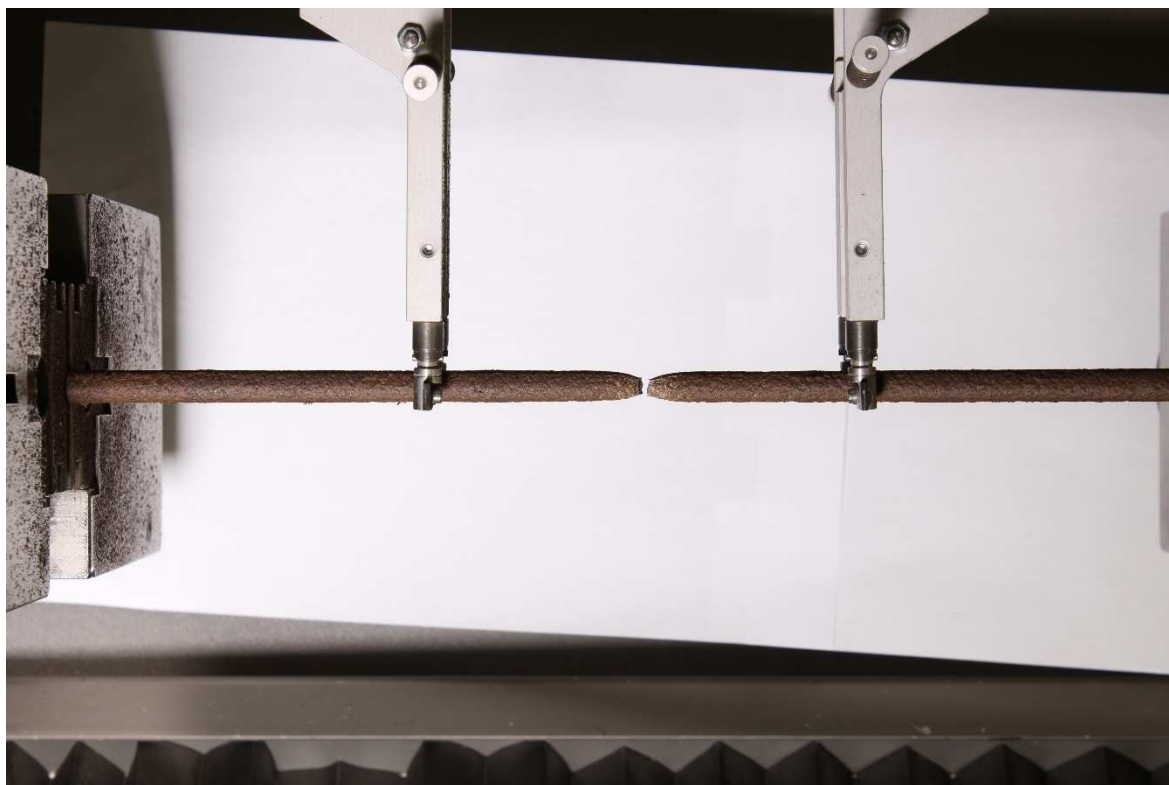
Datum a čas zkoušky:	16.11.2022 (13:06-14:31)
Rychlost zatěžování:	2 mm/min.
Vzdálenost čelistí:	200 mm
Nastavení extenzometru:	100 mm
Hodnota maximálního napětí (pro vzorek č. 3):	$\sigma_{\max} = 573,5 \text{ MPa}$



Graf 9 - Výsledky vzorků OC_T_T (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]



Obrázek 64 - OC_T_T_6 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]



Obrázek 65 - OC_T_T_6 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]

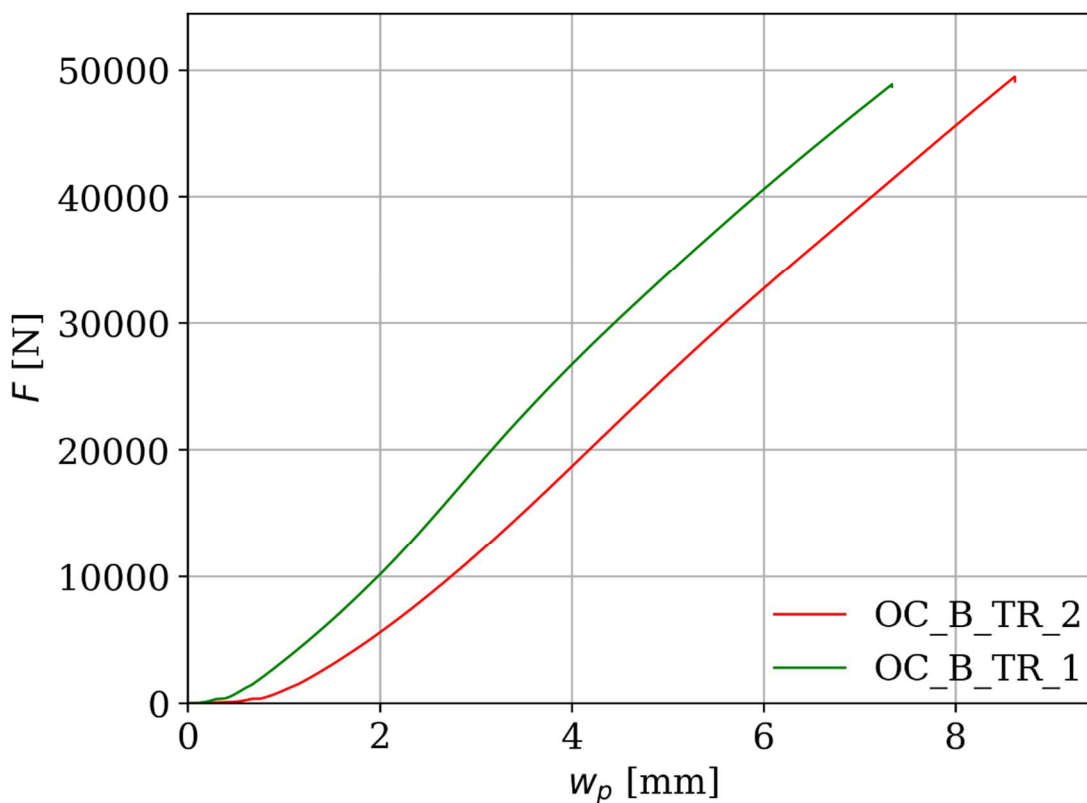
OCEL (OHYB – trámy)

Pro zkoušku oceli v ohybu byly dále použity vzorky ve formě ocelových uzavřených „Jekl“ profilů. Zkouška proběhla jen v rámci ověření hodnot dle výrobce.

Tabulka 16 - Rozměrové veličiny vzorků OC_B_TR [autor diplomové práce]

OCEL (OHYB - trámy)			
OZNAČENÍ	Délka [mm]	Vnější rozměr [mm]	Ø Tloušťka stěny [mm]
OC_B_TR_1	45,00	60x60	3,00
OC_B_TR_2	45,00	60x60	3,00

Datum a čas zkoušky:	23.11.2022 (10:33-10:59)
Rychlost zatěžování:	0,5-2 mm/min.
Rozteč horních podpor:	360 mm
Rozteč dolních podpor:	90 mm
Hodnota síly dosažená při maximálním průhybu:	$F_{\max} = 49500 \text{ N}$
Maximální dosažená hodnota průhybu:	$w_{p,\max} = 8,3 \text{ mm}$



Graf 10 - Výsledky vzorků OC_B_TR (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce]



Obrázek 66 - OC_B_TR_2 před zkouškou [autor diplomové práce]



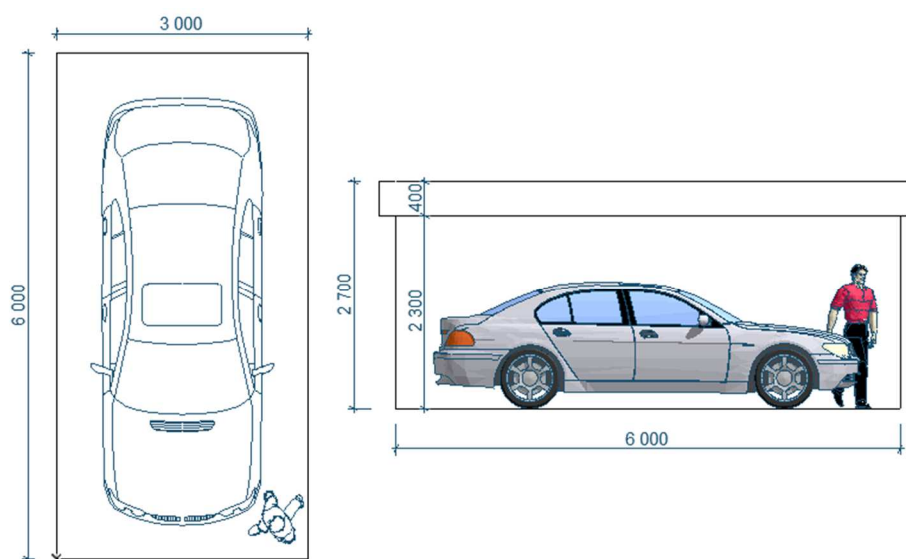
Obrázek 67 - OC_B_TR_2 po zkoušce [autor diplomové práce]

5. Model referenční konstrukce

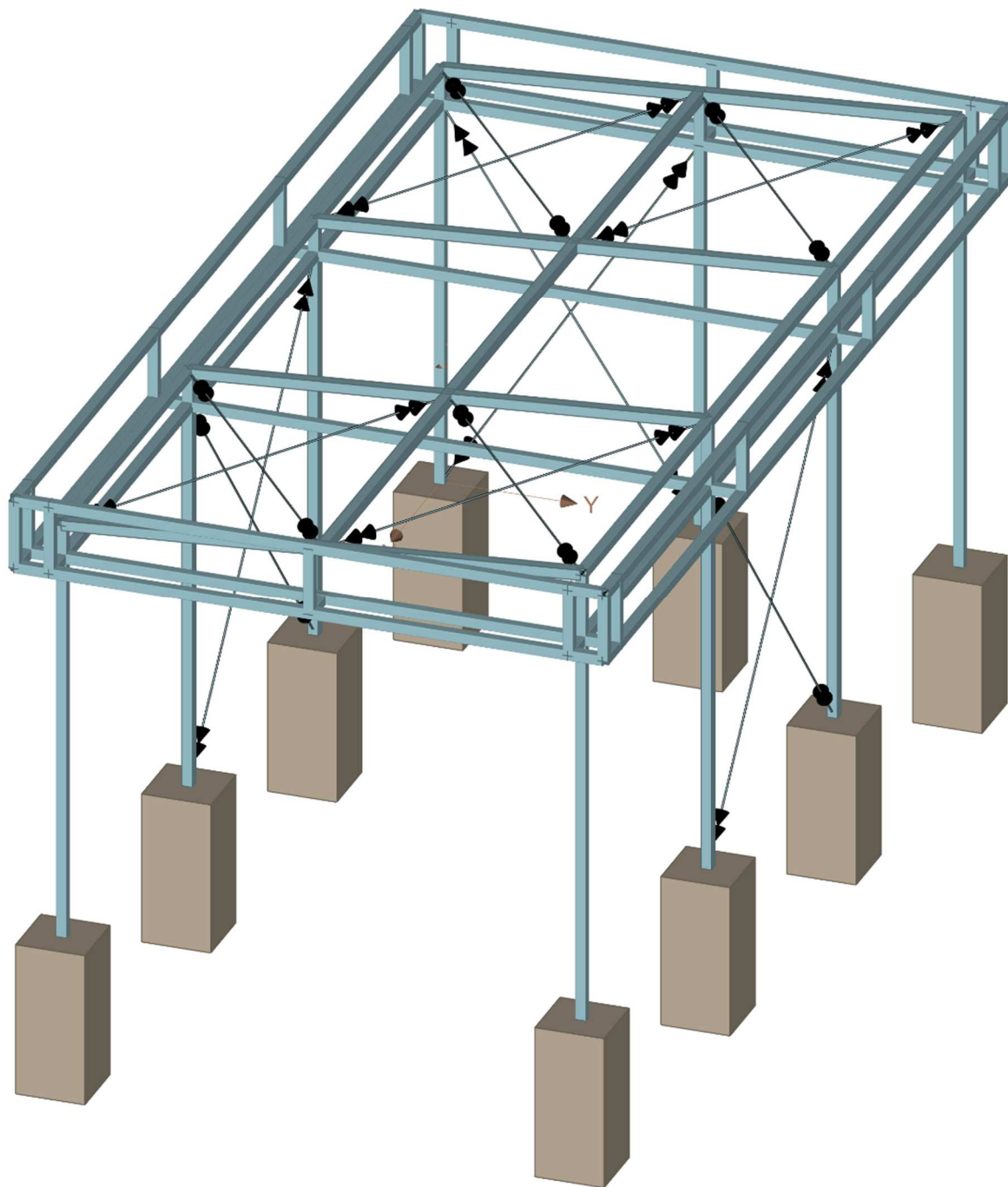
Po zkouškách v laboratoři, proběhlo zpracování dat z měření a návrh referenční konstrukce, na které jsem poté aplikovala za odborného dohledu pana Ing. Petra Kesla, PhD. materiálové charakteristiky kompozitních materiálů ze zkoušek. Byly vytvořeny celkem tři statické modely v programu FIN EC 3D. Jeden model byl vytvořen z oceli dle přednastavených hodnot výrobce z katalogu programu, druhý model byl z kompozitního materiálu s hodnotami ze zkoušek a třetí model byl také kompozitní, avšak s použitím hodnot výrobce, který z důvodu diskrétnosti není zmíněn.

Dva modely z kompozitního materiálu byly vytvořeny z důvodu informovanosti v rozdílech při použití udaných hodnot výrobcem a změřených hodnot v laboratoři. Dále model ocele slouží k porovnání právě mezi ocelí a kompozitem, k určení výhod, nevýhod, rozdílů a popřípadě porovnání finančního hlediska obou materiálů v případě referenční konstrukce.

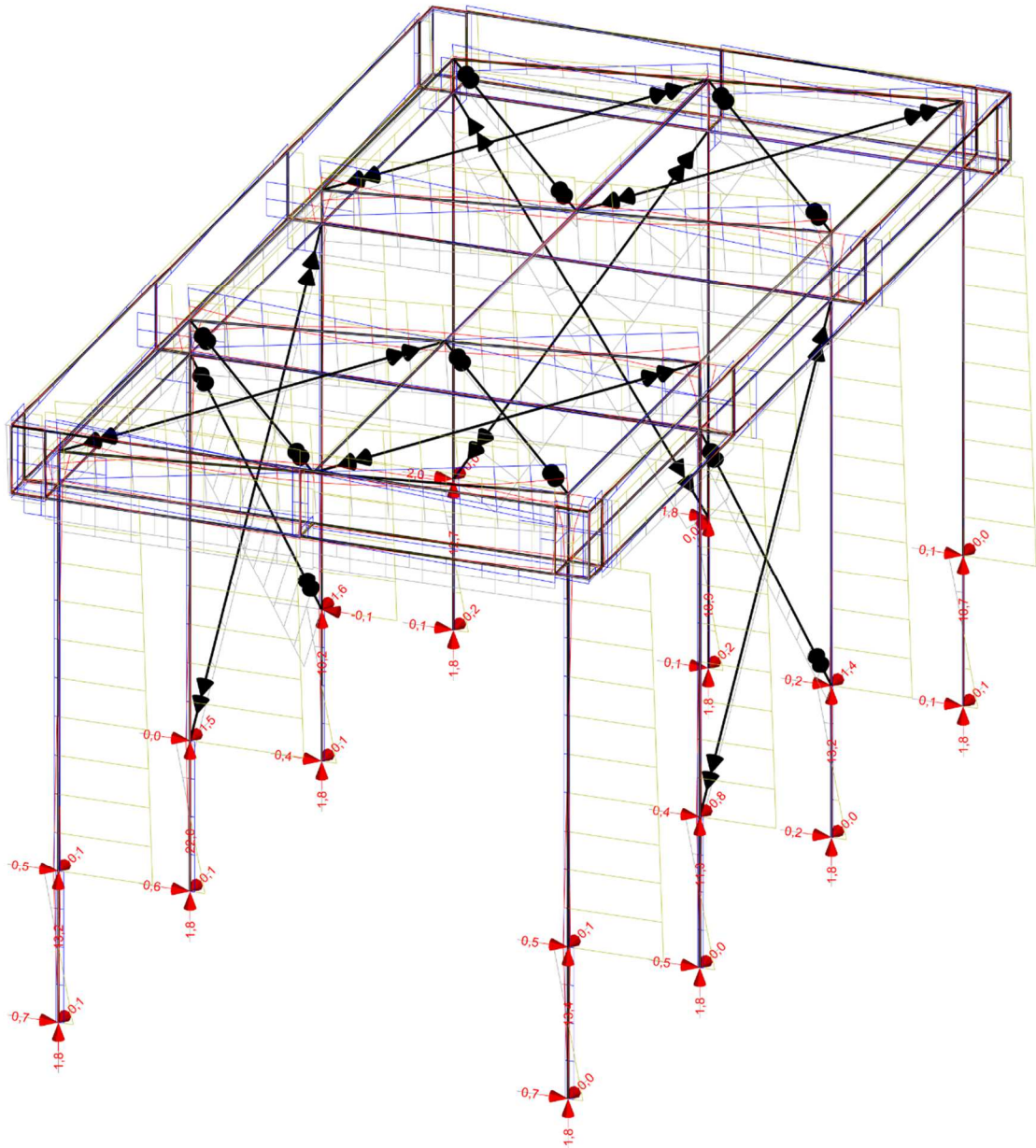
Při modelování konstrukce bylo třeba stanovit zatěžovací stavy včetně zatížení na konstrukci, nadimenzovat a posoudit navržené prvky. Prvky konstrukce byly navrženy tak, aby vyhověly a profily či průřezy byly stejných dimenzí či nejméně podobných, aby jednotlivé modely bylo možné mezi sebou porovnat. Poté byl proveden výpočet celé 3D konstrukce. Základy referenční konstrukce nejsou součástí výpočtů. Referenční konstrukce představuje jednoduchý přístřešek pro jedno parkovací stání osobního automobilu. Podrobné výpočty a celkové výsledky včetně průběhů jsou obsaženy ve vyexportovaných protokolech v příloze diplomové práce.



Obrázek 68 - Schéma se základními rozměry referenční konstrukce [autor diplomové práce]



Obrázek 69 - Pohled na 3D model referenční konstrukce [autor diplomové práce]



Obrázek 70 - Výsledné NVM + R (Kompozit – laboratoř – výpočet 2. MS – MSP) [autor diplomové práce]

6. Zhodnocení

Dle výpočtů konstrukcí bylo zjištěno, že přístřešek je možno postavit ve stejné velikosti a dimenzi prvků jak z oceli, tak i z kompozitu tak, aby vyhověl na oba mezní stavy, tedy na mezní stav únosnosti i mezní stav použitelnosti. Tím byla zodpovězena hypotéza diplomové práce a odpověď zní, že je možné nahradit ocelovou konstrukci, konstrukcí z kompozitních materiálů. Můžeme takto pravdivě tvrdit jen o konstrukci přístřešku, kterou se zabývala tato diplomová práce, ale z praxe bylo zjištěno, že postupně kompozitní materiály nahrazují ocel v různých podobách konstrukce, ať už jde jen o zábradlí, či celá schodiště vnitřní i vnější.

Výhody kompozitních konstrukcí:

- Nízká objemová hmotnost
- Vyšší odolnost vůči žáru (oproti oceli)
- Vynikající mechanické a pevnostní vlastnosti
- Menší uhlíková stopa než ocel
- Dlouhá životnost
- Chemická odolnost, odolnost proti korozi
- Dobré tepelně izolační vlastnosti, nevodivost
- Stálobarevnost, bezúdržbovost
- Možnost lepení

Nevýhody kompozitních konstrukcí:

- Křehkost
- Možné narušení prvku při vytváření otvorů, nesvařitelnost
- Citlivost na ředidla (v případě epoxidové matrice)
- Výpary z kompozitů při působení většího žáru mohou být toxické
- Nasákavost
- Vyšší cena
- Obtížná recyklovatelnost (ztráta mechanických vlastností až o 80 % - recyklát je příměs)

7. Závěr

Teoretická část diplomové práce měla za cíl obeznámit čtenáře s kompozitními materiály a rozebrat je spolu s ocelí v oblasti historie, druhů, způsobu výroby a možnostmi spojování. Této části bylo věnováno hodně prostoru vzhledem k nízké, ale dnes již vzrůstající popularitě kompozitních prvků ve stavitelství. Tento materiál může být budoucností v konstruování rychlých a snadno smontovatelných konstrukcí díky jejich nízké hmotnosti, a především také nutnosti stavět do výšky a šetřit tím prostor. Jeho výroba je technologicky náročnější než výroba oceli, a tedy cena je výrazně vyšší, avšak výhody kompozitů jsou v některých ohledech bezkonkurenční hlavně v oblasti požární ochrany, chemické odolnosti materiálů, tepelně izolačních vlastností, ale také mechanických a pevnostních vlastností. Záleží tedy na pohledu investora, a především prostředí a nároků na konstrukci. V dnešní době je kladen velký důraz na životní prostředí, a právě uhlíková stopa, která činí u kompozitních materiálů zhruba 0,11 kg CO₂ je oproti oceli, která je stanovena na 2,89 kg CO₂ značně nižší. Bohužel ale jejich velkou ekologickou nevýhodou je recyklace, při které se ztratí min. 60 až 80 % vlastností původního kompozitu a recyklát je možné znovu využít jen jako příměs do nových směsí kompozitů. Oproti tomu ocel je možno recyklovat do nekonečna a neztratit žádné z jejich vlastností.

V praktické části byly uvedeny zkoušky s výsledky různých kompozitních profilů na tah, tlak a ohyb včetně obrázků zkoušených vzorků před a po zkoušce. Zkoušky ocele byly provedeny jen z důvodu ověření tabulkových hodnot pro návrh ocelových konstrukcí. Dále byly vytvořeny 3 modely referenční konstrukce přístřešku pro stání jednoho osobního automobilu ve 3D, na kterém byly použity hodnoty kompozitního materiálu ze zkoušek a od výrobce a na poslední model z oceli byly použity tabulkové hodnoty pro návrh ocelových konstrukcí přímo z programu FIN EC 3D.

Z finančního hlediska by konstrukce přístřešku vymodelovaná v diplomové práci z kompozitního materiálu stála přibližně 47 085 Kč a konstrukce z oceli 40 142 Kč, pokud budeme uvažovat průměrnou cenu kompozitu 180 Kč/kg a cenu oceli 60 Kč/kg. Váha kompozitní konstrukce je oproti konstrukci z oceli o 61 % nižší což vyjadřuje, že konstrukce z kompozitu by byla 2,5krát lehčí než ta z oceli.

Z výsledků dimenze kompozitních prvků bylo zjištěno, že kompozitní konstrukce je vhodná vzhledem ke své únosnosti pro větší zatížení sněhem a větrem, a tedy je vhodnější do výše položených oblastí, které podléhají právě většímu zatížení větrem a sněhem. Kompozitní konstrukce z důvodu své nízké hmotnosti oproti oceli vyžaduje více ztužujících prvků kvůli nadměrnému kmitání ve formě příčných ztužení, či táhel.

Výpočtové protokoly jsou obsaženy v příloze diplomové práce. Bylo provedeno také ověření vybraných kompozitních prvků namáhaných na ohyb a tah ve zjednodušeném programu pro kompozitní konstrukce od firmy Ronn, které byly navrženy pomocí programu FIN EC 3D.

Výsledky ověření se z obou programů přibližně shodují a jsou také součástí přílohy diplomové práce, ověřením byla zjištěna nejen správnost výpočtů, ale také zjištění fakta, že lze program FIN EC využít také pro výpočty s jinými materiály, než je ocel, pokud jsou všechna potřebná data zadána ručně.

Seznam použitých software

- FIN EC
- ArchiCAD 25
- Microsoft Office 16 (Word, Excel)
- TestXpert II
- PDF Architect 7
- RONN
- Python

Reference

- [1] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. *Stavební materiály*. Brno: CERM, 1997. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [2] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [3] SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. Praha : Luboš Svoboda Dům "U staré podkovy", 2018.
- [4] Institut ocelových konstrukcí, s. r. o. - Prof. Ing. Jindřich Melcher, DrSc. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Frýdek-Místek : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] *ebeton.cz*. [Online] [Citace: 20. Únor 2023.] <https://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton/>.
- [6] *dkbeton.cz*. [Online] [Citace: 20. Únor 2023.] <https://www.dkbeton.cz/služby/prodej-dratku-a-vlaken-do-betonu/>.
- [7] *feromat.cz*. [Online] [Citace: 20. Únor 2023.] <http://www.feromat.cz/hutni>.
- [8] *eplechy.cz*. [Online] [Citace: 20. Únor 2023.] <https://eplechy.cz/produkt/flexibility-tahokov-tr-90-x-32-x-13-x-1-5-mm-z-oceloveho-plechu-dc01-dc05>.
- [9] *kovarstvi-divis.cz*. [Online] [Citace: 20. Únor 2023.] <https://www.kovarstvi-divis.cz/wp-content/uploads/2021/02/001441-429.jpg>.
- [10] *wintech.cz*. [Online] [Citace: 20. Únor 2023.] <https://www.wintech.cz/spojovaci-material/>.
- [11] STUDNIČKA, Jiří. *Ocelové konstrukce*. Praha : ČVUT Praha, 2006.
- [12] WALD, František. *Základy navrhování ocelových konstrukcí podle ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8*. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí, 2010. ISBN 978-80-904535-0-0.
- [13] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-x.
- [14] DAŘOUREK, Karel. *Základy materiálového inženýrství*. [Katedra materiálu, Strojní fakulta, Technická univerzita v Liberci] Liberec : autor neznámý, 2010.
- [15] Johnson, Todd. *cs.eferrit.com/*. [Online] 2. Březen 2023. <https://cs.eferrit.com/historie-kompozitu/>.
- [16] Grmela, Ing. Daniel. *estav.cz*. [Online] 2019. [Citace: 2. Březen 2023.] <https://www.estav.cz/cz/7396.myty-o-slamenych-domech-opravdu-ho-sezerou-mysi-a-jak-dobrehori>.
- [17] Prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc. *MECHANIKA KOMPOZITŮ*. Brno : Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky - Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.
- [18] Becková, Monika. *bozpprofi.cz*. [Online] 2020. [Citace: 2. Března 2023.] <https://www.bozpprofi.cz/33/prakticky-priklad-prevenčních-nastroju-vyroba-sklenených-vlaken-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jvUh4EkdwY8o5kOgdvLpo1JutUrOMB8q2Z8oGSQ/>.

- [19] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [20] element-shop.cz. [Online] [Citace: 9. Březen 2023.] <https://www.element-shop.cz/prisady-a-plniva/plnivo-skelna-vlakna-sekana--6-mm/?parameterValueId=1517>.
- [21] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek – Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [22] wikiwand.com. [Online] 2017. [Citace: 9. Březen 2023.] https://www.wikiwand.com/cs/Kovov%C3%A9_vl%C3%A1kno.
- [23] darte.cz. [Online] 2020. [Citace: 9. Březen 2023.] <https://www.darte.cz/technicke-izolace/keramicke-vlakno>.
- [24] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [25] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [26] Richter, Miroslav. *Ekomonitor.cz*. [Online] 2020. [Citace: 9. Březen 2023.] http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/9_vlsskna_pdegurodnu_a.
- [27] materialtimes.com. [Online] 2021. [Citace: 9. Březen 2023.] <https://www.materialtimes.com/tema/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>.
- [28] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORLT a Zdeněk PADOVEC. *polymer-composites.cz*. [Online] 2020. [Citace: 10. Březen 2023.] <https://polymer-composites.cz/category/technologie/>.
- [29] gdpkoral.cz. [Online] 2020. [Citace: 10. Březen 2023.] <https://gdpkoral.cz/technologie-vyroby-kompozitu/w7>.
- [30] roechling.com. [Online] 2020. [Citace: 10. Březen 2023.] <https://www.roechling.com/cz/industrial/technologie/pultruze>.
- [31] prefa-kompozity.cz. [Online] 2020. [Citace: 12. Březen 2023.] <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>.
- [32] Ing. Petr Bernardin, Ph.D. *Disertační práce - Spojování kompozitních materiálů s kovem*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní, Katedra konstruování strojů, 2016.
- [33] shop.easyelox.de. [Online] [Citace: 12. Březen 2023.] <https://shop.easyelox.de/carbon-fiber-bolts>.
- [34] PETRIE, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill, New York USA, 2007. 1077 s. ISBN 978-0-07-147916-5.
- [35] gstatic.com. [Online] 2020. [Citace: 15. Březen 2023.] <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AAND9GcS0q89cwMK4cnvTDuQ29GdJHvosw1HJfBLc>.
- [36] Ing. Lubomír Šabatka, CSc., prof. Ing. František Wald, CSc., ČVUT Praha, pracoviště UCEEB, Ing. Jaromír Kabeláč, Hypatia Solutions s.r.o, Ing. Drahošlav Kolaja, IDEA RS s.r.o. *stavba.tzb-info.cz*. [Online] 2017. [Citace: 15. Březen 2023.] <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/15284-pokrocile-modely-stycniku-a-globalni-analyza-ocelovych-konstrukci>.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Informativní hodnoty tvrdosti (HW), meze pevnosti v tahu (Rm) a tažnosti (A) uhlíkových ocelí v závislosti na obsaženém uhlíku (2)	13
Obrázek 2 - Deformační diagramy oceli (A – konstrukční ocel 11 375, B – ocel pro výztuž do betonu 10 505, C – ocel na tyče pro předpínání 10 607, D – ocelový drát tažený za studena pro předpínací výztuž) (3).....	16
Obrázek 3 - příklady betonářské oceli (3)	18
Obrázek 4 - Příklady tvarů drátků používaných jako rozptýlená výztuž (5)	19
Obrázek 5 - Fotografie používaných ocelových drátků (6).....	19
Obrázek 6 - Příklady válcovaných profilů (7).....	20
Obrázek 7 - Příklad mřížoviny (tahokovu) (8).....	21
Obrázek 8 - Příklad použití mřížoviny na oplocení (9)	21
Obrázek 9 - Spojovací materiál z oceli (10)	22
Obrázek 10 - Ocelářské pece (3)	23
Obrázek 11 - Schéma hutnické výroby – vlastní zpracování (3).....	24
Obrázek 12 - Svařování elektrickým obloukem (11)	28
Obrázek 13 - Svařování v ochranné atmosféře (11).....	28
Obrázek 14 - Svařování pod tavidlem (11).....	28
Obrázek 15 - Příklad šroubového spoje (11).....	29
Obrázek 16 - Nýtování (11)	30
Obrázek 17 - Příklady nýtů (11).....	30
Obrázek 18 - Čepový spoj (11)	31
Obrázek 19 - Hliněné cihly s příměsí slámy (16)	32
Obrázek 20 - Základní rozdělení kompozitů (13)	34
Obrázek 21 - Příklad skelného vlákna (21)	36
Obrázek 22 - Příklad kovového vlákna (23).....	37
Obrázek 23 - Příklad uhlíkových vláken (20)	38
Obrázek 24 - Příklad armidového vlákna (20)	39
Obrázek 25 - Příklad přírodních lněných vláken (27)	40
Obrázek 26 - Schéma pultruzní linky (28)	41
Obrázek 27 - Schéma ručního kladení (28)	42
Obrázek 28 - Schéma navíjení (28).....	42
Obrázek 29 - Schéma lisování pomocí vakua (28).....	43
Obrázek 30 - Schéma stříkání (28)	44
Obrázek 31 - Příklad kompozitních šroubů (33).....	45
Obrázek 32 - Schéma lepení dvou prvků (34)	46
Obrázek 33 - Schéma synergického efektu v kompozitech (35)	47
Obrázek 34 - Modely pracovního diagramu oceli (36).....	48
Obrázek 35 - kompozitní molo se zábradlím – Ostrava Poruba (31)	49
Obrázek 36 - detail kompozitní konstrukce mola – Blansko (31).....	49
Obrázek 37 - Kompozitní konstrukce pergoly (31).....	50
Obrázek 38 - Celokompozitní nosná konstrukce schodiště – ČOV Budapešť (31).....	50
Obrázek 39 - Kompozitní lávka – Štěpánovice (31).....	51
Obrázek 40 - Kompozitní schodiště k bytovému domu – Valtrovice (31).....	51

Obrázek 41 - Nevytříděné vzorky připravené ke zkoušce [autor diplomové práce].....	52
Obrázek 42 - Pokosová pila použita pro řezání kompozitů [autor diplomové práce].....	54
Obrázek 43 - Frézování kompozitních pásků do požadovaných rozměrů [autor diplomové práce]	54
Obrázek 44 - Fototechnika [autor diplomové práce].....	55
Obrázek 45 - Příklad kompozitního pásku [autor diplomové práce]	58
Obrázek 46 - KO_T_PA_07 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	59
Obrázek 47 - KO_T_PA_07 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	59
Obrázek 48 - KO_T_PB_03 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	61
Obrázek 49 -KO_T_PB_03 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	61
Obrázek 50 - KO_B_PB_04 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	63
Obrázek 51 - KO_B_PB_04 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	63
Obrázek 52 - KO_T_TC_1 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	65
Obrázek 53 - KO_T_TC_1 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	65
Obrázek 54 - KO_B_TR_S_1 před zkouškou [autor diplomové práce].....	67
Obrázek 55 - KO_B_TR_S_1 po zkoušce [autor diplomové práce]	67
Obrázek 56 - KO_B_TR_Z_1 po zkoušce [autor diplomové práce]	68
Obrázek 57 - KO_B_TR_Z_1 před zkouškou [autor diplomové práce].....	68
Obrázek 58 - KO_B_OL_1 před zkouškou [autor diplomové práce]	70
Obrázek 59 - KO_B_OL_1 po zkoušce [autor diplomové práce].....	70
Obrázek 60 - KO_C_L_1 před zkouškou [autor diplomové práce]	72
Obrázek 61 - KO_C_L_1 po zkoušce [autor diplomové práce].....	72
Obrázek 62 - OC_T_P_2 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	74
Obrázek 63 - OC_T_P_2 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	74
Obrázek 64 - OC_T_T_6 před zkouškou – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	76
Obrázek 65 - OC_T_T_6 po zkoušce – obrázky otočeny o 90 stupňů doprava [autor diplomové práce]	76
Obrázek 66 - OC_B_TR_2 před zkouškou [autor diplomové práce]	78
Obrázek 67 - OC_B_TR_2 po zkoušce [autor diplomové práce]	78
Obrázek 68 - Schéma se základními rozměry referenční konstrukce [autor diplomové práce]	79
Obrázek 69 - Pohled na 3D model referenční konstrukce [autor diplomové práce].....	80
Obrázek 70 - Výsledné NVM + R (Kompozit – laboratoř – výpočet 2. MS – MSP) [autor diplomové práce]	81
Obrázek 71 - Výsledné NVM + R (Ocel – FIN výrobce – výpočet 2. MS – MSP) [autor diplomové práce]	82

Seznam grafů

Graf 1 - Výsledky vzorků KO_T_PA (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]	58
Graf 2 - Výsledky vzorků KO_T_PB (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]	60
Graf 3 - Výsledky vzorků KO_B_PB (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce]..	62
Graf 4 - Výsledky vzorků KO_T_TC (závislost napětí na poměrném přetvoření) [autor diplomové práce]	64
Graf 5 - Výsledky vzorků KO_B_PB (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce]..	66
Graf 6 - Výsledky vzorků KO_B_OL (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce].	69
Graf 7 - Výsledky vzorků KO_C_L_1 (závislost působící síly na posuvu) [autor diplomové práce]..	71
Graf 8 - Výsledky vzorků OC_T_P (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]	73
Graf 9 - Výsledky vzorků OC_T_T (závislost napětí na poměrném prodloužení) [autor diplomové práce]	75
Graf 10 - Výsledky vzorků OC_B_TR (závislost působící síly na průhybu) [autor diplomové práce]	77

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Mezní hodnoty prvků v nelegované oceli [2]	14
Tabulka 2 - Základní vlastnosti oceli – vlastní zpracování [3]	15
Tabulka 3 - Vlastnosti vybraných typů vláken [13]	33
Tabulka 4 - Vlastnosti vybraných typů matric [13]	34
Tabulka 5 - Porovnání vlastností oceli a obecného kompozitu [autor diplomové práce]	47
Tabulka 6 - Staré a nové označení vzorků [autor diplomové práce].....	53
Tabulka 7 - Rozměrové veličiny vzorků KO_T_PA [autor diplomové práce]	57
Tabulka 8 - Rozměrové veličiny vzorků KO_T_PB [autor diplomové práce]	60
Tabulka 9 - Rozměrové veličiny vzorků KO_B_PB [autor diplomové práce].....	62
Tabulka 10 - Rozměrové veličiny vzorků KO_T_TC [autor diplomové práce]	64
Tabulka 11 - Rozměrové veličiny vzorků KO_B_TR [autor diplomové práce].....	66
Tabulka 12 - Rozměrové veličiny vzorků KO_B_OL [autor diplomové práce].....	69
Tabulka 13 - Rozměrové veličiny vzorků KO_C_L_1 [autor diplomové práce]	71
Tabulka 14 - Rozměrové veličiny vzorků OC_T_P [autor diplomové práce]	73
Tabulka 15 - Rozměrové veličiny vzorků OC_T_T [autor diplomové práce]	75
Tabulka 16 - Rozměrové veličiny vzorků OC_B_TR [autor diplomové práce].....	77

8. Přílohy