

Studium ohybového chování kompozitního profilu hokejové hole

Bc. Jan Klusáček

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Klusáček**
Osobní číslo: **T18341**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Studium ohybového chování kompozitního profilu hokejové hole**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši pro danou problematiku.
2. Zhotovte zkušební tělesa z vyrobených kompozitních profilů.
3. Provedte mechanické zkoušky-statické a rázové, pro zvolené materiály.
4. Vyhodnotte dosažené výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

Mallick, P. K. Composites Engineering Handbook, CRC Press, 1997, ISBN 0824793048

EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

Černošek, J.: Úvod do problematiky kompozitních materiálů, VUT v Brně, Fakulta technologická, Zlín, 1992

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

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

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je studium ohybového chování kompozitního profilu hokejové hole s různým poměrem skelných a uhlíkových vláken, jejich vzájemné porovnání při tříbodové zkoušce ohybem zkušebních těles a profilů hole, rázovou zkouškou zkušebních těles a únavovou zkouškou profilů.

Teoretická část se zabývá problematikou kompozitních materiálů použitých při výrobě hokejových holí a výrobními technologiemi. Další část definuje únavové chování kompozitních materiálů. Praktická část se zabývá výrobním procesem zkušebních těles pro zkoušky, provedením zkoušek. Dále obsahuje vyhodnocení získaných výsledků, pomocí zkoušky tříbodovým ohybem, rázové zkoušky a únavové zkoušky.

Klíčová slova: hokejová hůl, ohyb, kompozitní materiál, trvanlivost

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to study the bending behavior of the composite profile of a hockey stick with different ratios of glass and carbon fibers, their mutual comparison in a three-point bending test of test specimens and club profiles, impact test of test specimens and fatigue test of profiles.

The theoretical part deals with the issue of composite materials used in the production of hockey sticks and production technologies. The next part defines the fatigue behavior of composite materials. The practical part deals with the production process of test specimens for tests, the implementation of tests. It also contains an evaluation of the obtained results, using a three-point bending test, impact test and fatigue test.

Keywords: hockey stick, bend, composite material, durability

„Když mi bylo 5 let, matka mi neustále říkala, že štěstí je klíčem k životu. Když jsem šel do školy, ptali se mě, co chci být, až vyrostu. Napsal jsem „šťastný“. Řekli mi, že jsem úkol nepochopil, a já jim řekl, že oni nepochopili život.“

- John Lennon

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za jeho ochotně poskytnuté rady, pozornost a odborné vedení, po celou dobu vypracování diplomové práce a za pomoc při realizaci zkoušek. Dále bych chtěl poděkovat firmě STOON za možnost realizace mé diplomové práce, rodině a kamarádům za obrovskou podporu při studiu na vysoké škole.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I. TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE O KOMPOZITECH.	11
1.2 ROZDĚLENÍ HOKEJOVÝCH HOLÍ	12
1.2.1 <i>Historie hokejových holí.</i>	12
1.2.2 <i>Rozdělení hokejových holí dle materiálu.</i>	13
1.2.3 <i>Kompozitní hokejové hole.</i>	13
1.3 DRUHY VÝZTUŽÍ HOKEJOVÝCH HOLÍ.....	13
1.3.1 <i>Skelná vlákna.</i>	14
1.3.2 <i>Uhlíková vlákna.</i>	18
1.3.3 <i>Matrice.</i>	20
1.3.4 <i>Způsob výroby hokejových holí.</i>	21
2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	24
2.1 ZKOUŠKA OHYBEM.	24
2.2 ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU.....	26
2.3 ZKOUŠKA ÚNAVY.....	27
II. PRAKTICKÁ ČÁST	29
3 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI	30
4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES A PROFILŮ	31
4.1 ZKUŠEBNÍ TĚLESA A PROFILY PRO TŘÍBODOVÝ OHYB.	34
4.2 ZKUŠEBNÍ TĚLESA PRO ZKOUŠKU RÁZEM V OHYBU.....	34
4.3 ZKUŠEBNÍ PROFILY PRO ÚNAVOVOU ZKOUŠKU.	35
5 STATICKE ZKOUŠKY	36
5.1 ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM.	36
5.1.1 <i>Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.</i>	37
5.1.2 <i>Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.</i>	40
5.1.3 <i>Zkouška profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.</i>	42
5.1.4 <i>Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken.</i>	43

5.1.5	<i>Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.</i>	45
6	DYNAMICKÉ ZKOUŠKY	48
6.1	ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU	48
6.1.1	<i>Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.</i>	49
6.1.2	<i>Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.</i>	50
6.2	ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA	53
6.2.1	<i>Zkouška profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.</i>	53
6.2.2	<i>Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken.</i>	57
6.2.3	<i>Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.</i>	62
7	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	66
7.1	VÝSLEDKY STATICKÝCH ZKOUŠEK	66
7.1.1	<i>Výsledky zkoušky zkušebních těles v třibodovém ohybu.</i>	66
7.1.2	<i>Výsledky zkoušky profilů v třibodovém ohybu.</i>	67
7.2	VÝSLEDKY DYNAMICKÝCH ZKOUŠEK	69
7.2.1	<i>Výsledky zkoušky zkušebních těles rázem v ohybu.</i>	69
7.2.2	<i>Výsledky únavové zkoušky profilů.</i>	69
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
	SEZNAM TABULEK	79
	SEZNAM GRAFŮ	80
	SEZNAM PŘÍLOH	82

ÚVOD

K tomuto tématu diplomové práce přivedla autora hra rekreačního hokeje a zájem o vlastnosti hokejových holí, používaných při hře. Hokejové hole patří mezi nejdůležitější vybavení hráče. Chování hokejové hole je velice důležitý faktor, který má zásadní vliv na hru, výdrž hokejové hole ovlivňuje množství hokejových holí, které potřebuje hráč na sezónu. Cena hokejových holí není zanedbatelná. Po zničení hokejové hole má při pořízení nové hole i malá odlišnost v délce, tvrdosti nebo zakřivení zásadní vliv na hru.

Z tohoto důvodu se autor začal zajímat, o životnost hokejových holí. Autor používá při hraní hokejové hole od výrobce STOON.

Výroba hokejových holí je specifická od ostatní strojírenské výroby, a to z důvodu ochrany výrobního tajemství, a proto je v materiálech výrobců a literatuře uváděna jen velmi zjednodušeně (1).

Práce je rozdělena do pěti kapitol, první kapitola se zabývá kompozitními materiály, druhá kapitola se zabývá únavovým chováním kompozitních materiálů, třetí kapitola stanovuje cíle této práce, čtvrtá kapitola se zabývá výrobou zkušebních těles a profilů, pátá a šestá kapitola se zabývá průběhem zkoušek. Sedmá kapitola obsahuje výsledky zkoušek.



Obrázek 1 Autor při hraní hokeje.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

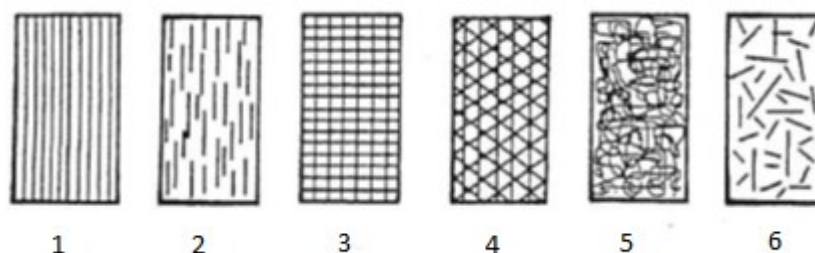
Kompozitní materiály (kompozity) jsou složené materiály, skládající se ze dvou či více složek, z nichž každá plní jinou specifickou funkci a má jiné materiálové vlastnosti, většinou značně odlišné.

Tyto materiály splňují požadavky od jednoduchých technických aplikací až po extrémní aplikace. Kromě výztužných vláken, které jsou nositeli pevnosti, je i polymerní matrice svým způsobem velmi významná pro uplatnění konstrukčních dílů, výrazně rozhoduje o způsobu výroby (2), (3).

1.1 Základní údaje o kompozitech.

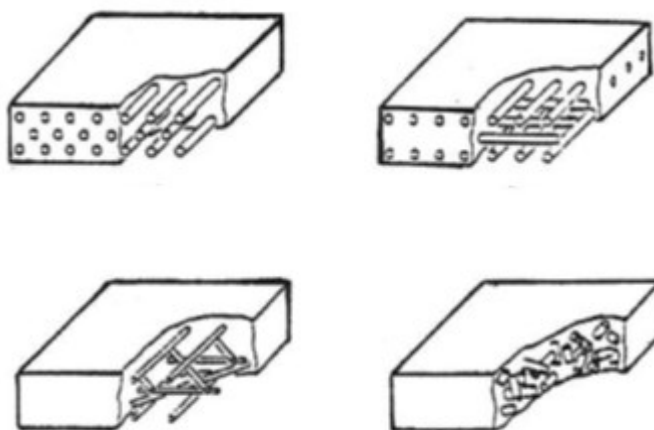
Kompozitní materiály je možné členit z několika hledisek

- a) podle materiálu výztuže: kovy (a jejich slitiny), nekovy, anorganické materiály, keramické materiály, skla, čedič, organické materiály, polymery, Kevlar, polyamidová vlákna, Nylon (2), (3).
- b) podle materiálu matrice: kovy (jejich slitiny), nekovy, anorganické materiály, keramické materiály, skla, organické materiály, polymery (polyestery, vinylestery, fenolické pryskyřice, epoxidy, polyamidy atd.) (2), (3).
- c) Materiál vláken a materiál matrice je možné kombinovat nejrůznějším způsobem, kompozit může být typu kov – kov, polymer – polymer, keramika – keramika, keramika – kov, keramika – polymer. Samozřejmým předpokladem je však dobrá mezifázová adheze a vhodné deformačně-napěťové vlastnosti. Jako zajímavost lze uvést, že existují kompozity, u kterých je materiál výztuže stejný, pouze v jiné formě. Jako příklad je zde možné uvést žárupevný materiál, kdy výztuž je ve formě tenkých vláken a matrice ve formě objemového materiálu (2), (3).
- d) podle geometrického tvaru výztuže (nosné části): vláknové, částicové, skeletové. Charakteristické typy vláknových kompozitů jsou graficky znázorněny na obrázku 2 (2), (3).



Obrázek 2 Typy vláknových kompozitů (2).

1 - jednosměrná dlouhá vlákna, 2 - jednosměrná krátká vlákna, 3 - dvousměrné vyztužení (křížová tkanina, rohož), 4 - vícesměrné vyztužení, 5 - náhodná orientace vláken, 6 - náhodná orientace krátkých vláken.



Obrázek 3 Prostorové uspořádání vybraných vláknových kompozitů (2).

e) podle použití: žárupevné, žáruvzdorné, korozivzdorné, aplikace v letectví, strojírenských výrobních technologiích, stavebnictví atd. (2), (3).

1.2 Rozdělení Hokejových holí

1.2.1 Historie hokejových holí.

První zmínky o hokeji se mohou lišit v závislosti na tom, čemu říkáme hokej. Existuje mnoho rozepří, které hry podobající se hokeji dali tomuto úžasnému sportu jeho finální podobu. Nejstarší hokejová hůl byla ručně vyrobena z javorového dřeva, a to zhruba mezi roky 1835 a 1838. První hole byly do Čech přivezeny pražskými hráči, kteří se zúčastnili turnaje v Chamonix 1909, kde tehdejší nové hole zakoupili (4).



Obrázek 4 První hokejová hůl (5).

1.2.2 Rozdělení hokejových holí dle materiálu.

Hokejové hole můžeme rozdělit podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny na dřevěné a kompozitní.

- a) Dřevěné hokejové hole jsou stálící na hokejovém trhu, zejména mezi hobby hokejisty. Dřevěné hokejové hole jsou v porovnání s kompozitními výrazně levnější a jsou tedy vhodné pro hráče, kteří nechtějí investovat do hokeje mnoho peněz. Dřevěné hokejové hole se vyrábí ze dvou různých stromů, a to z osiky a břízy (4), (6).
- b) Výroba kompozitních holí umožnila vyrábět hokejové hole o 35 % lehčí než jejich předchůdci ze dřeva. Kompozitní hokejové hole jednoznačně dominují před dřevěnými hokejovými holemi. Tyto hole nabízí daleko více variant, ze kterých si může vybrat každý hráč. Na výběr je velké množství zahnutí čepelí, tvrdostí hole, a samozřejmě rozdílná hmotnost hokejové hole, která je pro hráče velmi důležitá (4), (6).

1.2.3 Kompozitní hokejové hole.

U kompozitní hokejových holí se jako výztužný materiál používá dřevo, hliník, skelná a uhlíková vlákna. Výhoda kompozitních holí spočívá v možnosti zvolit libovolnou tvrdost hole. Dále si hráč může zvolit povrch, či typ zahnutí. V neposlední řadě si můžete také zvolit výkonnostní třídu hole, která je obvykle rozdělena do tří skupin. Profesionální, poloprofesionální a hobby, nebo též amatérské hokejové hole (4).

1.3 Druhy výztuží hokejových holí

Výrobce zkoušených hokejových holí používá při výrobě hokejových holí jako výztuž skelná a uhlíková vlákna ve formě prepregů (1).

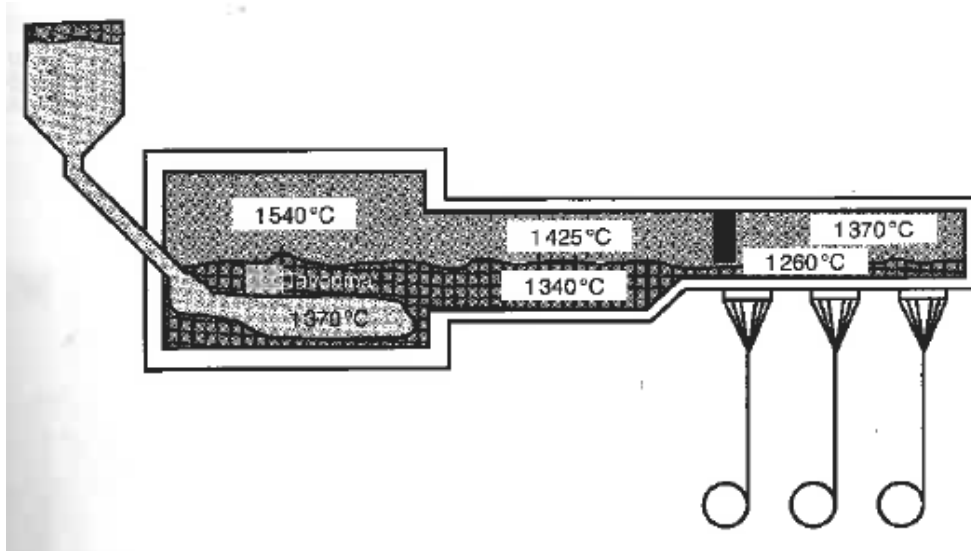
1.3.1 Skelná vlákna.

Skelná vlákna z bezalkalické skloviny patří mezi vynikající elektrické izolanty s vysokou prostupností pro záření, proto se označují jako *E-vlákna* (elektrická) a jejich sklovina jako *E-sklovina*. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který postupně jako standardní typ obsadil téměř 90 % trhu (3), (7), (9), (11).

Sklovina s vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 mívá o 40 až 70 % vyšší pevnost a značí se v USA jako *S – sklovina*, v Evropě jako *R-sklovina* a v Japonsku jako *T-sklovina*.

Dále je vyráběna *C-sklovina* která vyniká vysokou odolností proti kyselinám a chemicky agresivním látkám. Dále pevná, chemicky vysoce odolná bezboritá *C-sklovina*, tzv. *ECR-sklovina*. Bezalkalická skelná vlákna – *AR-vlákna*, s odlišným složením oproti *E-vláknům*, mají vysokou odolnost proti alkáliím a z tohoto důvodu se používají jako výztuhy do betonu. Relativně vysoké hodnoty pevnosti a *E-modulu* jsou důsledkem silných kovalentních vazeb mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny. Síla jednotlivých vazeb zesítěné struktury a je také závislá na druhu použitých oxidů kovů. Skelná vlákna jsou díky své amorfní struktuře izotropní. Textilní sklo se dodává jako příze, skaná příze, pramenec, rohož, krátké vlákno a sekaný pramenec (3), (7), (9), (11).

Skelná vlákna se vyrábějí tažením z trysek. Ve sklářské peci, která je vyzděná žáruvzdornou keramikou, se při teplotě kolem 1400 °C taví křemičitý písek (SiO_2), vápenec (CaCO_3), kaolin ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), kyselina boritá (H_3BO_3) a kazivec (CaF_2) na *E-sklovinu*, několik dní se čirí, a v tekutém stavu se vede do předpecí kanálky spřádacích trysek (*bushings*). Tyto trysky jsou z platinové slitiny. Trysky jsou zahřáté na teplotu, kdy z jejich 200 až 4000 trysek, které jsou umístěny na spodní straně předpecí, vytékala sklovina pomalu, ale rychle tuhla ve tvaru vláken. Vlákna na výstupu z trysky jsou přibližně 2 mm silná. Dloužením vysoce viskózních vláken, pomocí vysokou rychlostí rotujícího navíjecího zařízení se vlákna na zvolený průměr kalibrují (např. 10 nebo 14 μm) a současně 40 000 x prodlužují svou délku. Rychlost odtahu vláken je (asi 180 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$). Sdružením těchto téměř neviditelných elementárních vláken vzniká ohebné spřádací vlákno (3), (7), (9), (11).



Obrázek 5 Výroba textilních skelných vláken tažením (7).

Na čerstvě tažená textilní vlákna se v průběhu výroby nanáší šlichta (*lubrikace*) ve formě vodní emulze.

Úkolem šlichty je (3), (7), (9), (11):

- a) spojit jednotlivá vlákna,
- b) chránit citlivý povrch křehkých elementárních vláken,
- c) přizpůsobit vlákna dalšímu zpracovatelskému procesu,
- d) zlepšit vazby mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem.

Základní složky lubrikace jsou (3), (7), (9), (11):

- a) Filmotvorné – polyestery, jiné pryskyřice a vinylacetáty polymerizované do určitého stupně, které chrání elementární vlákna a spojují je do pramenů.
- b) Maziva – poskytují příslušnému produktu, potřebné kluzné vlastnosti.
- c) Apretace – typ musí odpovídat použitému typu pryskyřice (matrice), obvykle na silanové bázi.
- d) Antistatika – odvádějí elektrostatický náboj a jsou to anorganické soli.

Dále je skelné vlákno vyluhováno, že nakonec zůstává pouze „holá“ křemičitá mřížka.

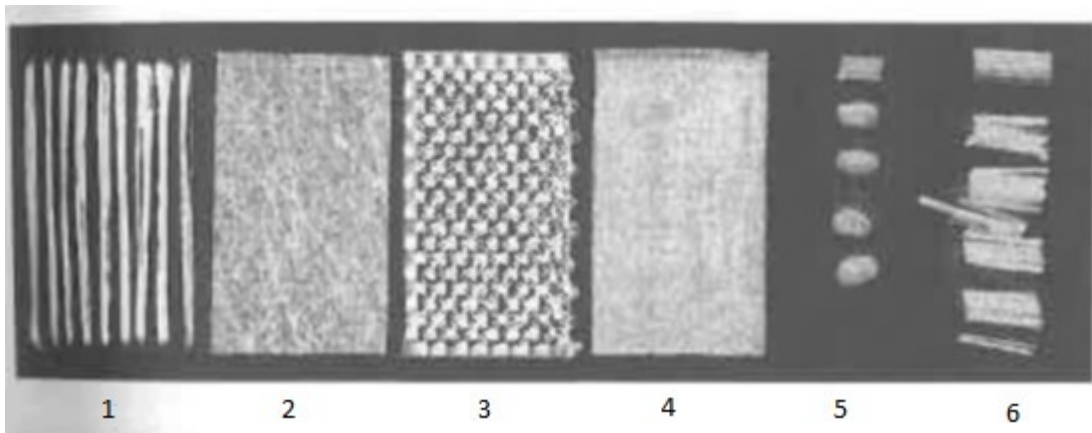
Proces vyluhování probíhá při teplotě 80° C. Vyluhování vnější vrstvy probíhá rychleji než vnitřku vlákna. Při tažení jsou vlákna ve vnější vrstvě prodloužena vlivem tepelného gradientu, který zvyšuje viskozitu směrem k vnější vrstvě vlákna a mřížka je zdánlivě řidší. Toto prodloužení se zvyšuje s rostoucí odtahovou rychlostí vlákna. Když se vlákno takto

exponované v kyselině vysuší, objeví se postupně osově a spirálovité trhliny, které vznikly vlivem ztráty materiálu a zeslabení mřížky. Z počátku převládají spirálovité trhliny. Při velmi silném vyluhování a u velmi tenkých vláken vznikají převážně osově trhliny. Rychlost šíření spirálových trhlín byla naměřena v rozmezí 1 až 100 mm · s⁻¹. Velmi slabé a velmi silné kyseliny působí agresivně. Při působení alkálií přeruší OH⁻ ionty kyslíkové vazby, postupně se zcela rozruší křemičitá mřížka vláken a vznikne rozpustná kyselina křemičitá. Původně hladká plocha povrchu skleněných vláken se zdrsňuje a na povrchu se vytvoří volná vrstva reakčních zplodin. Postupem času se sice její tloušťka zvětšuje, není ale schopna zabránit dalšímu pronikání alkálii. Difuzně probíhající mechanismus koroze při napadení kyselinou se při namáhání alkáliemi mění na mechanismus působící celoplošně. Tomu odpovídá i jejich daleko pomalejší průběh. Při namáhání alkáliemi nebyla na rozdíl od působení kyselin prokázána tvorba trhlín. Daleko vyšší chemickou odolnost v silných kyselinách, a i alkáliích vykazují uhlíková vlákna (3), (7), (9), (11).

Následující pojmy uvedené pro skelná vlákna platí většinou i pro ostatní typy vláken (3), (7), (9), (11):

- a) **Příze** – vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky.
- b) **Nitě (skaná příze)** - vyrábí se jedno – nebo víceúrovňově, a skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny.
- c) **Roving (pramenec)** - skládá se z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken, případně tažených přímo z taveniny (6 až 12000 elementárních vláken). Zpracovává se buď tkaním nebo sekáním, tažením nebo navíjením nekonečného pramence.
- d) **Spředený roving** – vyrábí se stočením vláken kolem podélné osy.
- e) **Rohože ze sekaných pramenců** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900 g · m⁻². Vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákna jsou uložena do vrstev, postříkána pojivem a po vysušení v pásové sušárně spojena, a proto je možno vzniklou rohož, podobnou plsti, navíjet do rolí.
- f) **Povrchové (závojové) rohože** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 20 až 50 g · m⁻² ze skleněných nebo termoplastových vláken, které se pokládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice, aby se zamezilo vzniku trhlín. Zabraňují prorážení struktury hrubší výztuže na povrchu a zesilují tenké vrstvy.

- g) **Krátká vlákna** – rozemletá a rozptýlená na jednotlivá elementární vlákna o různé délce (0,1 až 0,5 mm).
- h) **Tkaniny** – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravouhle v útku a osnově, které ve dvou směrech působí výztužně. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. Hmotnost vláken lze měnit v obou směrech až v poměru 1:20, čímž vznikají kvazijednosměrné tkaniny.

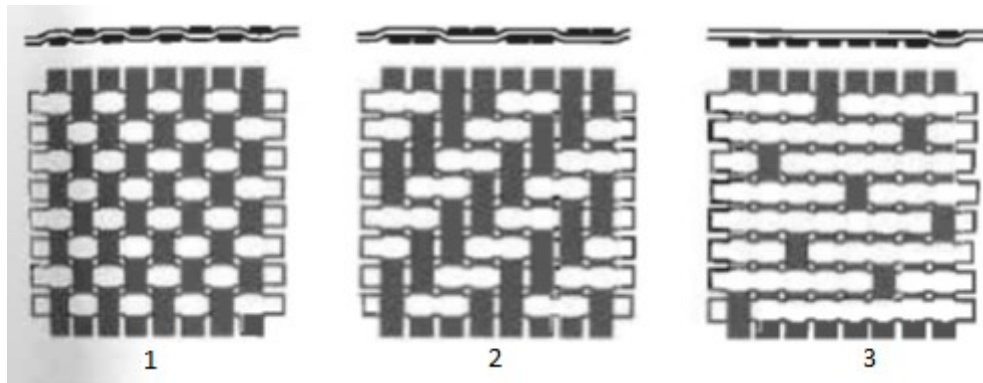


Obrázek 6 Typy sklovláknitých výztuží (7).

1 - roving, 2 - rohož, 3 - tkanina z pramenců, 4 - tkanina z vláken, 5 - krátká vlákna, 6 - dlouhá vlákna.

Druhy vazeb (3), (7), (9), (11):

- a) *plátnová vazba* – jednoduchá základní vazba, jednoduché zpracování tkaniny vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému otřepu při řezání.
- b) *keprová vazba* – vyšší pevnost a tuhost laminátu způsobená menším zvlněním vláken. Tkaniny jsou ohebnější, a jsou proto vhodnější pro tvarované prvky než tkaniny s plátnovou vazbou.
- c) *atlasová (saténová) vazba* – vychýlení vláken má menší než keprová vazba, dále velmi dobrou řasitelnost a z toho vyplývající vhodnost pro prostorově složité prvky, dosahují velmi hladkého povrchu.



Obrázek 7 Druhy vazeb výztužných tkanin (7).

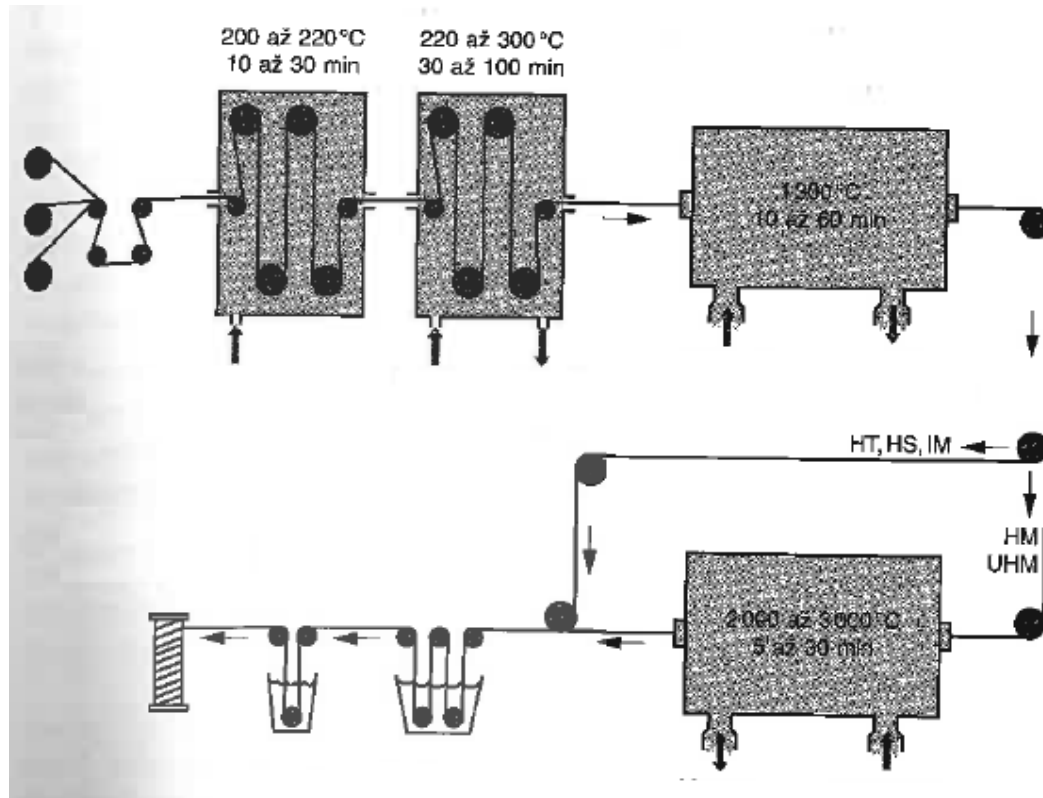
1 - plátňová vazba, 2 - keprová vazba, 3 - atlasová (saténová) vazba.

1.3.2 Uhlíková vlákna.

Uhlíková vlákna jsou technická vlákna s nízkou tažností, ale s extrémně vysokou tuhostí a pevností. Výchozí organické suroviny jsou nejprve karbonizovány ve vláknitém tvaru. Přitom se, až na uhlík odštěpí téměř všechny prvky. Se vzrůstající teplotou, se zvyšuje grafítizace a zlepšují se mechanické vlastnosti. Nad teplotou 1800 °C je tvorba grafitové struktury ukončena, přesto vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu (3), (7), (9), (11).

Výchozí suroviny pro výrobu uhlíkových vláken jsou (3), (7), (9), (11):

- a) celulóza – vyrobená vlákna disponují méně dokonalou strukturou, převážně se používají jako izolační materiál pro vysoké teploty.
- b) Polyakrylonitril (PAN) – používá se od r.1980, jeho používání je stále častější, vyrobená vlákna z něj, jsou považována za standardní vlákna.
- c) Smola – připravují se z ní vlákna nákladným způsobem, díky nízké ceně výchozí suroviny je konečná cena příznivá. Hodnota E -modulu těchto vláken je velmi vysoká a má i velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Pevnost v tlaku je ve srovnání se standardními vlákny podstatně nižší, z důvodu řidší vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami. Na trhu mají pouze malý podíl. Vlákna s vysokým modulem pružnosti a vysokou pevností se používají většinou pro speciální účely.



Obrázek 8 Schéma výroby PAN vláken (7).

Nejtěsněji uložená kontinuální síť silných vazeb je předpokladem pro vysokopevnostní a vysoko modulová vlákna. Z důvodu požadavku na nízkou měrnou hmotnost materiálu je vhodné použít pro tyto účely prvky z prvních dvou řad periodické soustavy, např. bor, uhlík, dusík, kyslík a křemík. Nejpevnější kovalentní vazby nemusí být přitom uspořádány trojrozměrně. U vláken s převážně jednosměrným přenosem sil v ose vlákna postačují jedno – nebo dvourozměrné molekulární struktury.

Složení uhlíkových vláken je z více než 90 % z uhlíku, < 7 % dusíku, < 1 % kyslíku a < 0,3 % vodíku. Průměr vláken je mezi 5 a 10 μm . Pevnost a E -modul se v širokém rozsahu mohou měnit. Dále jsou závislé na výskytu vadných míst a stupni orientace uhlíkových vrstev, které vznikly ve vláknech během výroby. Teoreticky možné hodnoty mechanických vlastností, vycházejí z hodnot energie kovalentních vazeb grafitového monokrystalu ve směru vrstev, dosahují až $1\,000\,000\ \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Silná anizotropie se projevuje i na tepelné roztažnosti, která dosahuje ve směru rovnoběžném s vrstvami uhlíku, tj. u vláken ve směru osy vlákna, dokonce mírně záporných hodnot.

Hlavní dva výrobní postupy průmyslové výroby uhlíkových vláken, z nichž technicky významnější je postup využívající polyakrylonitril, v druhém případě se vychází ze surovin bohatých na uhlík (3), (7), (9), (11).

Polyakrylonitril je nejprve dloužen k dosažení co největší orientace molekul ve směru osy vlákna, poté jsou vlákna stabilizována zahříváním na teplotu 200 až 300 °C pod mechanickým napětím za přístupu vzduchu. Při tom se PAN dehydruje a současně přemění v důsledku cyklizace nitrilových skupin na žebříčkovitý polymer.

Žebříčkovitá struktura polymeru se přemění ve druhém stupni výroby pyrolýzou (*karbonizací*) v inertní atmosféře při teplotách max. 1600 °C na grafitickou strukturu. Vlivem působícího tahového napětí a silně dlouženého výchozího polymeru dosáhnou uhlíkové vrstvy dobrého usměrnění rovnoběžně s osou vlákna. Takto mikrostruktura zapříčiní vysoké hodnoty *E*-modulu a pevnosti. Takto lze připravit vlákna s pevností více než 5 000 N · mm⁻², vlákna však mají nižší pevnost. *E*-modul a pevnost standardních uhlíkových vláken je asi 3 500, příp. 230 000 N · mm⁻² (3), (7), (9), (11).

Druhý postup používá k výrobě uhlíkových vláken vychází suroviny bohaté na uhlík, jako jsou smoly na bázi kamenouhelného dehtu nebo dehtů vznikajících při destilaci ropy. Uvedené suroviny se tepelně zpracovávají při teplotě nad 350 °C na *mezofázi*, tj. přechodový stupeň mezi trojrozměrně uspořádanou krystalickou fází a izotropní kapalnou fází. Mezofáze je vysoce anizotropní a obsahuje vysoký podíl kapalných krystalů. V průběhu spřádání vznikají z taveniny při působení hydrodynamických jevů vlákna s vysokým stupněm orientace v osovém směru (3), (7), (9), (11).

Následná karbonizace a stabilizace při teplotě 2 000 °C způsobí přeměnu na uhlík při současném zachování nebo zlepšení orientace. Takto lze vyrábět vlákna s vysokým *E*-modulem a to až 700 000 N · mm⁻². Tyto však mají v porovnání s vlákny vyrobenými z PAN nižší pevnost.

Žihání jako třetí stupeň výroby probíhá při teplotách 3 000 °C. Změny připomínají rekrytalizaci, a mohou být umocněny současným dloužením vláken. Grafitizací za dloužení lze vyrábět vysoko modulová uhlíková vlákna s orientovanou strukturou ze standardních uhlíkových vláken. Cena výroby z důvodů vysokých teplot je vysoká (3), (7), (9), (11).

1.3.3 Matrice

Úkolem matrice je zajistit správný geometrický tvar výrobku a jeho tvarovou stálost, ochránit vlákna před okolními vlivy, přenášet zatěžující síly na vlákna atd. Matrice může být jako termoset (reaktoplast) nebo termoplast. Nejčastěji se používají reaktivní pryskyřice, které jsou ve výchozím stavu většinou v tekutém stavu.

Reaktivní pryskyřice se vytvrzují přidáním tvrdidla (iniciátory, urychlovače, katalyzátory atd.), nebo dodáním další energie (záření, teplo atd.). Vytvrzování je často spojeno s exotermní reakcí (uvolňování tepla), zvýšením viskozity a smrštění (10).

- a) Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R).
- b) Vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice.
- c) Epoxidové pryskyřice (EP-R).

Jedná o kapalně až pevné látky za pokojových teplot, které mohou obsahovat přídavné látky (rozpouštědla atd.). Je nutný přesný stechiometrický míšící poměr pryskyřice a tvrdidla. Epoxidové pryskyřice disponují velmi dobrými mechanickými a izolačními vlastnostmi, přilnavostí a vysokou rozměrovou stálostí. Typy tvrdidel a přísad značně ovlivňují vlastnosti. Používají se jako zalévací hmoty pro elektroniku, na různé povlaky, a dále pro práškové nanášení. Pro svou vysokou kvalitu jsou EP-R využívány jako matrice pro výztuže z (uhlíkových a aramidových vláken). Na speciální se používají většinou epoxidové prepregy.

- d) Fenolické pryskyřice (PF-R).

Za pokojových teploty jsou termosety nízkoviskozní, a proto dobře prosycují vlákna výztuže díky dobré smáčivosti. K vytvrzení dochází díky chemickému procesu, který může ovlivnit jakost výrobku a také může mít vliv na životní prostředí. Oproti tomu jsou za pokojové teploty termoplasty pevné látky a do tekutého stavu přechází většinou, až po zahřátí nad teplotu 200°C. U termoplastů dochází po roztavení k ztuhnutí matrice. Nejčastěji používané termoplasty jsou PS, PVC, PE, PP, PA 6, PA 66, PBT, PC, POM atd (13).

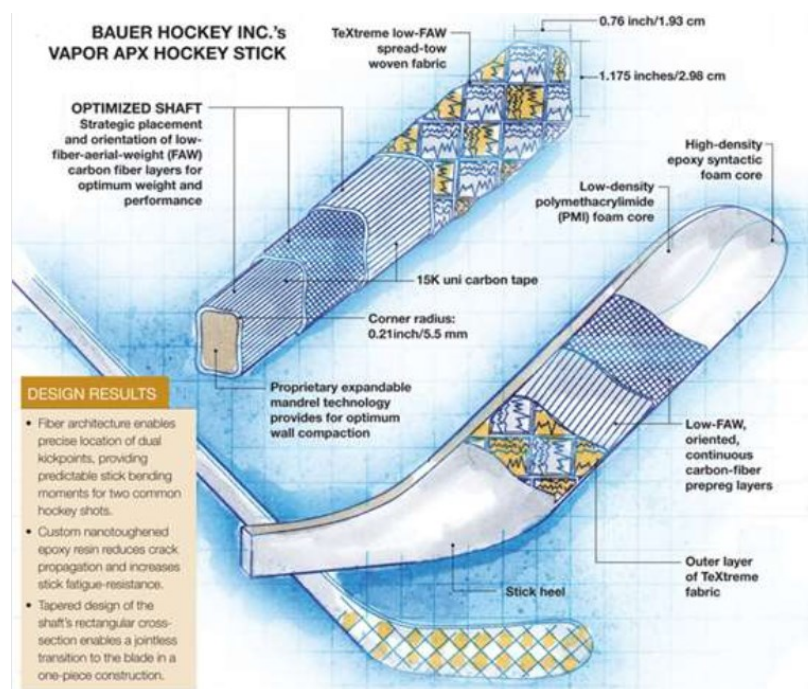
1.3.4 Způsob výroby hokejových holí.

Na rozdíl od ostatních sportovních potřeb z kompozitů jako jsou tenisové rakety a golfové hole, které se pohybují jednoduchým kývavým pohybem a většinou jsou v kontaktu pouze s míčem, hokejka při pohybu nejprve zasáhne led, úmyslně, určitou vzdálenost za pukem. Což umožní ohnutí hole, a tím uložení a přenesení značného množství energie. Hůl dosáhne svého maximálního ohybového momentu, před zásahem puku. Při kontaktu s pukem, se energie uvolní. Obecně musí hokejová hůl odolat dynamickému zatížení 1 000 - 1 200 N bez poškození při 1 000 a více cyklech (1), (6).

Kompozitní hokejová hůl má dutý obdélníkový průřez o (19,3 mm x 29,8 mm) a rádius rohů R - 5,5 mm. Standardní délka hole je 1,52 m. Kromě váhy existují tři hlavní kritéria designu hokejové hole.

- a) materiály musí být schopny rychle ukládat a uvolňovat energii.
- b) Profil hole musí mít určitou tuhost, která doplňuje biomechaniku hráče pro optimalizaci střelby.
- c) Čepel musí dostatečně tlumit náraz, aby bylo zajištěno, že puk zůstane na čepeli, zatímco hráč střílí nebo přijímá přihrávku, ale současně musí poskytovat dostatečný pocit, že má hráč puk na čepeli.

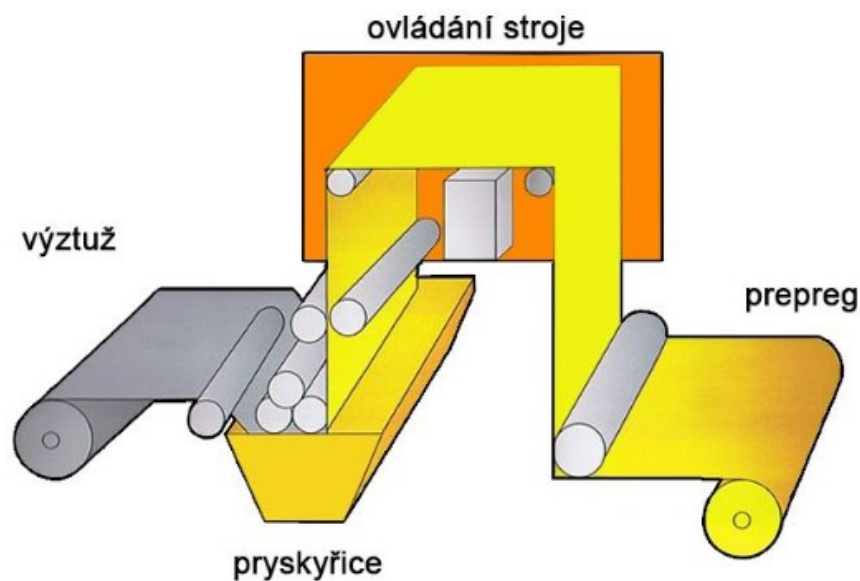
Hokejová hůl se skládá ze čtyř hlavních součástí: jádra rukojeti, vnější vrstvy, zúžení hole a čepel. Hůl je tvarována kolem rozšiřitelného trnu a obsahuje 13 až 15 vrstev materiálu, o šířce (102 mm až 1 524 mm), střídavě uspořádaných, materiál by měl být navrstven na určitou tloušťku. Čím více se použije vrstev, tím více je možností kombinovat orientaci a vzor vláken. Úhel vláken (např. $30^\circ / 45^\circ / 30^\circ / 19^\circ / 0^\circ / 30^\circ$) a vzor se mění v závislosti na oblasti hole a jejím specifikovaném profilu tuhosti. Více vrstev vláken o 0° zvyšuje lineární tuhost; více vrstev vláken 45° zvyšuje torzní tuhost; a více vrstev vláken o 90° zvyšuje odolnost proti vzpěru. Hokejové hole podrobené zkoušce jsou vyráběny navinutím prepregů na trn. Přesný poměr a počet vrstev je výrobním tajemstvím firmy. Dále je použita odtrhová tkanina, separační fólie, odsávací rohož a vakuová fólie. Poté je připravený profil uložen do formy, kde dojde k vytvrzení při teplotě $100\text{--}200^\circ\text{C}$ (1), (6).



Obrázek 9 Princip výroby hokejové hole (6).

1.3.4.1 Výroba prepregů.

Ve většině případů je při výrobě prepregů s reaktoplastickou matricí využíván tzv. „mokrý způsob“. Připravená tkanina (výztuž) se na začátku linky odvíjí z role a je namáčena do roztoku pryskyřice. Takto upravená tkanina se poté zahřívá, dokud nedojde k polymeraci. Hotový prepreg je na konci linky navíjen do role, která se skladuje v chladicích místnostech při předem určených teplotách, které odpovídají druhu prepregu. Průběh výroby je řízen počítačem a po celou dobu kontrolován (3), (16), (17).



Obrázek 10 Schéma výroby prepregů (18).

2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

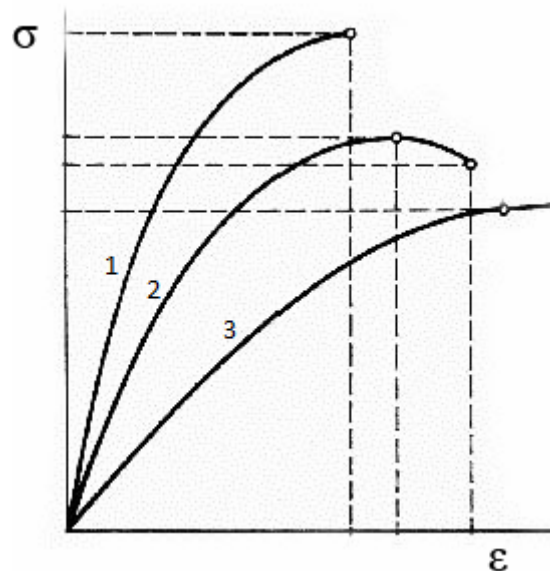
Závislost vlastností kompozitů na teplotě, době zatížení a podmínkách prostředí (vlhkost vzduchu, agresivní média, UV záření) není tak výrazná v porovnání s nevyztuženými plasty. Vliv na chování kompozitů při mechanickém namáhání má především vytvrzení matrice, rozložení plniva nebo vláken, orientace vláken, příp. jejich zakřivení, a zvláště obsah vláken. Při vzájemném srovnávání vlastností nesmíme opomenout obsah vláken. Únavové procesy, jsou mnohem složitější u vyztužených plastů než u homogenních materiálů, např. kovů nebo nevyztužených plastů. Stav poškození u těchto materiálů určuje např. vznik a rychlost šíření jednotlivé trhliny, a tím i životnost materiálu (2), (7), (19).

Při dynamických tak i statických zkouškách pevnosti kompozitů jsou to lokální poškození různého druhu, která způsobující porušení nosných vláken a předcházejí celkový lom materiálu. Ve vrstvách, kde existuje nebezpečí vzniku zejména mezi vláknové poruchy, např. při zatížení tahem kolmo ke směru vláken nebo smykem pod úhlem 45° , mohou vzniknout trhliny, které se mohou negativně projevit i u vrstev zatížených ve směru vláken. Z toho vyplývá, že vrstvy s orientací vláken 0° ke směru zatížení samy vykazují vyšší pevnost než stejné vrstvy ve spojení s vrstvami s orientací výztuže 90° ke směru zatížení, kde dochází k prvním poruchám. Při tlakovém zatížení je snížena lokální schopnost podepření vláken maticí, a to umožňuje jejich lokální vybočení. Při tahovém zatížení dochází k lokálnímu přerozdělení napětí a vzniklá vrubová napětí ke koncentracím napětí a vrubovým účinkům v přilehlých vrstvách. Výsledek měření často ovlivňují okrajové podmínky vlastní techniky provedení zkoušek. V oblasti působení síly dochází k počátečním deformacím a k bránění v příčné kontrakci. To u tuhých a vysoko pevných kompozitů s anizotropními vlastnostmi vyvolává zvýšenou úroveň trojrozměrné napjatosti v okolí upnutí zkušebních těles a může to výrazně ovlivnit výsledek zkoušky (2), (7), (19).

2.1 Zkouška ohybem.

Zkouška ohybem probíhá třibodovým nebo čtyř bodovým ohybem. Při zkoušce čtyř bodovým ohybem je výhoda v konstantním ohybovém momentu M_o po celé délce zkušebního tělesa, toto je významné při stanovování modulu pružnosti. Dvě stejné síly působí, mezi dvěma podpěrami a působíště sil jsou od nich stejně vzdálena. Při zkoušce třibodovým ohybem je v bodě zatížení napjatost s maximálním zatížením a místem lomu ve středu zkušebního tělesa. Síla působí uprostřed mezi dvěma podporami. Uprostřed tloušťky mezi vrstvami leží maximální smykové napětí. Při zkoušce v ohybu dochází současně k

namáhání tahem a tlakem. Největší tlakové napětí je v horních vrstvách, toto napětí se směrem k neutrální ose zmenšuje a přes nulové napětí přechází na tahové napětí v spodních vrstvách. Výsledkem zkoušky je křivka závislosti deformace ε na napětí σ (obr.11.), ze které lze určit charakteristické hodnoty (7), (11).



Obrázek 11 křivka závislosti deformace ε na napětí σ .

1 - lom před mezí kluzu, 2 - lom před dosažením smluvního průhybu tj. 1,5 násobku tloušťky tělesa, 3 - lom bez meze kluzu.

Ohybové napětí pro třibodový ohyb se vypočítá:

$$\sigma_{fM} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{\frac{F \cdot l}{4}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

M_o ... ohybový moment [Nmm],

W_o ... modul průřezu v ohybu [mm^3],

F ... zatěžující síla [N],

l ... vzdálenost podpěr [mm],

b ... šířka součásti [mm],

h ... výška součásti [mm],

Průhyb y se vypočítá dle ČSN EN ISO 178:

$$y = \frac{\varepsilon \cdot l^2}{6 \cdot h} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

l – vzdálenost podpěr [mm],

h – tloušťka součásti [mm],

ε – deformace [-].

Modul pružnosti E se vypočítá dle ČSN EN ISO 178:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

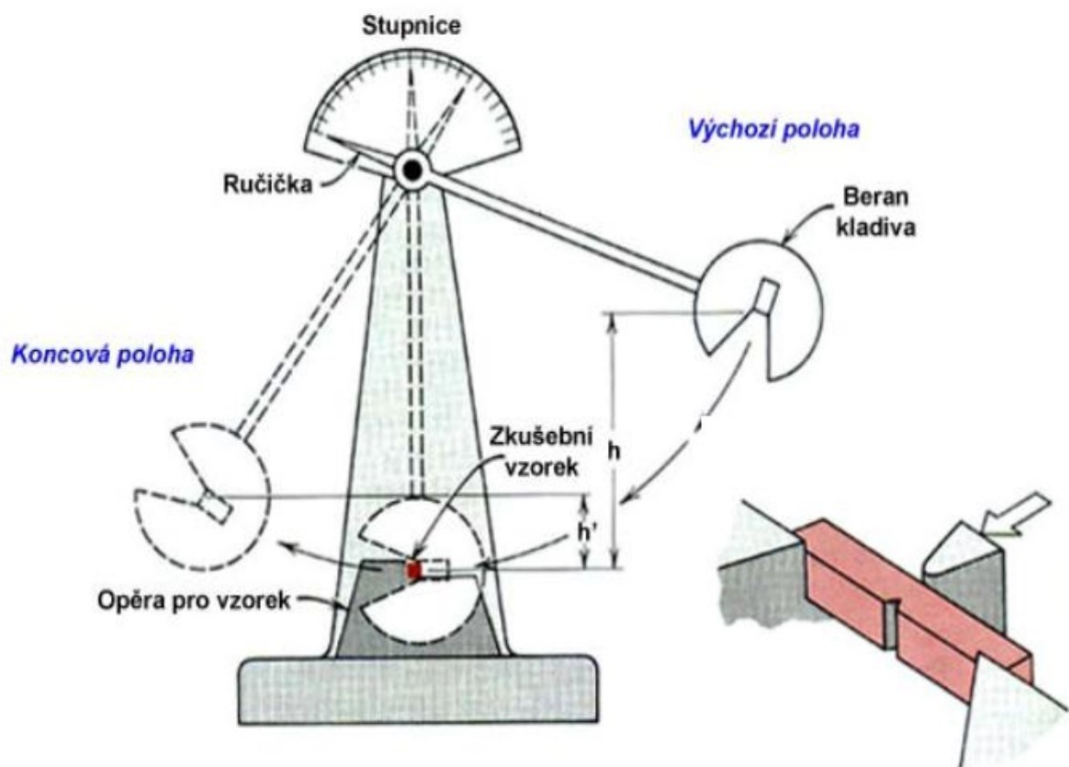
σ_1 – napětí stanovené při průhybu y_1 [MPa]

σ_2 – napětí stanovené při průhybu y_2 [MPa]

2.2 Zkouška rázem v ohybu.

Nejpoužívanější zkouška charakterizující houževnatost nebo křehkost materiálu. Zkouška je prováděna dle ČSN EN ISO 179. Podstata této zkoušky spočívá v přeražení tělesa s vrubem nebo bez vrubu. Vrub s geometrií „U“ nebo „V“ je umístěn uprostřed zkušební tělesa, a to ze strany protilehlé místu úderu kladiva. Měření musí probíhat za konstantních podmínek, tak aby nebylo ovlivněno okolními podmínkami (teplota, vlhkost, aj.).

Zkouška začíná s kladivem ve výchozí poloze. Mezi opěry se umístí zkoumaný zkušební těleso a kladivo se uvolní. Polohová energie kladiva se mění na kinetickou. V nejnižším místě své dráhy kladivo udeří do zkušební tělesa. Při přeražení zkušební tělesa kladivo ztratí část své kinetické energie a dostane se do koncové polohy. Práce potřebná na přeražení zkušební tělesa představuje rozdíl polohových energií (11), (20).



Obrázek 12 Charpyho kladivo (21).

2.3 Zkouška únavy.

Pro kompozity vyztužené vlákny je Wöhlerova křivka nejčastěji používána k popisu jejich únavového chování. Kritériem únavy je lom, tj. úplné porušení zkušebního tělesa. Vyhodnocení výsledků zkoušek statistickými postupy dovoluje poměrně dobře hodnotit vhodnost materiálů pro jejich využití v podmínkách únavového namáhání.

Pro dynamicky zatížené části je lom, pokud se zřetelně projeví, jakožto jediné kritérium únavy nedostatečný, neboť většina vlákní vyztužených plastů s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou více nebo méně vykazuje pokles tuhosti. Tento pokles je přípustný např. při použití vlákní vyztužených plastů pro konstrukční prvky, kde se může změna vlastností s počtem cyklů měnit v jistých mezích. Vezmeme-li jako kritérium únavy určitý pokles tuhosti (obvykle o 10 nebo 20 %) a vyneseme-li tyto body do Wöhlerova diagramu, získáme tak další informace o časovém průběhu únavy. Ke stanovení zbytkové pevnosti je pak zkušební těleso po určitém počtu cyklů zatížení podrobena statické zkoušce.

Je-li k určení chování při opakovaném zatížení skelného vláknitého laminátu použito zmíněné kritérium tuhosti, je nutno sestavit diagram napětí-deformace. Ten se vyznačuje zlomem v oblasti největšího nárůstu poškození. Tuhost zkušebního tělesa v okamžiku lomu odpovídá směrnici přímky mezi bodem odpovídajícím lomu a počátkem souřadnic. Při

dynamickém namáhání se průběžně měří tuhost zkušebního tělesa a za lom se považuje stav, kdy tuhost poklesne na úroveň stanovenou při statické zkoušce. Kritérium tuhosti platí pro lamináty s výztuží z uhlíkových vláken omezeně, neboť diagram napětí-deformace vykazuje progresivní průběh, tj. s rostoucím zatížením roste tuhost (2), (7), (8), (10), (12), (14), (19). Vedle kvalitativního popisu jevů poškození (oddělení matrice a vlákna, trhliny v matrici, inter – a intralaminární delaminace, lom vlákna) existují postupy ke stanovení kvantitativního popisu průběhu poškození, které se dělí na diskrétní a integrální postupy. U diskrétních postupů jsou určitá poškození (např. podélné a příčné trhliny) stanovena kvantitativně a vynesena do diagramu v závislosti na počtu cyklů. Jako integrální postup k popisu průběhu cyklického namáhání se pro mnohé kompozity (SMC, GFT, UP-R/GF, lamináty vyztužené tkaninou či rohoží) osvědčilo měření hystereze. Základem této metody je vyhodnocení změn hysterezní smyčky během únavy materiálu. Tyto nevratné změny souvisejí s vývojem mikroskopických poškození v jeho struktuře (2), (7), (8), (10), (12), (14), (19).

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části je pomocí statických a dynamických zkoušek studovat ohybové vlastnosti profilů hokejových holí.

- a) s výztuží 20 % skelných vláken a 80 % uhlíkových vláken.
- b) s výztuží 80 % skelných vláken a 20 % uhlíkových vláken.
- c) s výztuží 80 % skelných vláken a 20 % uhlíkových vláken a vyšším obsahem matrice.

Přesný počet vrstev, typu prepregů, složení a množství matrice je výrobním tajemstvím firmy STOON a nebylo majitelem firmy zveřejněno.

Pomocí výsledků statických a dynamických zkoušek určit, který poměr vláken hokejové hole je vhodnější pro hru hokeje a je výhodné pokračovat v jeho výrobě firmou STOON.

4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES A PROFILŮ

Zkušební tělesa a profily byly vyřezány z 10 profilů hokejových holí, 4 profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken, 4 profily s vyšším obsahem skelných vláken a 2 profily s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.



Obrázek 13 Profily hokejových holí.

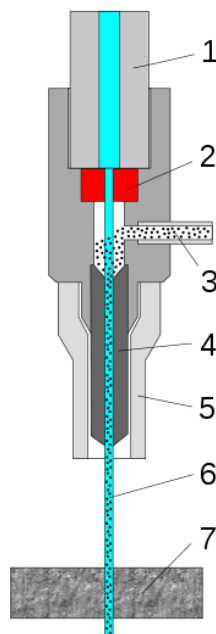
Dva profily hokejových holí s vyšším obsahem uhlíkových vláken byly naděleny na zkušební tělesa a dva profily na zkušební profily o délce 250 mm. Dva profily hokejových holí s vyšším obsahem skelných vláken byly naděleny na zkušební tělesa a dva profily na zkušební profily o délce 250 mm. Dva profily hokejových holí s vyšším obsahem skelných vláken a matrice byly naděleny na zkušební profily o délce 250 mm. Z profilu hole bylo vyřezáno 26 zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 14125 o rozměrech 15 x 100 mm, osa zkušebního tělesa byla totožná s osou strany profilu, ze které bylo zkušební těleso vyřezáno. Z profilu hole bylo uříznuto 5 zkušebních profilů o délce 250 mm. Na každém profilu hole, byl z horní strany ponechán 20 mm okraj. Zkušební tělesa a profily byly označeny svým pořadovým číslem a číslem profilu hole. Pro přesné určení, ze které části profilu hole byly. Zkušební tělesa i profily byly číslovány od horní strany profilu hole směrem ke spodní straně profilu hole. Spodní strana profilu hole je zúžená pro osazení další částí hokejové hole. Tloušťka zkušebních těles a profilů byla dána způsobem výrobou profilů hokejové hole a

chybami při výrobě. Rozdílnou tloušťku zkušebních těles zapříčinily chyby technologie při výrobě profilů holí.



Obrázek 14 Značení zkušebních těles.

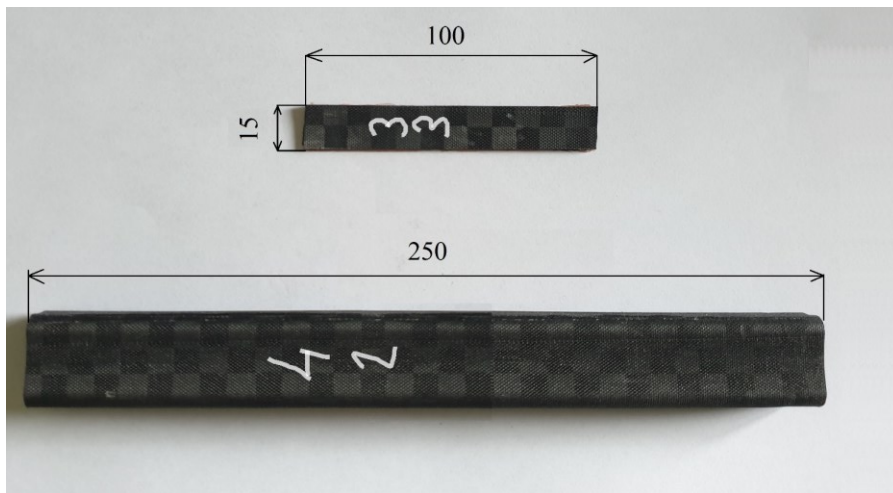
Z důvodu co nejmenšího tepelného a mechanického ovlivnění vlastností zkušebních těles se autor rozhodl pro dělení pomocí vodního paprsku.



Obrázek 15 Princip řezání vodním paprskem (22).

- 1 - přívod vysokotlaké vody, 2 - tryska (rubín nebo diamant), 3 - abrazivo, 4 - směšovací trubice, 5 - držák, 6 - vodní paprsek s abrazivem, 7 - obráběný materiál.

Tento způsob dělení zkušebních těles se posléze ukázal jako ne zcela vhodný. Při tomto způsobu řezání, by bylo z profilu vyrobeno pouze 13 a ne 26 zkušebních těles. Zkušební těleso ze zadní strany profilu nesplňovalo toleranci dle normy ČSN EN ISO 14125, z důvodu odklonění vodního paprsku při průchodu dutým profilem hole. A proto byly profily vodním paprskem naděleny pouze na délku 100 mm a 250 mm. Vyřezání samotných zkušebních těles ze 100 mm částí probíhalo řezáním ruční pilou a zabroušení pomocí smirkového papíru.



Obrázek 16 Rozměry zkušebních těles a profilů.



Obrázek 17 Dělení zkušebních těles ruční pilou.

4.1 Zkušební tělesa a profily pro třibodový ohyb.

Bylo použito 20 zkušebních těles 15x100 mm a to 10 zkušebních těles ze 2 profilů holí s vyšším obsahem uhlíkových vláken a 10 zkušebních těles ze 2 profilů holí s vyšším obsahem skelných vláken.

Tabulka 1 Značení zkušebních těles pro zkoušku třibodovým ohybem.

Materiál	P. č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
80 % uhlíkových vláken	Označení	1/2	2/2	3/2	4/2	5/2	1/4	2/4	3/4	4/4	5/4
80 % skelných vláken	Označení	1/2	2/2	3/2	4/2	5/2	1/4	2/4	3/4	4/4	5/4

Dále bylo použito 12 zkušebních profilů 19,5 x 29,5 x 250 mm a to 4 profily ze 2 profilů holí s vyšším obsahem uhlíkových vláken, 4 profily ze 2 profilů holí s vyšším obsahem skelných vláken a 4 profily ze 2 profilů holí s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.

Tabulka 2 Značení profilů pro zkoušku třibodovým ohybem.

Materiál	P. č.	1	2	3	4
80 % uhlíkových vláken	Označení	1/1	2/1	1/2	2/2
80 % skelných vláken	Označení	1/1	2/1	1/2	2/2
80 % skelných vláken a matrice	Označení	1/1 J	2/1 J	1/2 J	2/2 J

4.2 Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu.

Bylo použito 20 zkušebních těles 15x100 mm a to 10 zkušebních těles ze 2 profilů holí s vyšším obsahem uhlíkových vláken a 10 zkušebních těles ze 2 profilů holí s vyšším obsahem skelných vláken.

Tabulka 3 Značení zkušebních těles pro rázovou zkoušku.

Materiál	P. č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
80 % uhlíkových vláken	Označení	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3
80 % skelných vláken	Označení	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3

4.3 Zkušební profily pro únavovou zkoušku.

Bylo použito 17 zkušebních profilů 19,5 x 29,5 x 250 mm a to 6 profilů ze 2 profilů holí s vyšším obsahem uhlíkových vláken, 5 profilů ze 2 profilů holí s vyšším obsahem skelných vláken a 6 profilů ze 2 profilů holí s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.

Tabulka 4 Značení profilů pro únavovou zkoušku.

Materiál	P. č.	1	2	3	4	5	6
80 % uhlíkových vláken	Označení	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	5/2
80 % skelných vláken	Označení	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	
80 % skelných vláken a matrice	Označení	J 3/1	J 3/2	J 4/1	J 4/2	J 5/1 J	J 5/2

5 STATICKÉ ZKOUŠKY

U zkušebních těles a profilů byla provedena zkouška tříbodovým ohybem. Zkoušky probíhaly na zkušebním stroji v laboratoři UTB, za pokojové teploty 20 °C. Poloha zkušebního tělesa při zkoušce, byla vždy vnější stranou k pohyblivé části stroje. Celé profily byly zkoušeny zatížením na delší stranu profilu.

5.1 Zkouška tříbodovým ohybem.

Zkouška byla prováděna na zkušebním stroji Zwick 1456. Zkušební stroj je vybaven testovacím softwarem Test Expert. Stroj slouží k provádění zkoušek v tahu, tlaku a ohybu. Tohoto lze docílit používáním různých upínacích přípravků. Dále je stroj vybaven teplotní komorou pro zkoušky při různých teplotách. Výpočty provádí software na základě naměřených hodnot. Vzdálenost spodních podpěr pro zkušební tělesa byla 60 mm a pro profily 190 mm (23).



Obrázek 18 Zkušební stroj Zwick 1456.

5.1.1 Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

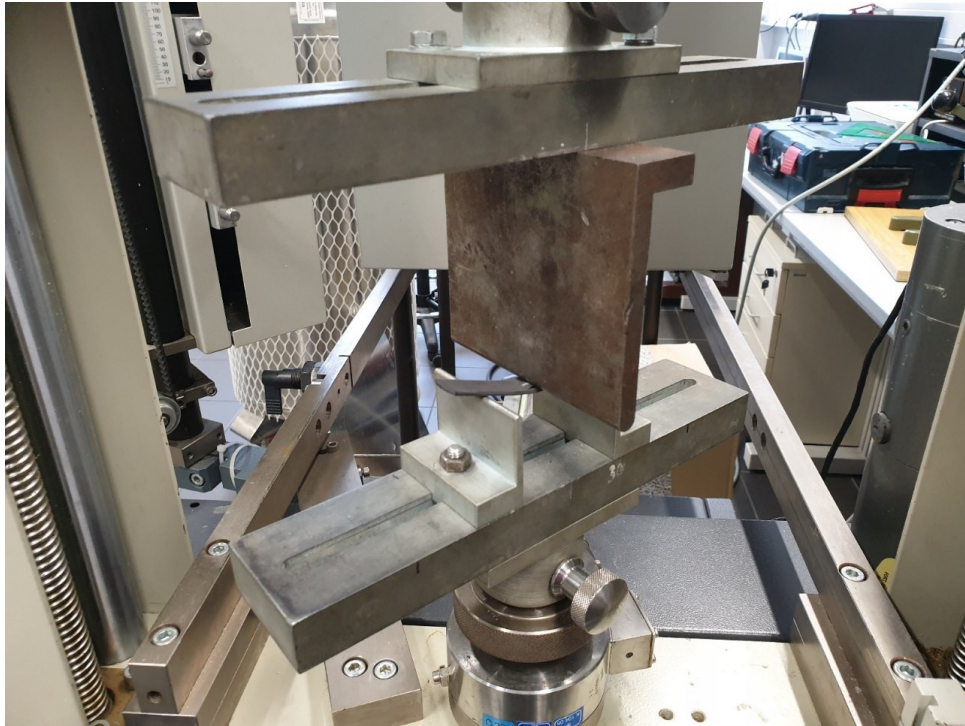
Nejprve bylo odzkoušeno 10 zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken, a to v pořadí 1-5/4 a 1-5/2 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.5. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 5 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

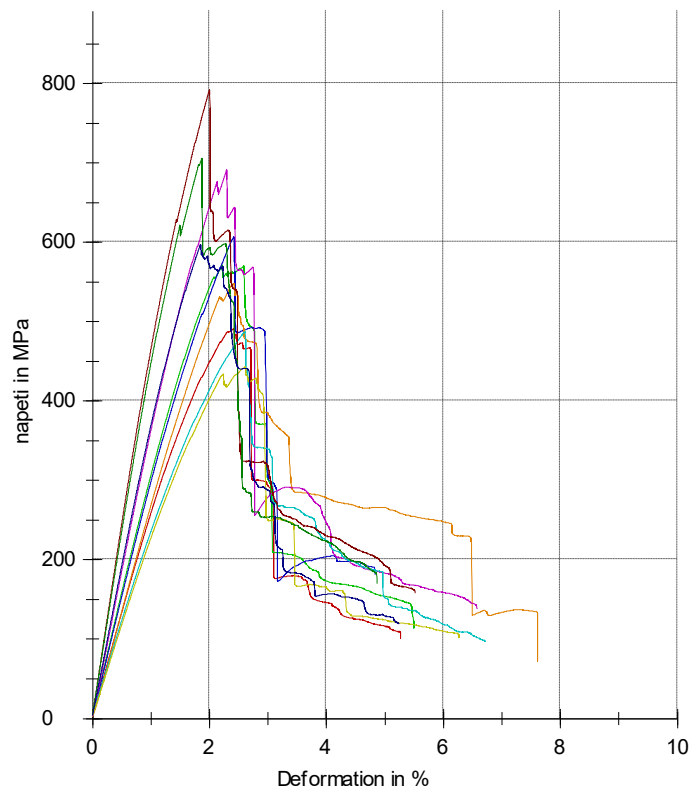
N=10	E	F max	σ_{fM}	y at F max	W to F max	Tloušťka zk. tělesa
Označení / Jednotka	[MPa]	[N]	[MPa]	[mm]	[Nmm]	[mm]
1/2	24100	249	472	9,4	1344,68	1,78
1/4	26500	263	476	8,5	1304,22	1,82
2/2	23000	269	429	8,6	1400,17	1,94
2/4	30900	319	553	7,6	1371,87	1,86
3/2	48700	315	767	8,2	1434,63	1,57
3/4	30200	392	588	7,7	1683,21	2
4/2	46700	291	682	7,5	1231,23	1,6
4/4	26300	428	531	7	1693,37	2,2
5/2	37800	312	578	6,6	1127,45	1,8
5/4	36900	433	669	7,5	1822,64	1,97
\bar{x}	33100	327	575	7,9	1441,35	1,85
s	9140	67	106	0,8	222,31	0,19



Obrázek 19 Zkušební tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce v třibodovém ohybu.



Obrázek 20 Zkouška zkušebního tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken.



Graf 1 Závislost deformace ϵ na napětí σ u zkušebních těles s vyšším obsah uhlíkových vláken.

5.1.2 Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.

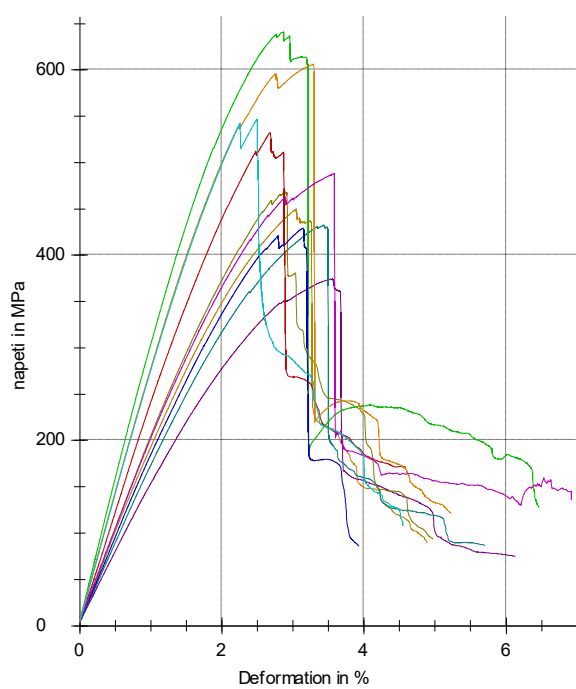
Dále bylo odzkoušeno 10 zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken, a to v pořadí 1-5/2 a 1-5/4 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.6. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 6 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.

N=10	E	F max	σ_{fM}	y at F max	W to F max	Tloušťka zk. tělesa
Označení / Jednotka	[MPa]	[N]	[MPa]	[mm]	[Nmm]	[mm]
1/2	19700	227	435	11	1461,83	1,77
1/4	31000	255	621	11,7	1793,37	1,57
2/2	15500	196	363	12,6	1516,28	1,8
2/4	18200	227	398	10,9	1545,07	1,85
3/2	17200	239	419	11,9	1695,4	1,85
3/4	28300	250	586	13,2	2101,99	1,6
4/2	20200	290	453	9,4	1570,7	1,96
4/4	20300	284	472	12,1	2143,89	1,9
5/2	23400	330	515	8,7	1610,4	1,96
5/4	27600	255	529	9,4	1394,9	1,7
\bar{x}	22100	255	479	11,1	1683,38	1,79
s	5220	38	83	1,5	257,54	0,14



Obrázek 21 Zkušební tělesa s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce v tříbodovém ohybu.



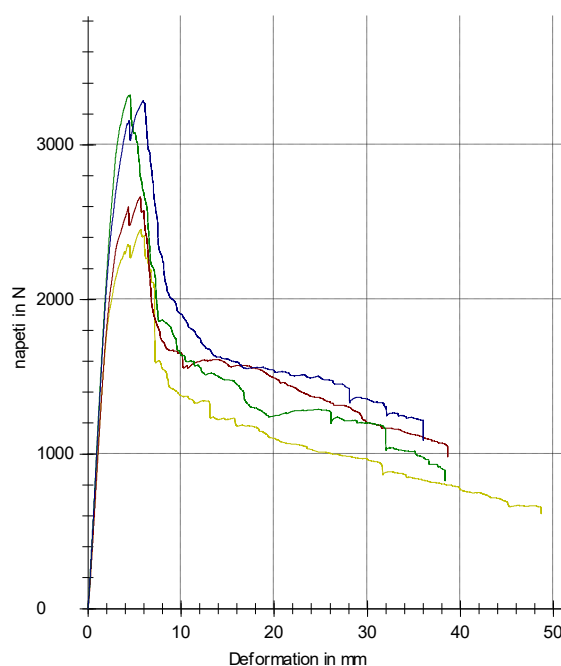
Graf 2 Závislost deformace ε na napětí σ u zkušebních těles s vyšším obsah skelných vláken.

5.1.3 Zkouška profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

Nejprve byly odzkoušeny 4 profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken, a to v pořadí 1/1, 1/2, 2/1 a 2/2 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.7. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole, ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 7 Hodnoty profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

N=4	F max	σ_{fM}	y at F max	W to F max	Rozměr profilu
Označení / Jednotka	[N]	[MPa]	[mm]	[Nmm]	[mm]
1/1	2450	1633	5,7	10028,53	19,5x29,5x1,5
1/2	2660	998	5,6	10516,67	19,5x29,5x2
2/1	3320	1537	4,5	9599,52	19,5x29,5x1,8
2/2	3280	1921	5,9	13479,65	19,5x29,5x1,6
\bar{x}	2928	1522	5,4	10906,09	19,5x29,5x1,73
s	439	386	0,6	1756,14	0x0x0,22



Graf 3 Závislost průhybu na síle u profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.



Obrázek 22 : Profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce v tříbodovém ohybu.

5.1.4 Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken.

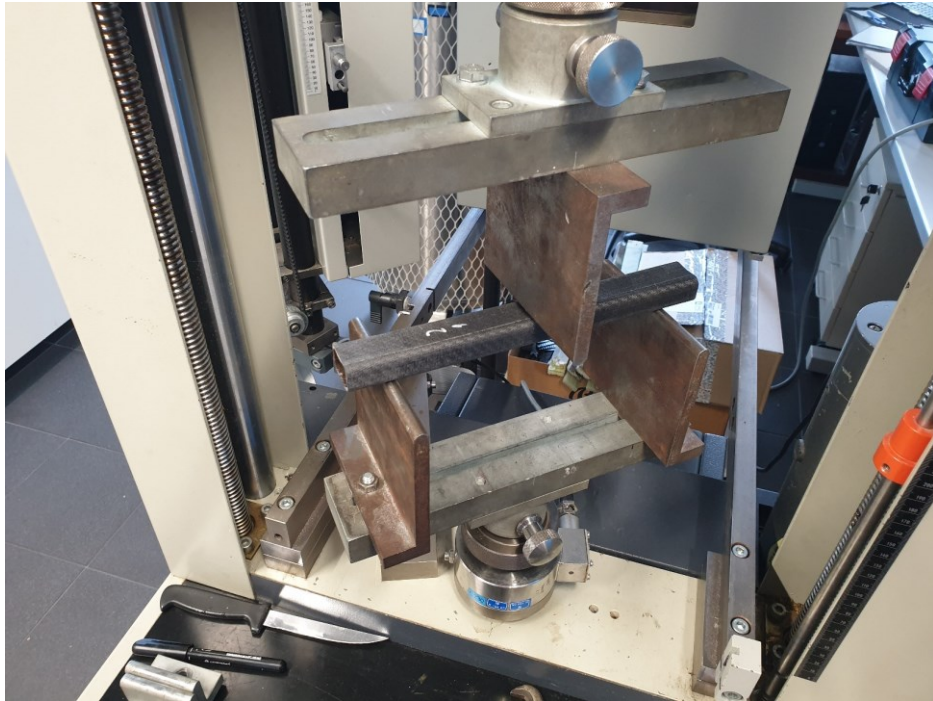
Dále byly odzkoušeny 4 profily s vyšším obsahem skelných vláken, a to v pořadí 1/1, 1/2, 2/1 a 2/2 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.8. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole, ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 8 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken.

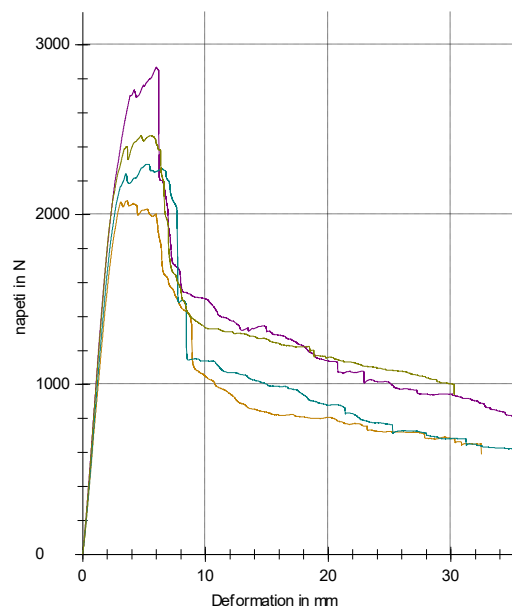
N=4	F max	σ_{fM}	y at F max	W to F max	Rozměr profilu
Označení / Jednotka	[N]	[MPa]	[mm]	[Nmm]	[mm]
1/1	2080	1080	3,6	4631,57	19,5x29,5x1,7
1/2	2870	1682	6	12011,57	19,5x29,5x1,6
2/1	2300	1065	5,4	8996,86	19,5x29,5x1,8
2/2	2470	926	5,5	9979,38	19,5x29,5x2
\bar{x}	2430	1188	5,1	8904,85	19,5x29,5x1,78
s	333	336	1,1	3113,18	0x0x0,17



Obrázek 23 Profily s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce v tříbodovém ohybu.



Obrázek 24 Zkouška profilu s vyšším obsahem skelných vláken.



Graf 4 Závislost průhybu na síle u profilů s vyšším obsah skelných vláken.

5.1.5 Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.

Jako poslední byly odzkoušeny 4 profily s vyšším obsahem skelných vláken a matrice, a to v pořadí J 1/1, J 1/2, J 2/1 a J 2/2 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.9. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole, ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 9 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.

N=4	F max	σ_{fM}	y at F max	W to F max	Rozměr profilu
Označení / Jednotka	[N]	[MPa]	[mm]	[Nmm]	[mm]
J 1/1	1690	1391	4,4	4631,57	19,5x29,5x1,35
J 1/2	2380	892	5,2	12011,57	19,5x29,5x2
J 2/1	1810	887	4,1	8996,86	19,5x29,5x1,75
J 2/2	2620	983	5,8	9979,38	19,5x29,5x2
\bar{x}	2130	1038	4,8	7070,27	19,5x29,5x1,78
s	448	239	0,8	2864,67	0x0x0,31

Graf 5 Závislost průhybu na síle u profilů s vyšším obsah skelných vláken a matrice.



Obrázek 25 Profily s vyšším obsahem skelných vláken a matrice po zkoušce v tříbodovém ohybu.

6 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY

U zkušebních těles byla provedena zkouška rázem v ohybu. U profilů byla provedena únavová zkouška. Zkoušky probíhaly na zkušebních strojích v laboratoři UTB, za pokojové teploty 20°C. Poloha zkušebního tělesa při zkoušce, byla vždy vnější stranou k pohyblivé části stroje. Celé profily byly zkoušeny zatížením na delší stranu profilu.

6.1 Zkouška rázem v ohybu.

Zkouška byla prováděna na zkušebním stroji Zwick/Roell HIT25P. Zkušební stroj je vybaven testovacím softwarem Test Expert II. Zařízení slouží k provádění dynamických zkoušek. Výpočty provádí software na základě naměřených hodnot. Rázové Charpyho kladivo 25 J, vybavené automatickým odečtem korigované energie E_c spotřebované k přeražení zkušebního tělesa s možností automatického výpočtu rázové houževnatosti dle zadaných vstupních parametrů. Plně stavitelný držák zkušebních těles dle ISO 179 (možnost nastavení podélně i příčně včetně vyrovnání (levé a pravé), ISO 180 a ISO 8256 metoda A. Splňuje požadavky normy ISO 179-1, ISO 180, ISO 8256. Zkouška je celá ovládána ručně: zakládání zkušebního tělesa, zvedání / spuštění kladiva. Vzdálenost podpěr pro zkušební tělesa byla nastavena na 62 mm (23).



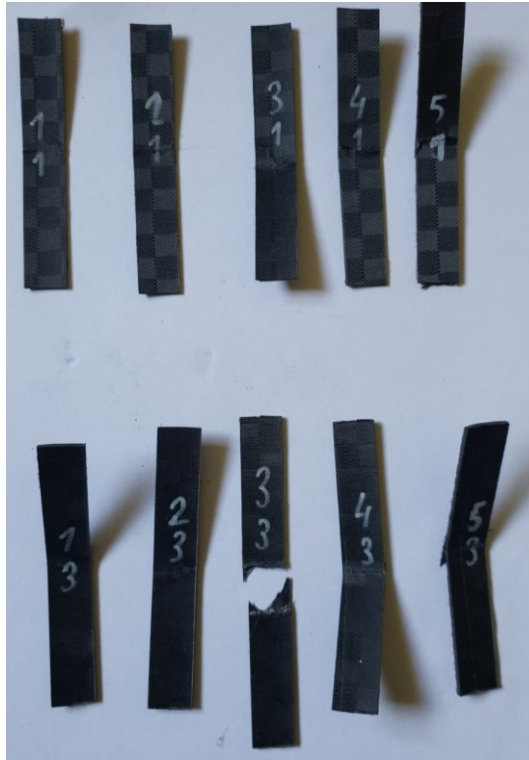
Obrázek 26 Zkušební stroj Zwick/Roell HT 25P před zkouškou.

6.1.1 Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

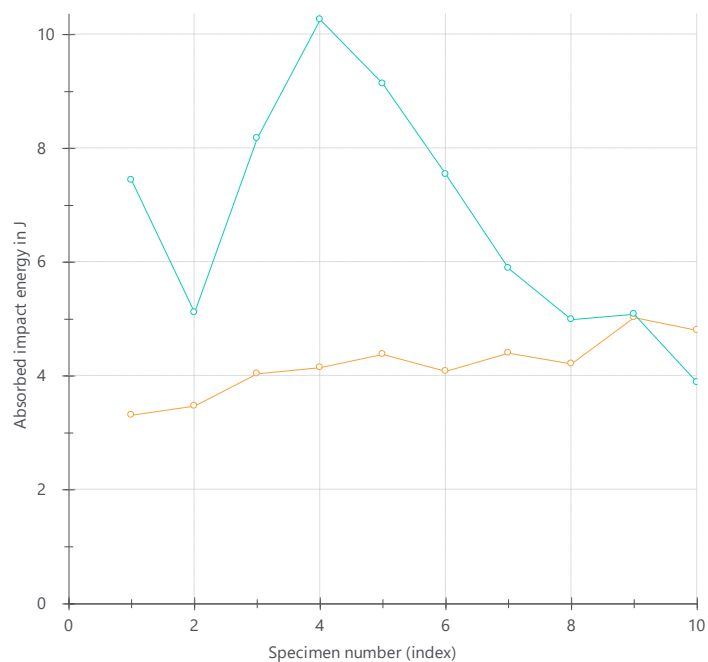
Nejprve bylo odzkoušeno 10 zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken, a to v pořadí 1-5/1 a 1-5/3 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.10. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle, umístění na profilu hole, ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 10 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

N=10	ak
Označení / Jednotka	[kJ/m ²]
1/1	157,69
1/3	171,22
2/1	165,49
2/3	184,78
3/1	150,37
3/3	160,61
4/1	159,98
4/3	165,99
5/1	160,64
5/3	164,19
\bar{x}	164,1
s	9,16



Obrázek 27 Zkušební tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce rázem v ohybu.



- zkušební tělesa s vyšším obsahem skelných vláken
- zkušební tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken

Graf 6 Absorbovaná energie jednotlivých zkušebních těles.

6.1.2 Zkouška zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.

Dále bylo odzkoušeno 10 zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken, a to v pořadí 1-5/1 a 1-5/3 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.11. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle, umístění na profilu hole, ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 11 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.

N=10	ak
Označení / Jednotka	[kJ/m ²]
1/1	221,5
1/3	227,69
2/1	149,04
2/3	178,72
3/1	237,98
3/3	151,28
4/1	279,4
4/3	154,22
5/1	235,13
5/3	158,08
\bar{x}	199,3
s	46,53



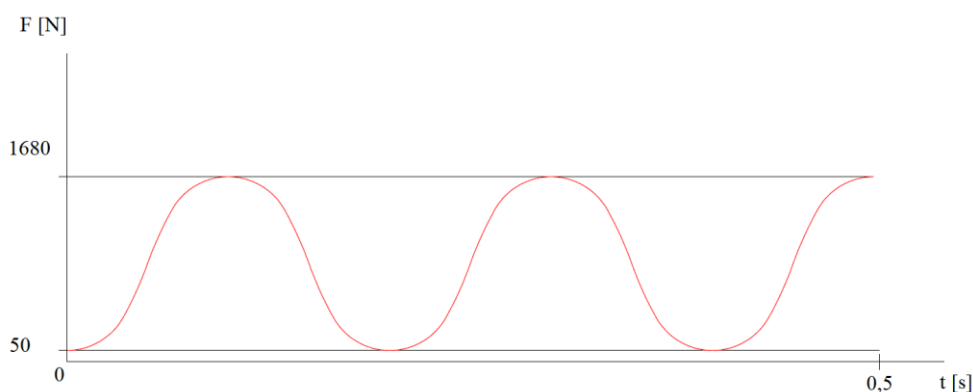
Obrázek 28 Zkušební stroj Zwick/Roell HIT25P po zkoušce.



Obrázek 29 Zkušební tělesa s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce rázem v ohybu.

6.2 Únavová zkouška

Zkouška byla prováděna na servohydraulickém zkušebním stroji Zwick/Roell HC25. Zkušební stroj je vybaven testovacím softwarem Test Expert. Zařízení slouží k provádění statických a dynamických zkoušek všech typů do 25 kN, včetně zkoušek ohybu. Výpočty provádí software na základě naměřených hodnot. Plně stavitelný držák zkušebních těles. Síla $F_{min.}$ byla nastavena na 50 N, $F_{max.}$ na 1680 N a frekvence 5 Hz. Vzdálenost podpěr pro profily byla nastavena na 190 mm (23).



Obrázek 30 Zátěžový cyklus únavové zkoušky.



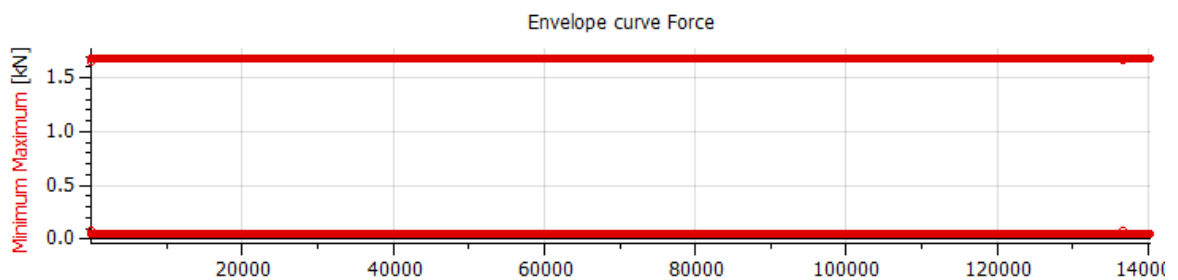
Obrázek 31 Zkušební stroj Zwick/Roell HC25

6.2.1 Zkouška profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

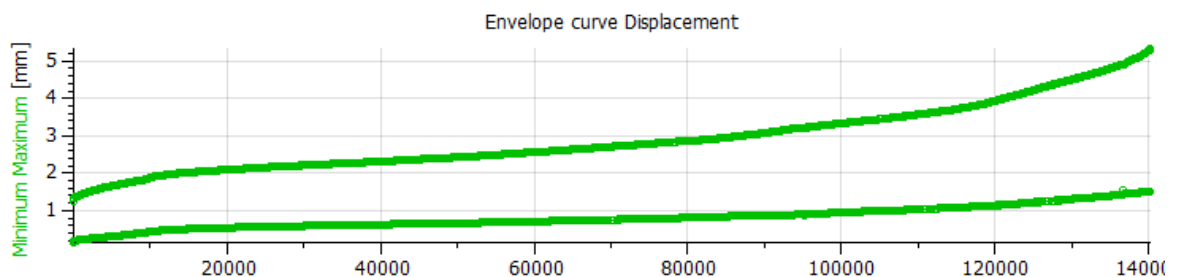
Nejprve bylo odzkoušeno 6 profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken, a to v pořadí 3/2, 3/1, 4/1, 4/2, 5/1 a 5/2 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.12. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole, ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 12 Hodnoty profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.

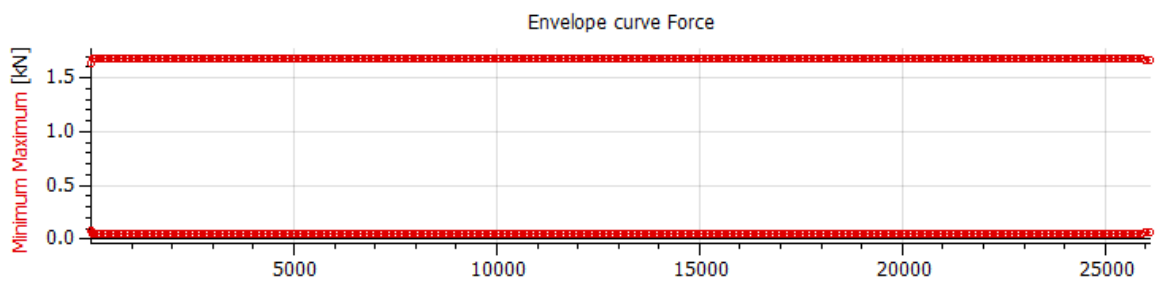
N=6	F min	F max	Počet cyklů	Rozměr profilu
Označení / Jednotka	[N]	[N]	-	[mm]
3/1	50	1680	14020	19,5x29,5
3/2	50	1680	26100	19,5x29,5
4/1	50	1680	15800	19,5x29,5
4/2	50	1680	23400	19,5x29,5
5/1	50	1680	598000	19,5x29,5
5/2	50	1680	366700	19,5x29,5
\bar{x}	50	1680	174003	-
s	0	0	249834	-



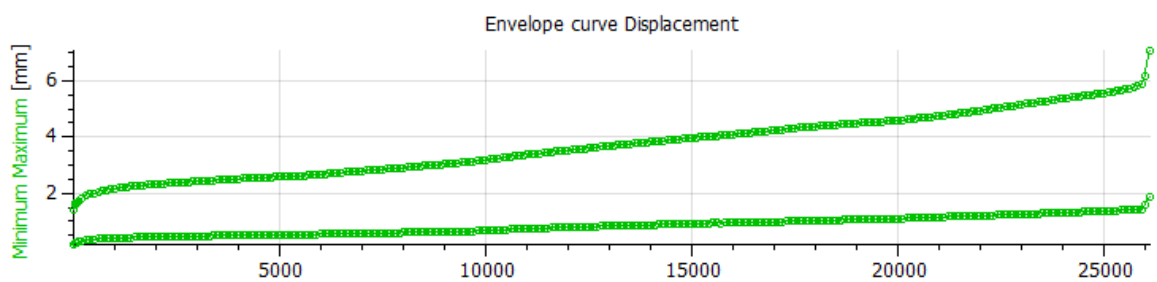
Graf 7 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/1.



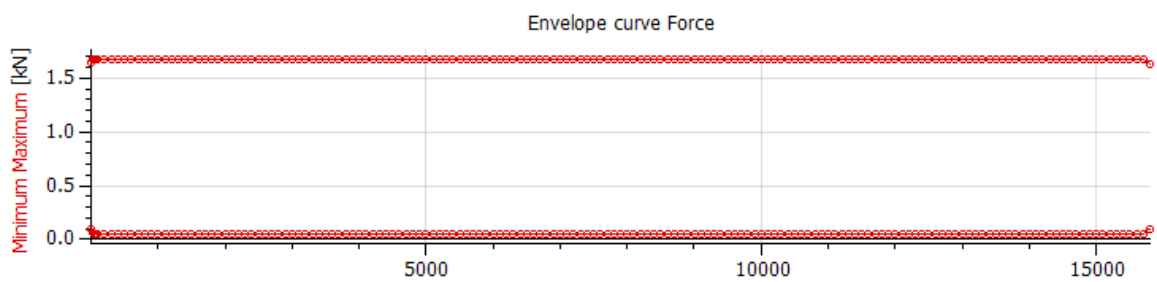
Graf 8 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/1.



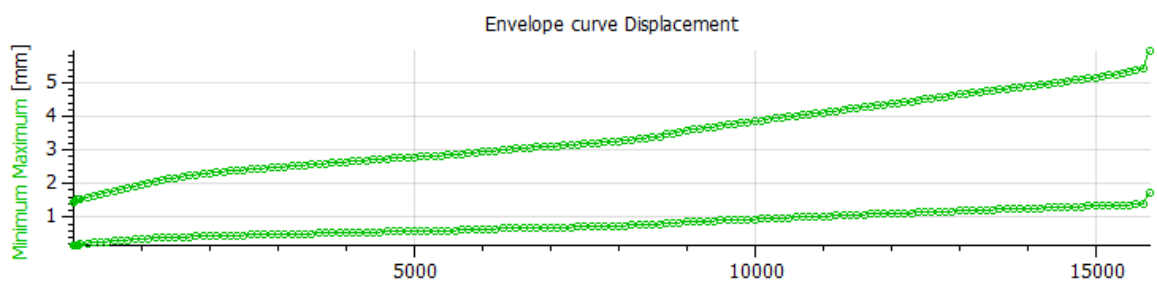
Graf 9 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/2.



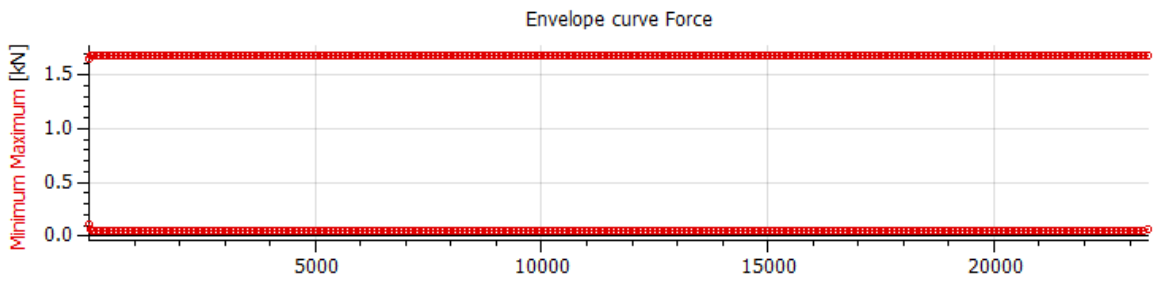
Graf 10 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/2.



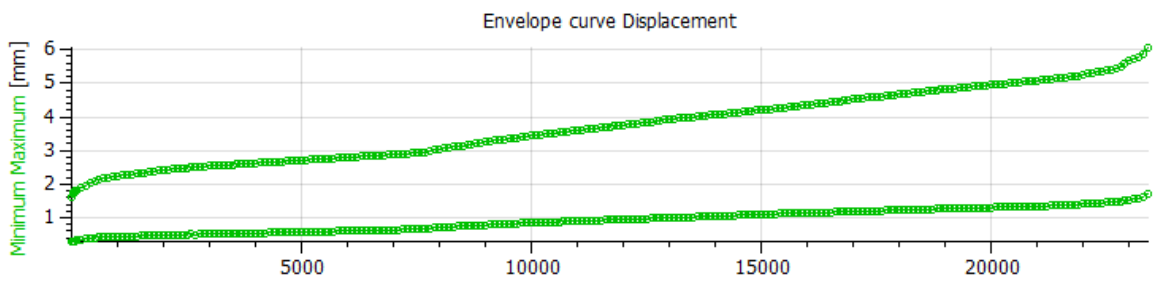
Graf 11 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/1.



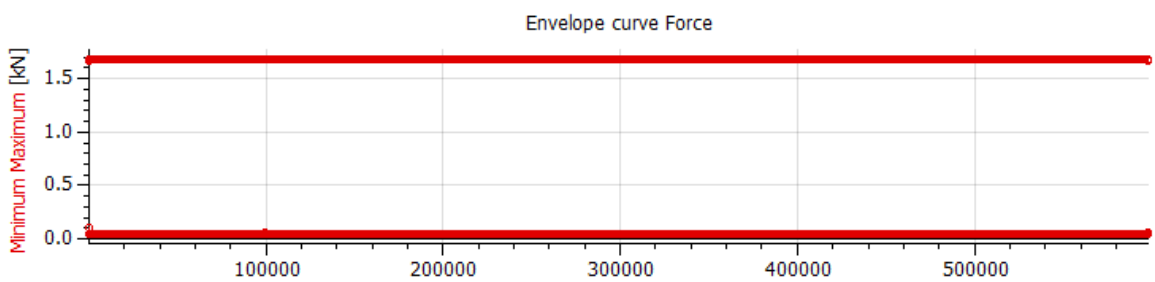
Graf 12 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/1.



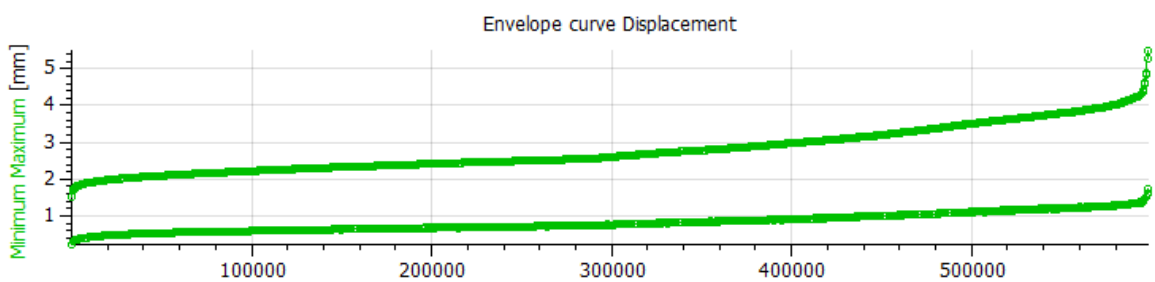
Graf 13 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/2.



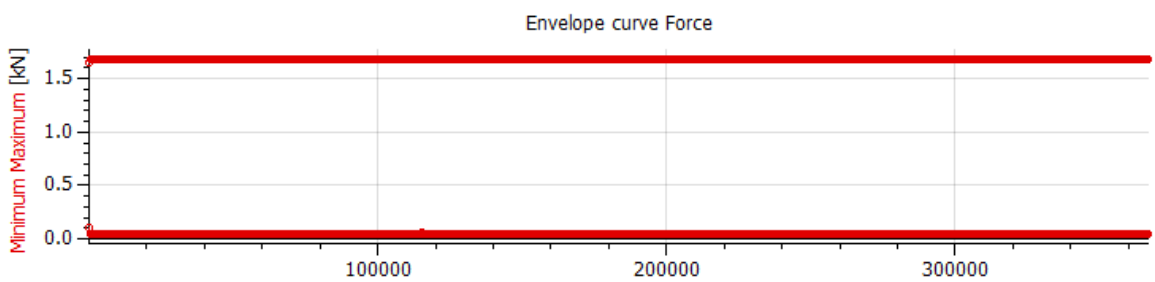
Graf 14 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/2.



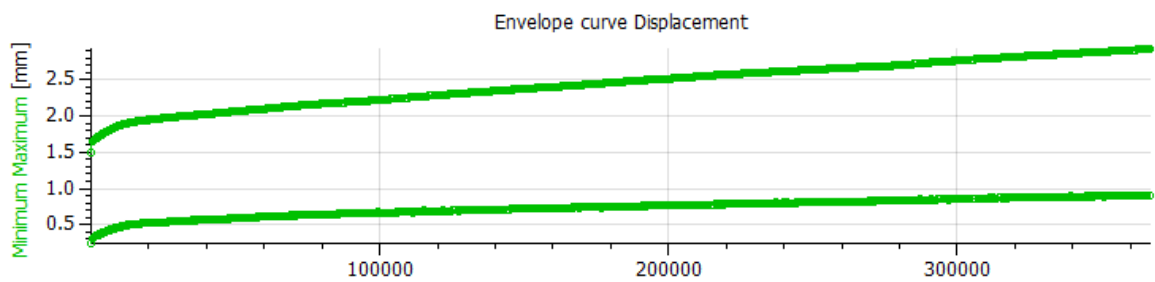
Graf 15 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 5/1.



Graf 16 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 5/1.



Graf 17 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 5/2.



Graf 18 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 5/2.



Obrázek 32 Profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce únavy.

6.2.2 Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken.

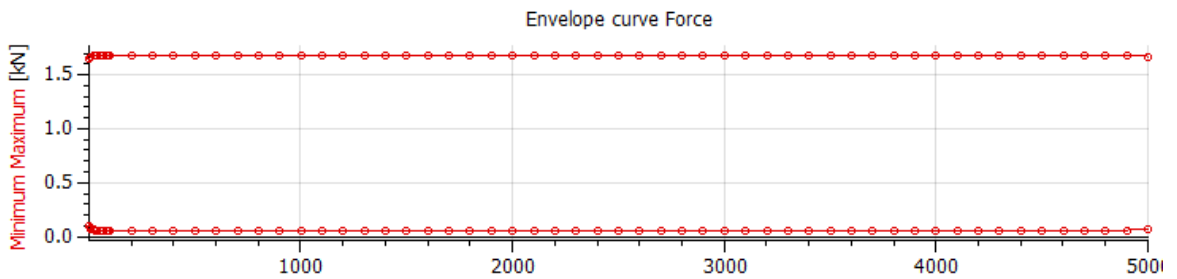
Dále bylo odzkoušeno 5 profilů s vyšším obsahem skelných vláken, a to v pořadí 3/1, 3/2, 4/1, 4/2 a 5/1 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.13. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole, a i při zkoušce.

Tabulka 13 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken.

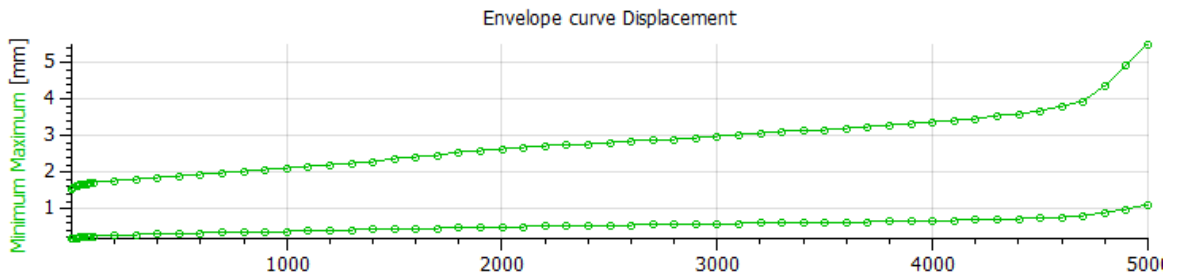
N=5	F min	F max	Počet cyklů	Rozměr profilu
Označení / Jednotka	[N]	[N]	-	[mm]
3/1	50	1680	5000	19,5x29,5
3/2	50	1680	8100	19,5x29,5
4/1	50	1680	2400	19,5x29,5
4/2	50	1680	2900	19,5x29,5
5/1	50	1680	481300	19,5x29,5
\bar{x}	50	1680	99940	-
s	0	0	213199	-



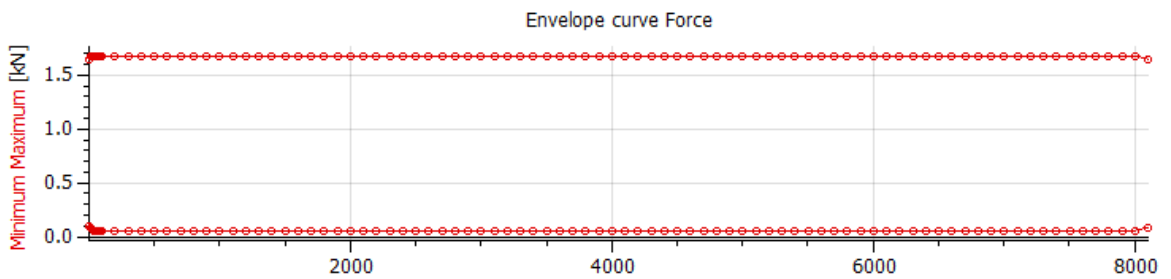
Obrázek 33 Profil s vyšším obsahem skelných vláken při zkoušce.



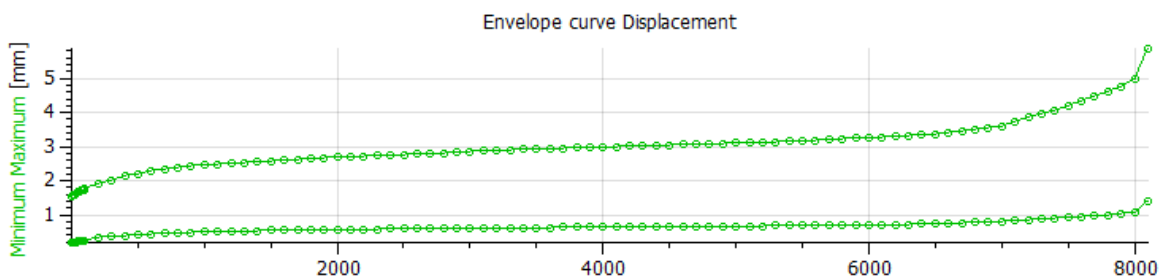
Graf 19 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/1.



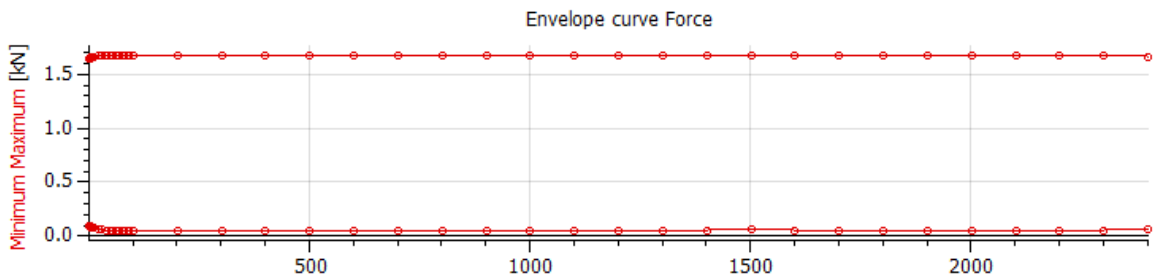
Graf 20 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/1.



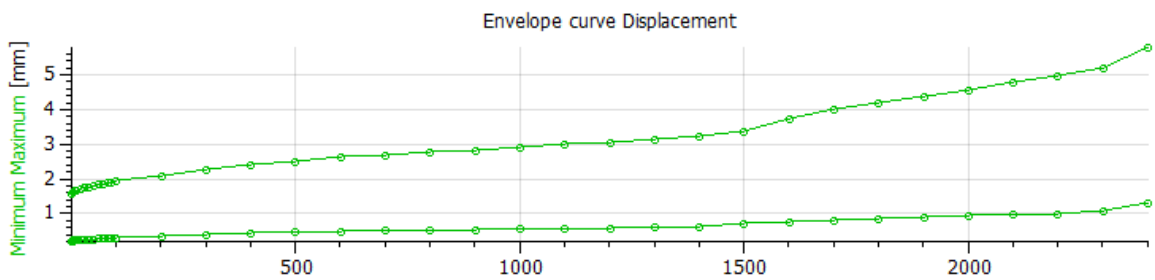
Graf 21 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/2.



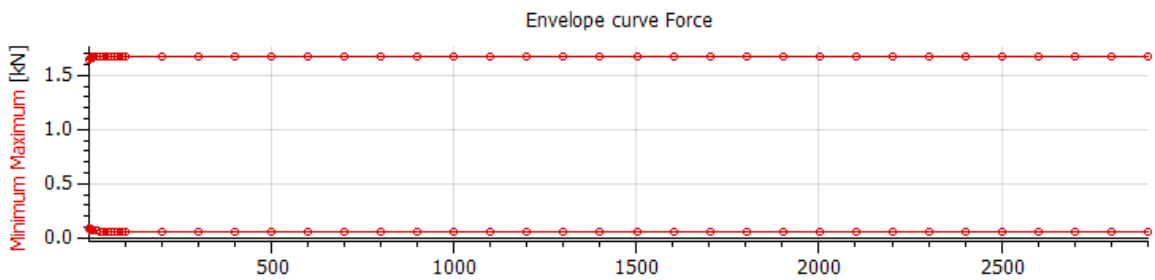
Graf 22 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/2.



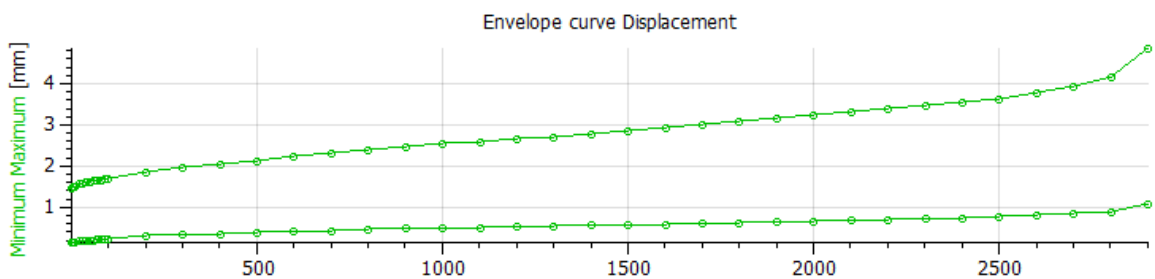
Graf 23 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/1.



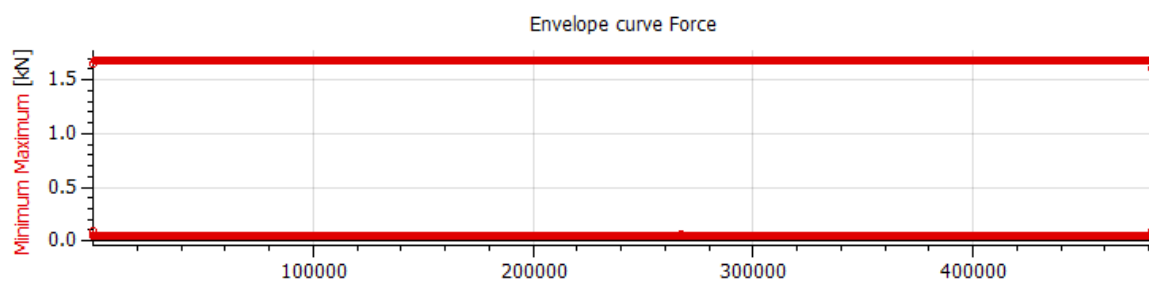
Graf 24 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/1.



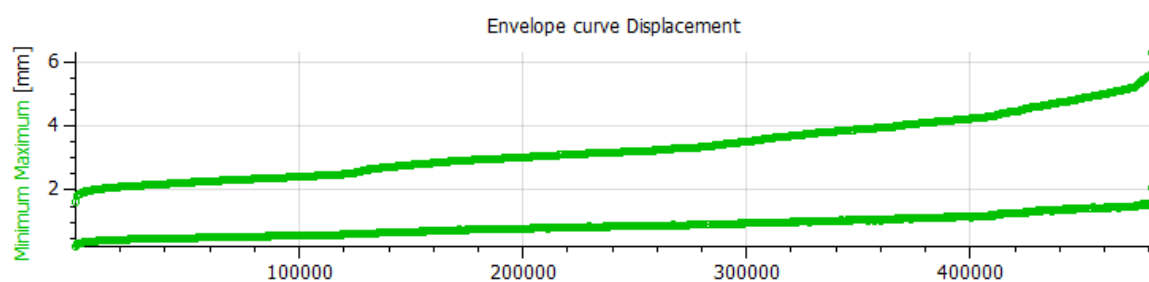
Graf 25 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/2.



Graf 26 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/2.



Graf 27 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 5/1.



Graf 28 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 5/1.



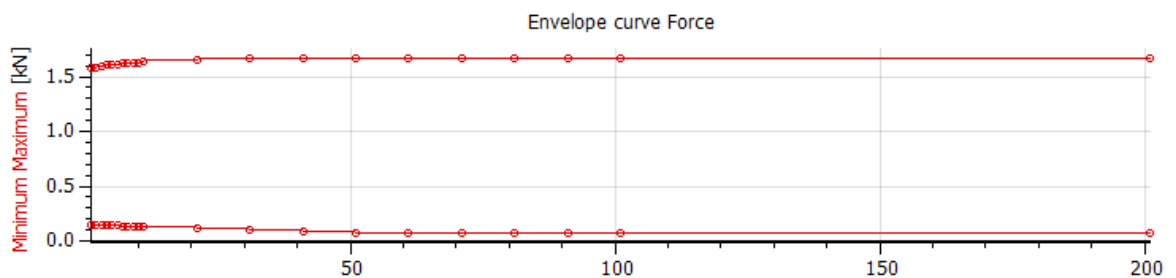
Obrázek 34 Profily s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce únavy.

6.2.3 Zkouška profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.

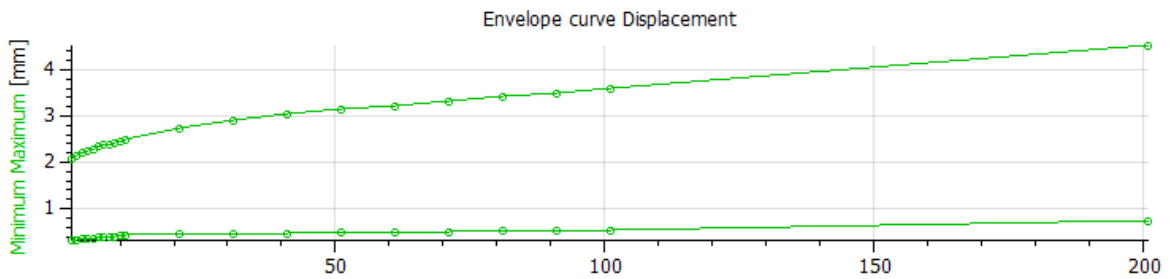
Jako poslední bylo odzkoušeno 6 profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice, a to v pořadí J 5/1, J 5/2, J 4/1, J 4/2, J 3/1 a J 3/2 naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.14. Hodnoty jsou v tabulce seřazeny podle umístění na profilu hole, ne podle pořadí při zkoušce.

Tabulka 14 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.

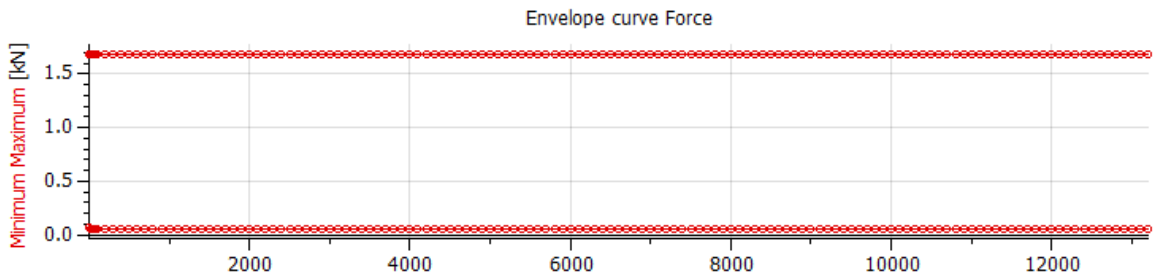
N=6	F min	F max	Počet cyklů	Rozměr profilu
Označení / Jednotka	[N]	[N]	-	[mm]
J 3/1	50	1680	274	19,5x29,5
J 3/2	50	1680	12900	19,5x29,5
J 4/1	50	1680	241	19,5x29,5
J 4/2	50	1680	3214	19,5x29,5
J 5/1	50	1680	600	19,5x29,5
J 5/2	50	1680	13200	19,5x29,5
\bar{x}	50	1680	5072	-
s	0	0	6279	-



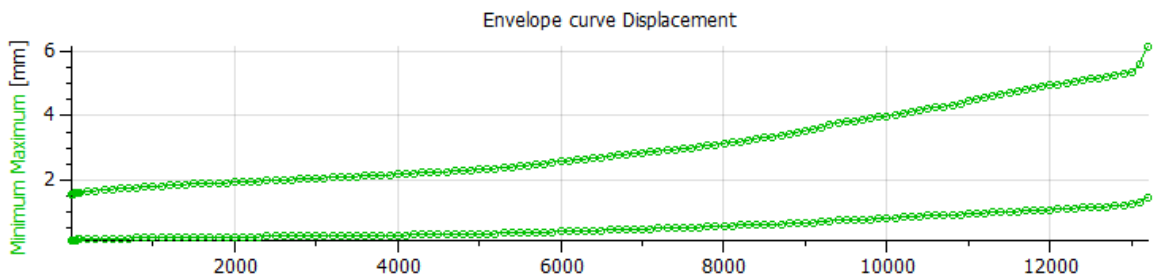
Graf 29 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 3/1.



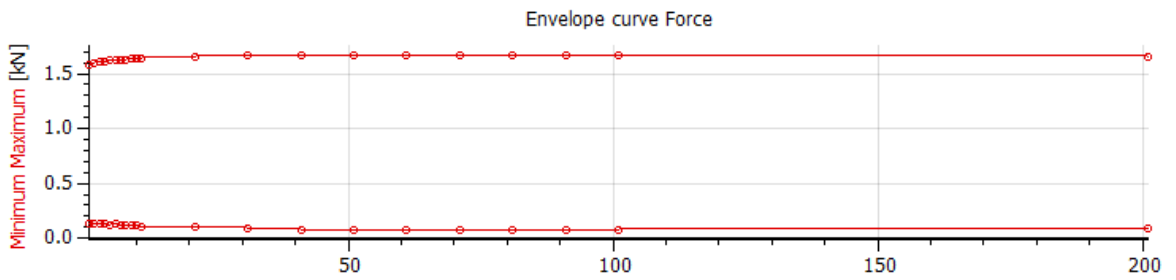
Graf 30 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 3/1.



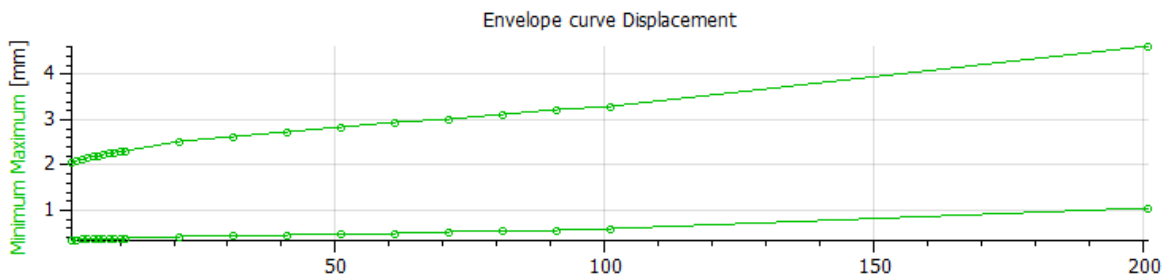
Graf 31 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 3/2.



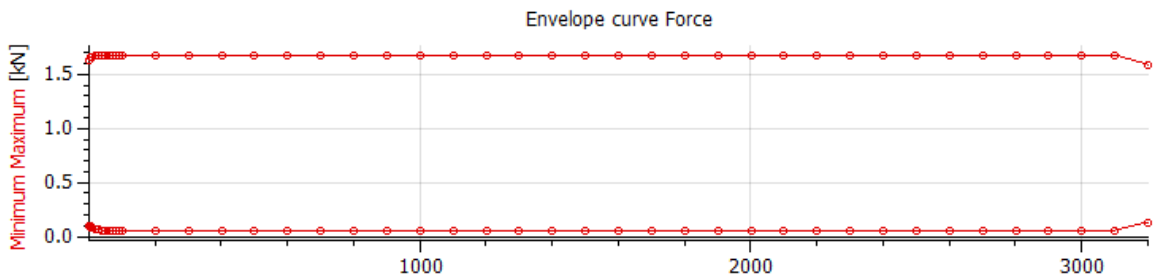
Graf 32 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 3/2.



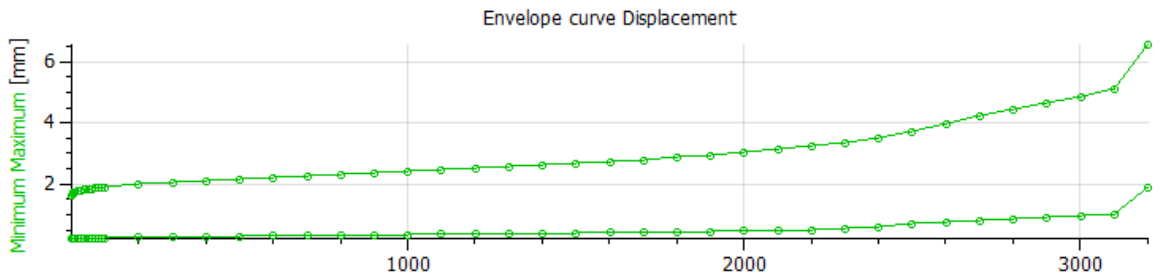
Graf 33 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 4/1.



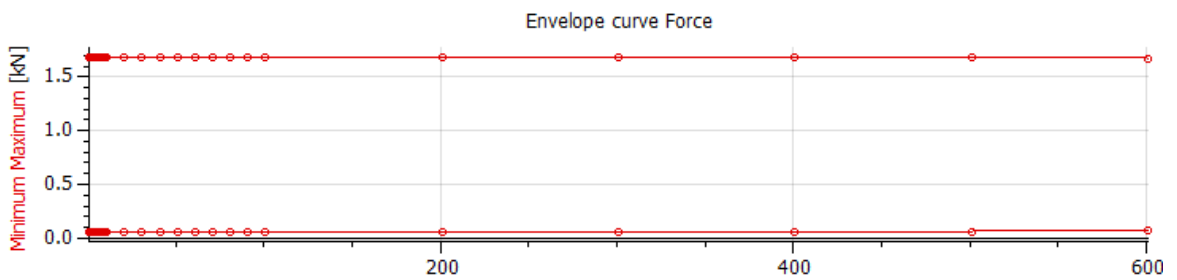
Graf 34 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 4/1.



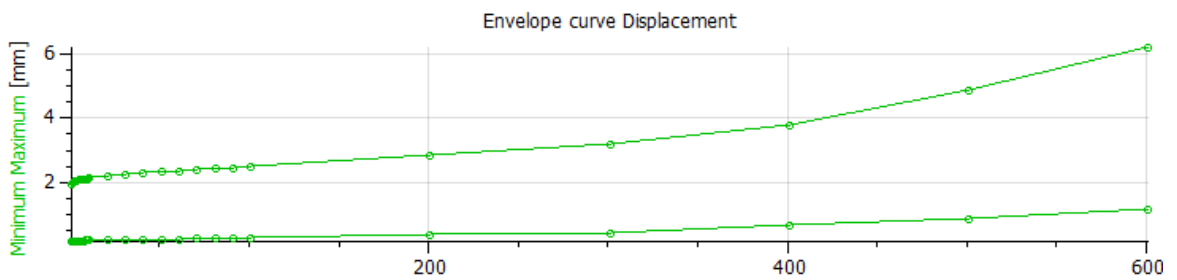
Graf 35 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 4/2.



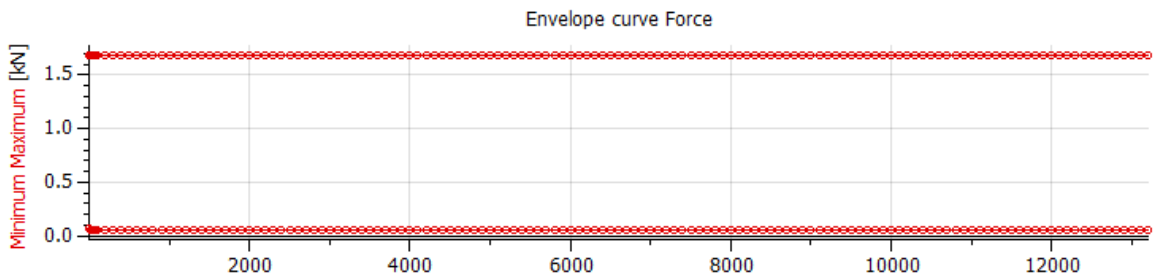
Graf 36 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 4/2.



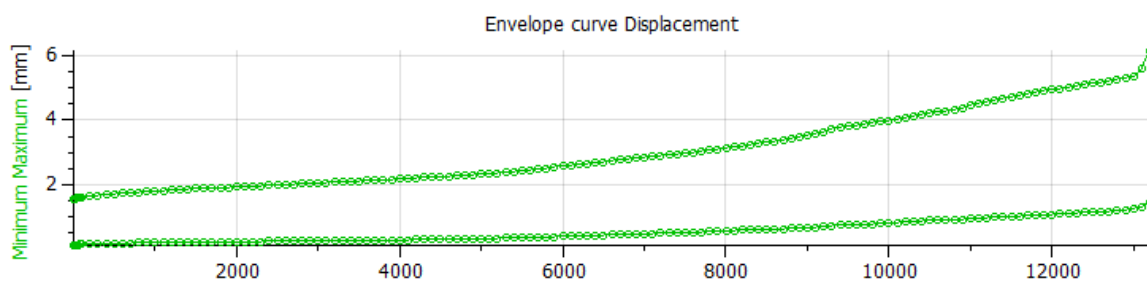
Graf 37 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 5/1.



Graf 38 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 5/1.



Graf 39 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 5/2.



Graf 40 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 5/2.



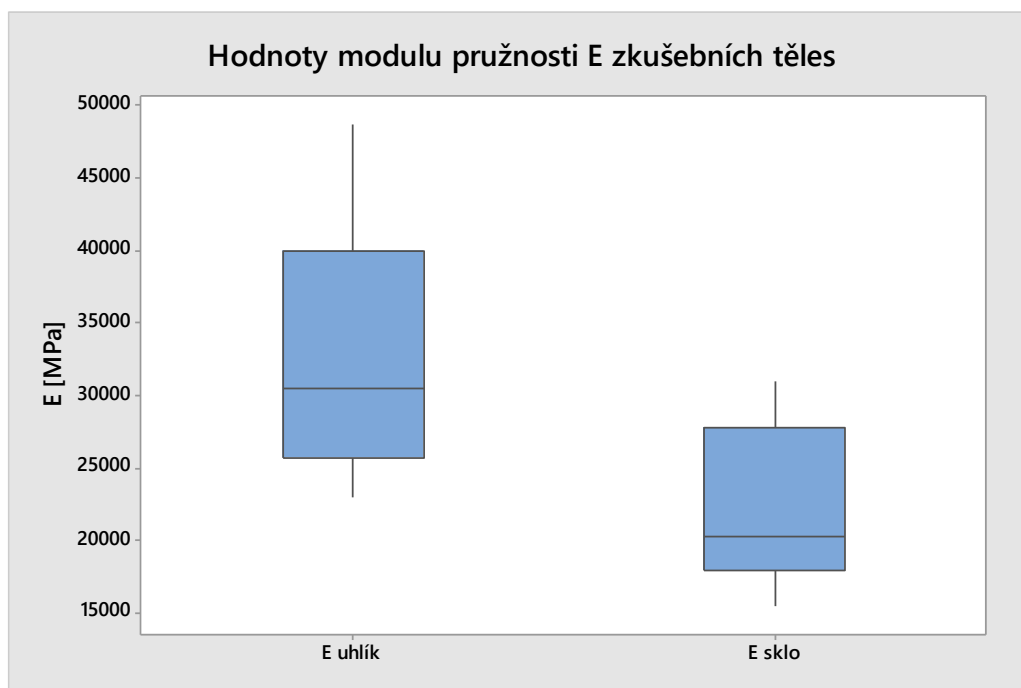
Obrázek 35 Profily s vyšším obsahem skelných vláken a matrice po zkoušce únavy.

7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

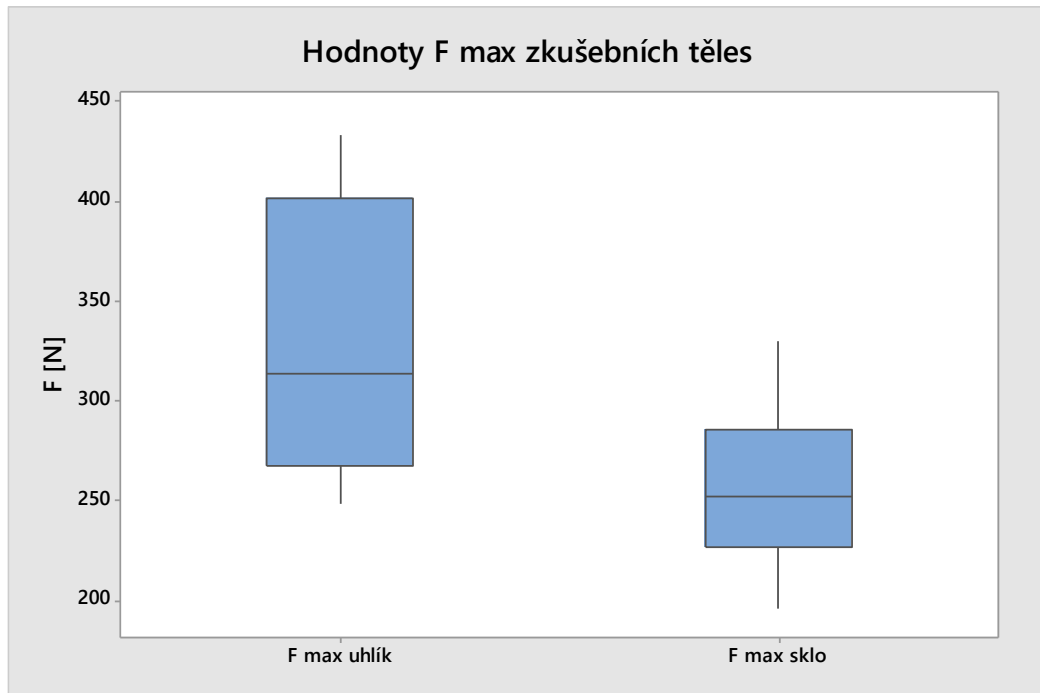
7.1 Výsledky statických zkoušek.

7.1.1 Výsledky zkoušky zkušebních těles v tříbodovém ohybu.

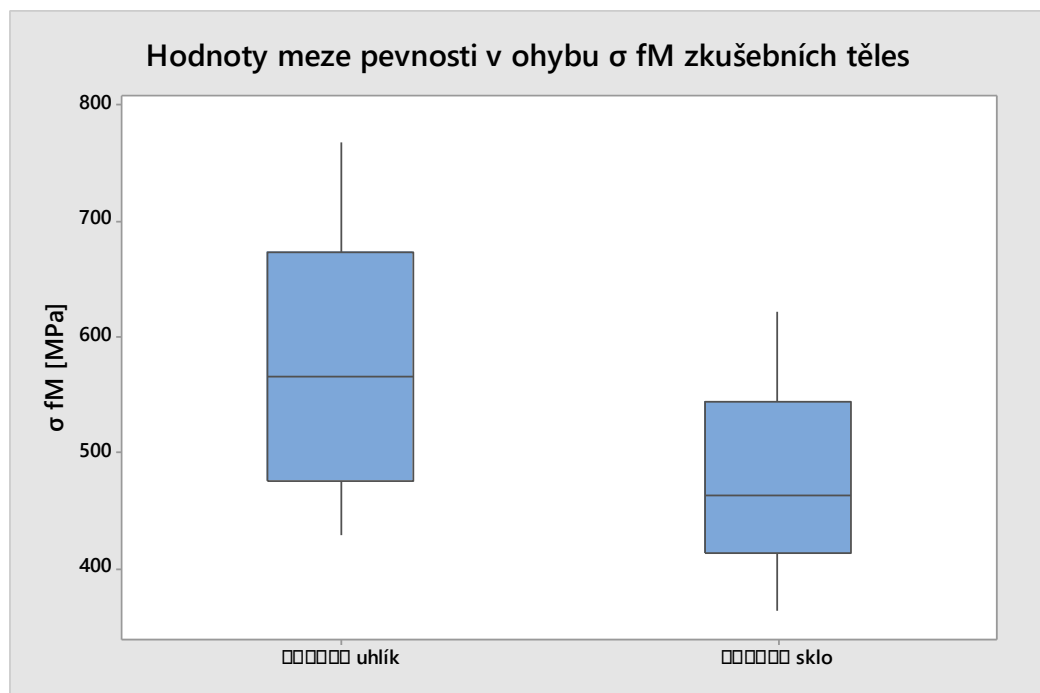
Přes velký rozptyl naměřených hodnot způsobený rozdílnou tloušťkou stěn zkušebních těles, která byla zapříčiněna chybami při výrobě profilů hokejových holí. Zkušební tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken mají průměrný modul pružnosti 33 100 MPa což je o 33,2 % více než, průměrný modul pružnosti 22 100 MPa u zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken. Průměrná maximální síla potřebná k porušení zkušebního tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken je 327 N což je o 22 % více než, průměrná maximální síla 255 N potřebná k porušení zkušebního tělesa s vyšším obsahem skelných vláken. Zkušební tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken mají mez pevnosti 575 MPa což je o 16,7 % více než, mez pevnosti 479 MPa u zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken viz grafy 41, 42, 43.



Graf 41 Hodnoty modulu pružnosti E zkušebních těles.



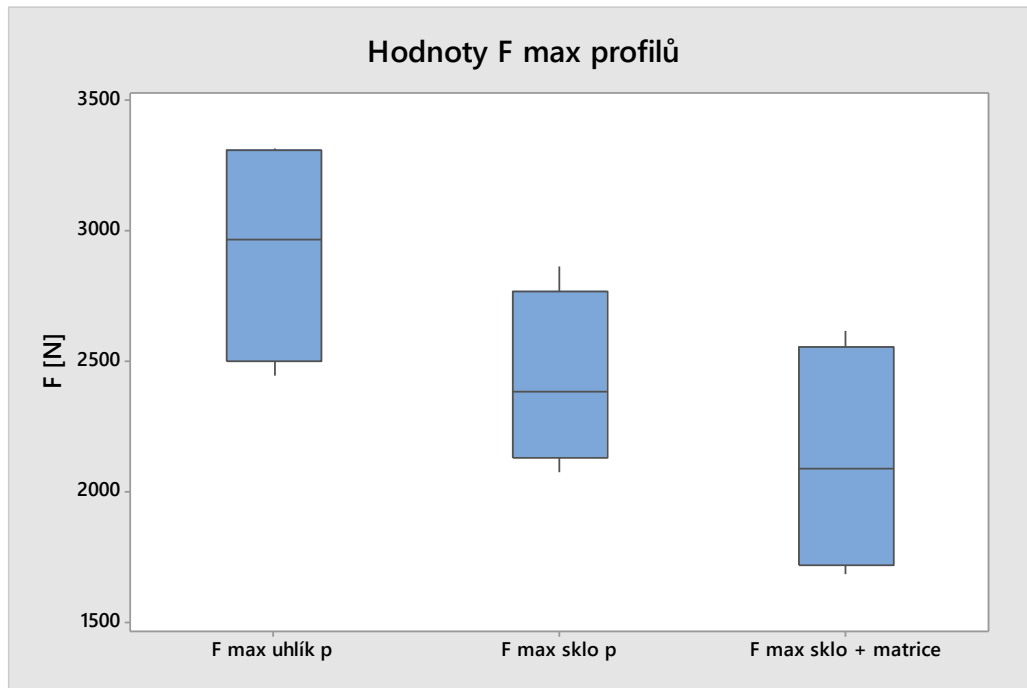
Graf 42 Hodnoty F max zkušebních těles.

Graf 43 Hodnoty meze pevnosti v ohybu σ_{fM} zkušebních těles.

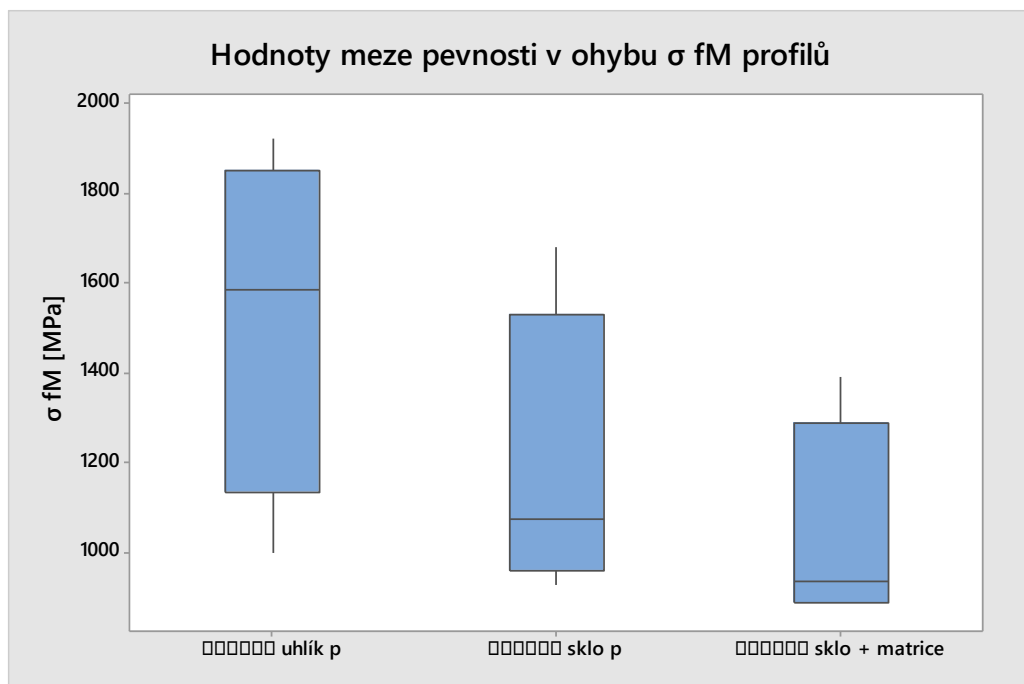
7.1.2 Výsledky zkoušky profilů v tříbodovém ohybu.

Přes velký rozptyl naměřených hodnot způsobený rozdílnou tloušťkou stěn profilů, která byla zapříčiněna chybami při výrobě profilů hokejových holí. Průměrná maximální síla potřebná k porušení profilu s vyšším obsahem uhlíkových vláken je 2928 N což je o 17 % více než, průměrná maximální síla 2430 N potřebná k porušení profilů s vyšším obsahem

skelných vláken a o 27,3 % více než, průměrná maximální síla 2130 N potřebná k porušení profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice. Profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken mají průměrnou mez pevnosti 1 522 MPa což je o 21,9 % více než, průměrná mez pevnosti 1 188 MPa profilů s vyšším obsahem skelných vláken a o 31,8 % více než, průměrná mez pevnosti 1038 MPa profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice viz grafy 44, 45.



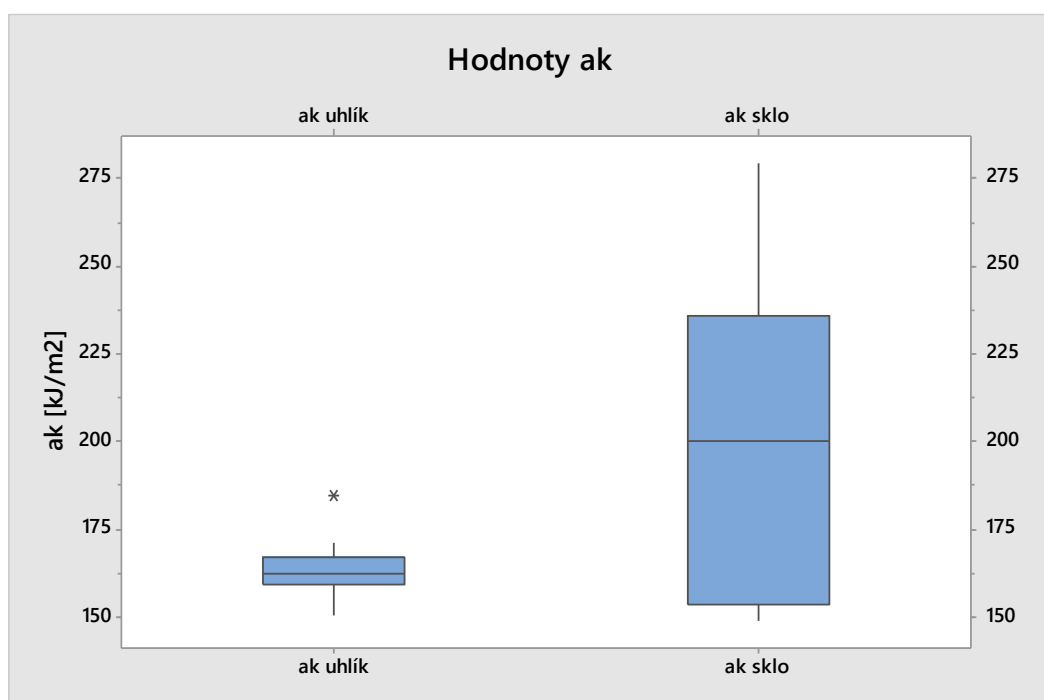
Graf 44 Hodnoty F max profilů.

Graf 45 Hodnoty meze pevnosti v ohybu σ_{fM} profilů.

7.2 Výsledky dynamických zkoušek.

7.2.1 Výsledky zkoušky zkušebních těles rázem v ohybu.

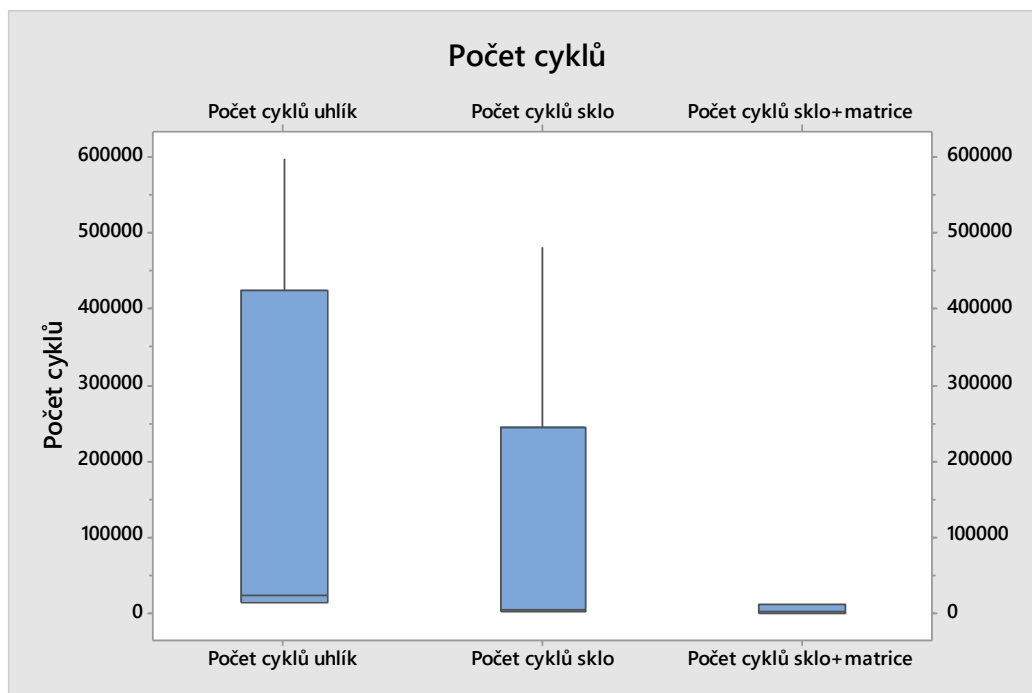
Přes velký rozptyl naměřených hodnot způsobený rozdílnou tloušťkou stěn zkušebních těles, která byla zapříčiněna chybami při výrobě profilů hokejových holí. Vykazují zkušební tělesa s vyšším obsahem skelných vláken vyšší průměrnou rázovou houževnatost a to $199,3 \text{ kJ/m}^2$ což je o 17,7 % více než $164,1 \text{ kJ/m}^2$ u zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken viz graf 46.



Graf 46 Hodnoty rázové houževnatosti.

7.2.2 Výsledky únavové zkoušky profilů.

Přes velký rozptyl naměřených hodnot způsobený rozdílnou tloušťkou stěn profilů, která byla zapříčiněna chybami při výrobě profilů hokejových holí. Vydrží profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken průměrně 175 003 cyklů do lomu což je o 42,9 % více než, průměrných 99 940 cyklů u profilů s vyšším obsahem skelných vláken a o 97,1 % více než, průměrných 5 072 cyklů u profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice viz graf 47.



Graf 47 Hodnoty počtu cyklů do lomu.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo studium chování profilu hokejové hole s různým poměrem skelných a uhlíkových vláken.

Studium chování probíhalo pomocí statických zkoušek v tříbodovém ohybu a dynamických zkoušek rázem v ohybu a únavovou zkouškou.

U hokejových holí s vyšším obsahem uhlíkových vláken je průměrný modul pružnosti v ohybu zkušebního tělesa 33 100 MPa. Průměrná mez pevnosti v ohybu zkušebního tělesa je 575 MPa a profilu 1522 MPa. Průměrná maximální síla potřebná k poškození zkušebního tělesa je 327 N a profilu 2 928 N. Průměrná rázová houževnatost zkušebních těles je 164,1 kJ/m². Profily průměrně vydržely 174 003 cyklů do lomu.

U hokejových holí s vyšším obsahem skelných vláken je průměrný modul pružnosti v ohybu zkušebního tělesa 22 100 MPa. Průměrná mez pevnosti v ohybu zkušebního tělesa je 479 MPa a profilu 1188 MPa. Průměrná maximální síla potřebná k poškození zkušebního tělesa je 255 N a profilu 2 430 N. Průměrná rázová houževnatost zkušebních těles je 199,3 kJ/m². Profily průměrně vydržely 99 940 cyklů do lomu.

U hokejových holí s vyšším obsahem skelných vláken a matrice je průměrná mez pevnosti v ohybu profilu 1 038 MPa. Průměrná maximální síla potřebná k poškození profilu 2130 N. Profily průměrně vydržely 5072 cyklů do lomu.

Během zkoušek bylo patrné, že největší vliv na výsledky zkoušek má způsob výroby a chyby při výrobě, kdy tloušťka stěny hokejové hole, potažmo počet vrstev v daném místě nebyl stejný. Což zapříčinilo velké rozdíly v naměřených hodnotách. Pro výrobce z toho plyne ponaučení, že tloušťka stěny hokejové hole, potažmo počet vrstev v daném místě musí být stejný, a proto je nutné zlepšit proces výroby a následnou kontrolu vyrobených profilů hokejových holí.

Z celkového vyhodnocení zkoušek vyplývá, že hokejové hole vyztužené vyšším obsahem uhlíkových vláken, jsou mnohem vhodnější k hraní hokeje. Jak z pohledu bezpečnosti při hře, kdy může dojít ke zranění jiného hráče odletující částí poškozené hokejové hole, kdy u profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken, po zkoušce v tříbodovém ohybu a zkoušce únavy po narovnání zkoušeného profilu nedošlo k jeho úplnému prasknutí a oddělení částí profilu od sebe. U hokejových holí s vyšším obsahem skelných vláken po těchto zkouškách při narovnání zkoušeného profilu došlo k jeho úplnému prasknutí a oddělení částí profilu od

sebe. Hokejové hole s vyšším obsahem skelných vláken vynikaly pouze ve zkoušce rázem v ohybu. Při hře po zásahu hokejové hole hranou puku by pravděpodobně nedošlo k prasknutí hokejové hole, popřípadě by došlo k menšímu poškození. Nejhorších výsledků dosáhly hokejové hole s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. *STOON*. [Online] [Citace: 11. 11 2019.] <http://www.stoon.tode.cz/>.
2. VRBK A, Jan. *MECHANIKA KOMPOZITŮ*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2008.
3. BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
4. *HOKEJMAN*. [Online] [Citace: 10. 1 2020.] <https://hokejman.cz/vse-o-hokejkach/>.
5. *The Evolution of the Hockey Stick* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.timetoast.com/timelines/the-evolution-of-the-hockey-stick>.
6. *Advanced hockey stick design delivers optimal performance* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/advanced-hockey-stick-design-delivers-optimal-performance>
7. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd.* Praha : Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
8. A.Zafar,F.Bertocco,J.Schjødt-ThomsenandJ.C.Rauhe. Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites. *Composites Science and Technology*[online]. Elsevier. Volume 72, Issue 6,27 March 2012[cit.28. 4. 2020]. Dostupné z:<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.010>
9. SCHMIEMANN, A. *Kennwertänderungen von GFK durch korrosive Einflüsse Diss.:* Universität Gh Kassel : Institut für Werkstofftechnik, 1989.
10. A.P.P. Fulco. Fatigue damage and fatigue life diagrams of a carbon/epoxy cross ply laminate aged by hygrothermal exposure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[online]. Elsevier. 16 September 2019, [cit.5. 5. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105628>
11. *Composites Science and Technology*. Oxford: Elsevier. ISSN 0266-3538.
12. M. Akay, S. Kong Ah Mun and A. Sranley. Influence of moisture on the thermal and mechanical properties of autoclaved and oven-cured Kevlar-49/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*[online]. Elsevier. Volume 57, Issue 5,

1997, [cit.29. 4. 2020]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00017-1)

13. *Kompozity - vyztužené plasty: Co jsou to kompozitní materiály* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/>

14. Beckry Abdel-Magid, Saeed Ziaee, Katrina Gass and Marcus Schneider. The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites. *Composite Structures*[online].Elsevier. Volume 71, Issues 3–4, December 2005 [cit.8. 4. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.022>

15. *Prepreg and process for producing the same* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5104718A/en>.

16. R.Selzerand K.Friedrich. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[online]. Elsevier. Volume 28, Issue 6,1997, [cit.7. 4. 2020]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(96\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00154-6)

17. AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.

18. Pic_prepregs01: ProcessesofPrepreg and LaminateProduction. [Online] [Citace: 20. 4 2020.] http://www.tlm.co.th/images/pic_prepregs01.jpg.

19. LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-X.

20. ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. 2011.

21. *Žák-TVÁŘENÍ* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z:

http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/DZM/DZM_ZK.pdf

22. *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98ez%C3%A1n%C3%AD_vodn%C3%ADm_paprskem

23. *Zwick/ Roell*. [Online] [Citace: 1. 5 2020.] <https://www.zwickroell.com/en>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SiO ₂	-	Oxid křemičitý
MgO	-	Oxid hořečnatý
Al ₂ O ₃	-	Oxid hlinitý
mm	-	Milimetr
$km \cdot h^{-1}$	-	Kilometr za hodinu
° C	-	Stupeň celsia
mm	-	Milimetr
$mm \cdot s^{-1}$	-	Milimetr za sekundu
OH ⁻	-	Hydroxidový aniont
$g \cdot m^{-2}$	-	Gram na metr čtverečný
μm	-	Mikrometr
$N \cdot mm^{-2}$	-	Nevton na milimetr čtverečný
PS	-	Polystyren
PVC	-	Polyvinylchlorid
PE	-	Polyethylen
PP	-	Polypropylen
PA 6	-	Polyamid PA6
PA 66	-	Polyamid PA 66
PBT	-	Polybutylentereftalat
PC	-	Polykarbonát
POM	-	Polyoxymethylen
N	-	Nevton
M	-	Metr
°	-	Stupeň
%	-	Procento
SMC	-	Sheet Moulding Compound
GFT	-	Gerflor Fiber Technology

σ	MPa	napětí
ε	-	Deformace
MPa	-	Megapascal
E	MPa	Modul pružnosti
F min	N	Minimální síla
F max	N	Maximální síla
σ_{fM}	MPa	Mez pevnosti v ohybu
Hz	-	Hertz
Y	mm	Průhyb
W	Nmm	Vykonaná práce
W _o	mm ³	Ohybový moment
ak	kJ/m ²	Nárazová práce
kJ/m ²	-	Kilojoul na metr čtverečný
\bar{x}	-	Aritmetický průměr
s	-	Směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Autor při hraní hokeje.	9
Obrázek 2 Typy vláknových kompozitů (2).	12
Obrázek 3 Prostorové uspořádání vybraných vláknových kompozitů (2).	12
Obrázek 4 První hokejová hůl (5).	13
Obrázek 5 Výroba textilních skelných vláken tažením (7).	15
Obrázek 6 Typy sklovláknitých výztuží (7).	17
Obrázek 7 Druhy vazeb výztužných tkanin (7).	18
Obrázek 8 Schéma výroby PAN vláken (7).	19
Obrázek 9 Princip výroby hokejové hole (6).	22
Obrázek 10 Schéma výroby prepregů (18).	23
Obrázek 11 křivka závislosti deformace ε na napětí σ	25
Obrázek 12 Charpyho kladivo (21).	27
Obrázek 13 Profily hokejových holí.	31
Obrázek 14 Značení zkušebních těles.	32
Obrázek 15 Princip řezání vodním paprskem (22).	32
Obrázek 16 Rozměry zkušebních těles a profilů.	33
Obrázek 17 Dělení zkušebních těles ruční pilou.	33
Obrázek 18 Zkušební stroj Zwick 1456.	36
Obrázek 19 Zkušební tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce v třibodovém ohybu.	38
Obrázek 20 Zkouška zkušebního tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken.	39
Obrázek 21 Zkušební tělesa s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce v třibodovém ohybu.	41
Obrázek 22 : Profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce v třibodovém ohybu.	43
Obrázek 23 Profily s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce v třibodovém ohybu.	44
Obrázek 24 Zkouška profilu s vyšším obsahem skelných vláken.	45
Obrázek 25 Profily s vyšším obsahem skelných vláken a matrice po zkoušce v třibodovém ohybu.	47
Obrázek 26 Zkušební stroj Zwick/Roell HT 25P před zkouškou.	48
Obrázek 27 Zkušební tělesa s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce rázem v ohybu.	50
Obrázek 28 Zkušební stroj Zwick/Roell HIT25P po zkoušce.	52
Obrázek 29 Zkušební tělesa s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce rázem v ohybu.	52

Obrázek 30 Zátěžový cyklus únavové zkoušky.....	53
Obrázek 31 Zkušební stroj Zwick/Roell HC25	53
Obrázek 32 Profily s vyšším obsahem uhlíkových vláken po zkoušce únavy.	57
Obrázek 33 Profil s vyšším obsahem skelných vláken při zkoušce.	58
Obrázek 34 Profily s vyšším obsahem skelných vláken po zkoušce únavy.	61
Obrázek 35 Profily s vyšším obsahem skelných vláken a matrice po zkoušce únavy.	65

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Značení zkušebních těles pro zkoušku tříbodovým ohybem.	34
Tabulka 2 Značení profilů pro zkoušku tříbodovým ohybem.	34
Tabulka 3 Značení zkušebních těles pro rázovou zkoušku.....	35
Tabulka 4 Značení profilů pro únavovou zkoušku.	35
Tabulka 5 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.	37
Tabulka 6 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.	40
Tabulka 7 Hodnoty profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.....	42
Tabulka 8 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken.	44
Tabulka 9 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.....	46
Tabulka 10 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem uhlíkových vláken.	49
Tabulka 11 Hodnoty zkušebních těles s vyšším obsahem skelných vláken.	51
Tabulka 12 Hodnoty profilů s vyšším obsahem uhlíkových vláken.....	54
Tabulka 13 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken.	58
Tabulka 14 Hodnoty profilů s vyšším obsahem skelných vláken a matrice.....	62

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost deformace ε na napětí σ u zkušebních těles s vyšším obsah uhlíkových vláken.....	39
Graf 2 Závislost deformace ε na napětí σ u zkušebních těles s vyšším obsah skelných vláken.	41
Graf 3 Závislost průhybu na síle u profilů s vyšším obsah uhlíkových vláken.	42
Graf 4 Závislost průhybu na síle u profilů s vyšším obsah skelných vláken.....	45
Graf 5 Závislost průhybu na síle u profilů s vyšším obsah skelných vláken a matrice.	46
Graf 6 Absorbovaná energie jednotlivých zkušebních těles.....	50
Graf 7 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/1.	54
Graf 8 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/1.....	54
Graf 9 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/2.	55
Graf 10 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/2.....	55
Graf 11 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/1.	55
Graf 12 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/1.....	55
Graf 13 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/2.	56
Graf 14 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/2.....	56
Graf 15 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 5/1.	56
Graf 16 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 5/1.....	56
Graf 17 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 5/2.	56
Graf 18 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 5/2.....	57
Graf 19 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/1.	59
Graf 20 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/1.....	59
Graf 21 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 3/2.	59
Graf 22 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 3/2.....	59
Graf 23 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/1.	60
Graf 24 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/1.....	60
Graf 25 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 4/2.	60
Graf 26 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 4/2.....	60
Graf 27 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu 5/1.	61
Graf 28 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu 5/1.....	61
Graf 29 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 3/1.	62
Graf 30 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 3/1.	63
Graf 31 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 3/2.....	63
Graf 32 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 3/2.	63

Graf 33 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 4/1.....	63
Graf 34 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 4/1.	63
Graf 35 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 4/2.....	64
Graf 36 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 4/2.	64
Graf 37 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 5/1.....	64
Graf 38 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 5/1.	64
Graf 39 Počet cyklů do lomu pro zvolené cyklické zatížení profilu J 5/2.....	64
Graf 40 Závislost Min. a Max. průhybu na počtu cyklů, profilu J 5/2.	65
Graf 41 Hodnoty modulu pružnosti E zkušebních těles.	66
Graf 42 Hodnoty F max zkušebních těles.....	67
Graf 43 Hodnoty meze pevnosti v ohybu σfM zkušebních těles.....	67
Graf 44 Hodnoty F max profilů.	68
Graf 45 Hodnoty meze pevnosti v ohybu σfM profilů.	68
Graf 46 Hodnoty rázové houževnatosti.	69
Graf 47 Hodnoty počtu cyklů do lomu.	70

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technická data Zwick 1456.

Příloha P II: Technická data Zwick/Roell HIT25P.

Příloha P III: Technická data Zwick/Roell HC25.

PŘÍLOHA P I: Technická data Zwick 1456 (23).

Description	Value	
Type	RetroLine tC II für 1456	
	Table top model	
Item No.	1012195	
Test load F_{max}	20	kN
Test area height	1094	mm
Test area width	420	mm
Ambient temperature	+10 ... +35	°C
Drive		
Drive power	1	kW
Motor	AC servo-motor with concentrated windings, Hiperface® motor feedback system	
Control, set value preselection	Digital (real-time Ethernet, EtherCAT®)	
Crosshead speed $v_{min} \dots v_{max}$	0.001 ... 750	mm/min
Controller	adaptive	
Cycle time	1000	Hz
Power input specifications		
Version	1	kW
Power supply	230	V, 1Ph/N/PE
Permissible voltage fluctuation	±10	%
Power consumption (full load), approx.	2.3	kVA
Power frequency	50/60	Hz

PŘÍLOHA P II: Technická data Zwick/Roell HIT25P (23).

Technical data for HIT25P basic instrument

Type	HIT25P	HIT25P with pendulum lifting	
Item No.	1064351	1064349	
Use	With PC	With PC	
Potential energy	25 (18.45 ft lbf)	25 (18.45 ft lbf)	J
Dimensions:			
Overall height, approx.	1162	1162	mm
Overall width, approx.	1080	1080	mm
Overall depth, approx.	583	658	mm
Weight:			
Without test tools, approx.	258	278	kg
With typical test tools, approx.	285	305	kg
Test results, numerical	Impact energy [%], impact energy [J], impact strength [kJ/m ²]	Impact energy [%], impact energy [J], impact strength [kJ/m ²]	
Units	SI, metric, Anglo-American	SI, metric, Anglo-American	
Control functions	Friction correction, pendulum-vertical position, swing duration, instrument data display	Friction correction, pendulum-vertical position, swing duration, instrument data display	
Pulse resolution	0.09	0.09	°
Safety device	Safety device, left and right	Safety device, electrically interlocked	
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> • Ethernet port to connect a PC • 2 x USB port to connect a printer or USB stick or USB Multiplexer • 2x RS232 interface 		
Electrical supply	100 ... 240, 50/60, 70	100 ... 240, 50/60, 150	V, Hz, W

PŘÍLOHA P III: Technická data Zwick/Roell HC25 (23).

Test area height	Standard	Extended by 250 mm ^[1]	Extended by 500 mm	
Dynamic nominal force	25	25	25	kN
A - max. height of end of column	2240	2490	2740	mm
A _{G100} - max. height with 100mm testing actuator	2725	2975	3225	mm
A _{G250} - max. height with 250mm testing actuator	3025	3275	3525	mm
B - max. width	720	720	720	mm
C - max. depth	1360	1360	1360	mm
F - height of top edge of lower crosshead	995	995	995	mm
K - total weight ^[2]	1080	1095	1120	kg
C1 - max. depth of test frame	450	450	450	mm
D1 - distance between columns	460	460	460	mm
E - column diameter	65	65	65	mm
G - max. test area height ^[3]	1070	1320	1570	mm
H - max. working test area height ^[4]	310 to 1010	560 to 1260	810 to 1510	mm
Frame stiffness at 1000mm crosshead separation	300	300	300	kN/mm
T-slots	as per DIN 650 12H12, spacing 80 mm			
Connection size	Ø 70 mm, 6 x M8 and Ø 115 mm, 4 x M8			
Clamping/ adjustment: manual/manual	1037238	1037462	1037469	
Clamping/ adjustment: manual/hydraulic	1036930	1036931	1037473	