

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

AKUSTICKÉ MODULY SPECIÁLNÍCH VLÁKEN
ACOUSTIC MODULES OF SPECIAL FIBERS

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

Katedra textilních materiálů

Katedra: Textilních materiálů
Studijní program: N3106/Textilní inženýrství
Studijní obor: 3106T007/Textilní materiálové inženýrství
Kód: 597

Název diplomové práce:

Akustické moduly speciálních vláken
Acoustic modules of special fibers

Řešitel: Bc. Zdeňka Šebelová
Vedoucí práce: Jiří Militký, prof. Ing. CSc. podpis
Konzultant: Ing. Jaroslav Hanuš, Ph.D.

Počet stran: 105
Počet tabulek: 17
Počet obrázků: 48
Počet příloh: 3

P r o h l á š e n í

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

P o d ě k o v á n í

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Prof. Ing. Jiřímu Militkému CSc. za odborné vedení diplomové práce a ochotu při jejím zpracování.

Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jaroslavu Hanušovi Ph.D. za pomoc při výrobě zkušebních vzorků a Doc. Dr. Ing. Daně Křemenákové za pomoc se strojním zařízením a poskytnutí potřebných informací k přístroji.

V neposlední řadě díky patří i mé rodině, přátelům a známým za trpělivost a ohleduplnost v nelehkých časech při řešení a zpracování této práce.

Anotace

Téma: Akustické moduly speciálních vláken

V rámci této diplomové práce bylo zpracována literární rešerše na téma akustické moduly speciálních vláken. Jsou zde uvedeny základní vlastnosti a obecné charakteristiky NiTiNOLových, skleněných a čedičových vláken. Cílem je zjistit dynamický a statický modul pružnosti těchto vláken.

Ke zjištění dynamického modulu pružnosti je použito zařízení DMT, založené na stanovení rychlosti šíření zvuku ve vláknech. Statický modul pružnosti je měřen na dynamometru LabTech při tahové zkoušce. Práce obsahuje porovnání výsledků dynamického a statického modulu.

Na přístroji DSC jsou vlákna testována, aby se zjistilo, jak se mění transformační fáze během ohřívání a ochlazování vzorku u vláken NiTi.

Klíčová slova:

Dynamický modul pružnosti

Statický modul pružnosti

Rychlost šíření zvuku

NiTiNOL

Čedičové vlákno

Skleněné vlákno

Annotation

Topic: Acoustic special fiber modules

The aim of this diploma thesis is determination of the dynamic and static moduli of selected specialty fibers.

In the first part the acoustic moduli of specialty fibers are reviewed. The basic properties of NiTiNOL, glass and basalt fibers are compared.

The dynamic modulus of elasticity is measured by the dynamic modulus tester (DMT) device. Principle is measurement of acoustic wave spread through material. Initial static mechanical modulus was measured on the machine LabTech in a tensile test mode. The work contains comparison of the results of dynamic and static modulus and simple models for their prediction.

The instrument DSC fibers are tested to determine how they change phase transformation during heating and cooling a sample of the NiTi filaments.

Keywords:

The dynamic modulus of elasticity

Static modulus of elasticity

Speed of sound

NiTiNOL

Basalt fiber

Fiberglass

Seznam symbolů a zkratk v textu

FZÚ	Fyzikální ústav Akademie věd ČR	
ČR	Česká republika	
DMT	Dynamic Modulus Tester (zařízení pro měření akustických modulů)	
SMA	Shape Memory Alloys (slitiny s tvarovou pamětí)	
SME	Shape Memory Effect (efekt tvarové paměti)	
SMP	Shape Memory Polymers (polymery s tvarovou pamětí)	
NiTi	Nikl Titan	
MTA	metody termické analýzy	
DTA	Diferenční termická analýzy	
TGA	Termogravimetrie	
DTGA	Diferenční termogravimetrie	
TMA	Dynamicko-mechanická analýza	
DSC	Differentia Scanning Calorimetry	
EXO	exotermní děj	
ENDO	endotermní děj	
A	austenit	
M	martenzit	
R	R – fáze	
T	teplota	[°C]
T _g	teplota zesklňování	[°C]
UV	ultra fialové záření	
U	vnitřní energie látky	[J]
M _s	začátek fázové změny Martenzitické transformace	[°C]
M _f	konec fázové změny Martenzitické transformace	[°C]
A _s	začátek fázové změny Austenitické transformace	[°C]
A _f	konec fázové změny Austenitické transformace	[°C]
R _s	začátek fázové změny R – fáze	[°C]
R _f	konec fázové změny R – fáze	[°C]
A _p	exotermní děj	
M _p	endotermní děj	
E _A	počáteční modul Austenitické transformace	[MPa]
E _M	počáteční modul Martenzitické transformace	[MPa]

Akustické moduly speciálních vláken

E_R	počáteční modul R – fáze	[MPa]
ε	deformace (protažení)	[%]
Δl	délka po deformaci	[mm]
l_0	počáteční délka vzorku – upínací délka	[mm]
σ	napětí (při přetrhu)	[MPa]
F	síla (při přetrhu)	[N]
S	plocha průřezu vzorku	[mm ²]
I	elektrický proud	[A]
U_e	elektrické napětí	[V]
R	elektrický odpor	[Ω]
G	elektrická vodivost	[S]
W	práce	[J]
m_z	hmotnost závaží	[g]
l	délka vlákna	[mm]
D	průměr vlákna	[mm]
C	tepelná kapacita	[kJ/kg.K]
T_{ext}	teplota okolí	[°C]
D	průměr vlákna	[mm]
ρ	hustota	[kg/m ³]
c	rychlost šíření zvuku	[m/s]
L	vzdálenost	[cm]
E_D	dynamický modul	[MPa]
E	statický modul	[MPa]
t	čas	[s]
f	frekvence	[Hz]
H	změna entalpie	[mW]
$\bar{x}$	průměr	
s	směrodatná odchylka	
s^2	rozptyl	
V	variační koeficient	
IS	interval spolehlivosti středních hodnot	
R^2	regresní koeficient	
r	korelační koeficient	

OBSAH

ÚVOD	10
1 Zvuk	12
2 Rychlost šíření zvuku	14
2.1 Rychlost zvuku	14
2.2 Akustické metody pro vlákna	15
2.3 Akustické měření vlastností vláken	16
2.3.1 Tvar akustického pulsu	17
3 Dynamický modul pružnosti	18
3.1 Dynamic Modulus Tester (DMT)	18
3.2 Ultrazvukové vlnění	18
3.3 Rezonanční metoda	19
4 Historie SMA materiálů	20
4.1 Slitiny s tvarovou pamětí	21
4.2 Polymery s tvarovou pamětí – SMP	22
4.3 Tvarová paměť	24
4.4 Jev tvarové paměti	25
4.4.1 Austenit	25
4.4.2 Martenzit	26
4.4.3 R-fáze (rhombohedral)	28
4.5 Druhy tvarové paměti	29
4.6 Jednosměrná paměť	29
4.7 Vícesměrná paměť	30
5 Mechanické projevy materiálů s tvarovou pamětí	31
5.1 Pseudoplasticita	31
5.2 Superelasticita	32

6	NiTiNOL	33
6.1	Výroba NiTiNOLových vláken	34
6.2	Základní oblasti uplatnění	34
7	Skleněná vlákna	39
7.1	Historie skleněných vláken	39
7.2	Současnost a budoucnost skleněných vláken	40
7.3	Textilní skleněné vlákno	41
7.4	Složení skleněných vláken	42
7.5	Výroba skleněných vláken	42
7.5.1	Metody zvlákňování	43
7.6	Úprava skleněných vláken	44
7.7	Vlastnosti skleněného vlákna	46
7.8	Základní oblasti uplatnění	48
7.8.1	Kombinované výrobky	49
7.8.2	Výrobky ze skleněných vláken	50
8	Čedičová vlákna	52
8.1	Historický vývoj horninových vláken	53
8.2	Složení čediče	54
8.3	Výroba čedičových vláken	55
5.1	Technologie čedičových vláken	56
8.3.1	Technologie výroby kontinuálních čedičových vláken	58
8.3.2	Technologie výroby krátkých čedičových vláken	58
8.4	Rozdělení čedičových vláken podle typu jejich použití	58
8.5	Vlastnosti čedičových vláken	59
8.6	Fyzikální vlastnosti	59
8.6.1	Chemické vlastnosti	59
8.6.2	Tepelné vlastnosti	60

8.6.3	Elektrické vlastnosti a další vlastnosti	60
8.7	Výrobci a výrobky čedičových vláken	61
8.7.1	Výrobci čedičových vláken	61
8.7.2	Výrobky z čedičových vláken	61
9	Termická analýza	64
9.1	Metoda DSC	65
10	Experimentální část	67
10.1	Příprava vláken	67
10.1.1	Žihání	68
10.2	Skleněná a čedičová vlákna	69
10.3	Měření na Dynamic Modulus Tester (DMT)	70
10.4	Rychlost šíření zvuku ve vláknech	71
10.5	Dynamický modul pružnosti vláken	72
10.6	Statický modul pružnosti	74
10.7	Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti	79
10.8	Testování na přístroji DSC	80
10.9	Vyhodnocení křivek DSC	82
11	ZÁVĚR	92
12	POUŽITÁ LITERATURA	95
	Seznam obrázků	101
	Seznam tabulek	103
	Seznam příloh	104
	PŘÍLOHA A	104
	PŘÍLOHA B	105
	PŘÍLOHA C	105

ÚVOD

Akustické vlastnosti souvisí obecně se schopností materiálu šířit zvuk. Zvukem se nazývá mechanické vlnění prostředí, které vnímáme sluchovým orgánem, jako zvukový vjem. V pružném prostředí jsou částice mezi sebou vázány nebo na sebe působí vzájemnými srážkami. Tyto vazby způsobují, že dochází k šíření mechanického vlnění, které je doprovázeno vznikem elastických vln. Znalost šíření těchto vln v materiálu má význam pro hodnocení dynamické odezvy, tak i pro popis kmitů různých konstrukčních prvků. Na rozdíl od řady technických materiálů je studium rychlosti šíření zvuku ve vláknech výrazně složitější, protože vlákna vykazují anizotropní vlastnosti související s chemickým složením a stavbou vláken.

Jednou z vlastností, které se u speciálních vláken zjišťují, je statický a dynamický modul „pružnosti“. Ke zjišťování statického modulu se používá tahová zkouška, při níž lze tuto veličinu vypočítat. U dynamického modulu pružnosti se dá použít více metod, všechny tyto metody jsou nedestruktivní. U vláken se používá metoda měření času potřebného k průchodu akustických vln vláknem na určité vzdálenosti, z něhož lze vypočítat rychlost šíření zvuku a dynamický modul pružnosti. Dalšími metodami jsou rezonanční metoda a ultrazvuková metoda. Rezonanční metoda se používá tak, že se ve vláknech měří frekvence, která je vyvolaná úderem do materiálu. Ultrazvuková metoda slouží nejen ke stanovení dynamického modulu pružnosti vlákna, ale také k tzv. ultrazvukovému zobrazení. To může být kontaktní nebo bezkontaktní. Touto metodou se zjišťují hlavně vady ve vláknech. V této práci je použita metoda Dynamic Modulus Tester, která pomocí dvou snímačů snímá čas v určité vzdálenosti.

V diplomové práci je zpracováno téma akustické moduly speciálních vláken. Cílem je zjistit, jak se liší moduly speciálních vláken určené z šíření rychlosti zvuku a pevnost v tahu (počáteční modul). Tyto moduly jsou zkoumány na speciálních vláknech čedičových, skleněných a NiTiNOlových. Zjišťuje se, zda lze nahradit klasický postup založený na analýze pracovních křivek jednodušší nedestruktivní metodou.

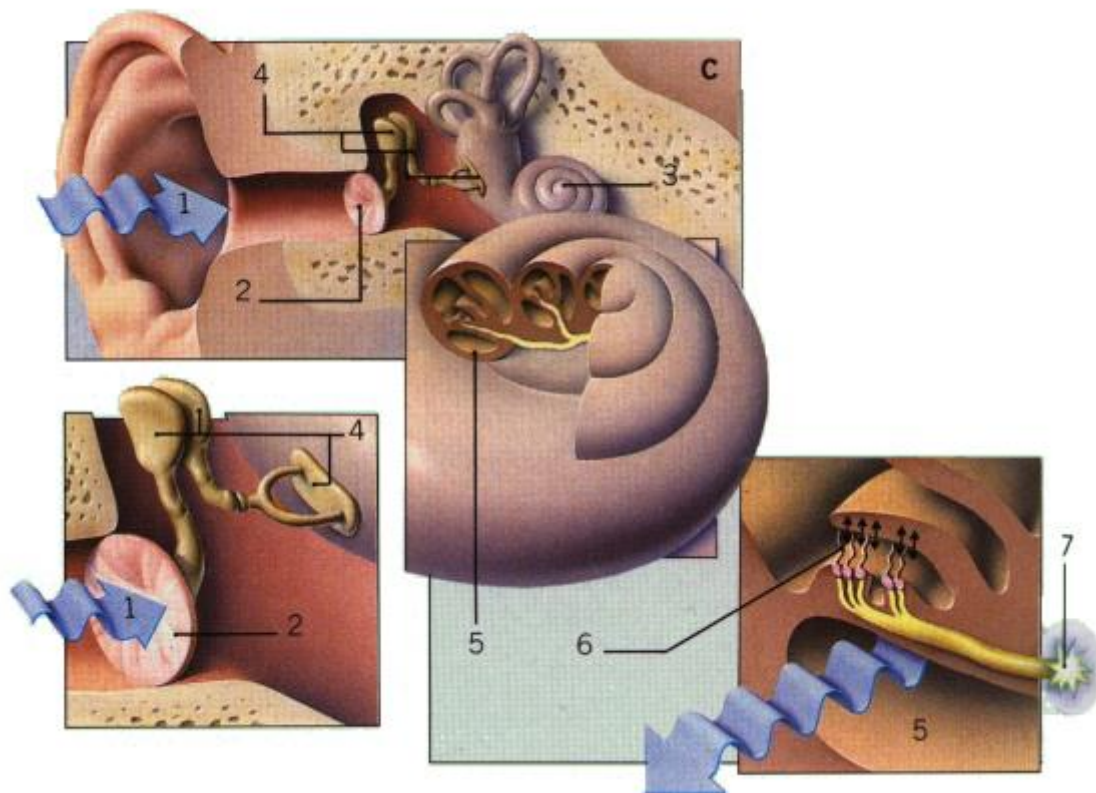
NiTiNOL je speciální vlákno, které není pro potřeby textilního průmyslu ještě dostatečně prozkoumáno. Proto je v této práci pojednáno o jeho vlastnostech a jeho historii a jaký má v tomto technickém oboru přínos. Budou použity dva typy NiTiNOLu o různém složení. Bude to NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6. Těmto vláknům byla obnovena struktura materiálu žíháním.

Dále je na vláknech zkoumán ještě statický modul pružnosti a měření na přístroji DSC, kde je sledování fyzikálních vlastností rozdílných tepelných toků dodávaných do vzorků a referenční látky. Pro porovnání, jsou použity, ještě skleněná a čedičová vlákna.

Mým úkolem je změřit metodou Dynamic Modulus Tester čas na určité vzdálenosti vlákna. Z naměřeného času je vypočítána rychlost šíření zvuku. Dynamický modul pružnosti byl vypočítán z hustoty vlákna a rychlosti šíření zvuku. Dále je na vláknech zjišťován statický modul pružnosti pomocí trhačky LabTech. Na závěr jsou zjištěné výsledky vyhodnoceny, jestli je nalezena korelace mezi akustickým a statickým modulem pružnosti.

1 ZVUK

Zvuk je každé mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem. Frekvence tohoto vlnění leží v rozsahu přibližně 16 Hz až 20 000 Hz; mimo tyto hranice člověk zvuk sluchem nevnímá [1]. V širším smyslu lze za zvuk označovat i vlnění s frekvencemi mimo tento rozsah. V elektroakustice se jako zvukový signál označují i elektrické kmity odpovídající kmitům mechanickým. [1]



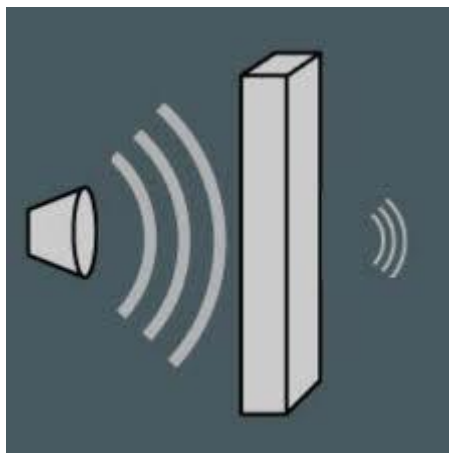
Obr.1 Zvukové vlny, které vstupují do ucha [8]

Zvuk s frekvencí nižší než 16 Hz (který slyší např. sloni) je infrazvuk. Zvuk s frekvencí vyšší než 20 kHz (např. delfini či netopýři vnímají zvuk až do frekvencí okolo 150 kHz) je ultrazvuk. Děje, které jsou spojeny se vznikem zvuku jeho šířením a vnímáním se nazývají akustika. [1]



Obr.2 Frekvence zvuku [10]

Zdroje zvuku jsou velice rozmanité (lidský hlas, struna houslí, membrána reproduktoru apod.) Šíření zvuku je podmíněno existencí pružného prostředí mezi zdrojem zvuku a uchem, nebo třeba mikrofonom elektrického zařízení. Vzduchoprázdným prostorem se zvuk nešíří. Rychlost zvuku je důležitou fyzikální veličinou a je výrazně ovlivněna látkovým prostředím, kterým se šíří. [2]



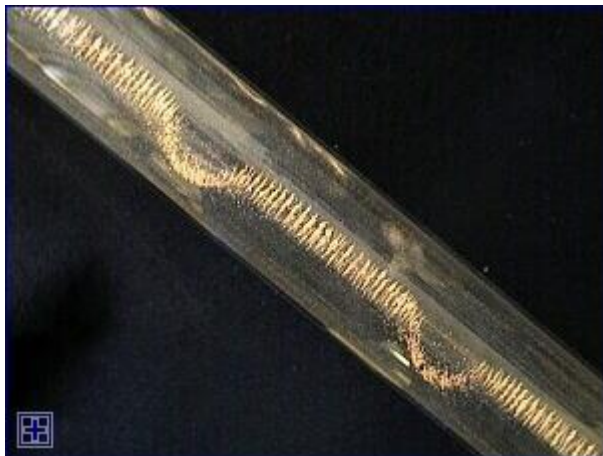
Obr.3 Šíření zvuku přes překážky [6]

- **infrazvuk** mechanické vlnění s frekvencí nižší než 20 Hz (komunikace např. sloni, velryby, hroši, aligátoři...). Infrazvuk vyšší intenzity může způsobovat zdravotní komplikace – od nepříjemných pocitů až po infarkt (v případě, že se jeho frekvence blíží frekvenci srdce). [3]
- **ultrazvuk** mechanické vlnění frekvencí vyšší než 20 kHz (který slyší např. delfinovití, netopýři, psi ...). Ultrazvuk se používá pro určování polohy a vzdáleností – sonar, pro kontrolu homogenity materiálu, měření tloušťky materiálu, čištění vzduchu (odstranění exhalací), sterilizaci vody, mléka a jiných roztoků, čištění předmětů, v medicíně se používá na diagnostiku (plodu, měkkých tkání...), léčbu (rozbíjení ledvinových kamenů...). [3]

Zdrojem zvuku mohou být kromě těles, kmitajících vlastními kmity, i tělesa kmitající kmity vynucenými. [4]

2 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ZVUKU

Rychlost zvuku je rychlost, jakou se zvukové vlny šíří prostředím. Často se tímto pojmem myslí rychlost zvuku ve vzduchu, která závisí na atmosférických podmínkách – největší vliv na její hodnotu má teplota vzduchu. [8]



Obr.4 Rychlost šíření zvuku v mosazné tyči [10]

2.1 Rychlost zvuku

Zvuk se šíří ze zdroje pouze pružným látkovým prostředím libovolného skupenství. Nejčastěji se jedná o vzduch, kde se zvuk šíří jako podélné postupné vlnění: dochází k periodickému stlačování a rozpínání vzduchu, což se projeví periodickými změnami tlaku vzduchu. Dobrým „vodičem“ zvuku je beton, ocel, sklo, voda a mnoho dalších. [9]

Nejdůležitější charakteristikou prostředí z hlediska šíření zvuku je rychlost zvuku v daném prostředí. Již v 17. století se podařilo poměrně přesně určit velikost rychlosti zvuku ve vzduchu: pomocí výstřelu z děla umístěného ve známé vzdálenosti a měření doby, která uplyne mezi světelným zábleskem a zvukem výstřelu. Velikost rychlosti světla je vzhledem k velikosti rychlosti zvuku výrazně větší, a proto lze předpokládat, že světelný vjem zaznameneáme okamžitě, zatímco sluchový s určitým zpožděním. V kapalinách a pevných látkách je velikost rychlosti zvuku větší než ve vzduchu. [9]

Velikost rychlosti šíření zvuku v daném materiálu závisí jednak na hustotě daného materiálu, ale také na jeho pružnosti. Pružnost je přitom ovlivněna velikostí vazebných sil, kterými jsou jednotlivé molekuly materiálu k sobě vázány. [9]

2.2 Akustické metody pro vlákna

Tyto metody vycházejí z měření rychlosti zvuku ve vláknech a akustické emise. Rychlost zvuku je silně ovlivněna strukturálním složením vláken, umožňují odhalit charakteristické vady. Jako jsou roztržená vlákna ve svazku. [46]

Mezi další nástroje patří ultrazvuk v rozsahu frekvencí od 20kHz do 1 GHz. Stroj na třídění podle pevnosti pracuje také na tomto základu. Hustota vlákna ovlivní měření, pokud je vlákno náchylné k degradaci. Vady ve vláknech mohou být lokalizovány a zdokumentovány pomocí grafických ultrazvukových testů. [46]

Akustické emise jsou založeny na skutečnosti, že i vlákno při zatížení vydává akustické signály. V minulosti byly provedeny pokusy, hledající vady a jak ve vláknech probíhá rychlost šíření zvuku pomocí stetoskopu nebo kombinací mikrofону, zesilovače a sluchátka. Přesnější výsledky jsou však získány systémy, které zaznamenávají akustické signály. Vibrace nebo zvukové vlny jsou měřeny nedestruktivně. Poškození vlákna může být odhaleno už v raném stádiu. [46]

Některé výzkumy byly založeny na použití jednorozměrné teorie zvukové vlny pro hodnocení modulu pružnosti vlákna. Pokoušejí se dokázat vztah mezi hodnotami získanými měřeními zvukové vlny a těmi, které byly získány statickým testováním. [46]

Četné výzkumy byly zaměřeny na zjištění korelačního vztahu mezi rychlostí šíření zvuku a mechanickými vlastnostmi materiálů. Metoda měření rychlosti šíření zvuku pro zjišťování stavu vlákna je podmíněna stavbou a vlastnostmi vlákna. [46]

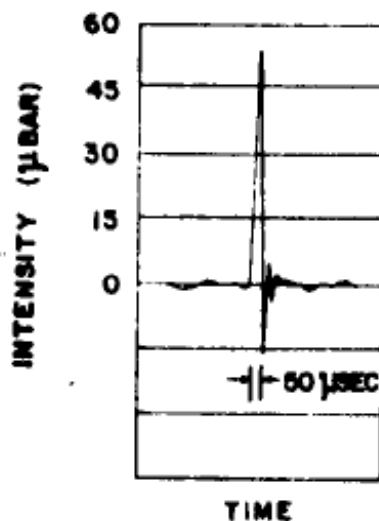
2.3 Akustické měření vlastností vláken

V textilním výzkumu je důležité měřit napětovou deformaci nebo tahové vlastnosti u vláken. Konvenční postupy vyžadují hodně pozornosti obsluhy a jsou relativně pomalé a drahé. Záměrem bylo zjistit, zda je vytvářen akustický puls, jestli textilní vlákno souvisí s tahovými vlastnostmi, a zda měření impulsu může poskytnout informace o těchto vlastnostech. Bylo zkoumáno, zda je akustický puls generován při porušení vlákna a charakteristiky impulsu se týkaly určitých měřených napětově-deformačních vlastností vlákna. [46]

Velmi málo prací popisovalo hladinu hluku ve vláknech. Thorsen a Veneklasen P. [73], a Thorsen W. J. T [74], studovali zvuk produkovaný vlákny a tkaninami při tření. Tato práce souvisí se zvukem vytvořeným tak, že vlákna vibrují do měření některých vlákenných vlastností, ale vlákna nejsou zlomená. Bernstein, B., Hall, D. A., a Trent, H. M. [75] popsali dynamiku generovaného zvuku pomocí dlouhého biče. Corte, H., Kallmes, O., and Jarrot, D. [76], zjistili, že porucha svazků mezi sousedními vlákny v tenkém listu papíru může být detekována pozorováním akustického „kliknutí“, které způsobí, že jsou vlákna oddělena. Počet výzkumných pracovníků pozorovalo a měřilo akustické emise během deformace kovů. Publikace o práci v této oblasti byly přezkoumány Liptainem, R. G. a Harrisem, D. O. [77]. [46]

2.3.1 Tvar akustického pulsu

Šířka impulsu má různé časové rozmezí podle druhu vlákna. Vysoce kvalitní zvukové vybavení má odpovídající frekvenční rozsah následovaný akustickým signálem typických textilních vláken. Maximální amplituda nebo intenzita akustického impulsu závisí na mnoha proměnných. Tvar typického akusticky generovaného pulsu jednoho textilního vlákna je uveden v obrázku 5.



Obr.5 Tvar typického akustického pulsu [46].

3 DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

K měření dynamického modulu pružnosti je používán přístroj Dynamic Modulus Tester.

3.1 Dynamic Modulus Tester (DMT)

Dynamic Modulus Tester je kompletní systém, který měří rychlost zvukových impulsů v materiálech jako vlákna, filmy, pásy. Zkoušený materiál je v kontaktu se dvěma snímači, mezi kterými se měří čas průchodu zvuku v jednotlivých vzdálenostech, z kterých se vypočítá rychlost zvuku, která se šíří měřeným materiálem.

Pro ideálně pružné těleso účely je vzorec:

$$E_D = \rho c^2 \quad (1)$$

kde E_D je dynamický modul pružnosti, ρ je hustota měřeného materiálu a c^2 je rychlost šíření zvuku.

3.2 Ultrazvukové vlnění

Ultrazvuková metoda je založena na opakovaném vysílání ultrazvukových impulsů do zkoušeného materiálu a zjištění impulsové rychlosti. Ta se určí výpočtem z času šíření a dráhy, po které se impuls vlnění šíří. [47]

Řada technik, které používají zvukové vlny, byla objevena a používána pro nedestruktivní účely. Jako nedestruktivní parametr se používá rychlost zvukového přenosu a zeslabení zvukového vlnění v materiálech.

Metoda měření přenosu ultrazvukového vlnění, se považuje za aplikaci jednorozměrné teorie šíření zvuku v homogenním viskoelastickém materiálu. Je založena na měření rychlosti šíření elastické deformace, která závisí na směru přenosu signálu. Po dopadu kladívka na těleso je generována tlaková vlna. Vlna se materiálem pohybuje konstantní rychlostí, ale jednotlivé částice vykazují také malý příčný pohyb jako důsledek šíření vlnoplochy. Rychlost vlny závisí na intenzitě budiče. [47]

I když rychlost vlny zůstává konstantní, pohyb částic se zmenšuje s každým úspěšným přechodem vlny přes částici. Sledování pohybu příčného průřezu v blízkosti konce takové překážky v reakci na šíření zvukového vlnění dokazuje, že jejich velikost exponenciálně klesá s časem. V případě šíření podélného vlnění můžeme samostatně vyhodnocovat šíření zvuku v hlavních směrech – podélný, radiální a tangenciální.[47]

Při podélném kmitání dochází k změnám relativního prodloužení malých úseků, které se šíří v podélném směru. [47]

Z naměřených hodnot rychlosti a hustoty je možné vypočítat dynamický modul pružnosti podle rovnice (1). Z této rovnice vyplývá, že rychlost šíření zvuku je tím větší, čím je větší modul pružnosti nebo hustota vlákna. [47]

Přechod zvukové vlny přes vlákno v podélném směru (rovnoběžně) trvá kratší čas, než napříč vláken (v příčném směru), resp. rychlost rovnoběžně s vlákny je větší než rychlost kolmo na vlákna. Dobu přenosu vlny ve vláknech výrazně ovlivňuje přítomnost dutin, nedokonalostí, nebo vlákna v rozkladu. Je-li prvek degradován, dochází k významnému prodloužení doby přenosu vln. [47]
do hlavních směrů. [47]

3.3 Rezonanční metoda

Rezonanční metoda zjištění dynamického modulu pružnosti. Každý materiál z tuhého materiálu se po mechanickém impulsu rozkmitá. Jako rezonance se označuje jev vzrůstu amplitudy vynucených kmitů zkoušeného tělesa na maximum (vlastní kmitočet), ke kterému dochází v případě kdy kmitočet vnější budící síly je shodný s vlastním (rezonančním kmitočtem). [47]

Rezonance materiálu je schopnost vlákna zesilovat zvuk bez zkreslení. Za rezonanční materiál se považuje takový, který má výborné rezonanční vlastnosti. S rostoucí hustotou akustická konstanta klesá. Vlákno by nemělo obsahovat žádné vady. Z důvodu snížení vzniku vnitřního pnutí a tvorby trhlin je důležité uskladnění vlákna, nejlépe v klimatizované místnosti nebo skříni. Ukazatelem rezonančních vlastností vlákna je konstanta vyzařování nazývaná také jako akustická konstanta. Akustická konstanta je závislá na hustotě vlákna. Rezonanční metoda se více používá pro zjištění dynamického modulu pružnosti u dřeva než u vláken.[47]

4 HISTORIE SMA MATERIÁLŮ

Slitiny s tvarovou pamětí (SMA) prošly po určité době vývojem, při kterém byly testovány a objevovány charakteristické vlastnosti těchto materiálů a jejich komerční využití. Tyto slitiny vykazují dvě velmi unikátní vlastnosti, pseudopružnost a efekt tvarové paměti. [13]

Jako první tyto vlastnosti pozoroval švédský fyzik Arne Olander u slitin zlata (Au) a kadmia (Cd), jestliže byl tento materiál zastudena deformován, po ohřátí nabyl původního tvaru. Od té doby byla objevena a zkoumána celá skupina takových slitin. Jako jsou například slitiny CuZnAl a CuAlNi a mnoho dalších, které jsou v oddílu Slitiny s tvarovou pamětí. [13]

Nejvýznamnější, a nejrozšířenější z nich je slitina niklu a titanu vyvíjená původně jako antikoroziční materiál, byla poprvé významně zkoumána počátkem 60. let v laboratoři amerického námořnictva W. Beuhlerem. Název *NiTiNOL* (*N*ickel *T*itanium *N*aval *O*rdnance *L*aboratory) skrývá složení slitiny i místo objevu. [13]

Jev tvarové paměti se využívá často v medicíně, strojírenství, kosmickém výzkumu, jednou z prvních aplikací byly od počátku 70. let i konstrukce tepelných motorů využívajících tvarové paměti klíčových součástí a nyní je využívána i v textilních aplikacích. [13]

V 90. letech 18. století byla objevena v oceli fáze, která dostala název po svém objeviteli Adolfu Martensovi, Martenzit. Tato fáze vzniká při transformaci, která je označovaná podle názvu svého produktu jako martenzitická. Byl to první krok směřující k objevu slitin s tvarovou pamětí. Martenzitická transformace pozorovaná v oceli je nevratná. Po roce 1952 byly objeveny další slitiny s martenzitickou transformací, např.: slitiny InTi a CuZn. [13]

Od roku 1965 ukazovaly nejrůznější studie výrazné snížení transformačních teplot u slitiny TiNi přidáním legujícího prvku Co nebo Fe (prvek, který je přidán do slitiny za účelem zlepšení mechanických vlastností). Tato nová slitina představovala první slitinu s tvarovou pamětí, která byla komerčně využita pod názvem Cryofit. Ten byl poprvé použit při spojování trubek ve stíhacím letounu F14 [14].

V roce 1989 byla věnována velká pozornost systému NiTiNb, který vykazoval martenzitickou transformaci s širokou teplotní hysterezí. Tato slitina našla využití např. při opravách nukleárních reaktorů. Objev její vratné tvarové změny spolu s dobrými mechanickými vlastnostmi vzbudil o slitinu velký zájem. [14]

Další prováděné výzkumy byly zaměřeny na slitinu NiTiCu, která se začala široce využívat v inženýrských aplikacích z důvodu zlepšené únavové životnosti a nízké ceně. Od svého objevení našla slitina NiTi mnoho komerčních využití. [13]

4.1 Slitiny s tvarovou pamětí

Technicky zajímavé a využitelné slitiny s tvarovou pamětí patří především do skupiny intermetalických sloučenin, které krystalizují ve výchozím krystalografickém uspořádání. Při ochlazování se tato vysokoteplotní fáze přeměňuje na nízkoteplotní martenzitickou strukturu. Martenzit v materiálech s tvarovou pamětí je na rozdíl od Martenzitu v uhlíkových ocelích měkký a tvárný. Austenitická fáze se při ochlazování mění na Martenzitickou strukturu, přičemž tato změna není doprovázena makroskopickou změnou tvaru. Působením dostatečného napětí dochází ke vzniku trvalé deformace Martenzitu. Při ohřevu nad určitou teplotu dochází z důvodu reverzibility termoelastického Martenzitu k přeměně na původní vysokoteplotní fázi Austenit. [15].

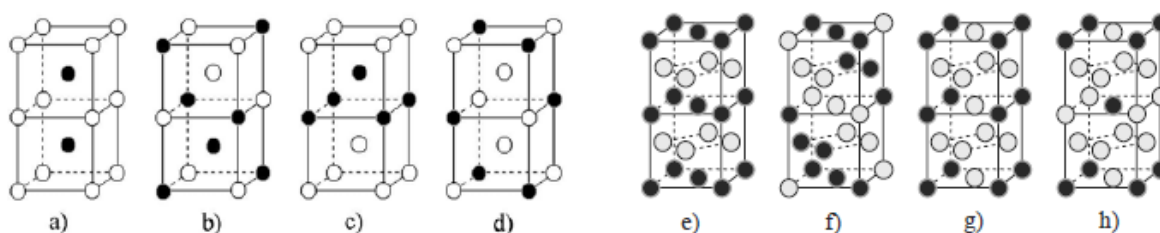
V následujících sloupcích jsou uvedené ostatní slitiny s tvarovou pamětí a jejich procentuální složení.

NiTi (50% Ni~ 50% Ti)	Ni-Al-X (X=Fe,Co) (~37% Al)
Ag-Cd (44% Ag a 49%Cd) 25%Ga)	Ni-Mn-Ga (50% Ni, 24%Mn, 25%Ga)
Ag-Zn (38% Zn)	In-Ti (18 – 23% Ti)
Au-Cd (46% Au A 50% Cd)	In-Cd (~ 5% Cd)
Cu-Zn-X (X=Si,Sn,AL,Ga) (~40% Zn)	Mn-Cu (5,35% Cu)
Ni-Al (~ 37% Al)	Ti-Pd-Ni (~36% Pd)
Cu-Sn (~15% Sn)	Fe-Ni-X (X=Mn, Si, Co, Ti) (~30%
Ni)	
Cu-Au-Zn (~25% Au, 46% Zn)	Fe-Cr-Ni-Mn-Si-Co (Xi < 10%)
Ni-Ti-X (X_ ₋ =Cu,Hf, Fe, Zn)	Pb, Zr-TiO ₃ [16]

Na následujícím obrázku jsou znázorněny konkrétní hodnoty u vybraných slitin.

Slitina	Vratná deformace [%]	Transformační teploty [°C]	Šířka hystereze [°C]	Teplotní závislost napětí $\Delta\sigma/\Delta T$ [MPa/°C]
NiTi	5 - 6	-120 - 120	30 - 60	5 - 7
NiTi - R-fáze	1	0 - 60	1 - 2	17 - 19
NiTiCu	4 - 5	-50 - 110	10 - 20	7 - 9
CuZnAl	4	-200 - 200	15 - 30	2 - 4
FeMnSi	1 - 2	-320	-200	1 - 2

Obr.6 Přehled některých slitin s tvarovou pamětí [17]



Obr.7 Typické příklady prostorově centrovaných struktur – a) B2 (NiAl), b) B32 (NaTl), c) B11 (TiCu), d) D0B3 B (NiB³Al) a plošně centrovaných struktur binárních slitin – e) L1B0B (CuPt), f) L1B1B (CuAu), g) L1B2B (AuCuB₃B), h) D0B22B (TiAlB₃B). Uvedeno je označení uspořádané struktury, v závorce je příklad slitiny.[25]

4.2 Polymery s tvarovou pamětí – SMP

Jev tvarové paměti není záležitost pouze kovů. Efekt tvarové paměti není ve spojení s polymery vlastnost pouze jednoho polymeru, ale spíše vhodné kombinace polymerní struktury, morfologie polymeru a vhodným výběrem výrobní technologie [6].

V současnosti se používají polymerní materiály jako Polyuretany, Polyesterény, Polynorbornyleny styren-butadienové kopolymery, které mají také tuto schopnost. Tyto materiály jsou atraktivní díky své nízké ceně, snadnému zpracování a vysoké funkci návratu do svého původního tvaru [20].

Polymery s tvarovou pamětí (SMP – Shape Memory Polymers) jsou poměrně novou skupinou inteligentních materiálů. Ve srovnání se slitinami s tvarovou pamětí mají mnoho výhod, jako nízká hustota (od 1,0 do 1,3 g/cm³), levnější a jednodušší výroba. Nejznámější SMP jsou tzv. segmentové polyuretany. Jsou odolné vůči organickým rozpouštědlům, UV záření a mohou být i biokompatibilní [21].

Polymerní materiály jsou charakteristické tím, že nad teplotu T_g jsou v kaučukovitém stavu – lze je lehce deformovat bez výraznější relaxace. To vše za podmínky, že působící čas je nižší než relaxační čas. Pokud je materiál následně ochlazen pod teplotu T_g , je deformace materiálu stabilizována. Tento materiál se vrátí do původního stavu zahřáním nad teplotu T_g . Lze říci, že pro tvarovou paměť je nezbytný rychlý přechod ze skelného do kaučukovitého stavu [20] [22].

Tyto polymery se obecně vyskytují ve dvou fázích. *První fáze je tepelně vratná* tzv. reverzibilní fáze. Ta udržuje přechodový stav. *Druhá fáze je tuhá struktura*, která umožňuje návrat do původního stavu. Jako tuhá struktura se používají krystaly, spleteniny nebo zesítnění. Tepelně vratná fáze je vybrána tak, že dochází k vratnému poklesu modulu při vzrůstu teploty nad T_R . Na rozdíl od slitin zde elastická složka s růstem teploty klesá. [20] [23].

Důležitou roli u polymerů s tvarovou pamětí hraje časová konstanta relaxačních a retardačních časů. Tato konstanta se obvykle liší při teplotách nad a pod T_R . Další skupinou nekovových materiálů s tvarovou pamětí jsou keramiky a gely, které vykazují tvarový efekt reagující na změnu teploty [23].

Nejčastěji používanou strukturou použitou při výrobě textilních výrobků je sendvičová struktura. Uvnitř této struktury je buď fólie, nebo pěna obvykle na bázi polyuretanů. Využití sendvičové struktury je především jako ochrana proti extrémním teplotám [20].

V současné době německý výzkumný tým představil polymerní materiály, které reagují na magnetické pole. Tento efekt je možný díky oxidům železa, které jsou obsaženy v polymeru. Tyto příměsi způsobují přeměnu energie magnetického pole na teplo. Vědci již bylo nalezeno i uplatnění těchto materiálů v moderní medicíně [24].

S nástupem polymerních materiálů s tvarovou pamětí bylo využito jejich vlastností a byly uplatněny jako komponenty do aut např.: tlumiče. [23].

4.3 Tvarová paměť

S pojmem „Tvarová paměť“ se můžeme setkat i u klasické textilie. Po odstranění napětí, které vyvolává deformaci, se textilie postupně vrací do původního zafixovaného stavu. Tento stav byl fixován při teplotě nad T_g materiálu a následně v tomto stavu byl materiál ochlazen pod teplotu T_g [20]. Dále se touto problematikou budeme zabývat v experimentální části.

Pro předměty a slitiny s tvarovou pamětí je charakteristický následující průběh chování: předmět ze slitiny SMA je zdeformován (zásadně se změní jeho tvar) a po zahřátí předmětu nad určitou charakteristickou teplotu se předmět samovolně vrátí nebo se přiblíží svým tvarem ke svému původnímu tvaru. Tato deformace může být velká a změna tvaru výrazná [20].

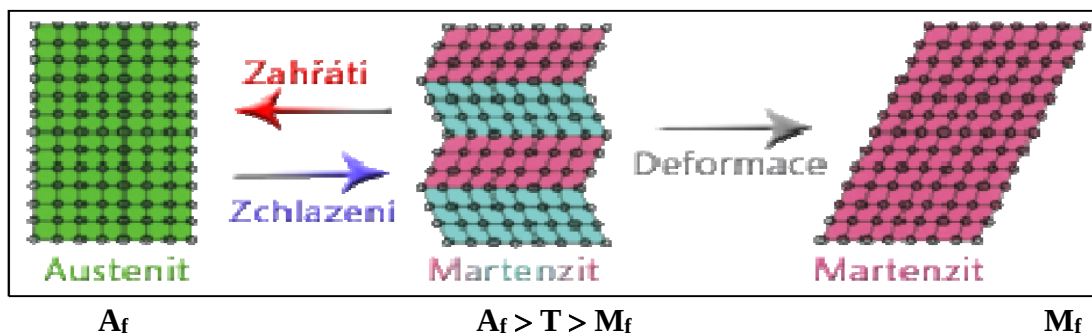
Při změně tvaru běžného tvárného kovového materiálu se atomy posunou. Překročíme-li tzv. mez kluzu, narušíme meziatomové vazby, atomy se přemisťují a vzniká trvalé přetvoření. Tento kluz nenastává při deformaci SMA. Krystaly mění strukturu bez narušení vazeb. Struktura není stabilní a při ohřevu se vrací do stabilnější původní struktury, protože nebyly narušeny meziatomové vazby. Tyto jevy se souhrnně nazývají jevy tvarové paměti.[30]

Touto problematikou se zabývali v článku o tvarové paměti i Vašina, M.; Šolc F. [78]. Ti uváděli, že slitiny SMA vykazují i další velmi atraktivní vlastnosti při mechanickém namáhání, které úzce souvisí s tvarovou pamětí a je možné je souhrnně označit jako "Jevy tvarové paměti". Charakteristické vlastnosti jsou např.: možnost vyvolání SME (Shape Memory Efekt) procházejícím elektrickým proudem, stabilní transformační teploty, možnost opakovaného vyvolání SME, větší průtažnost a vysoký stupeň biokompatibility [12].

4.4 Jev tvarové paměti

V souvislosti s jevem tvarové paměti hovoříme o tzv. martenzitické transformaci. Jde o fázový přechod prvního druhu (při teplotě fázového přechodu se skokem mění vnitřní energie U látky a měrný objem v , dochází při něm k přijímání nebo odevzdání tepla fázového přechodu, změny skupenství např. tání, vypařování atd.), který probíhá velice rychle. Fázovou změnu pevného stavu SMA materiálů lze řídit změnou teploty nebo změnou vnějšího napětí. Výchozí strukturou je **Austenit**. Jedná se o fázi existující při vyšší teplotě, která má charakteristickou kubickou krystalovou mřížku. Fázi vzniklou ochlazením materiálu nebo působením vnějších sil nazýváme **Martenzit**. [34]

Martenzit má také krystalickou mřížku, ale s nižší symetrií, hovoříme o méně stabilní struktuře než v případě Austenitu. Přechod Austenitu do Martenzitu je na obrázku 10 [34].

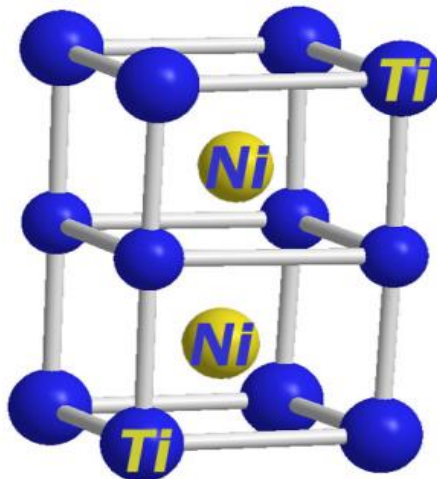


Obr.8 Fázový přechod Austenitu a Martenzitu [27]

4.4.1 Austenit

Tato struktura vzniká při teplotě A_s a končí při teplotě A_f ($A_f > A_s$). Austenit má strukturu s vysoce symetrickou kubickou mřížkou, která je na obrázku 9. Jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou odděleny zlomy zvanými **dvojčatění**. Pokud na slitinu při transformaci nepůsobí žádné vnější síly, tak si výsledná „krychle“ zachová přibližně tvar i objem, který měla v Austenitu. Tímto způsobem může vzniknout z jednoho Austenitu až 24 různých variant Martenzitu (záleží na symetrii martenzitu), ale při zpětné transformaci Martenzitu do Austenitu může vzniknout pouze jedna varianta Austenitu [18, 19].

Fáze, ve které dochází k transformaci, se nazývá β -fáze. Jedná se o transformaci v rozmezí teplot $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ v závislosti na složení a mikrostruktuře, což závisí především na termomechanickém zpracování [26].



Obr.9 Struktura austenitu [27]

Pod teplotu M_f („horký tvar“) jde o Austenit (viz Obr. 9), který je měkký, resp. kujný a obtížně deformovatelný. Nad teplotu A_f („studený tvar“) vzniká tvrdý, snadno deformovatelný Martenzit s chováním, které je blízké titanu. Na rozmezí těchto teplot vzniká superelastický (pseudo-elastický) materiál, který má schopnost návratu do původního stavu po odlehčení [26].

4.4.2 Martenzit

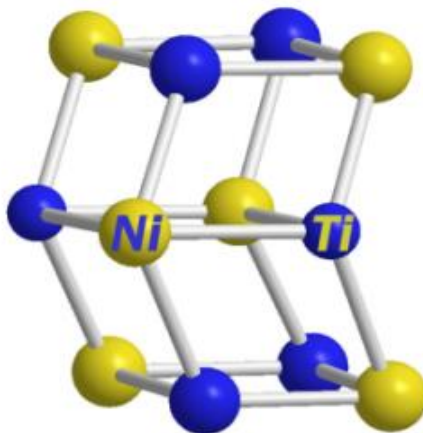
Martenzit má také krystalickou mřížku, ale s nižší symetrií, hovoříme o méně stabilní struktuře než v případě Austenitu. Přechod Austenitu do Martenzitu je na obrázku 10 [18].

Martenzitické transformace lze rozdělit do tří základních skupin: transformace a) Austenit-Martenzit; b) Martenzit-Martenzit (mezi dvěma různými Martenzity); c) Martenzit-Martenzit (Martenzity jednoho typu, kdy dochází pouze ke změně orientace mřížky a jeho struktura se nemění – druh vratné plastické deformace) [25].

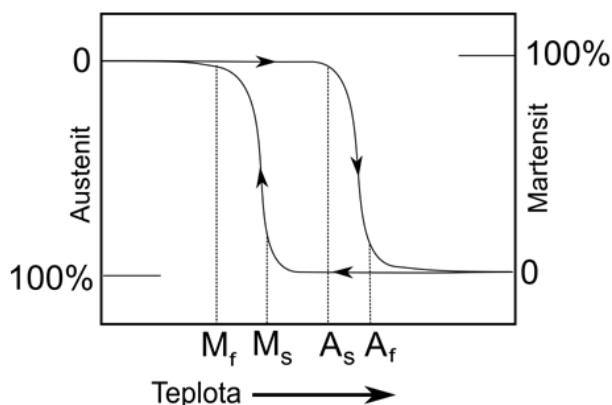
Martenzit je fáze, která vzniká při nižší teplotě M_s působením vnějších sil. Krystalická mřížka Martenzitu na Obr. 10, má menší symetrii než krystalická mřížka Austenitu na Obr. 9.

Tuto strukturální změnu probíhající v Martenzitické transformaci lze zjednodušeně popsat jako tvarovou změnu původních krychlí na kosé kvádry vyvolanou silným posunem atomů mřížky. Tato změna je ukončena při teplotě M_f ($M_f < A_s$), která je patrná na obrázku 11. [18, 19]

V Martenzitickém stavu je prvek snadno deformovatelný. Po ochlazení přechází na téměř jakýkoliv tvar. Jediným omezením je, že deformace nesmí překročit určité napětí (8%) udává literatura [26].



Obr.10 Struktura Martenzitu [17]



Obr.11 Hysterezní křivka poměru mezi Martenzitem a Austenitem [12]

- M_s : začátek přeměny z Austenitické fáze do Martenzitické fáze při ochlazování
- M_f : konec přeměny z Austenitické fáze do Martenzitické fáze při ochlazování
- A_s : začátek přeměny z Martenzitické fáze do Austenitické fáze při zahřívání
- A_f : konec přeměny z Martenzitické fáze do Austenitické fáze při zahřívání [19]

Vlastnosti stejného materiálu během transformace jsou za stejné teploty různé podle toho, jestli materiál přechází z Austenitu do Martenzitu nebo naopak. Šířka teplotní hystereze se rovná $M_s - A_s$ viz Obr. 11. Šířka může být v rozmezí 1 °C až 60 °C a závisí zejména na složení a typu slitiny [19].

Teplotní rozsah transformace $M_f - A_f$ nastává během ohřevu a je vyšší než při opačné transformaci během ochlazování. Rozdíl mezi teplotami transformace během ohřevu a ochlazování se nazývá teplotní hystereze. Hystereze je tedy definována jako rozdíl mezi teplotou, při které je materiál z 50 % transformován na Austenit během ohřevu a z 50 % transformován na martenzit během ochlazování. V praxi to znamená, že slitina navržená tak, aby byla plně transformovaná tělesnou teplotou během ohřevu ($A_f < +37$ °C), by vyžadovala ochlazení na teplotu kolem +5 °C, aby se plně přetransformovala na Martenzit (M_f) [28].

Na obrázku 11 je vidět relativní podíl Martenzitu/Austenitu v celé slitině.

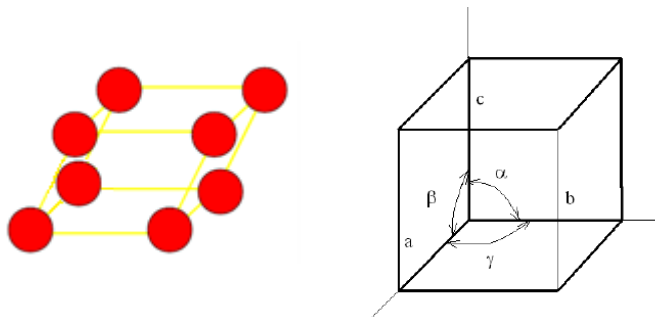
Hysterezní chování se projevuje i při působení síly. Důsledkem toho je, že síla nutná pro stlačení či natažení SMA součástky je vyšší než síla, kterou látka působí na své okolí po odtížení. Proto by byly z SMA slitin velmi špatné pružiny, ale na druhou stranu existují využití tohoto efektu hlavně pro tlumení vibrací a podobně [19].

4.4.3 R-fáze (rhombohedral)

R-fáze vzniká za jistých okolností, které závisí na tepelných a mechanických účincích, chemické složení, deformace atd. Tato fáze se objevuje mezi transformací Austenitu do Martenzitu. Výsledkem je dvoustupňová transformace [29].

R-fáze je charakteristická svou krystalickou mřížkou, která je vidět na obrázku 12. Tato krystalická mřížka se jmenuje Trigonální (romboedrická). Pro tuto mřížku je charakteristické:

$$\begin{aligned} a &\neq b \neq c \\ \alpha &= \beta = \gamma = 90^\circ \end{aligned}$$



Obr.12 Romboedrická (Rhombohedral) krystalická mřížka [29]

4.5 Druhy tvarové paměti

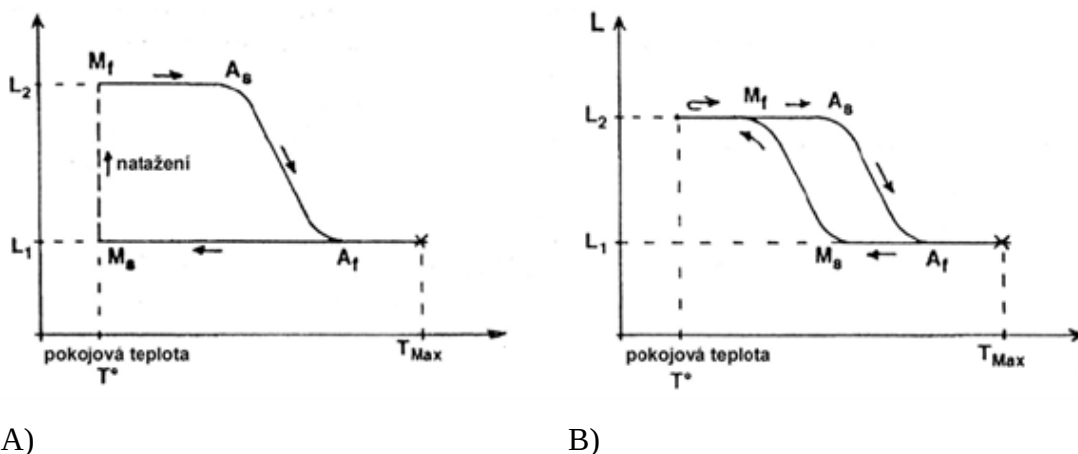
Tvarová paměť slitin je spojena s fázovým přechodem z jedné polohy krystalické mřížky do druhé. Dochází-li k přechodu z Austenitu do varianty Martenzitu, hovoříme o jednosměrné paměti. Dojde-li však k přechodu z Austenitu do jakékoliv z 24 variant Martenzitu, hovoříme o vícesměrné tvarové paměti.

4.6 Jednosměrná paměť

Jednosměrná paměť je schopnost přechodu mezi výchozí polohou (Austenitní) a jen jednou polohou další (Martenzitní). Jedná se o paměťový efekt typu: z Austenitu slitina přejde do Martenzitu, po zahřátí slitina přejde zpět do jediného Austenitu (vrátí se do původního tvaru). Tato transformace je na obrázku 13 A [26].

Jednosměrný paměťový efekt vzniká v důsledku probíhající Martenzitické transformace, kterou lze řídit změnou teploty. Mezi Austenitem a Martenzitem jsou charakteristické čtyři transformační teploty A_s , A_f , M_s , M_f . Teplota M_s je teplota, kdy se během ochlazování začíná Austenit měnit na Martenzit, zatím co M_f je teplota, při jejímž dosažení změna transformace M_f ustává. Teploty A_s , A_f jsou teploty, při kterých během ohřívání začíná, resp. končí opačná přeměna, tzn. Martenzitu na Austenit. [26]

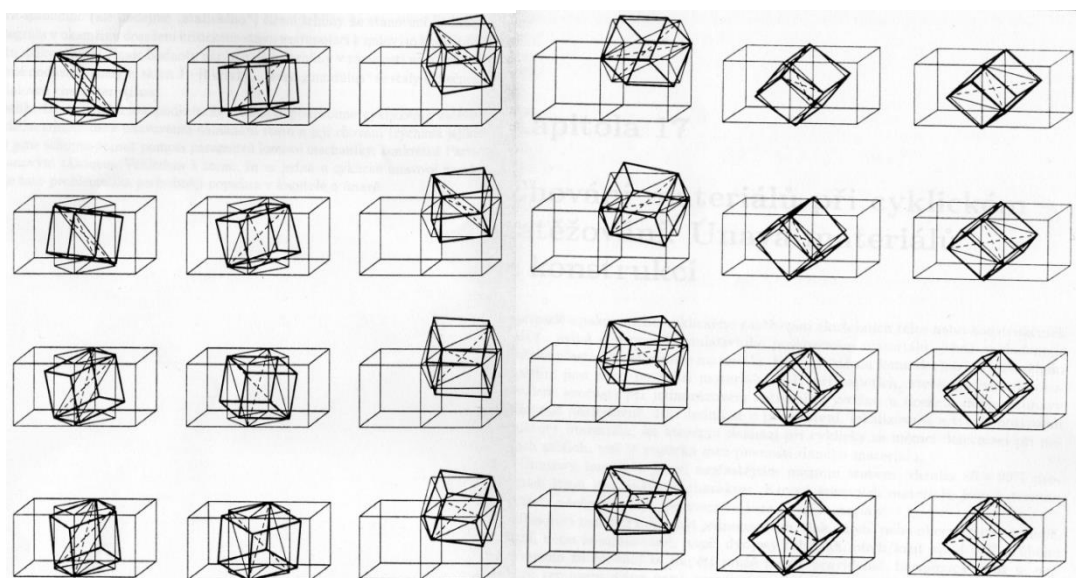
Tyto teploty představují základní charakteristiku paměťových materiálů s ohledem na jejich aplikaci, výběr materiálů, hodnocení tvarově paměťového efektu a posouzení technologie výroby [31].



Obr.13A) Jednosměrná tvarová paměť; B) Vícesměrná tvarová paměť [32]

4.7 Vícesměrná paměť

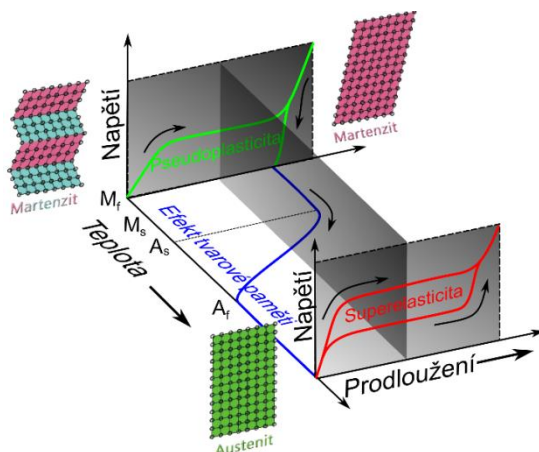
Vícesměrná paměť je schopnost přechodu mezi jednou Austenitní a více Martenzitními polohami při různých změnách vnějších podmínek. Martenzitické fáze jsou na Obr. 16. Tuto vícesměrnou paměť je možné „vytrénovat“ z jednocestné. Průběh vícesměrné paměti je vidět na obrázku 13 B. Princip je takový, že po ochlazení slitina přejde přednostně přímo do jedné varianty Martenzitu a tím změní tvar, po zahřátí se zase vrátí do výchozího stavu (ke změně tvaru stačí změna teploty). Síla, kterou materiál vyvine při přechodu mezi fázemi je mnohem nižší než u běžných SMA a vratná deformace těchto materiálů je pouze něco okolo 1 %. Pokud je materiálu silně bráněno ve změně tvaru, tak se může dvoucestná paměť ztratit. V technických aplikacích se používají zejména jako pružiny, kdy je změna tvaru o 1 % dost výrazná [26].



Obr.14 24 fází Martenzitu [29]

5 MECHANICKÉ PROJEVY MATERIÁLŮ S TVAROVOU PAMĚTÍ

Mezi základní mechanické vlastnosti SMA materiálů patří superelasticita, pseudoplasticita a jev tvarové paměti, které jsou uvedena na obrázku 15.



Obr.15 Základní termomechanické efekty [33]

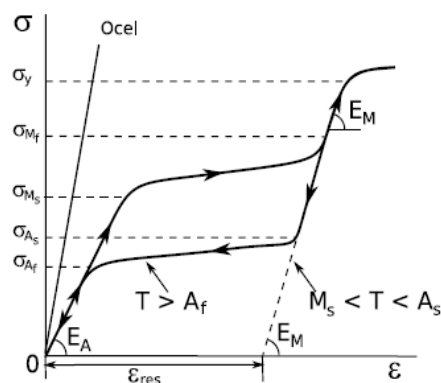
5.1 Pseudoplasticita

Mechanický projev Pseudoplasticita vzniká při namáhání vzorku SMA v tahu a tlaku v Martenzitickém stavu při $T < M_s$. Působí-li na SMA vzorek síla, Martenzit se snadno přetransformuje a přesune se při daném zatížení do jiného Martenzitu. Materiál se deformuje v rozsahu $\pm 5\%$. Postupně se vytvoří nejvýhodnější varianta Martenzitu v daném zatížení. Po překročení meze a při odtížení se zotavený Martenzit chová elasticky. Po zahřátí se SMA vrátí z jakéhokoli Martenzitu zpět do jediné varianty Austenitu a tím opět vzniká jev tvarové paměti [26].

Při ohřevu vzorek nad teplotu A_f se Martenzit transformuje zpět do vysokoteplotní Austenitické fáze, přičemž se tvar součástky mění na původní tvar a dochází k vlastnímu jevu tvarové paměti. Je-li deformaci materiálu při ohřevu bráněno, návrat do původního Austenitického stavu probíhá obtížně a působí na své okolí velkou silou. Pokud se zorientovaný Martenzit transformuje, mění se napětí s teplotou přibližně lineárně [26, 34].

5.2 Superelasticita

Superelastické NiTi materiály mohou být až několikanásobně napjatější, než obyčejné kovové slitiny, aniž by byly plasticky deformovány, což je charakteristické pro chování kaučuku [28].



Obr.16 Superelasticita SMA materiálů [34]

Jedná se o namáhání SMA materiálu v Austenitickém stavu $T > A_f$. Současně dochází k Martenzitické transformaci z Austenitu do nejvhodnější Martenzitické varianty. Nedochází pouze ke změně teploty. Deformace (tvarová změna) je omezená, plně vratná, při odtížení v Austenitické fázi má vzorek po odtížení původní tvar. Superelastická deformační křivka na obrázku 16 má silně nelineární charakter a je vždy doprovázená hysterezí. Elastická deformace kovových materiálů je malá, běžně kolem 0.7 % [34, 35].

6 NITINOL

NiTi s obsahem cca 50%, příp. 55 hm. % Ni se považuje za hlavní paměťovou slitinu. Pro změnu teploty z Ms na As je v tomto systému definovaná jen úzká oblast s podobnou strukturou (homogenitou) cca 3 %. Při přípravě slitin se tedy musí dbát na přesnou kontrolu složení slitiny a extrémní homogenitu. Tato extrémní homogenita je podmínkou vysoké funkční spolehlivosti a teplotní transformace. Atomy slitin musejí být rovnoměrně rozloženy v celém objemu materiálu. Pomocí přimísení dalších prvků, jako jsou zejména Cu a Fe je možno snížit koncentrační závislost teplot přeměny a dají se navíc dosáhnout příznivější mechanické vlastnosti [15].

Fyzikální a mechanické vlastnosti intermetalické sloučeniny NiTi jsou uvedené v tabulce. 1.

Tab.: 1 Vlastnosti slitin NiTi [12, 27]

Vlastnost	Hodnota		Jednotka
	Austenit	Matrenzit	
Teplota tání	1310		[°C]
Hustota	6,45		[g.cm ⁻³]
Tepelná vodivost	18	8,5	[W. °C.cm ⁻¹]
Transformační entalpie	490		[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Rozsah transformačních teplot	-200,110		[°C]
Hystereze	30		[K]
Max. jednosměrného jevu	8		[%]
Max. vícesměrného jevu	1,2		[%]
Max. teplota ohřevu	400		[°C]
Odpor	82	76	[μΩ.cm]
Tepelná kapacita	0,326		[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Maximální prodloužení	Až 15,5; spíše méně		[%]
Youngův modul pružnosti	Přibl. 83	Přibl. 28	[GPa]
Pevnost v tahu	2		[GPa]

Mezi další vlastnosti těchto materiálů patří korozní odolnost, biokompatibilita. Tyto vlastnosti úzce souvisí s oblastí použití SMA. Pro experiment je v této DP byl použit materiál NiTi 1, NiTi5 a NiTi6 upravený žháním a NiTi 5 a NiTi 6, které jsou nežháné

6.1 Výroba NiTiNOLových vláken

Výroba a formování NiTiNOLu pro specifické účely je složitá záležitost. Titan je velmi reaktivní prvek. Z tohoto důvodu se tavení provádí v ochranné atmosféře. Často se tavení provádí pomocí plasmového oblouku, elektronovými svazky nebo indukčně ve vakuu. Při tavení Ni-Ti slitin působí nepříznivě především uhlík a kyslík. Tvorbou karbidu titanu a oxidu titanu z NiTi dochází k posuvu koncentrací jednotlivých prvků a tím také dochází ke změně teploty přeměny. Další těžkostí při tavení NiTi slitin je tvorba nízkotavitelné fáze Ti_2Ni , která způsobuje výraznou náchylnost k tvorbě trhlin za tepla. V poslední době je rovněž věnována pozornost aplikaci plazmových postupů tavení reaktivních materiálů, včetně slitin NiTi [15].

Pro tvarování NiTi se zpočátku používají standardní procesy zpracování za tepla i za studena. Během zpracování za studena kov rychle tvrdne a musí být často žíhán. Tvrzením a správným tepelným zpracováním se zlepšují parametry SMA. Při obrábění je vzhledem k vlastnostem NiTiNOLu problematické používání svařování a pájení. Pro vytváření konkrétních tvarů se využívá broušení, stříhání a vrtání [12] [48].

6.2 Základní oblasti uplatnění

Využití materiálů s tvarovou pamětí je velice široké a souvisí především s cenou materiálu. Největší odvětví, kde se uplatňují slitiny s tvarovou pamětí je medicína.

- **Medicína** – využívá jevu tvarové paměti pro: cévní, průduškové a jiné stenty (jedná se o trubičky, umožňující průchodnost díky roztažení úzkého místa), drobné chirurgické nástroje. Další skupinu tvoří ortodontické dráty v permanentních rovnátkách.

Katetry: jedná se o tenké trubičky, které jsou zaváděny tělními trubicemi do různých tělních dutin. Právě chování trubek ze SMA materiálů v ohybu určuje jedinečné vlastnosti lékařských katetrů. I při průchodu trubicí tvořenou jemnou biologickou tkání sleduje jemné zákruty a mechanicky tkáň nepoškodí. Materiály s tvarovou pamětí mají lepší mechanické vlastnosti, méně zatěžují pacienty, usnadňují unikátní lékařské úkony [25].

Stenty: síťky ve tvaru trubiček připravené spletením z drátu nebo laserovým vyříznutím z tenkostěnné trubičky, jsou lékařskými pomůckami, které hlavně pomáhají zlepšovat průchodnost cév v okolí lidského srdce a jiných důležitých místech krevního oběhu, dále pak průchodnost jiných tělních trubíc od žlučovodu až po jícn a střeva. Jsou využívány hned tři vlastnosti SMA – a) superplasticita při komprimaci stentu do trubičky katetru, kterým je dopraven na místo, b) tvarová paměť při roztažení stentu v místě jeho funkce – vlivem tělesné teploty se stent roztáhne do původního tvaru, c) biokompatibilita stentu – materiál stentu je intermetalikum a velmi dobře odolává agresivnímu prostředí lidského těla [25].

Permanentní rovnátka zubů: mají hlavní člen tvořený z elastického drátku, který táhne (rovná) pokřivené zuby do žádaného postavení. Pokud je drátek vyroben z klasické oceli, má lineární elastické chování. S přiblížením zubu do žádané polohy, síla na zub klesá a drátek je nutno upravit či vyměnit. Použije-li stomatolog drátek superelastický, je síla působící na zuby silně nelineární a navíc vysoce závislá na teplotě v ústech [16, 25].

- **Technické aplikace:** jako první aplikace byly použity slitiny NiTi na výrobu sponek a spojek trubek.

Spojky trubek: spojka vyrobená z NiTi je roztažena v Martenzitickém stavu, po vložení spojovacích trubek je trubka zahřátá nad teplotu A_f . Tato spojka se smrští díky působení jevu tvarové paměti a dojde ke spojení trubek. Použití těchto trubek bylo pro bojové stíhačky F-14 v hydraulickém systému [16] [25].

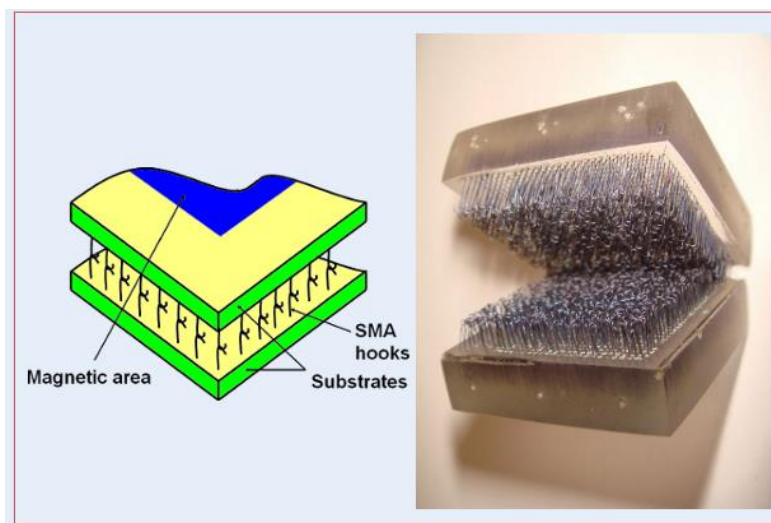
Elektrické konektory (mikroprocesory): slabé zahřátí konektoru uvede v činnost paměťové elementy a dojde tím k mechanickému a elektrickému kontaktu. Po slabém ochlazení se mechanický kontakt uvolní a elektronickou součástku lze snadno vyjmout (rozpojit) [16] [25].

Vodovodní baterie: Při návratu do Austenitu materiál SMA vyvíjí velkou sílu. Tohoto poznatku je využito pro aplikace, kde prvky nahrazují teplotní čidlo, vyhodnocovací jednotku i příslušný akční člen (motor). Oproti klasickým prvkům se s výhodou využívá nelineární teplotní charakteristika, tj. reagují v úzkém oboru teplot, který lze relativně přesně nastavit. Je to například vodovodní baterie, ve které je udržována stálá teplota vytékající vody právě díky pružině z SMA slitiny. Základem jsou dvě pružiny – jedna teplotně a napětově citlivá ze SMA slitiny Ni-Ti a druhá teplotně necitlivá, vytvářející potřebné předpětí. Předpětím se nastaví žádaná teplota vytékající vody a NiTi pružina pohybuje šoupátkem tak, že nastavuje poměr teplé a studené vody. Ochranu před opařením vodou teplejší než 70 °C lze zajistit uzavíracím ventilem pracujícím na stejném principu [16] [25].

Marsovské vozítko: Mars Pathfinder – vozítko bylo vybaveno s detektorem dopadajícího mart'anského prachu. Nad elementem slunečního článku bylo umístěno otočné sklíčko, na které padal prach. Detekováno bylo dopadající sluneční záření přes sklíčko a po jeho otočení bez sklíčka. Otočný mechanismus byl poháněn drátkem *NiTi* (SMA), jeho zkrácení bylo vyvoláno průchodem elektrického proudu na povel ze Země [16].

- **Mikrotechnika:** mikroventily, mikropumpy, technické prvky, které mají výrazně menší rozměry než klasické při stejných technických parametrech.
- **Superelastické aplikace:** Příkladem takových aplikací jsou *superelastické obroučky brýlí*, které se po odtížení vrací do původního tvaru, navíc jsou příjemné na nošení, netlačí. U *přenosných telefonů* (pracující na nižším kmitočtu než klasické GSM telefony) jsou antény zhotoveny ze superelastické slitiny, díky tomu vydrží i hrubší zacházení [16].
- **Textilní aplikace:** Košile s tvarovou pamětí, která se sama vlivem lidského tepla "vyžehlí". [16].

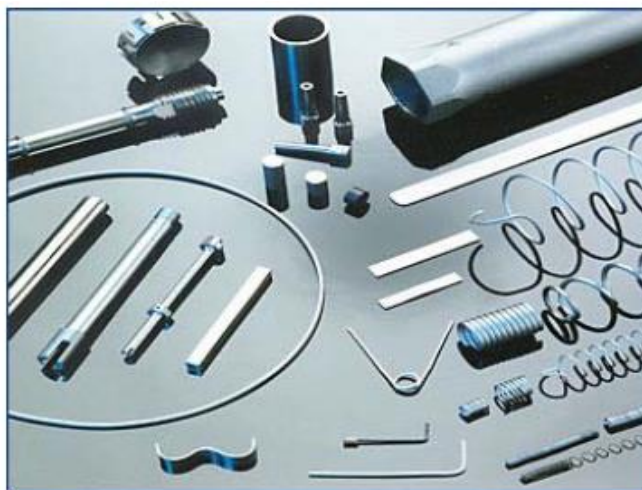
SMA suchý zip – nová aplikace slitin s tvarovou pamětí – Byl vyvinut nový typ suchého zipu využívající mikroháčky z NiTi vláken s tvarovou pamětí, který je vidět na obrázku 17. Tento nový design háčků odstraňuje některé nevýhody klasického suchého zipu, jakými jsou např. hlučnost při rozepínání, opotřebení háčků po několika tisících cyklech spojení a rozepnutí. Využití NiTi vláken pak dále přináší řadu nových funkčních vlastností jako např. velká maximální pevnost spojení, kterou je možné teplotně řídit. Na nový suchý zip byla podána patentová přihláška PV 2008–568 u Českého patentového úřadu [36].



Obr.17 Schéma a prototyp suchého zipu z SMA [36]

Technické textilie – tepelně upravené 3D textilie s NiTiNOlovými vlákny s tvarovou pamětí, proměnou tuhostí a proměnou strukturou. Uplatnění NiTiNOlových textilií také jako tlumících a nárazu odolných textilií.

Biomedicínské textilie – superelastické textilie určené pro růst buněk



Obr.18 Polotovary ze slitiny NiTi [25]



Obr.19 Příklady užití slitin s tvarovou pamětí. a) Anténa přenosného telefonu, b) Marsovské vozítko – Mars Pathfinder – bylo vybaveno detektorem dopadajícího marťanského prachu, pohyb byl zajištěn elektricky zahřívaným SMA drátkem, c) směšovací vodovodní baterie (viz obr 7) d) stenty pro lékařské účely e) superelastické obroučky brýlí.[25]

Dalšími zajímavými speciálními vlákny jsou například skleněná nebo čedičová vlákna, která byla v této práci použita k hrubému srovnání s NiTiNOlovými vlákny.

7 SKLENĚNÁ VLÁKNA

Skleněná vlákna jsou jedním ze sklářských výrobků, jehož využití v technické i každodenní praxi se stále rozšiřuje.

Oproti masivnímu sklu mají vlákna především vyšší pevnost v tahu a mohou se použít pro výrobu moderních kompozitních materiálů. Skleněná vlákna jsou tradičním výrobkem českého průmyslu a vyrábějí se ve formě stříže nebo nekonečných vláken vhodných pro další využití ve stavebních, chemických i konstrukčních odvětvích průmyslu. [49]



Obr.20 Sekané skleněné vlákno [50]

7.1 Historie skleněných vláken

Výroba skla byla známa již Egypťanům okolo roku 1800 př. n. l. a můžeme s jistotou tvrdit, že první výrobci skla znali i skleněná vlákna, která dokázali snadno vytáhnout z roztavené skloviny. Egyptské vázy okolo roku 1600 př. n. l. byly již zdobeny hrubými skleněnými vlákny. Archeologické nálezy v Číně (dynastie Han 206 let př. n. l. až 220 let n. l.) obsahovaly tlustá skleněná vlákna o složení obdobném současnému E – sklu. [49]

V 16. a 17. stol. n. l. začali benátští skláři zdobit ve větší míře své výrobky skleněnými vlákny. Laboratorní výrobu a technické použití skleněných vláken uvádějí ve svých pracích zakladatelé moderní fyziky Hooke a Réaumur (17. až počátek 18. století). [49]

Koncem 19. stol. se objevují první zmínky o technickém využití skleněného vlákna v patentové literatuře. Nejstarší dochovaná zmínka je z roku 1880 a zabývá se drátem pro telegraf opředeným skleněnou izolací. Veřejný zájem o skleněná vlákna byl vzbuzen na Světové výstavě v Chicagu v roce 1893, kdy E. D. Lingey vytáhl pramence vláken z rozžhavených konců tyčí a namotal je na otáčející se buben velkého průměru. [49]

V roce 1916 podává R. Kemp první patent na vlákna vyztužená plastem a od roku 1934 jsou průmyslově vyráběna tepelně-izolační skleněná vlákna v Newarku (Ohio, USA). V následujících letech probíhal vývoj E-skloviny pro skleněná vlákna a v roce 1951 získává patent na allylsilanovou povrchovou úpravu vláken R. Steinman. [49]

7.2 Současnost a budoucnost skleněných vláken

Skleněná vlákna jsou vlákna anorganická s širokou škálou použití. Ceněná jsou hlavně pro svoje výborné technické vlastnosti, jako jsou vysoká pevnost, vysoká hodnota Youngova modulu v tahu, odolnost vůči vysokým teplotám, nehořlavost, dobrá chemická odolnost a dobré elektrické vlastnosti. Vynikající tepelně a zvukově izolačních vlastností využívá v široké míře stavební průmysl. [49]

Vlastnosti skleněných vláken jsou výhodné zvláště ve výrobě kompozitních materiálů jako vyztužující kontinuální vlákna nebo ve formě stříže. Skleněná vlákna jsou používána ke konstrukci vláknových kompozitů o vysoké kvalitě s vysokými nároky na mechanické a tepelné vlastnosti. Konečné výrobky se využívají především v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, leteckém průmyslu, chemickém průmyslu, elektrotechnice a v jiných odvětvích. V elektrotechnickém průmyslu se aplikují zejména ve výrobě laptopů, počítačů a mobilních telefonů. V současné době se věnuje větší pozornost výrobě a použití skleněných vláken ve formě nekonečného vlákna. [49]

Moderní kompozitní konstrukční materiály se bez skleněných výztuží neobejdou. V roce 2001 byla celosvětová výroba skleněných vláken na úrovni 2,5 milionu tun. V roce 2000 byla v Evropě spotřeba sklolaminátů rozdělena následovně: 37 % dopravní aplikace, 25 % elektrické a elektronické výrobky, 31 % stavební prvky, 5 % výrobky pro sport a volný čas a 2 % ostatní aplikace.

Technologie zpracování moderních kompozitních prvků zahrnuje kromě klasického ručního kladení a prosycování textilních vrstev využití autoklávové techniky, navíjení vláken, tažení profilů (pultruze), injekční vstřikovávání, tlakové prosycování pryskyřicemi (resin transfer molding) a další způsoby. [49]

Budoucnost vyžaduje stále kvalitnější materiály. Lze předpokládat především rozvoj kompozitních materiálů s hybridní výztuží – tedy kombinací skleněných, uhlíkových, aramidových, případně dalších typů vláken. Pro dosažení speciálních efektů budou uplatňovány nanotechnologie, jak v povrchových úpravách vláken, tak i ve funkčních úpravách výrobků. Vysokých pevností kompozitních materiálů určitě využije i výroba energie. Nedávno se spojily firmy GERMAN WIND a DENMARK's LM GLASFIBER a vyvinuly lopatky pro větrnou elektrárnu s výkonem 5 MW. Při průměru rotoru 125 m se jedná o největší lopatky, které budou sériově vyráběny od roku 2004. [49]

Na Technické Univerzitě v Liberci se skleněnými vlákny zabývá několik kateder a vedle strojů pro jejich zpracování je značná pozornost věnována jejich využití pro výrobu kompozitních materiálů. [49]

7.3 Textilní skleněné vlákno

Skleněná textilní vlákna se začala vyrábět koncem 19. století. V odborné literatuře se rozlišují dvě velké skupiny:

- textilní výrobky ze skla pro izolace a zpevnění jiných materiálů,
- vlákna ve formě kabelu pro elektronický přenos dat.[51]

7.4 Složení skleněných vláken

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B) s velmi malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. [52]

Tab.: 2 Složení sklovín (hmotnostní procenta) [52]

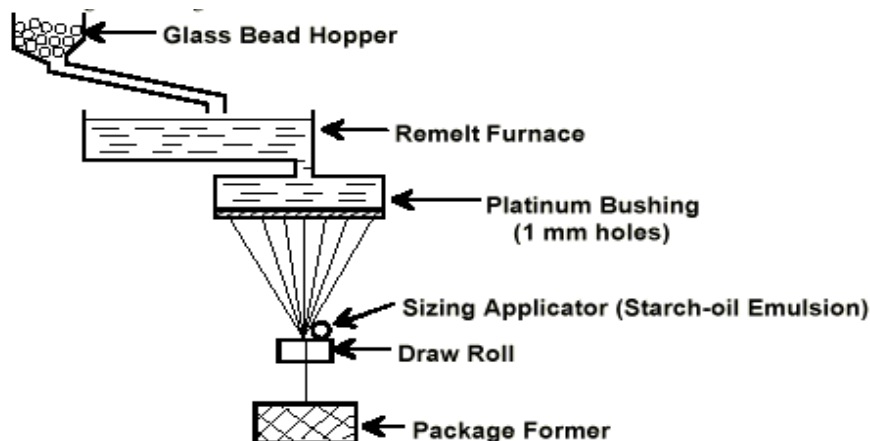
Oxid	Sklo E	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Sklo L	Křemenné sklo
SiO_2	52 – 56	65	64 -68	64	62,9	99,9
Al_2O_3	12 – 16	25	3.5	1	2,6	
CaO	16 – 25	–	11 –15	5		
MgO	0 – 5	10	2 – 3		10,3	
TiO_2				3		
ZrO_2				13	2,1	
B_2O_3	5 – 10	–	4 – 6		13,6	
$\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$	< 0,8	< 0,3	až 10	14	< 0,8	
PbO					8,5-28	

7.5 Výroba skleněných vláken

Skleněné vlákno je materiál vyrobený z extrémně jemných vláken skla. Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr trysky 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování „monovláken“. Monovlákna se po povrchové úpravě (sizing) sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (kabílek). [52]

O mikrostruktuře skleněných vláken je velmi málo poznatků vzhledem k jejich amorfnímu stavu, který je způsoben nepatrnou krystalizační rychlostí směsi oxidů při ochlazování taveniny. Předpokládá se, že na vysoké pevnosti skleněných vláken vedle tzv. velikostního faktoru (malý povrch a malé defekty v tenkém vláknu), se podílí také odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. Zatímco jádro obsahuje nahodile orientovanou síť kovalentně vázaných atomů, povrch má pravděpodobně semi – orientovanou strukturu. Na povrchu tak vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému rozvoji trhlin při tahovém zatížení vlákna. Podobný mechanismus je v souladu se skutečností, že jakékoliv narušení povrchových vrstev (např. mechanické poškrabání) vede k drastickému poklesu tahové pevnosti vlákna.

Předpokládaná tenká povrchová vrstva s preferovanou orientací kovalentních vazeb se však neprojevuje měřitelnou anizotropií elastických veličin skleněného vlákna. Při mikro mechanických výpočtech se uvažují stejně velké hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν ve směru podélném i příčném. [52]



Obr.21 Schéma výroby skleněných vláken [52]

Nejčastěji se vyrábí metodou *sol/gel*: Z disperze (solu) se těkáním rozpouštědla tvoří gel. Je to kapalina tak viskózní, že se chová jako pevná látka. Tepelným zpracováním za současného dloužení se vytváří kompaktní struktura, což je skleněné vlákno. [51]

7.5.1 Metody zvlákňování

Zvlákňování přes trysky: Skelná tavenina při odtahování z trysky rychlostí 30 – 60 m/sek. tuhne. Jednotlivé filameny s jemností 4 – 13 μm se spojují do jednoho svazku, šlichtují a navíjí. Tímto způsobem se vyrábí více než 90% skleněných filamentů.

Pro staplová vlákna se používá dvoufázová technologie. V prvním stupni se zhotovují z taveniny tzv pelety, které se případně skladují a ve druhé fázi roztaví a zvlákňují tažením přes trysku s pomocí síťového bubnu rychlostí do 60 m/s.

Foukání přes trysku. Odtah z trysky se provádí stlačeným vzduchem. Rychlostí 150 – 200 m/sek. se vytahují niti rozdílných délek a ukládají na síťový buben. Odtud se vlákenný materiál odtahuje, prochází olejovou mlhovinou a navíjí na cívku.

Tažení tyčemi: 100 – 200 skleněných tyčí 150 – 190 cm dlouhých a o průměru 4 – 5 mm se taví na dolním konci při konstantním posunu. Odletující kapky táhnou vlákna a padají na buben, na který se rychlostí 40 – 50 m/sek. nitě navíjí, zatímco se kapky odhazují.[51]

Modifikované tažení tyčemi: Nitě, které leží na odtahovacím bubnu vedle sebe, se zvedají pomocí proudu vzduchu a vedou do sběrného kanálu. Zde se pak se lámou na různé délky, odtahují a vytváří pramen vláken, který se navíjí jako přást na cívku.

Vlákno se dodává jako hladký nebo tvarovaný filament v tloušťce 400 – 4000 tex (s průměrem jednotlivých vláken od 6 μm) nebo jako skaná příze 400-2000 tex, případně s mosazným nebo chromovým jádrem nebo jako stříž [51].

7.6 Úprava skleněných vláken

Při manipulaci s nechráněnými vlákny dochází při jejich vzájemném kontaktu k abrazi a následnému snížení pevnosti. Proto se každé jednotlivé vlákno ihned po vytažení z platinové trysky ve dnu tavicí pece, vydloužení a ochlazení na teplotu okolí pokrývá tenkým ochranným povlakem, jehož tloušťka odpovídá hmotnostnímu podílu 0,3 až 1,5% [52]. Pro úpravu skleněných vláken jsou používány:

- **lubrikační látky** (vosk, olej, škrob, želatina, polyvinylakohol), které usnadňují další textilní zpracování vláken. Lubrikační látku je nutno před výrobou kompozitu z povrchu vláken odstranit, aby bylo dosaženo potřebné soudržnosti vláken a matrice
- **vazebné prostředky**, které mají dobrou afinitu jak ke skleněným vláknům, tak k polymerní matici. [52]

K pozitivním účinkům ochranných prostředků patří snížení adsorbovaného podílu vody (mají určitý hydrofobizační účinek) a antistatické působení (vlákna méně přitahují prach). Běžné vazebné prostředky pro silikátová skla jsou **organokovové sloučeniny** (hlavně „chromkomplexy“, nejznámější je Volan[®] firmy. Du Pont) a **organosilany** (zkráceně silany).

Chemická struktura silanů je komplikovaná, stejně jako mechanismus jejich změn před spojením s polymerem a sklem. Vazebné prostředky nanášené ve vodném roztoku nevytvářejí na povrchu vláken souvislý film, ale jsou přítomny v podobě mikroskopických kapiček ulpívajících na sklu v místech s vyšším podílem reaktivních skupin (povrch skla má poněkud jiné složení než jádro).

Již z tohoto důvodu nezabraňují např. silany (přes určité hydrofobní vlastnosti vnějších vrstev povlaků) působení vody na povrch vláken, spíše jenom znesnadňují difúzi molekul vody do kompozitu podél vláken.

Molekuly vody, které k vláknům difundují skrze polymerní matrici, znovu hydrolyzují vazbu vazebného prostředku k povrchu skla. [52]

Ačkoliv jde v podstatě o reverzibilní proces, tj. po vysušení se kovalentní vazby opět obnoví, u mechanicky zatížených kompozitů tato hydrolýza umožňuje smykové posuvy vláken vůči matrici, zvyšování množství adsorbované vody a nakonec může dojít i k úplnému porušení rozhraní vláken a matrice, U laminátu se skleněnou výztuží se takové porušení projevuje zbělením poškozeného místa [52]. V praxi jsou používané úpravy rozlišovány také podle tvrdosti:

- měkká (silanová) úprava
- polotvrdá (organokovová) úprava
- tvrdá (silanová nebo organokovová) úprava [52]

Tvrdost vazebného prostředku, daná jeho chemickou strukturou, určuje vhodnost rovingu pro další technologie. Tvrdá úprava, např. methakrylsilanem nebo chromkomplexem (je používán termín „tvrdý roving“) zaručuje dobrou sekatelnost rovingu a rovnoměrný rozpad vláken při sekání, tj. vlastnosti potřebné při výrobě dílů pomocí stříkacího zařízení nebo při přípravě prepregu pro lisovací technologii (SMC). Je vhodná i při výrobě jednosměrných prepregů a rohoží. Měkká úprava (tzv. měkký roving) např. vinylsilanem nebo aminosilanem zajišťuje rychlou smáčivost vláken polyesterovou pryskyřicí a používá se u rovingů pro navíjení, tažení profilů a pro tkaniny určené k výrobě členitých dílů. V sortimentu vláken fy. Saint-Gobain Vertex je typ úpravy vyjádřen posledním trojčíferným číslem v označení rovingu. [52]

U dražších skel typu S, používaných pro kompozity s epoxidovými matricemi, se užívá jiná úprava. Firma Owens-Corning opatřuje vlákna povlakem na bázi epoxidové pryskyřice.[52]

Jsou studovány povlaky na bázi polyimidu a organického křemičitého prekurzoru, v nichž hlavní složku tvoří SiO₂ (povlaky CERAMER®).[52] Zvláštní povrchovou úpravu vyžadují skleněná vlákna do fenolformaldehydových pryskyřic. Místo silanů se používají povlaky na epoxidové bázi. [52]

7.7 Vlastnosti skleněného vlákna

Skleněná vlákna jsou čirá a mají kruhový průřez. Skleněná vlákna je možné barvit v tavenině, ale barva nebývá výrazná.

K ochraně vlákna se používají lubrikanty, které chrání na povrchu skleněné vlákno. K lubrikaci skleněného vlákna se používají vosky, syntetická pryskyřice, oleje nebo silikony.[53]

Sklo je odolné proti ohni a mnoha chemikáliím, má poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti. Vlhkost však pevnost vláken snižuje a odolnost proti trvalému namáhání a pevnost v oděru je rovněž nízká. Průměrná hmotnost je asi 2500 kg/m³, bod tání až přes 1000° C, dlouhodobě snáší sklo teploty až 450° C. [53]

V tabulce 3 je příklad 3 druhů skla používaných k výrobě textilního vlákna. Všechny obsahují nejméně 50 % oxidu křemičitého (SiO₂), obsahem ostatních chemických prvků se jednotlivé druhy liší.[51]

Například E-sklo obsahuje 55 % SiO₂, 18 % CaO, 8 % Al₂O₃, 4,6 % MgO a jiné prvky s podíly pod 5 %. Vlákná z E-skla jsou vhodná jako elektroizolační materiál. S-sklo snáší teploty přes 1000° C a je méně pružné. C-sklo je mimořádně odolné proti chemikáliím.[51]

Tab.: 3 Vlastnosti textilního skleněného vlákna [51]

Druh skla	Pevnost v tahu [GPa]	E - modul [GPa]
E (electric)	1,7 - 3,5	69 - 72
S (strength)	2,0 - 4,5	85
C (corrosion)	1,7 - 2,8	70

Tab.: 4 Vlastnosti některých druhů skleněných vláken [51]

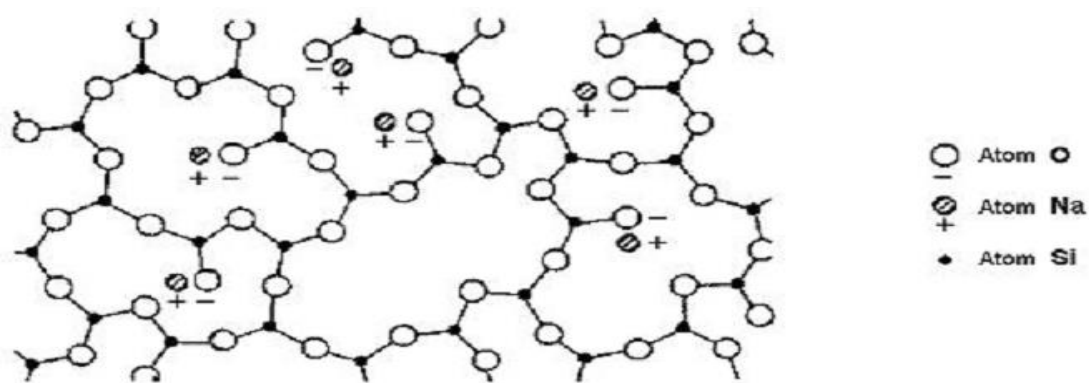
	Sklo E Saint Gobain Vertex	Sklo E	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Sklo L	Křemenné sklo
Průměr [μm]	5 – 16	9 – 13	9 – 13	9 – 13			8,9
Hustota [g/cm^3]	2,54	2,54	2,49	2,49	2,7	4,3	2,19
Modul pružnosti [GPa]	73	72,4	85,5	69	75	51,1	69
Pevnost v tahu [GPa]	2 – 4	až 3,45	až 4,6	až 3	1,7	1,6	3,45
Prodloužení [%]	1,8 – 3,2			4,8			5
Součinitel tepelné roztažnosti	4,9	5	5,6	7,2			
Součinitel tepelné vodivosti	1	1	1	1			
Teplota měknutí [$^{\circ}\text{C}$]	800	800	970	750			980

U hodnot vlastností skleněných vláken převzatých z různých publikací není obvykle uvedeno, při jakém průměru vláken byly naměřeny. Je však známo, že čím mají vlákna menší průměry, tím jsou pevnější. Při průměrech 3 až 4 μm obdržíme kompozity s větší pevností v tahu, než kdybychom použili vlákna běžných průměrů. Na laminátech vyztužených skleněnými tkaninami z tenkých vláken bylo zjištěno, že se zvýšil i modul pružnosti. S vlákny velkých průměrů (60 a více μm) mají zase kompozity větší pevnost v tlaku působícím ve směru vláken. Rozdíly dosahují řádově desítky MPa.

Z technologického důvodu jsou nejběžnější průměry od 7 do 15 μm (roving z vláken malých průměru se hůře prosycuje pryskyřicí). [52]

Povrch skleněných vláken je hydrofilní. Oxidy SiO_2 a Al_2O_3 vytvářejí hydroxylové skupiny ($-\text{M}$, $-\text{OH}$, kde M je Si nebo Al), ke kterým jsou molekuly vody vázány vodíkovými můstky. Na povrchu vláken a v jeho mikroskopických trhlínkách je při 20 $^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu 65 % adsorbováno asi 0,1 % hmotnostních vody.

Adsorpce vlhkosti na povrch čerstvě vyrobených vláken je velmi rychlá (rychlost navlhání je možno demonstrovat například vážením čerstvě vyžíhaných skleněných vláken na analytických vahách – vlákna rychle těžknou). Adsorbovaná vlhkost působí v povrchových defektech vláken jako tenzoaktivní látka, snižující lomovou energii skla. Pevnost čerstvě vyrobeného vlákna je proto větší než pevnost vlákna s rovnovážným obsahem vody, daným vlhkostí okolní atmosféry. Vysoký podíl adsorbované vody je překážkou vytvoření dobré vazby mezi vláknem a polymerní matricí. Proto je nutno výrobky ze skleněných vláken chránit před vzdušnou vlhkostí polyethylenovými obaly a navlhla vlákna se musí před použitím vysušet. Vysušování skleněných vláken v horkovzdušné sušárně se před jejich použitím doporučuje, i když jsou vlákna a výrobky z nich skladovány v relativně suchém prostředí. [52]



Obr.22 Trojrozměrná síť skleněného vlákna [54]

7.8 Základní oblasti uplatnění

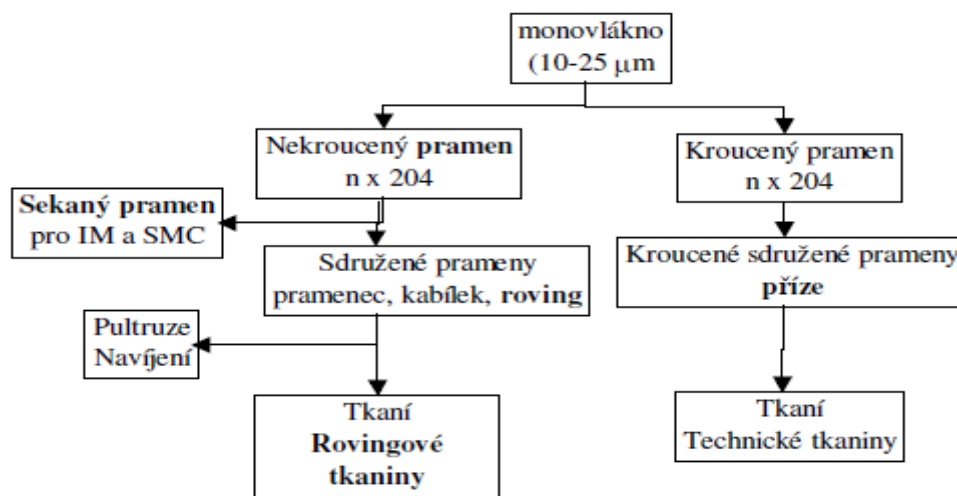
Staplové příze se dopřádají na odstředivých nebo frikčních strojích. (Prstencové stroje jsou svým systémem udělování zákrutu pro skleněná vlákna nezpůsobitelné). Běžně vyráběné příze mají jemnost 125–2000 tex a používají se většinou pro podkladové tkaniny na tapety a dekorační látky. [51]

Filamenty se zpracovávají např. na tkaniny ve všech základních vazbách s váhou 600-1300 g/m², tloušťkou 0,8-2 mm, pevností v tahu: osnova 5000 N/5 cm, útek 2500 N/5 cm, bod tání až 1200° C. Ve tkaninách se též kombinuje osnova nebo útek s přízemi z aramidových nebo uhlíkových vláken. [51]

Z tkanin se šijí ochranné oděvy, především pro extrémně horké provozy (hutníci, svářeči). Tkaniny nebo paralelně ložené filamenty (*jednosměrné svazky*, UD-Rovings) se vkládají jako armatury do *kompozitů* a stavebních hmot (snímek vlevo). [51]

Celosvětová výrobní kapacita skleněných vláken měla v roce 2010 dosáhnout 4,7 milionů tun. V roce 2005 bylo v Evropě zhotoveno přes milion tun kompozit (tyto plasty obsahují cca. 50 % váhového množství skleněných vláken), které se používají na nejrůznější účely: od nárazníků na auta, přes čluny, vrtule větrných elektráren, až k mostům pro chodce.

Ze skleněných vláken se také zhotovují izolace proti žáru nebo chemickým vlivům ve formě rohoží (soudržnost je zajištěna lisováním nebo prošíváním vrstvy vláken) a hadic, stuh a šňůr. [51]



Obr.23 Blokové schéma výrobků ze skleněných vláken je uvedeno na obrázku [52]

7.8.1 Kombinované výrobky

Výrobci polotovarů z vláken dodávají také kombinované výrobky:

- tkaniny kombinované s rohožemi (vícevrstvé tkaniny)
- jednosměrné tkaniny (útek těchto tkanin obsahuje výrazně méně vláken než osnova) kombinované s rohoží
- jednosměrné tkaniny s výztuží orientovanou vůči podélné ose úzkého pásu pod úhlem 45° nebo $\pm 45^\circ$ (vícevrstvé tkaniny)
- vícevrstvé polotovary umožňují velmi produktivní výrobu laminátů (získá se rychleji potřebná tloušťka laminátu) s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. [52]

7.8.2 Výrobky ze skleněných vláken

Sekané prameny (angl.: chopped strands)

- Jsou určeny pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebné délky. Dodávají se v pytlích [55]

Mletá vlákna

- Mletím lze získat krátká vlákna jen v případě křehkých vláken [55]

Rovingy (Pramence, kabílky)

- Jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů) pro výrobu profilů tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu jednosměrných prepregu. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti (u skleněných vláken do 15 kg)
- Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších cívkách s kónickým zakončením. Jemnost rovingu je udávána jako **tex** nebo jako **denier** [55]

Rohože (angl.: matt)

- Netkané textilie, rouna
- Tvoří je v rovině ležících nahodile uspořádaná kontinuální nebo na větší délky (cca 50 mm), sekaná vlákna (25 až 50 mm) jsou v rohoži spojena polymerními pojivy, rozpustnými v pryskyřicích. Kontinuální vlákna v rohoži jsou vzájemně propletená a není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem [55]

Prepregy

- Jsou různě široké (role nebo kotouče), obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaniny nebo rohož a polymerní matrici
- Poslední druh polotovaru se používá k získání špičkových polymerních kompozit [55]

Voštiny (angl.: honeycomb)

- Zvláštním produktem, který je určen pro jádra sendvičových konstrukcí, s různou výškou, velikostí a tvarem buněk
- Používá se jednak Al voština nebo voština z vláken aromatického polyamidu s fenolformaldehydovou matricí
- Stěny buňky má tloušťku a vzhled papíru
- Starší typ voštiny je vyroben z neuspořádaných krátkých vláken levnějšího, méně tuhého a méně pevného aromatického polyamidu poly-metha-phenylenizoftalamidu (obchodní značka Nomex, firmy Du Pont)
- Obě složky voštiny zaručují voštině nehořlavost a malý vývin kouře při expozici v plameni. Nyní jsou na voštiny používány i vlákna PPD – T (Kevlar) a voštiny jsou prodávány pod obchodním názvem Korex (firmy DU Pont)
- Oproti nomexovým voštinám mají korexové voštiny větší odolnost proti tlakovému smykovému namáhání [55]

Skleněné rohože typu U – pica mat nebo Unifilo

- Pro odlehčení konstrukce pro střední vrstvy laminátu
- Při malé plošné hmotnosti mají relativně značnou tloušťku
- Tyto rohože obsahují duté skleněné kuličky (o průměru okolo 10 μm)
- Jako jádro sendvičových konstrukcí se používají i polymerní pěny a balza [55]

8 ČEDIČOVÁ VLÁKNA

Čedičová vlákna patří do skupiny horninových vláken. Výroba těchto vláken se více rozšířila teprve v době nedávné, jedná se v podstatě o nový typ technického vlákna. Vlastnosti čedičových vláken jsou velice podobné vlastnostem skleněných vláken typu S. Pro výrobu skleněných vláken, se však převážně používá sklo typu E, které má odlišné složení i vlastnosti než vlákna čedičová. Pro své vlastnosti jsou čedičová vlákna vhodná k výrobě produktů, na které jsou kladeny zvýšené užité vlastnosti, tepelně – izolační vlastnosti, a také zvýšená chemická odolnost. Další výhodou je cena čedičových vláken, která je nižší než cena skleněných vláken. [57]

Čedičová vlákna mají téměř kruhový průřez a jsou téměř hladká. V dnešních dobách se čedičová vlákna vyskytují ve formě kontinuálních a staplových vláken. [56]

Čedičové vlákno je textilní výrobek získaný z čedičové horniny. Jde o vlákna s vlastnostmi podobnými skleněným vláknům typu S. Výhodou je jejich cena, která činí asi 60 % S vláken a dobrá chemická odolnost. Výroba je analogická výrobě skleněných vláken, teplota tavení je 1400°C.

Složení čediče i technologie používaná v USA odpovídá podmínkám v ruských a ukrajinských závodech, v nichž výroba začala během studené války (vlákna nahrazovala S skleněná vlákna v leteckých aplikacích). Čedičová vlákna mají ve srovnání s E skleněnými vlákny odlišné složení a vlastnosti. [52]

Chemické složení	Čedič [hm. %]	E-sklo [hm. %]
SiO ₂	58	55
Al ₂ O ₃	17	15
Fe ₂ O ₃	10	0,3
CaO	8	18
MgO	4	3
Na ₂ O	2,5	0,8
TiO ₂	1,1	-
K ₂ O	0,9	0,2
B ₂ O ₃	-	7
F	-	0,3

Obr.24 Porovnání složení čedičových a skleněných E vláken [52]

	Čedičové vlákno	Vlákno z E skloviny
Pracovní teplota pro tepelné izolace [°C]	820	600
Minimální teplota použití [°C]	-260	-60
Teplota tavení [°C]	1450	1400
Teplota skelného přechodu [°C]	1050	825
Hustota [kg/m ³]	2750	2600
Pevnost v tahu [MPa]	4840	3450
Modul pružnosti E [GPa]	89	77
Prodloužení při přetržení [%]	3,15	4,7
Součinitel délkové teplotní roztažnosti 10 ⁻⁶ [1/K]	5,5	5
Chemická odolnost - úbytek hmotnosti za 3 hod [%] vařící voda/vařící NaOH	0,2/5	0,7/6

Obr.25 Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [52]

8.1 Historický vývoj horninových vláken

Sopečná vlákna patří mezi nejstarší horninová vlákna. Některé lávy byly takového složení a viskozity, že se při určitých podmínkách trhaly a vytahovaly ve vlákna, horninovou vlnu. Chemické složení čedičových vláken je velmi podobné jako složení sopečných vláken. [58]

K rozšířenému rozvoji výroby horninových vláken došlo až na počátku 20. stol. V roce 1920 získala francouzská společnost Genérale první patent na výrobu čedičových vláken. Největší rozvoj ve výrobě horninových vláken nastal teprve po druhé světové válce. [58]

V roce 1952 se začala horninová vlákna vyrábět i v Československu v Duchcovských sklárnách. V dalších letech byly uvedeny do provozu další výrobní horninových vláken. Výroba těchto vláken byla v naší zemi rozšířena nejen pro jejich výborné vlastnosti, ale také z důvodu nízké výrobní ceny. K jejich výrobě se používaly domácí suroviny. U většiny vláken stačilo pouze upravit výchozí surovinu a dále nebyl zapotřebí dalších úprav. [58]

8.2 Složení čediče

Čedič se skládá z několika složek. Nejvíce zastoupenou složkou je oxid křemičitý. SiO_2 je zde zastoupen přibližně v rozmezí 43,3–47 %. Dále je zde obsažen oxid hlinitý (Al_2O_3) v rozmezí 11–13 %. Oxid vápenatý (CaO) je zde zastoupen přibližně 10–12 %, podíl oxidu hořečnatého (MgO) je mezi 8–11 %. Ostatní oxidy mají podíl nižší než 5 %. [59]

Čedičová hornina vhodná pro výrobu vláken obsahuje zpravidla olivín a nefelín. Používají se kyselé čediče s obsahem nejméně 46 % oxidu křemičitého (SiO_2). [60]

Příklad chemického složení:

- 52 % oxidu křemičitého (SiO_2)
- 17 % safíru (Al_2O_3)
- 9 % oxidu vápenatého (CaO)
- 5 % oxidu hořečnatého (MgO)
- 17 % ostatních prvků [60]



Obr.26 Krystal nefelínu [60]

Základní hmota čediče je tvořena:

- pyroxeny – augit, titanaugit
- plagioklasy – labradorit, zbornit
- olivín

Pyroxeny tvoří cca 50 % hmotnosti, jsou to metasilikáty, pro které je charakteristická téměř dokonalá štěpnost. [61]

Plagioklasy patří mezi živce. Tvoří asi 30 % hmotnosti. Olivín je minerál s proměnlivým podílem železa a hořčíku. Tento podíl je závislý na podmínkách při vzniku čediče. Olivín tvoří asi 20 % hmotnosti. [61]

8.3 Výroba čedičových vláken

Čedičová vlákna jsou anorganická vlákna vyráběná z roztavené čedičové horniny. Díky svým vynikajícím termo-mechanickým vlastnostem jsou hojně používána například v tepelných, zvukových nebo chemických izolacích. Tato vlákna jsou jednou z perspektivních náhrad dražších skleněných (S-vlákna) nebo omezovaných azbestových vláken. [62]

Základním materiálem pro výrobu vláken je čedič neboli basalt. Čediče jsou vyvřelé horniny šedo-černé až černé barvy. Z velké části tvoří právě čediče zemskou kůru a je to i nejhojnější magmatická hornina zemského povrchu. Dle chemického rozboru se jedná o křemičito-železnato-vápenato-hořečnato-hlinito-sodné horniny. [62] Hlavní složkou čediče je oxid křemičitý (SiO_2). Podle obsahu SiO_2 se čediče dělí do tří skupin [62]:

1. Alkalické čediče s obsahem SiO_2 do 42%
2. Slabě kyselé čediče s obsahem SiO_2 43-46 %
3. Kyselé čediče s obsahem nad SiO_2 46%, vhodné pro výrobu vláken [63].

První pokusy se zvlákněním čediče se konaly na začátku 20. století, k rozvoji výroby došlo teprve po 2. světové válce. Výrobní technologie se zakládá na tavném zvláknění při teplotě 1 500 – 1 700 °C. Při dostatečně rychlém ochlazení vzniká sklovitá hmota, při pomalejším chlazení se tvoří krystaly ze směsi minerálů. Pro některé účely se vláknina dluží při teplotě cca 1 300 °C. [60]

Výrobní linka produkuje (v závislosti na jemnosti vlákna) cca 15 – 35 kg/h. Důležití výrobci čedičových textilií jsou v současné době např. v Rusku, na Ukrajině a v Číně. Celosvětová roční produkce se v roce 2005 odhadovala na 3 000 – 5 000 tun (t.j. asi 1/1000 množství skleněných vláken. [60].

Získaná vlákna mají vysokou tepelnou odolnost a nízkou navlhavost. Dále je u těchto vláken zajímavá také jejich mrazuvzdornost (až do teploty -260 °C). Surovina pro výrobu těchto vláken je velmi levná a také v přírodě snadno dostupná. Nutno podotknout, že pracovat s čedičem by se mělo obezřetně, jelikož vlákna jsou velmi jemná a křehká, při práci se mohou do kůže uvolňovat jehličky. [64]

5.1 Technologie čedičových vláken

Technologie výroby čedičových vláken se liší podle toho, zda vyrábíme kontinuální nebo krátká čedičová vlákna. Technologie výroby kontinuálních čedičových vláken je podobná výrobě skleněných vláken. Čedičová hornina je roztavena v pícce a proud taveniny je protlačován skrz platinové trysky (průměr cca 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vláken je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování monovláken. Navíjecí rychlost je několik tisíc m/min [62].

Pro výrobu krátkých čedičových vláken jsou používány technologie jako centrifugální vyfukování, multirolování a vyfukování při tuhnutí [65]. Tato čedičová vlákna jsou vyrobena ze směsi, která tvoří asi 75 - 80 % čediče a 20 - 25 % strusky. Takto vzniklá směs se taví v kupulové peci při teplotě 1 350 – 1 450 °C. Následná hmota z pece vytéká na rotující válec a pomocí odstředivé síly se tavenina, momentálně v kapičkách a v proudu ofukovacího vzduchu, změní na jemné vlákno. [66]

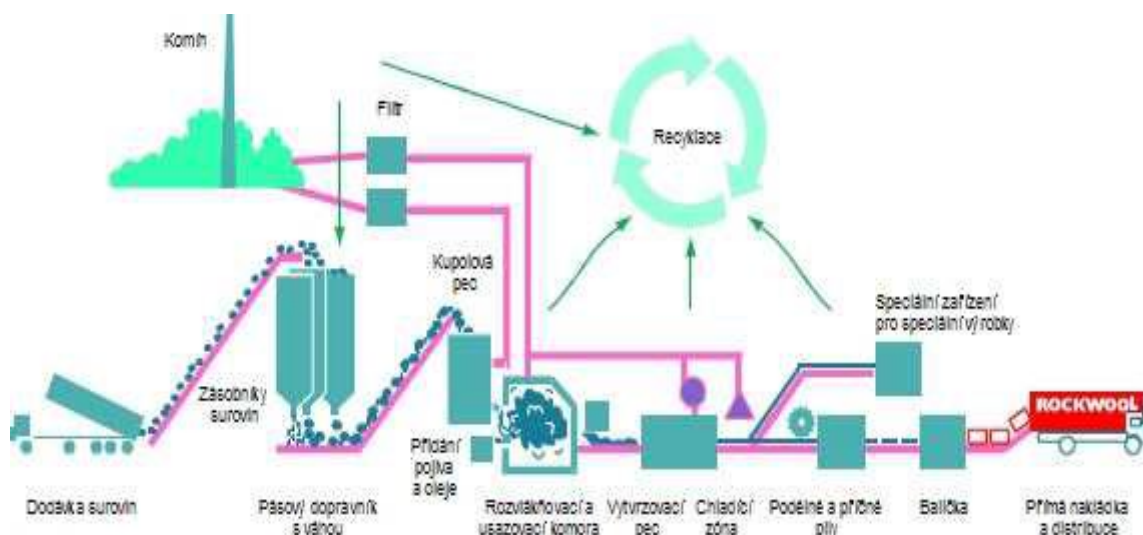
Kapičky, které nejsou dostatečně horké, se pak nemohou protáhnout a odletují ve formě drobných zrněk. Zrnka pak padají naspod rozvlákňovacího stroje, odkud jsou poté znovu vracena do pece. Hmota, která je zjemněná a rozvlákněná s malým počtem zrněk, je unášena vzduchem do usazovací komory. Tak jsou vlákna ještě ošetřena pojivem, přísadami zabraňující výskytu plísní, vodoodpudivými a dalšími důležitými přísadami. [66]

V usazovací komoře mají vlákna za úkol se ustálit do vrstvy, připomínající pás, který pak pokračuje do vytvrzovací komory. Tam se společně s pojivem a dalšími přísadami vytvrdí za pomoci tepla. Současně ve vytvrzovací komoře dochází k odparu vody a polykondenzaci pojiva. [64]. Teplota v komoře je 180 – 220 °C. Odsud pak vylézá pás čedičové vlny, který je regulován přítlačným zařízením dohlízejícím na požadovanou tloušťku a objemnou hmotnost. [64]

Nekonečný pás čedičové vlny se pak dále pohybuje přes chladicí komoru až k diamantové pile. Tato speciální pila pak formátuje daný výrobek ořezem na šířku, kterou si přejeme. Ořezané kraje se recyklují, tím, že se vrací do tavicí pece. Z nařezaných výrobků se poté stávají buďto polotovary, které dále postupují na další výrobní linku. Z takovýchto polotovarů se v konečné fázi stávají výrobky, které jsou speciální. Jedná se například o potrubní pouzdra nebo kaširované desky [64].



Obr.27 Detail zvukově a tepelně izolační desky z krátkých čedičových vláken [64]



Obr.28 Schema technologie výroby čedičovo-struskového vlákna [64]

Z vlákna vyrobeného výše popsanou technologií se dále vyrábí hlavně tepelně izolační desky, vhodné pro izolaci šikmých střech, stropů, přiček, fasád a podlah. Výrobky mohou být také pro technické izolace, kde je využívána například zvuková a tepelná izolace vhodná pro použití na kotle a jiná topná tělesa. Dále pak na vzduchotechnická zařízení, komíny, výfuky a jiné. [64]

8.3.1 Technologie výroby kontinuálních čedičových vláken

Čedičová vlákna se vyrábějí jednostupňovým tažením vlákna, které probíhá při teplotách 1 500–1 700 °C. Dále se na vlákna nanáší lubrikace. Lubrikace snižuje mechanické poškození vláken při tření vláken o sebe. Při mechanickém poškození se výrazně snižuje pevnost vyráběných vláken. Po nanesení lubrikace probíhá navíjení Vyrobených vláken. Pro výrobu čedičových vláken se nejlépe osvědčily středně kyselé čedičové vyvřeliny. [67]

8.3.2 Technologie výroby krátkých čedičových vláken

- Pneumatický způsob výroby – vlákna jsou tvarována pomocí dynamických sil, tyto síly jsou přenášeny z proudícího plynu na pramínky taveniny pomocí tření.
- Odstředivý způsob výroby – vlákna jsou tvarována pomocí působení odstředivých sil z vlákniny, která je unášena rotujícím tělesem.
- Kombinovaný způsob výroby – kombinace předešlých způsobů. [68]

8.4 Rozdělení čedičových vláken podle typu jejich použití

V průmyslu jsou čedičová vlákna využívána stále v hojnější míře díky svým vynikajícím mechanickým, chemickým a tepelně-izolačním vlastnostem. Nejen proto se čím dál více firem snaží zařadit alespoň některé z těchto produktů do výroby. Čedičová vlákna dokáží úspěšně nahradit vlákna skleněná například při výrobě tkanin v perlinkové vazbě používané zejména ve stavebnictví [69]. Dále se čedičová vlákna mohou vyskytnout:

- jako geotextilie (po silniční a železniční stavitelství)
- jako tepelně izolační směsi ve stavebnictví (žáruvzdorné stavební hmoty)
- jako výztuže v kompozitech, sekaná vlákna do plastických hmot
- jako tepelné izolace, zvukové izolace a chemické izolace
- k filtrování agresivních látek
- pro ochranné pracovní oděvy (pro hasiče, svářeče, v chemických provozech)
- pro bytové a interiérové nehořlavé textilie [69]

8.5 Vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna předčila v mnohých ohledech ostatní vlákna díky svým mechanickým, fyzikálním a chemickým vlastnostem a to je základní předpoklad k jejich masivnějšímu rozšíření v technické praxi. Dalšími přednostmi jsou v dnešní době velmi populární ekologické výhody a nezanedbatelné zdravotní výhody proti podobným vláknům. Jedná se o menší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci materiálu a menší riziko při zpracování a používání. [69]

8.6 Fyzikální vlastnosti

- nízká hustota
- malá navlhavost (minimální nasákavost)
- vysoký modul pružnosti a výborná pevnost v tahu
- malá změna pevnosti v tahu ve vlhku [69]

Tab.: 5 Porovnání fyzikálních vlastností čedičových a skleněných vláken [69]

Fyzikální vlastnosti	Jednotka	Čedič	Sklo
Hustota (při 20 °C)	Kg.m ⁻³	2900	2600
Navlhavost	%	0,5	1
Modul pružnosti v tahu	MPa	100 000	70 000
Pevnost v tahu	MPa	1850 – 2150	1850 – 2150
Pevnost v tlaku	Mpa	300	300
Změna pevnosti v tahu:			
při relativní vlhkosti 100 % za 64 dní	%	91	72
při teplotě 400 °C	%	82	52

8.6.1 Chemické vlastnosti

- malý úbytek hmotnosti při hydrolýze
- dobrá odolnost proti vodě, většině alkálií, organickým a anorganickým kyselinám, organickým rozpouštědlům, většině chemikálií a jiným agresivním látkám [69]

Tab.: 6 Porovnání chemických vlastností čedičových a skleněných vláken [69]

Chemické vlastnosti	Jednotka	Čedič	Sklo
Úbytek hmotnosti při 100 C za 3 hod.			
v H ₂ O	%	99,8	99,3
v 2HNCI	%	81,8	53,9

8.6.2 Tepelné vlastnosti

- pracovní teplota (dobrá tepelná odolnost, velký tepelný rozsah použitelnosti)
- měrná tepelná vodivost (nízká)
- nehořlavost a nízký obsah spalin (díky čemuž jsou čedičová vlákna více ekologická než vlákna skleněná) [69]

8.6.3 Elektrické vlastnosti a další vlastnosti

- specifický odpor (vysoký elektrický odpor)
- vysoký schopnost pohltit zvuk
- odolnost proti eroznímu prostředí, proti UV záření, proti plísním a jiným mikroorganismům [69]

Tab.: 7 Porovnání tepelných a elektrických vlastností čedičových a skleněných vláken [69]

Tepelné a elektrické vlastnosti	Jednotka	Čedič	Sklo
Pracovní teplota	C	– 200 až + 700	– 60 až + 460
Měrná tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035
Specifický odpor	Ω.m	10 ¹²	10 ¹¹

Z tabulek vyplývá, že vlastnosti čedičových a skleněných vláken jsou v mnoha případech obdobné. Pro čedičová vlákna pak mluví zejména lepší hustota, navlhavost, pružnost a také cena materiálu. Kontinuální čedičová vlákna jsou většinou dodávána ve formě rovingů, což je svazek nekonečně dlouhých fibril bez zákrutu, popřípadě s minimálním zákrutem, s tloušťkou větší než 68 tex. [70]. Výhodou rovingu je, že jsou to vysoce pevné, ohebné textilní útvary využitelné na výrobu řady technických textilií pro většinu průmyslových aplikací [69].

8.7 Výrobci a výrobky čedičových vláken

8.7.1 Výrobci čedičových vláken

Rozvoj minerálních vláken, do kterých se řadí čedičová vlákna, se v prvopočátku stal pouze ruskou doménou. Současný vývoj v této oblasti pokročil kupředu a to díky novým výrobním technologiím a novým oblastem použití těchto vláken, jako jsou například konstrukční kompozity [66]. Dnes mezi největší světové výrobce čedičových vláken patří:

- Kamenny Vek, Dubna, Rusko
- Basaltex, Wevelgem, Belgie
- Svitap, Saint – Gobain Isover CZ, Havel Composites CZ, Česká Republika
- Rockwool, Knauf Insulation

8.7.2 Výrobky z čedičových vláken

Produkty z čedičových vláken mají široké možnosti využití v oblasti pro tepelné a zvukové izolace, požární ochrany či jako výztuže do kompozitních materiálů, nebo jako pevnostní šňůry. Výrobky z čedičových vláken se mohou rozdělit na:

Izolační materiály:

- stavební tepelně-izolační – pro zateplování domů
- technické izolace – používané v technickém sektoru [66]

Do stavebních tepelně izolačních výrobků patří výrobky používané:

- do plochých a šikmých střech, popřípadě střešních klínů – může se vyskytovat i s povrchovou úpravou, důležité jsou zde hlavně protipožární vlastnosti
- na vnější a vnitřní stěny – díky svým tepelně technickým a zvukově izolačním vlastnostem se hodí téměř na všechny druhy příček a fasád
- na podlahy lehké, těžké a kombinace obojí, nebo jako okrajové pásy na plovoucí podlahy
- na stropy – desky s povrchovou úpravou, zabraňuje se tak průniku proudícího vzduchu, hlavně díky svým protipožárním vlastnostem
- na protipožární konstrukce [66]



Obr.29 Izolační výrobek vyrobený z čedičových vláken [71]

Do výrobků pro technické izolace patří:

- nejrůznější druhy rohoží rozdělených dál například podle povrchové úpravy
- rohože s hliníkovou fólií – používá se na kotle a potrubí
- rohože se skelnou netkanou textilií – používá se na komíny
- rohože pozinkované – do komínů a výfuků
- skruže – speciální kruhové technické izolace používají se na nejrůznější typy trubek u energetických rozvodů
- lamelové pásy a pásy
- izolační desky – používající se na rovné i nerovné povrchy pod kotle i potrubí
- desky s protipožární ochranou – většinou hliníkové desky pro protipožární řešení na rizikových místech jako jsou například v okolí kotlů [66]

Textilní textilie pro konstrukční aplikace

Příze:

- Použitelné například pro požární ochranu jako pevnostní šňůry či v textilním průmyslu jako kroucené příze používající se na tkaní látek a pásků. [66]

Stříže:

- Stříže se hojně využívají například v automobilovém průmyslu na zástěrky. Dále pro výrobu třecích materiálů či na rohože a plsti.[66]

Roving:

- Roving se může přidávat pro zpevnění například do rohoží. Dále nachází využití ve stavebnictví při konstrukci mostů, do betonových výztuží či pro další nosné profily. [66]

Tkaniny:

- Tkaniny mohou být hybridní, což znamená, že se používají v kombinaci s jiným materiálem v kompozitu. Hybridní tkaniny mohou být v kombinaci se skleněnými, uhlíkovými, nebo aramidovými vlákny, čímž dosáhnou lepších vlastností. Čedičové vlákno může samo o sobě sloužit jako výztuž v kompozitních materiálech. [66]

Netkané textilie:

- Jako jsou například netkané rohože užívané pro tepelnou izolaci.

Textilní aplikace pro požární ochranu:

- Například nehořlavé opony a vnější ochrany domů, možné je i použití v hromadné dopravě. V těchto oblastech se využívá vysokého tepelného a chemického odporu čedičových vláken. [66]

Vysokoteplotní izolace (HTI):

- Hlavní využití je v oblasti konstrukce automobilů, a to do výfuků. Používají se také pro tepelné izolace plynových turbín v jaderných elektrárnách, kde se využívá vlastnosti odolnosti proti záření. [66]

9 TERMICKÁ ANALÝZA

Termické analýzy jsou experimentální analytické metody uvedené v Tab. 8, při nichž se sledují některé fyzikální nebo fyzikálně-chemické vlastnosti zkoumané látky (pevných látek, minerálů, hornin) v závislosti na čase t [sec] nebo na teplotě T [°C]. Ve většině metod se sledují příslušné vlastnosti systému (hmotnost, energie, rozměr, vodivost apod.) jako dynamické funkce [79].

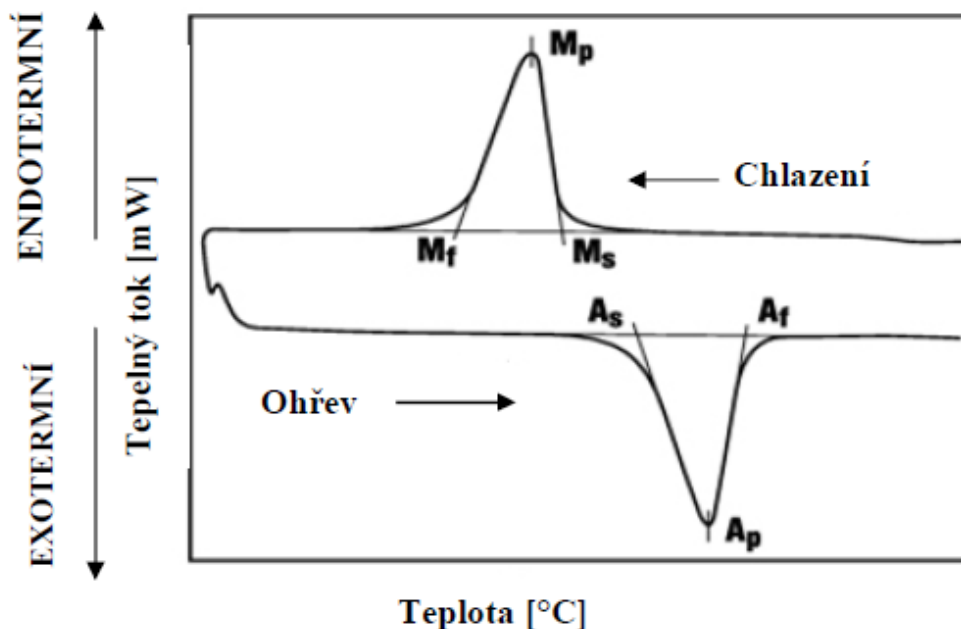
Každý systém má snahu dosáhnout takového stavu za dané teploty, který odpovídá nižšímu obsahu volné entalpie. Příkladem může být přechod látky z jedné krystalické formy do druhé, která má za dané teploty T menší obsah volné entalpie a je tedy stálejší. [79]

Tab.: 8 Základní termické analýzy [79]

Název analýzy	Charakteristika analýzy
DTA Diferenční termická analýza	Teplotní rozdíl mezi vzorkem a referenčním vzorkem
DSC Diferenční kompenzační kalorimetrie	Tepelná energie nutná ke kompenzaci rozdílu teplot mezi vzorkem a referenčním vzorkem
TGA Termogravimetrie	Změna v hmotnosti vzorku
DTGA Diferenční termogravimetrie	První derivace změny hmotnosti
DMA Dynamicko-mechanická analýza	Mechanická síla a frekvence při periodickém namáhání vzorku v tahu, ohybu, krutu penetraci
Dilatometrie	Změna objemu
Efluenční plynová analýza	Množství sledovaného plynu
Pyrolýza	Produkty pyrolýzy
Elektrická vodivostní analýza	Změna elektrického odporu

9.1 Metoda DSC

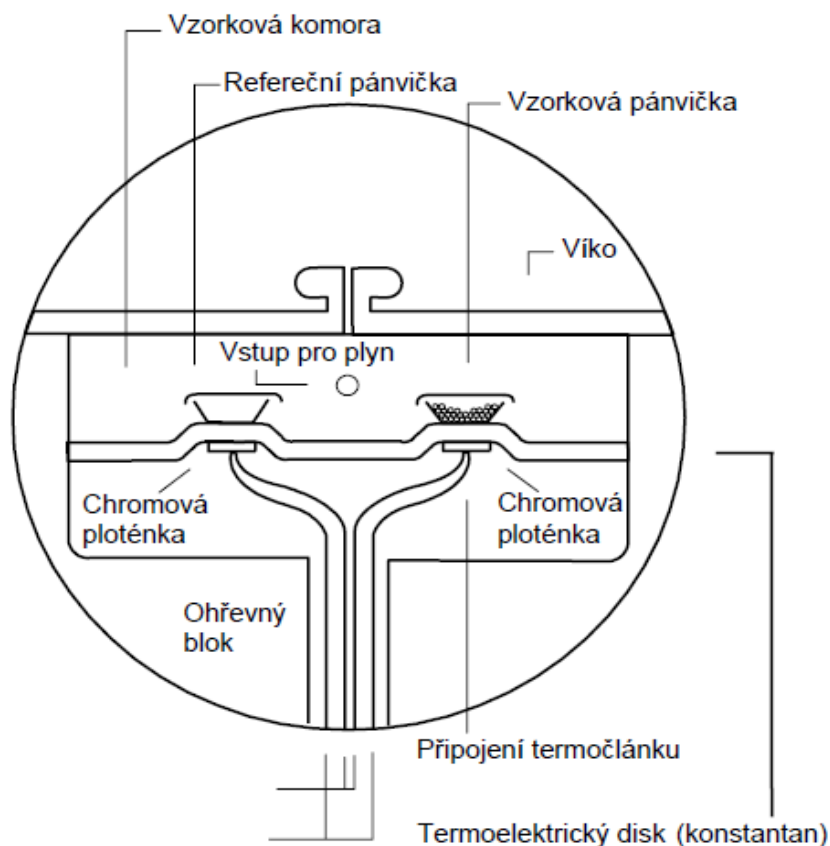
Sledováním fyzikálních vlastností rozdílných tepelných toků dodávaných do vzorků a referenční látky hovoříme o diferenční kompenzační kalorimetrii. Tato metoda je označována DSC metoda z anglického názvu *Differential Scanning Calorimetry*. Použití DSC kalorimetru je udáváno v rozmezí teplot T od $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při této metodě se vzorek podrobuje lineárnímu ohřevu a rychlost tepelného toku ve vzorku, která je úměrná okamžitému měrnému teplu, se plynule měří. Metoda DSC je vhodná pro měření charakteristických teplot fázového přechodu I. a II. druhu viditelné na obr. 30, i na kvantitativní srovnávání entalpických charakteristik spojených s fyzikálními i chemickými změnami látek [80].



Obr.30 Teoretický DSC výstup křivky pro SMA materiály [81]

Princip měření

Uvnitř měrného pláště, který je standardně udržován na pokojové teplotě, jsou umístěny dvě symetrické nádoby. Odporový teploměr a topný člen zabudovaný v nosiči vzorku slouží jako primární teplotní kontrola systému. Sekundární teplotní kontrolní systém měří teplotní diferenci mezi oběma nosiči. Tento rozdíl mezi oběma nosiči se upravuje na nulový tepelný proud, který je měřen. Teplota vzorku je udržována jako izotermní se vzorkem srovnávacím (nebo blokem) pomocí dodávání tepla do srovnávacího vzorku. Toto množství, které je potřebné k udržení izotermních podmínek, je zapisováno v závislosti na čase t [sec] nebo teplotě T [$^{\circ}\text{C}$] [82].



Obr.31 Schéma DSC [79]

Aplikace metody DSC

- Teplota skelného přechodu, mísitelnost polymerů
- Teplota tání, entalpie tání, obsah krystalické fáze
- Teplota a doba krystalizace, entalpie krystalizace
- Oxidační/termická stabilita
- Rychlost sít'ování
- Reakční kinetika
- Čistota [82]

Materiály s tvarovou pamětí (SMA) mají schopnost vrátit se po zahřátí do základního (výchozího) stavu. Komponenty z SMA vykazují např. vysoké vratné (elastické) a neelastické deformace při mechanickém zatížení za konstantní teploty (pseudoelastická) při zahřátí (tvarová paměť) a jsou schopny vykonávat mechanickou práci při proměnných teplotách. Tvarový projev je způsoben termomechanickým chováním závislým na změnách krystalové struktury. [82]

10 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce je zaměřena na studium chování skleněných, čedičových a NiTiNOlových vláken, typu NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6, které jsou upraveny žiháním, čímž je jim dodána paměť. Vlákná NiTiNOlová mají stejné průměry. Základní metodou bylo studium rychlosti šíření zvuku, z níž byl dále určován dynamický modul pružnosti.

10.1 Příprava vláken

Pro testování byl použit paměťový materiál NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6 s odlišným složením. Paměť NiTiNOLu byla dodávána při 450 °C po dobu 30 minut. Dále byly testovány vlákna čediče a skleněná vlákna. Chemické složení těchto vláken je v tabulce 9.

Tyto materiály byly podrobeny testování na Dynamic Modulus Tester (DMT) a na přístroji LabTech. Při testování na DMT byla sledována rychlost šíření zvuku, z které byl následně počítán dynamický modul pružnosti.

Tab.: 9 Chemické složení vláken, NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6 [83]

	Uhlík	Chrom	Nickl	Titan	Měď	Kobalt	Železo	Vodík	Kyslík	Niobium	Ostatní
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
NiTi 1	0,05	0,01	54,5 – 57,0	45,5 – 43,0	0,01	0,05	0,05	0,005	0,05	0,025	0,1
NiTi 5	0,034	0,01	54,82	44,56	0,1	0,05	0,05	0,005	0,0212	0,025	0,33
NiTi 6	0,004	0,005	55,24	44,49	0,005	0,005	0,01	0,0014	0,036	0,005	0,2

10.1.1 Žihání

Základ žihání je ohřev vlákna na žhací teplotu, setrvání (výdrž) na této teplotě po určitou dobu a potom pomalé ochlazování. Byly použity vlákna NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6, které mají průměr 0,1 mm. Tyto vlákna byly vybrány, protože jejich vlastnosti byly při pokojové teplotě v různých fázích, NiTi 1 v austenitu, NiTi 5 v martenzitu a NiTi 6 v R – fázi.

Vlákna NiTi 1 bylo dodáno od výrobce – *Fort Wayne Metals*, které bylo poskytnuto pro Fyzikální ústav akademie věd ČR a posléze pro tuto diplomovou práci, NiTi 5 a NiTi 6 byly žihány při 450 °C po dobu 30 minut ve Fyzikálním ústavě ČR.

Vlákno NiTi 1 – *Fort Wayne Metals*, které má označení *medical graded superelastic NiTi#1 straight annealed*. Byl žihán přímo od výrobce v rovném tvaru. Technologie výroby byla tažení za studena, plastická deformace po tažení cca 40 %.

Délka vlákna *l* byla odměřena z cívky dle typu NiTiNOLu. Vlákno bylo namotáno na železnou desku, kdy se upevnilo a vložilo do odporové pece, aby se vyžihalo.

Tyto vlákna byly vyrobeny tažením za studena, tzn., že materiál byl plasticky deformován, průměr se zredukoval, procházel od velkého po nejmenší očka, bylo to třeba provádět, jinak by vlákno prasklo. Po posledním tažení byla struktura materiálu zničena, a aby vykazovala jev tvarové paměti, byla obnovena žiháním.

Pro zkoušku jsme vlákna narovnaly na klasickou domácí žehličku. Vyžíhaná vlákna byla položena na tepelný zdroj, a vizuálně se hodnotila doba a míra narovnání vlákna do vyžíhaného (rovného) tvaru.

Tab.: 10 Parametry materiálů NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6

	D [mm]	L [mm]
NiTi 1	0,1	300
NiTi 5	0,1	300
NiTi 6	0,1	300

D – průměr vlákna; L – délka vlákna

10.2 Skleněná a čedičová vlákna

Pro testování bylo použito skleněné a čedičové vlákno. Toto vlákno pochází z katedry materiálového inženýrství na Technické univerzitě v Liberci. Tyto vlákna mají podobné vlastnosti. Pro porovnání tabulka číslo 10.

Tento materiál byl podroben testováním na Dynamic Modulus Tester (DMT) a na přístroji LabTech. Při testování na DMT byla sledována rychlost šíření zvuku, z které byl následně počítán dynamický modul pružnosti v závislosti na hustotě materiálu a rychlosti šíření zvuku.

Tab.: 11 Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [69]

Fyzikální vlastnosti	Jednotka	Čedič	Sklo
Hustota (při 20 °C)	Kg.m ⁻³	2900	2600
Navlhavost	%	0,5	1
Pevnost v tlaku	MPa	300	300
Změna pevnosti v tahu:			
při relativní vlhkosti 100 % za 64 dní	%	91	72
při teplotě 400 °C	%	82	52
Chemické vlastnosti	Jednotka	Čedič	Sklo
Úbytek hmotnosti při 100° C za 3 hod.			
v H ₂ O	%	99,8	99,3
v 2HNCI	%	81,8	53,9
Tepelné a elektrické vlastnosti	Jednotka	Čedič	Sklo
Měrná tepelná vodivost	W.m-1.K-1	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035
Specifický odpor	Ω.m	1012	1011

10.3 Měření na Dynamic Modulus Tester (DMT)

Vzorky vláken byly připraveny pro testování na přístroji Dynamic Modulus Tester (DMT). Vlny se šířily prostředím (vlákny) a byly snímány snímači, při měření vznikaly i akustické šumy z vnějšku, které byly omezeny na minimum.



Obr.32 Dynamic Modulus Tester [11]

Měření na DMT bylo umístěno v prostředí s kontrolovatelnou teplotou a vlhkostí, měření bylo prováděno pomocí snímačů. Tento přístroj lze použít pro zjišťování vad ve vláknech. DMT je kompletní systém, který měří rychlost zvukových impulsů v materiálech, jako jsou vlákna. Zkoušený materiál je kontaktován dvěma snímači. Software DMT počítá zvukovou rychlost, která se používá pro určení dynamického modulu pružnosti. DMT se ještě používá pro vyhodnocení experimentálních materiálů, výrobní kontrolu kvality, výzkum a asistenci při vývoji výrobků. Základní čas nastavení signálu přístroje je závislý na frekvenci DMT. Maximální amplituda signálu je spolehlivější, když je v rozsahu mezi 7 až 9. Pokud se amplituda pulsů správně nastaví, jsou možné přesnější údaje. Naměřené hodnoty z DMT jsou v příloze A. Laboratorní měření hodnot rychlosti šíření zvuku ve vláknech proběhlo za následujících podmínek:

- Teplota vzduchu: 23 ± 2 °C
- Vlhkost vzduchu: 60 ± 2 %

Na přístroji DMT přitom byly nastaveny následující hodnoty:

- Frekvence: $f = 2$ Hz
- Napětí $U = 2$ V
- Předpětí = 33,00 g

Tab.: 12 Statisticky zpracované hodnoty časů z DMT

	$\bar{x}$ [μs]	s [μs]	V [μs]	IS95 [μs]
NiTi 1	40,159	0,331	0,825	40,014; 40,304
NiTi 5 HARD	40,827	0,446	1,093	40,632; 41,023
NiTi 5 žíhané	41,581	0,442	1,062	41,388; 41,775
NiTi 6 HARD	40,277	0,501	1,244	40,058; 40,497
NiTi 6 žíhané	41,023	0,29	0,731	40,891; 41,154
Skleněné vlákno	48,555	0,089	0,183	48,516; 48,594
Čedičové vlákno	49,155	0,17	0,366	49,076; 49,155

10.4 Rychlost šíření zvuku ve vláknech

Na přístroji DMT byly měřeny hodnoty, které jsou použity pro výpočet času a vzdálenosti. Z tohoto výpočtu jsou vypočítána rychlost šíření zvuku vláknem. Rychlost šíření zvuku jsme vypočítaly ze vzorce (2), který je upravený pro vlákna.

$$c = \frac{L * 10^{-5}}{t * 10^{-6}} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Testovaný materiál byl proměřen na DMT, na kterém jsme naměřily čas rychlosti šíření zvuku na určité vzdálenosti. Z těchto hodnot byla následně vypočítána rychlost šíření zvuku. Statistické hodnoty rychlosti šíření zvuku jsou v tab. č. 13.

Na rozdíl od řady technických materiálů (zejména kovů, dřeva) je studium šíření vln ve vláknech výrazně složitější, protože vlákna vykazují anizotropní vlastnosti související s chemickým složením a stavbou vláken.

Výstupem je graf, který nám ukazuje průběh šíření rychlosti zvuku u jednotlivých typů vláken. Rychlost se počítala jako směrnice regresní přímky. Vypočítané hodnoty rychlosti šíření zvuku jsou v příloze A.

Tab.: 13 Výsledné hodnoty rychlosti šíření zvuku

	$\bar{x}$ [m/s]	s [m/s]	V [m/s]	IS95 [m/s]
NiTi 1	3,13	0,104	3,311	3,085; 3,176
NiTi 5 HARD	2,955	0,123	4,16	2,901; 3,009
NiTi 5 žíhané	2,727	0,101	3,715	2,682; 2,771
NiTi 6 HARD	2,882	0,138	4,788	2,821; 2,942
NiTi 6 žíhané	2,74	0,071	2,58	2,709; 2,771
Skleněné vlákno	5,405	0,078	1,445	5,371; 5,439
Čedičové vlákno	5,094	0,139	2,719	5,034; 5,155

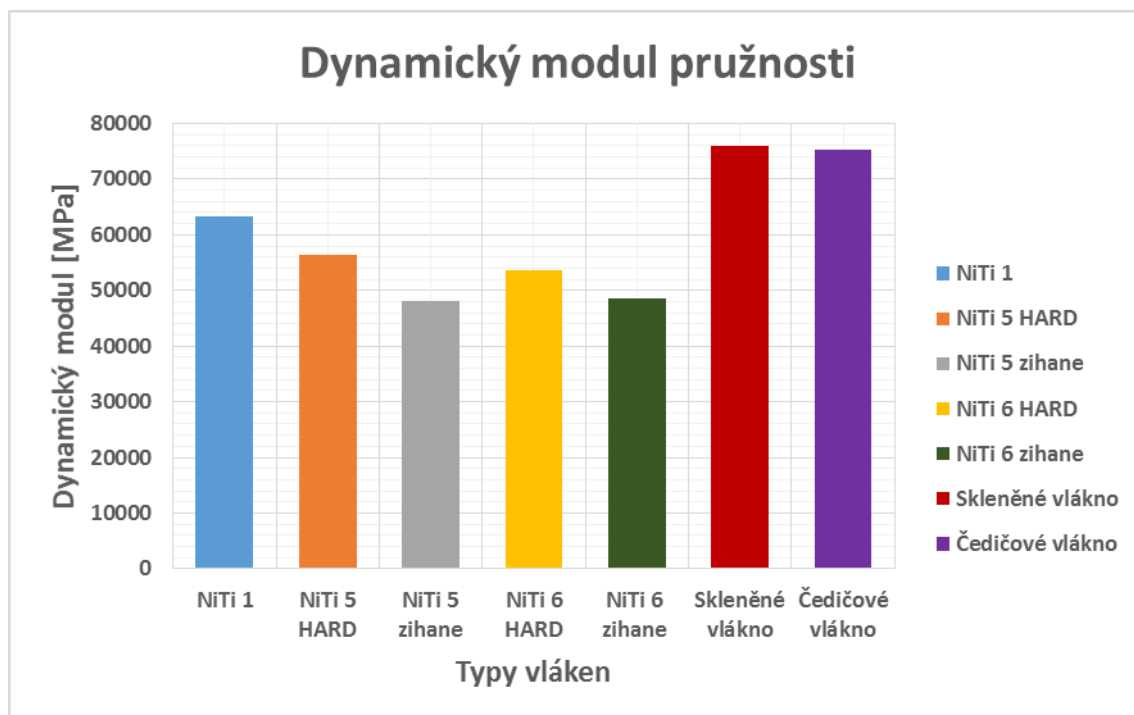
10.5 Dynamický modul pružnosti vláken

Dynamický modul pružnosti u vláken se určil pomocí DMT, který pomocí dvou snímačů vysílá do vlákna zvukové impulsy a následného zjištění rychlosti šíření zvuku. Ta se určí výpočtem z času šíření a dráhy, po které se impuls šíří. Dynamický modul pružnosti zjištěný pomocí DMT se značí E_D . Čas přechodu frekvenční vlny závisí na druhu vlákna a jeho hustotě. Dynamický modul pružnosti E_D je určen vztahem (1).

Kde ρ je objemová hmotnost (hustota) daného materiálu a c je rychlost šíření zvuku. Vypočítané hodnoty dynamického modulu jsou v příloze B.

Tab.: 14 Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti

	$\bar{x}$ [MPa]	s [MPa]	V [MPa]	IS95 [MPa]
NiTi 1	63269,38	4198,98	6,64	61 429,1; 65109,67
NiTi 5 HARD	56421,41	4733,69	8,39	54346,77; 58496,04
NiTi 5 žíhané	48026,51	3529,43	7,35	46479,67; 49573,35
NiTi 6 HARD	53690,42	5222,92	9,73	51401,38; 55979,47
NiTi 6 žíhané	48460,03	2484,33	5,13	47371,23; 49548,84
Skleněné vlákno	75964,55	2196,96	2,89	75002; 76927
Čedičové vlákno	75314,8	4107,96	5,45	73514; 77115



Obr.33 Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti

Na obrázku 33 je vidět, jak se měnil dynamický modul pružnosti u kovových a nepolymerních vláken. Jde o nedestruktivní metodu zjištění dynamického modulu pružnosti.

Čedičová a skleněná vlákna patří do skupiny nepolymerních vláken, jejich dynamický modul pružnosti je vyšší než u vláken NiTiNOLOvých. Tyto vlákna mají podobné vlastnosti. Zjištěná rychlost byla u těchto vláken takřka shodná, byly ovlivněny svoji hustotou, protože tu mají vlákna čedičová a skleněná odlišnou. Největší dynamický modul mělo skleněné vlákno, nejlépe se v něm šířila rychlost zvuku. O něco menší dynamický modul vykazovalo čedičové vlákno.

Ve vláknech NiTiNOLOvých se rychlost zvuku šířila znatelně hůře než u vláken nepolymerních. Byly zvoleny tři typy NiTiNOLOvých vláken a to NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6, které byly upraveny žiháním a byly ve třech různých transformačních fázích v pokojové teplotě. Pro porovnání byl vypočítán dynamický modul i u vláken nežíháných, a to NiTi 5 a NiTi 6.

Tyto vlákna měla různý dynamický modul, i když při bližším zkoumání se dynamické moduly příliš nelišily, hustotu měla vlákna NiTi stejnou, lišily se pouze v rychlosti šíření zvuku ve vláknech a ta ovlivnila dynamický modul. Rozdíly byly patrnější u vláken, která byla žíhaná oproti vláknům nežíhaným. Vlákna NiTi 5 a NiTi 6, která byla nežíhaná, měla podobný dynamický modul, bylo to způsobeno, že u nich nebyla upravena struktura vlákna, což znamená, že nevykazovaly jev tvarové paměti. Vlákna žíhaná, u kterých se projevil jev tvarové paměti, měla nižší dynamický modul než vlákna nežíhaná. Jedině vlákno NiTi 1 mělo vyšší dynamický modul než ostatní vlákna NiTiNOlová. Bylo to způsobeno, že rychlost byla vyšší a NiTi 1 bylo při pokojové teplotě ve fázi austenitu. Ostatní žíhaná vlákna NiTi, byla v jiných transformačních fázích, NiTi 5 v martenzitu a NiTi 6 v R – fázi.

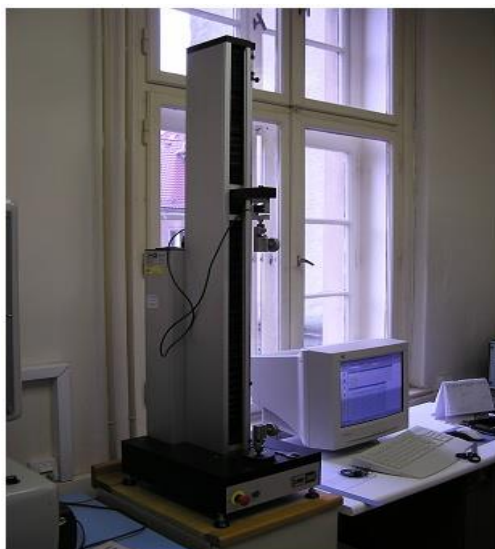
10.6 Statický modul pružnosti

Na testovaném materiálu byly provedeny testy pro zjištění statického modulu. Vzorky vláken byly připraveny pro testování na trhačce LabTech, která nám modul zaznamenala a vypočítala z naměřených hodnot.

Vzorek byl namáhaný prostým tahem definovaného tvaru a je zatížen osovou silou ve směru nejdelší osy. Zkoušení vzorku se provádí na trhačích strojích různé konstrukce. Vzorek je upevněn do čelistí a je zatěžován pomalu narůstající osovou silou, až dojde k přetrhu, tím dochází u vzorku k trvalým (nevratným) změnám. Na vzorku docházelo vlivem vnější osové síly nejen ke změně délky vzorku, ale rovněž ke změně průřezu vzorku. V tomto případě již nelze stav napjatosti přepokládat za jednoosý.

Pevnost a tažnost jsou základní mechanické vlastnosti, které se zjišťují na dynamometrech (trhačích strojích). Pro toto měření je použito měřící zařízení dynamometr uvedené na Obr. 34. Testování bylo provedeno za podmíněk:

- Teplota vzduchu: 22 ± 2 °C
- Vlhkost vzduchu: 65 ± 2 %



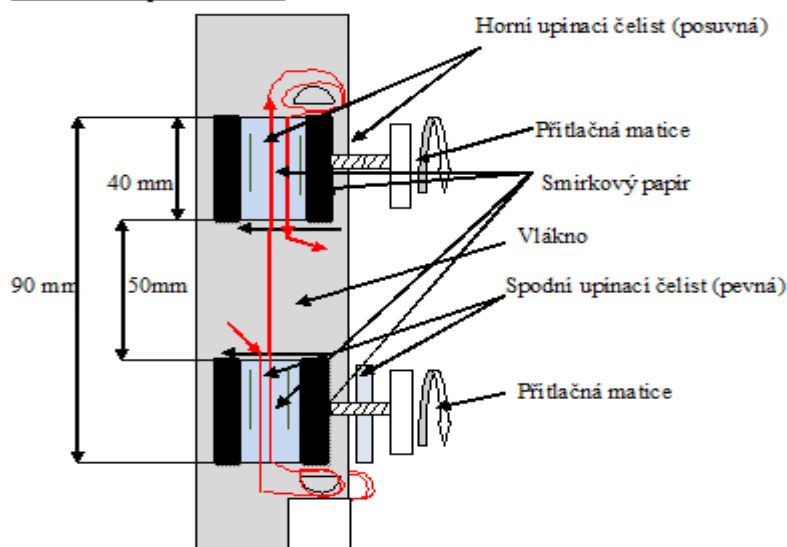
Obr.34 Přístroj LabTech

Přístroj je vybaven svěrnými čelistmi, z nichž jedna čelist je pevná a druhá čelist se pohybuje konstantní rychlostí po celou dobu zkoušky. Měřicí přístroj LabTech je napojen na počítač, který výsledky zpracuje a dá nám potřebné hodnoty.

Vzorky NiTiNOlových vláken byly předem připravené žíháním. Tyto vlákna měly délku u NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6 – 300 mm, tato délka se nám dobře upínala do měřících čelistí. Vlákna byla vložena do svěrných čelistí „samosvorným“ způsobem s vložením smirkového papíru proti prokluzu vláken v čelistech při testování. Schéma upínání vláken samosvorným způsobem je uvedeno na Obr. 35. Tímto způsobem byla upínána vlákna proto, aby se zabránilo prokluzu vláken v čelistech během testů.

Vzorky skleněných a čedičových vláken byly vloženy do svěrných čelistí způsobem s vložením smirkového papíru proti prokluzu vláken v čelistech při testování. Délka vláken byla 400 mm. U těchto vláken se změnila upínací délka na 200 mm.

Samosvorné upínání vláken:



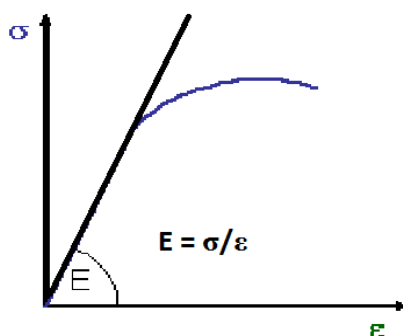
Obr.35 Upínání vláken do čelistí u NiTiNOLu

Při spuštění programu přístroje dochází k posuvu horní čelisti až do přetrhu vlákna za současného zaznamenávání síly $F[N]$ a prodloužení Δl [mm]. Tyto hodnoty jsou výstupem z programu LabTest. Program zpracoval hodnoty dle normy ČSN EN 10002 [84]. Testování pevnosti vláken je provedeno dle normy [85]. Při testování byl použit senzor o měřicím rozsahu 0 – 100 N.

Výstupní veličiny se volily předem při tvorbě definice pro jednotlivé materiály. Pro každou sadu vzorků NiTiNOLu, skleněného a čedičového vlákna bylo provedeno 20 měření, protože každá sada obsahovala 20 ks vzorků, až na sadu NiTi 5 HARD, kde bylo pouze 13 vzorků (nedostatek materiálu).

Statický modul, který se také nazývá Youngův modul, lze definovat jako poměr napětí a jím vyvolané deformace v počátku [72].

$$E = \sigma / \varepsilon \quad [\text{Pa}] \quad (3) \quad [72]$$

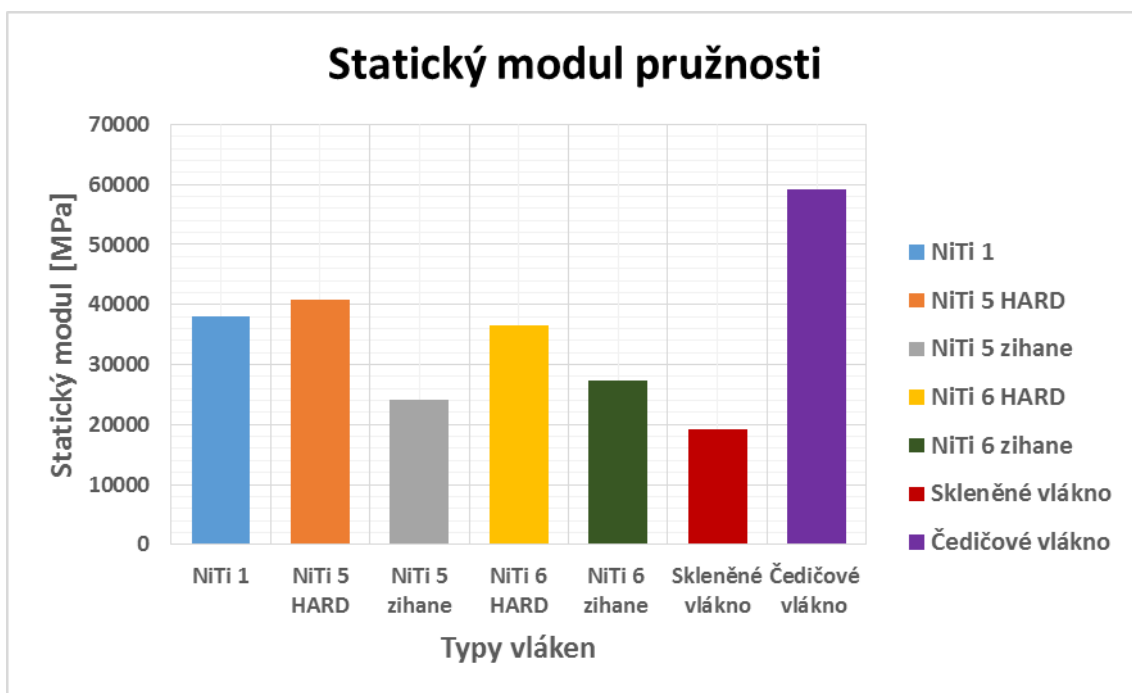


Obr.36 Youngův modul pružnosti

Kde E je modul pružnosti v tahu, σ je napětí v tahu a ε je relativní deformace, která se vypočítá z rozdílu délky vlákna a z prodloužené délky vlákna a podělí se původní délkou vlákna. Hodnota statického modulu je vyjadřována v Pa nebo v MPa. Naměřené hodnoty statického modulu je v příloze C.

Tab.: 15 Výsledné hodnoty modulu pružnosti

	$\bar{x}$ [MPa]	s [MPa]	V [MPa]	IS95 [MPa]
NiTi 1	37958,33	3506,08	9,24	36421,72; 39494,93
NiTi 5 HARD	40874,4	2997,98	7,33	39244,68; 42504,12
NiTi 5 žíhané	24183,39	1892,32	7,83	23353,04; 25011,73
NiTi 6 HARD	36483,94	2599,2	7,12	35344,75; 37623,14
NiTi 6 žíhané	27281,64	3280,19	12,02	25844,03; 28719,25
Skleněné vlákno	19307,23	562,96	2,92	19060,5; 19553,96
Čedičové vlákno	59278,21	604,23	1,02	59013,3; 59543,03



Obr.37 Výsledné hodnoty statického modulu

Na obrázku 37 je vidět jak se měnil statický modul u vláken kovových a nepolymerních. Jednalo se o zkoušku provedenou destruktivní metodou, opakované měření jednotlivých vzorků tedy nebylo možné.

Nejvyšší statický modul mělo vlákno čedičové, které má největší pevnost v tahu oproti ostatním vláknům. Skleněné vlákno mělo statický modul přibližně třetinový oproti čedičovému vláknu. I když tyto vlákna mají podobné vlastnosti, jejich pevnost v tahu se liší, proto mají různé uplatnění.

Ve vláknech NiTiNOLOvých byl statický modul menší oproti čedičovému vláknu, ale byl vyšší než u vlákna skleněného. Byly zvoleny tři typy NiTiNOLOvých vláken a to NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6, které byly upraveny žíháním a byly ve třech různých transformačních fázích při pokojové teplotě. Pro porovnání byl proměřen i statický modul u vláken nežíhaných, a to NiTi 5 a NiTi 6.

Tyto vlákna měla odlišný statický modul, i když při bližším zkoumání se statické moduly příliš nelišily. Rozdíly byly patrnější u vláken, která byla žíhaná oproti vláknům nežíhaným. Vlákna NiTi 5 a NiTi 6, která byla nežíhaná, měla podobný statický modul, bylo to způsobeno, že u nich nebyla upravena struktura vlákna, což znamená, že nevykazovaly jev tvarové paměti. Vlákna žíhaná, u kterých se projevil jev tvarové paměti, měla nižší statický modul než vlákna nežíhaná.

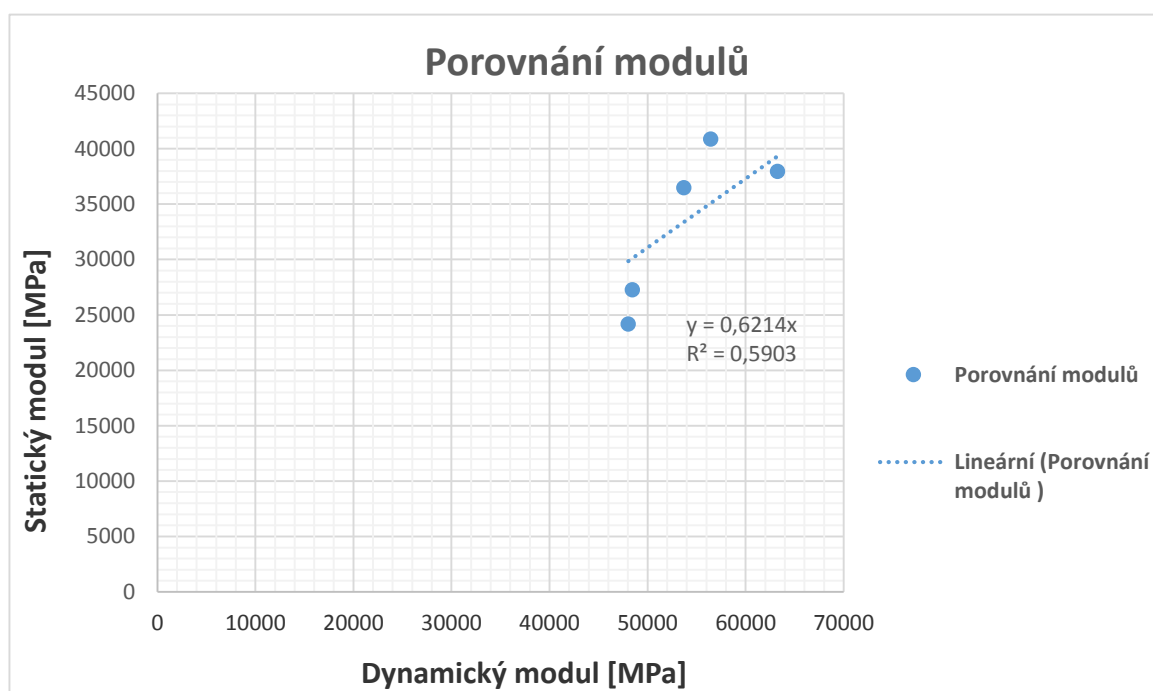
Vlákno NiTi 1 mělo vyšší statický modul než vlákna NiTi 5 a NiTi 6, které byly také žíhané. Bylo to způsobeno, že NiTi 1 bylo při pokojové teplotě ve fázi austenitu. Ostatní žíhaná vlákna NiTi, byla v jiných transformačních fázích, NiTi 5 v martenzitu a NiTi 6 v R – fázi.

10.7 Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti

U všech vláken byly stanoveny průměrné hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti. Statický modul pružnosti se zjišťuje zdeformováním vlákna, jeho roztrhnutím. Dynamický modul pružnosti se zjišťuje pomocí výpočtu. Hodnoty pro výpočet byly získány z DMT přístroje. Jde o čistě nedestruktivní metodu.

Tab.: 16 Průměrné hodnoty statického a dynamického modulu

	Statický modul [MPa]	Dynamický modul [MPa]
NiTi 1	37958,33	63269,38
NiTi 5 HARD	40874,4	56421,41
NiTi 5 zihane	24183,39	48026,51
NiTi 6 HARD	36483,94	53690,42
NiTi 6 zihane	27281,64	48460,03



Obr.38 Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti u vlákna NiTi

Byl porovnán dynamický a statický modul pružnosti. Byly stanoveny průměrné hodnoty modulů těchto vláken. Dále bylo zjištěno, že dynamický modul byl vyšší než statický modul, z čeho vyplývá, že platí závislost $E < E_D$ ($\sim 30\%$). Byl určen koeficient lineární závislosti, že E z E_D byl 0,62, korelační koeficient byl 0,77, což znamená, že mezi moduly byla přímá lineární závislost. Podařilo se zjistit, že lze nahradit složitý způsob měření statického modulu, který byl měřen destruktivním způsobem, že jej lze nahradit nedestruktivní metodou zjišťování dynamického modulu.

10.8 Testování na přístroji DSC

Testování materiálů NiTi 1, NiTi5 a NiTi6 připravených žíháním i bez úpravy, bylo provedeno na měřicím zařízení PERKIN ELMER Diferential Scanning Calorimeter DSC 6. Přístroj DSC, byl umístěn na katedře Textilních materiálů v budově B. Testování bylo prováděno za klimatických podmínek:

- Teplota vzduchu: 20 ± 2 °C
- Vlhkost vzduchu: 65 ± 2 %

Princip měření přístroje DSC PERKIN ELMER byl uveden v kapitole 10.1.

Testovací zařízení PERKIN ELMER DSC 6, na kterém bylo provedeno měření, pracuje na principu – vzorek byl ohříván do mezní teploty nastavené uživatelem a potom následně ochlazován.

Při testování vzorků na přístroji DSC byla křivka vykreslována v opačném pořadí, než je uvedeno na obr. 30. Charakteristickým znakem byl pík = ostré maximum na křivce znázorňující závislost 2 veličin. Pík A_p (EXOTERMNÍ DĚJ) směřuje směrem nahoru a vzniká při dodávání energie (uvolnění tepla). Pík M_p (ENDOTERMNÍ DĚJ) směřuje směrem dolů a vzniká při chlazení (spotřeba tepla).

Postup při přípravě a měření vzorků:

1. příprava prázdných kalíšků a víček $\Rightarrow$ zvážení na vahách
2. odvážení vláken na vahách
3. příprava vzorků - nastříhání vláken na malé kousky
4. umístění vláken do připravených kalíšků
5. zavíčkování kalíšků
6. zalisování kalíšků v lisovači
7. umístění zalisovaných kalíšků do přístroje a nastavení parametrů
8. spuštění přístroje za přítomnosti dusíku v měřicí peci
9. vyhodnocení výsledků v programu PE PYRIS SERIES DSC – 6

Do programu byly zadány hodnoty (parametry), při kterých byly vzorky měřeny:

- počáteční teplota 25 °C
- ohřev z 25 °C na 250 °C při rychlosti ohřevu 5 °C/min
- chlazení z 250 °C na 25 °C při rychlosti chlazení 5 °C/min
- ohřev z 25 °C na 250 °C při rychlosti ohřevu 5 °C/min
- chlazení z 250 °C na 25 °C při rychlosti chlazení 5 °C/min
- hmotnost vzorku vláken uvedené v tab. 16

Tab.: 17 Hmotnosti vláken, misky + víčka – přístroj DSC

Vzorek	NiTi 1	NiTi 5 HARD	NiTi 5 žíhané	NiTi 6 HARD	NiTi 6 žíhané
Hmotnost vzorku [mg]	9,6	9,2	9,3	8,2	9,9
Hmotnost kalíšku + víčka [mg]	34,8	34,1	34,2	33	34,8

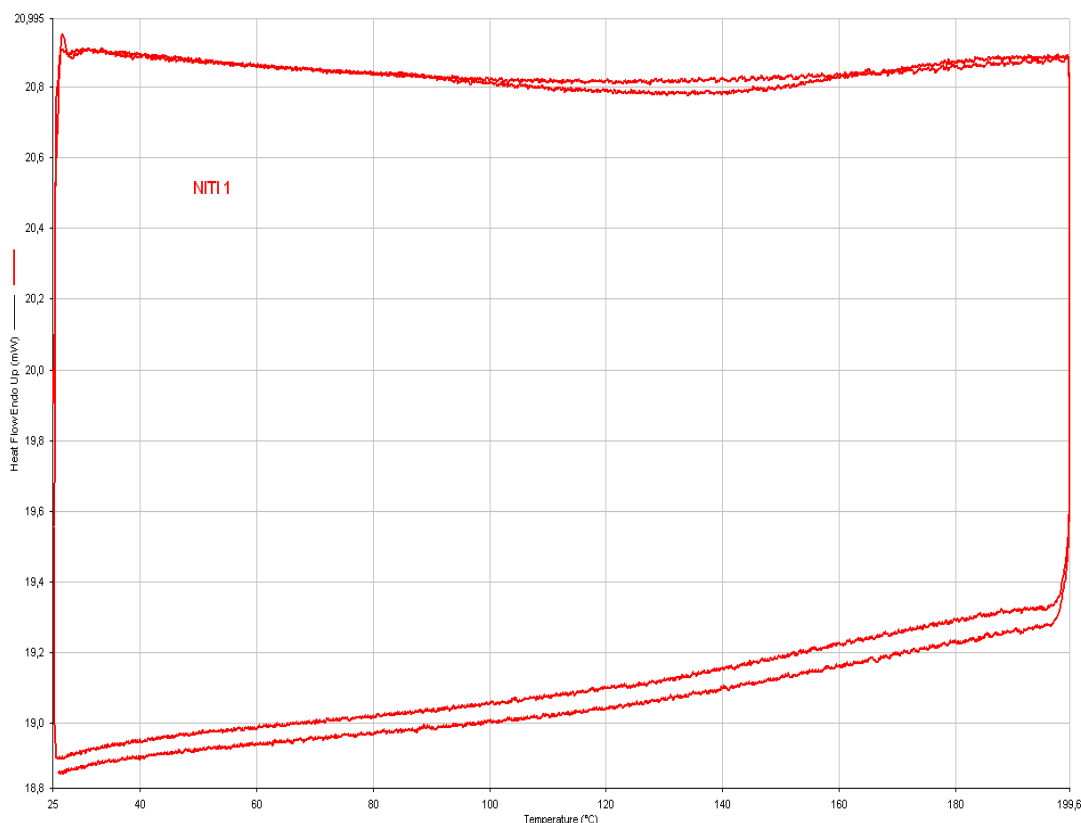
Vstupní parametry byly voleny s ohledem na rozsah přístroje. Dále se vycházelo z předem známých vlastností NiTi vláken (teplota tání $T_m = 1310$ °C). Rozsah přístroje při měření teplot je do +450 °C a z tohoto důvodu nebylo možno ověřit T_m NiTi vláken a byla to hodnota, při které bylo vlákno žíháno.

Po vložení vstupních parametrů materiálu a nastavení hodnot pro ohřev a chlazení, byl program zpuštěn za současného zaznamenávání změny entalpie H [mW] v závislosti na teplotě T [°C]. Po ukončení cyklu měření, byly naměřené křivky vyhodnoceny. Vyhodnocování bylo provedeno v samotném programu PE PYRIS SERIES – DSC6.

10.9 Vyhodnocení křivek DSC

Vzorky vláken NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6 byly předem připraveny žiháním (viz. kapitola 10.1.1). Posléze byly tyto vlákna připraveny pro testování na přístroji DSC, kde bylo měřeno ve dvou cyklech. Vyhodnocení křivek bylo prováděno pomocí derivace, které nám detekují změny tečny (směrnice tečny). Derivace nám upřesní přesně body, kdy začínají transformační děje.

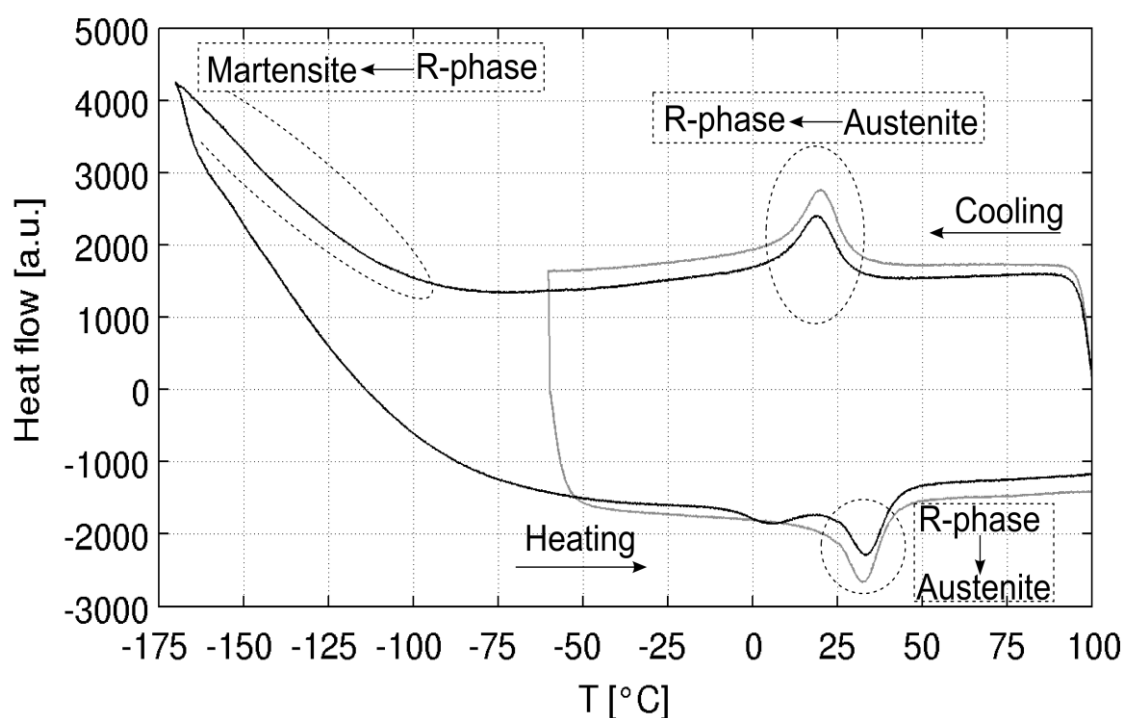
Závislost se vykreslila do grafu, na kterém na ose x byla zaznamenána teplota a na ose y stoupání tepla, tedy vykreslení píku. Tyhle píky byly pouze u vzorků připravených žiháním. Vzorky vláken, které nebyly žihány, nepředvedly žádnou transformační změnu. Byly vybrány tři typy vláken, které jsou při pokojové teplotě v různých fázích. Niti 1 v austenitu, NiTi 5 v martenzitu a NiTi 6 v R – fázi. Začíná v počáteční teplotě přeměny, kdy je vzorek zahříván a vstupuje do další transformační fáze, která vzniká za určitých podmínek. Z této fáze přestupuje do další fáze a při ochlazování se transportuje zpět do výchozí fáze.



Obr.39 DSC křivky – NiTi 1

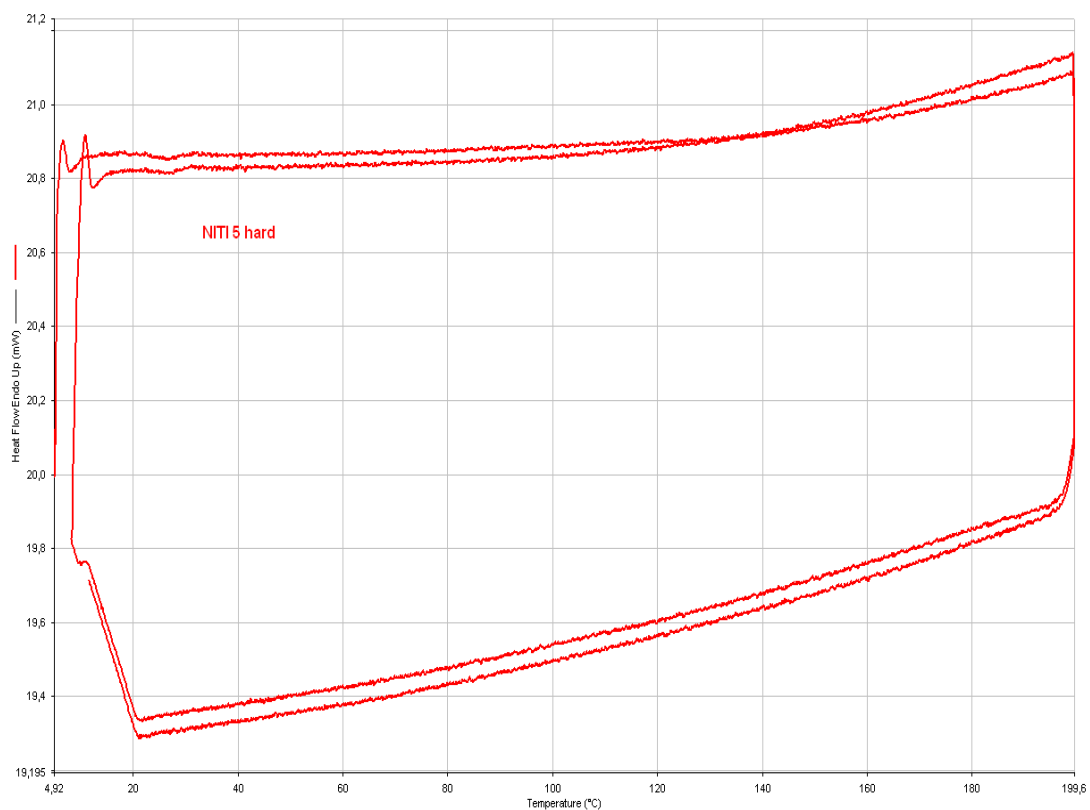
Na obr. 39 je vidět charakteristický průběh křivek vlákna NiTi 1, které bylo žiháno od výrobce z Fyzikálního ústavu akademie věd ČR, které bylo měřeno na přístroji DSC.

Je vidět, že na Niti 1 nedochází k fázové transformaci při zahřívání, i když je vlákno vyžiháno, je to způsobeno tím, že kdybychom chtěli vidět fázový přechod, musely bychom měřit při nižších teplotách, což ve škole nám přístroj neumožňuje. Toto vlákno je v pokojové teplotě a při této teplotě nám vlákno nic neukáže, protože se při těchto teplotách nic neděje. Musely bychom zadat parametry do mínusových hodnot. Bohužel na přístroji DSC, který je na Technické univerzitě tyto hodnoty nejdou nastavit.



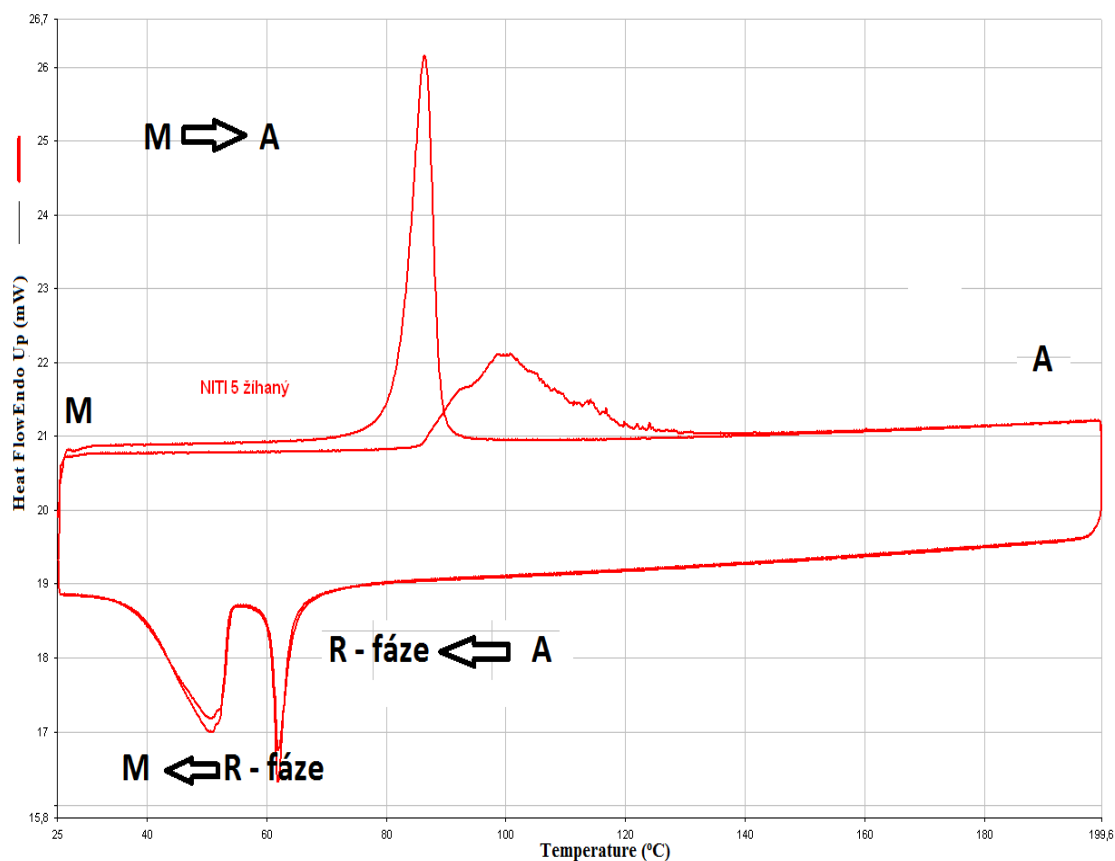
Obr.40 DSC křivky – NiTi 1 z FZU [84]

Na obr. 40 je vidět charakteristický průběh křivek vlákna NiTi 1, které je žiháno ve FZU na přístroji DSC. Toto vlákno bylo žiháno přímo ve FZU. Zde byly trochu posunuté teploty R – fázového přechodu k vyšším teplotám vzhledem k drátu vyžiháném přímo výrobcem.



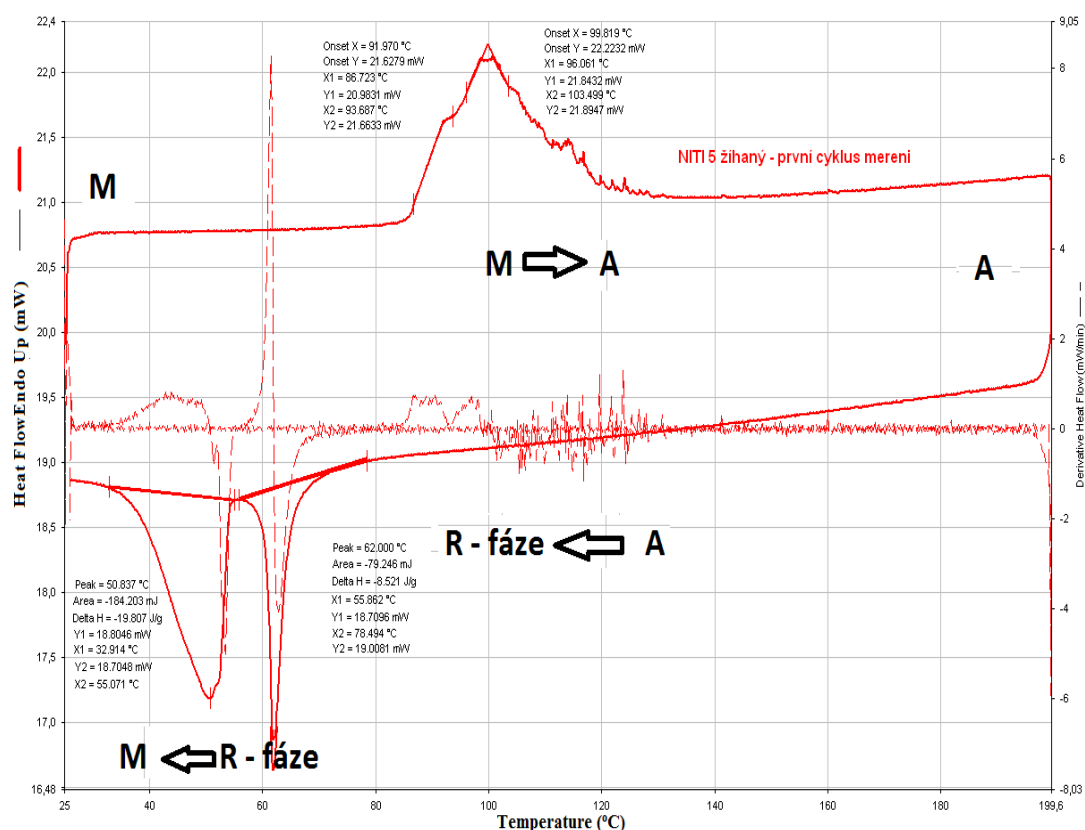
Obr.41 DSC křivky – NiTi 5 HARD

Na obr. 41 je vidět vlákno NiTi 5 HARD, toto vlákno nebylo žiháno, proto zde nedochází k žádné fázové transformaci.



Obr.42 DSC křivky – NiTi 5 žíhaný

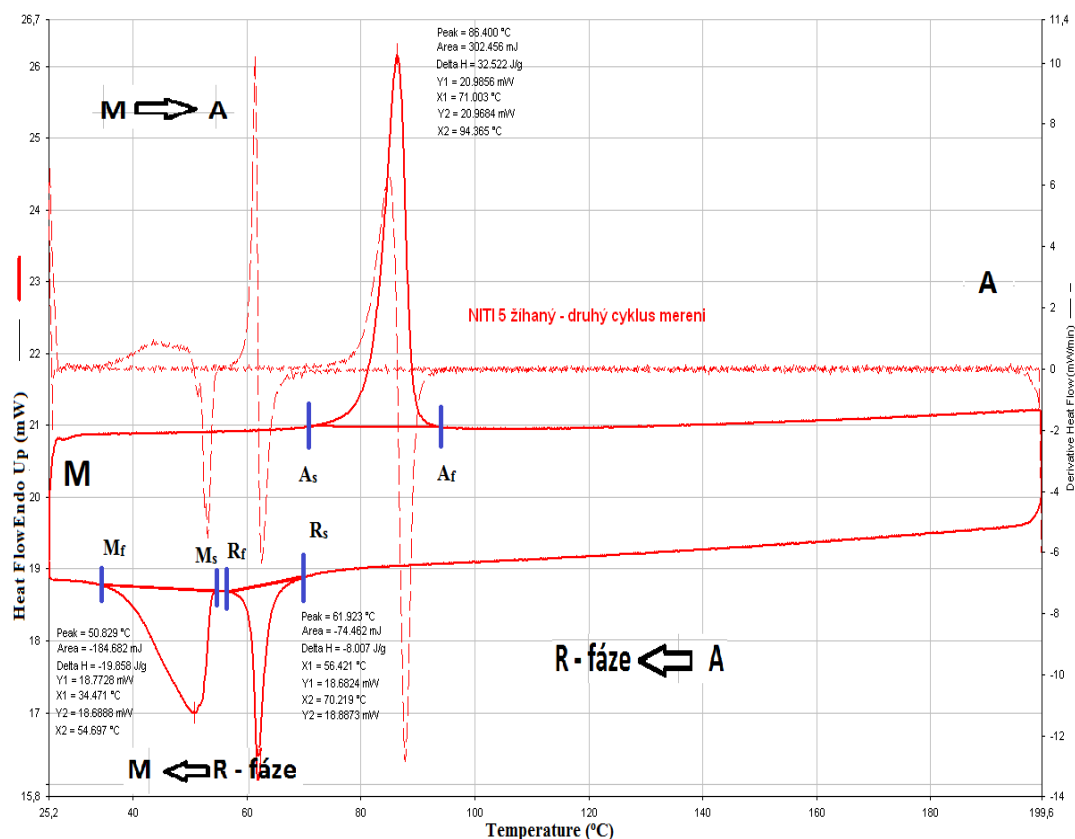
Na obr. 42 je vidět charakteristický průběh křivek NiTi 5, který je žíhaný naměřených na přístroji DSC ve dvou cyklech. Probíhaly zde změny z martenzitu, do austenitu. Při ochlazování z austenitu přes R – fázi zpět do martenzitu.



Obr.43 DSC křivky – NiTi 5 žíhaný – první cyklus měření

Na obr. 43 je vidět průběh křivek vlákna NiTi 5 žíhaného, při prvním cyklu měření na DSC. Nerovnosti měření jsou způsobeny vlákny, které se snaží narovnat při zahřívání (paměť) a plastickou deformaci při přípravě vzorku (stříhání vlákna do kalíšku).

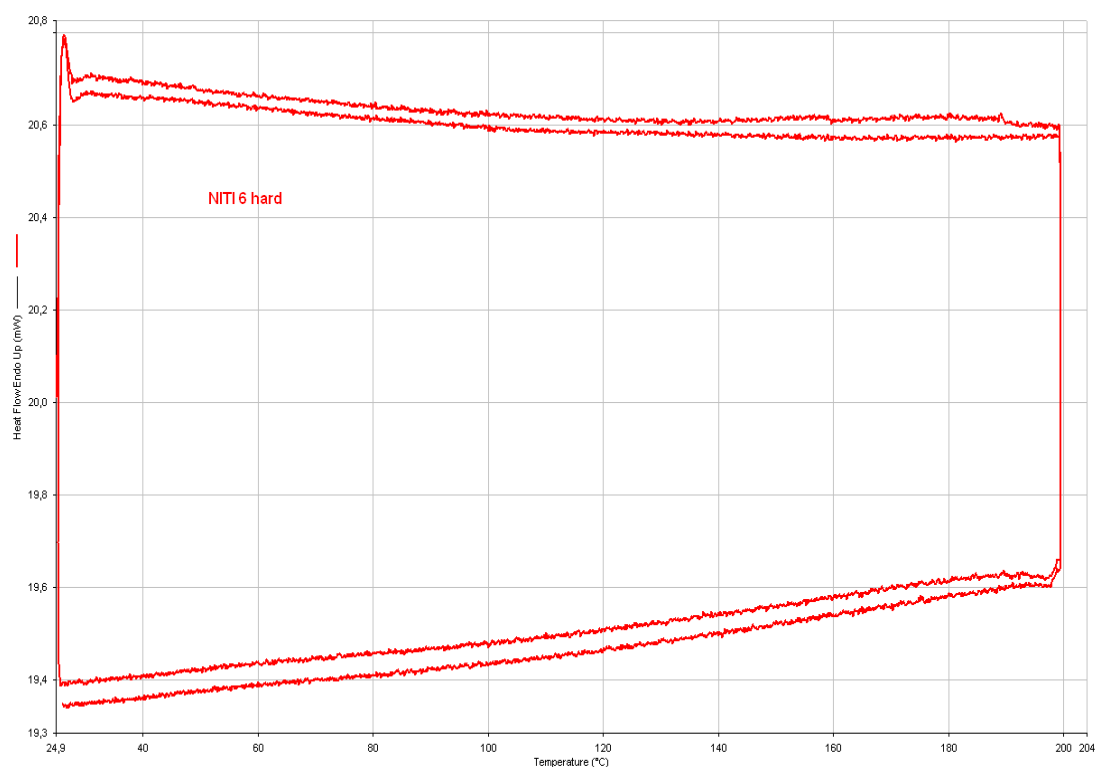
Křivka vychází z martenzitu, při zahřívání přechází do fáze austenitu, při ochlazování se z austenitu dostává do R – fáze. Následně přechází z R – fáze zpět do martenzitu.



Obr.44 DSC křivky – NiTi 5 žihany – druhý cyklus měření

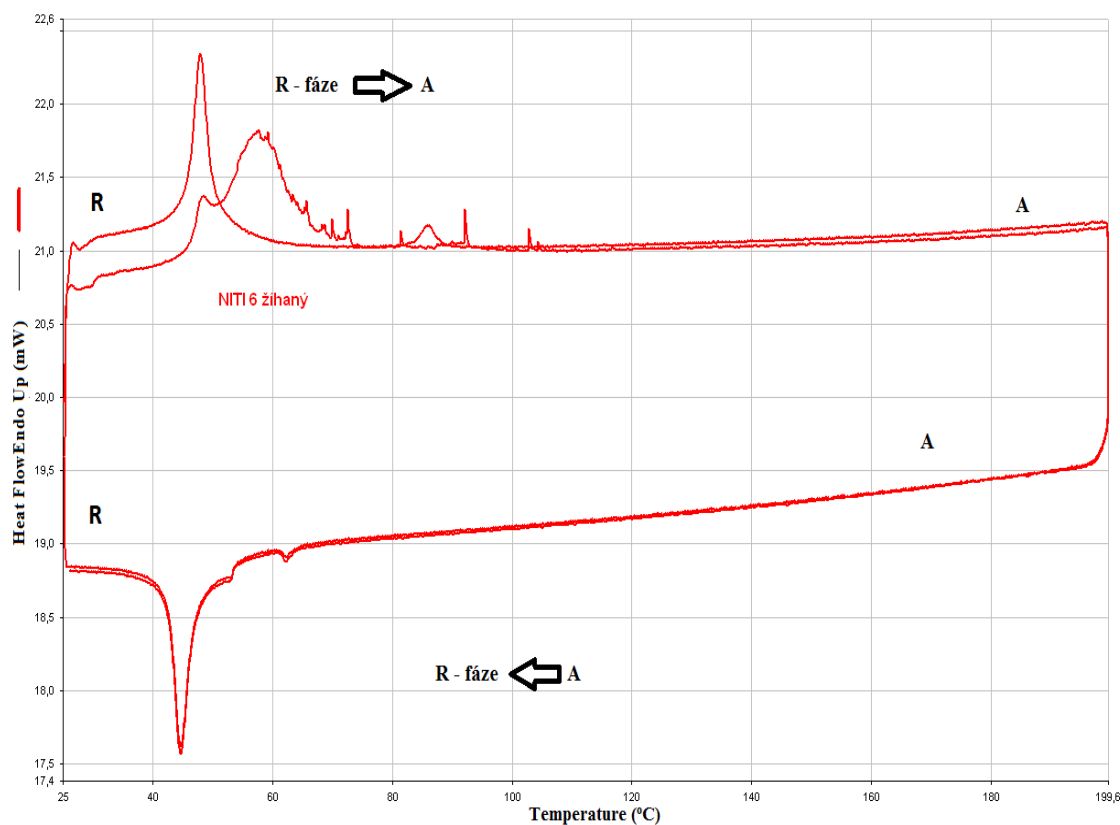
Na obr. 44 je vidět průběh křivek vlákna NiTi 5 žíhaného, při druhém cyklu měření na DSC. Zde můžeme vidět, že nerovnosti zmizely, je to způsobeno tím, že se nám vlákna v prvním cyklu urovnaly a druhý cyklus je proto přesnější. Druhý cyklus je ve stejných fázích jako první cyklus, ale měření je přesnější, proto lze určit začátek a konec transformačních fází.

Křivka nám vychází z martenzitu do austenitu. Austenit start (A_s) je přibližně při 70 °C a konec austenit finish (A_f) kolem 95 °C. Při ochlazování se s fáze austenitu přechází do R – fáze. Kde R_s je okolo 92 °C a R_f je 58 °C. Potom přechází zpět do martenzitu, kde M_s je 52 °C a M_f okolo 32 °C.



Obr.45 DSC křivky – NiTi 6 HARD

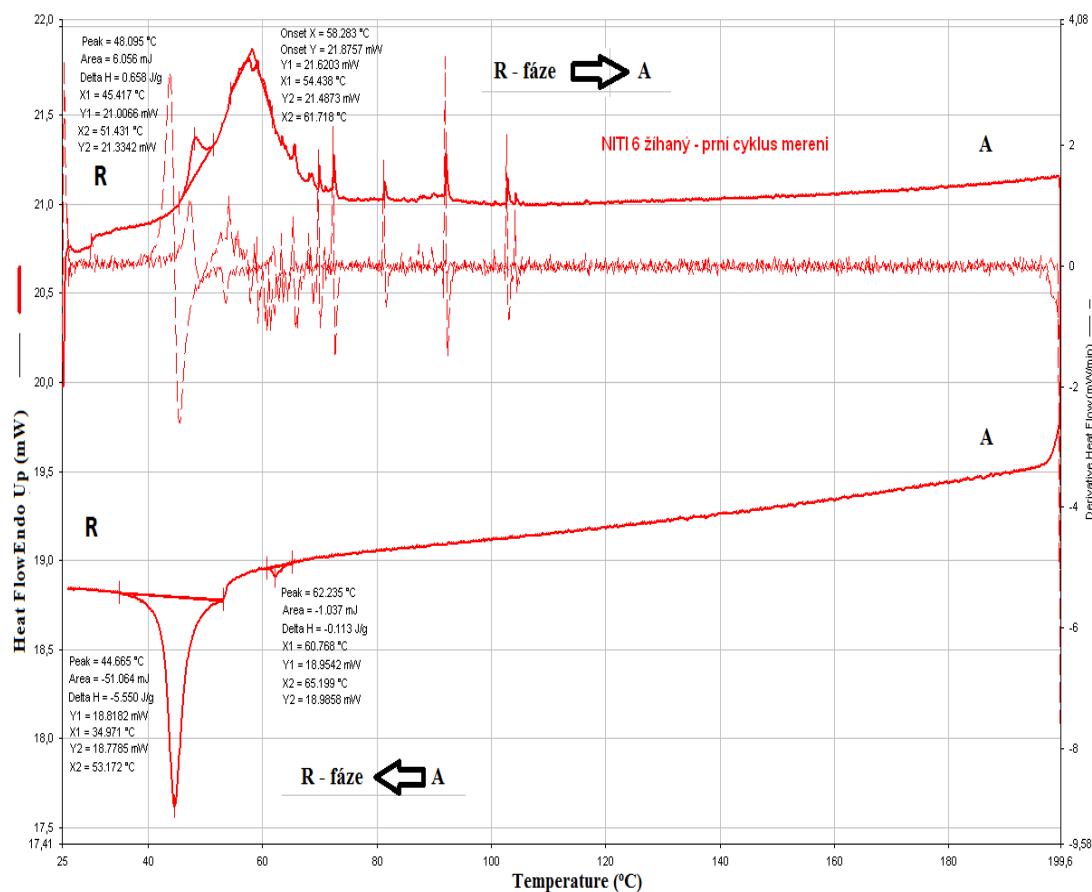
Na obr. 45 je vidět vlákno NiTi 6 HARD, toto vlákno nebylo žíháno, proto zde nedochází k žádné fázové transformaci.



Obr.46 DSC křivky – NiTi 6 žihany

Na obr. 46 je vidět charakteristický průběh křivek NiTi 6, který je žihany naměřených na přístroji DSC ve dvou cyklech. Probíhaly zde změny z R – fáze do austenitu a zpět.

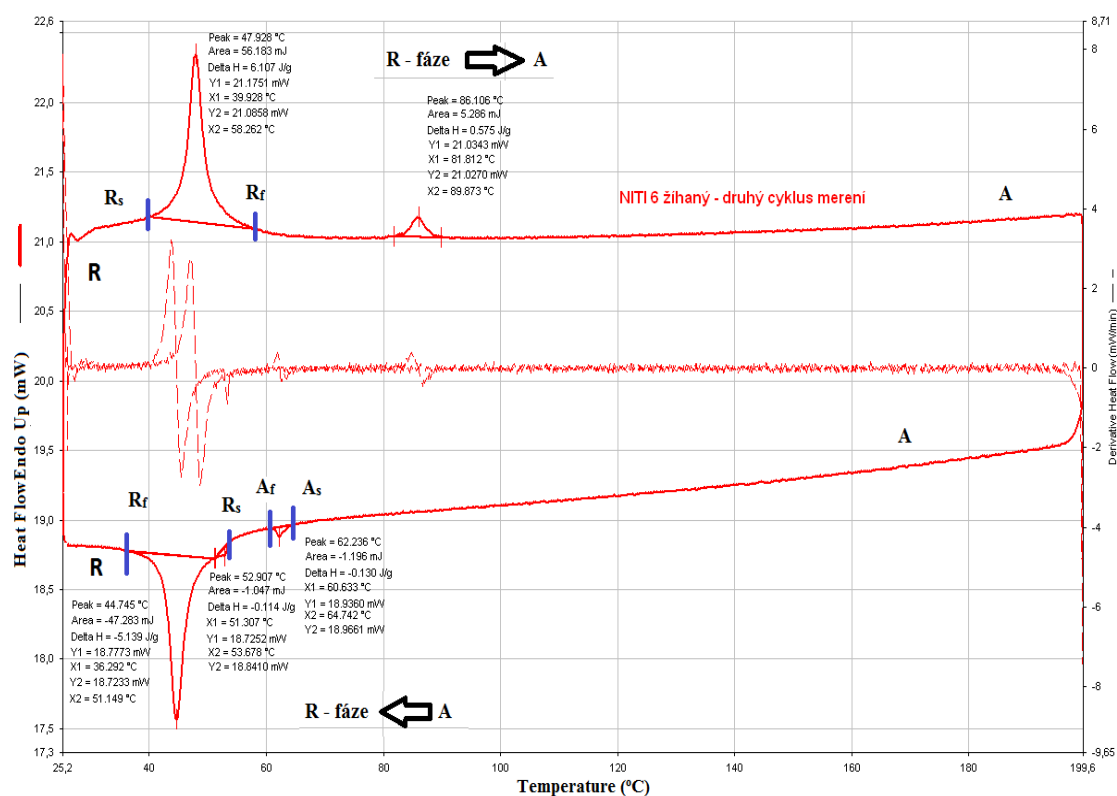
U NiTi 6, které je při pokojové teplotě v R – fázi, probíhaly změny pouze z R – fáze do austenitu. Martenzit by nastal, kdyby byl vzorek déle ochlazován a posléze opět zahříván, aby se vrátil zpět do R – fáze. Musely bychom zadat parametry do mínusových hodnot. Bohužel na přístroj DSC, který je na Technické univerzitě tyto hodnoty nejdou nastavit.



Obr.47 DSC křivky – NiTi 6 žíhaný – první cyklus měření

Na obr. 47 je vidět průběh křivek vlákna NiTi 6 žíhaného, při prvním cyklu měření na DSC. Nerovnosti měření jsou způsobeny vlákny, které se snaží narovnat při zahřívání (paměť) a plasticou deformaci při přípravě vzorku (stříhání vlákna do kalíšku).

Křivka nám vychází z R – fáze do austenitu při zahřívání. Při ochlazování dochází k fázovému přechodu z austenitu do R – fáze.



Obr.48 DSC křivky – NiTi 6 žíhaný – druhý cyklus měření

Na obr. 48 je vidět průběh křivek vlákna NiTi 6 žíhaného, při druhém cyklu měření na DSC. Zde můžeme vidět, že nerovnosti zmizely, je to způsobeno tím, že se nám vlákna v prvním cyklu urovnaly a druhý cyklus je proto přesnější a můžeme určit začátek a konec fázového přechodu.

Křivka nám vychází z R – fáze, kde R_s je 40 °C. a konec fáze R_f je 58 °C. Transformuje se do austenitu. Při ochlazování je A_s kolem 64 °C a A_f je 60 °C. Z austenitu přechází zpět do R – fáze, kde R_s je 55 °C a R_f je 36 °C.

11 ZÁVĚR

Předmětem této práce bylo stanovení dynamického a statického modulu pružnosti u vláken NiTiNOlových, čedičových a skleněných. S tímto bylo spojeno i měření veličin, pomocí kterých byly spočítány potřebné moduly.

NiTiNOlová vlákna byla před měřením žíhána, po předem určenou dobu a tím zotavena jejich mikrostruktura, z toho plyne efekt SMA. Tato tvarová paměť NiTiNOLu byla spojena se změnou vnitřního uspořádání krystalické mřížky, během tohoto procesu dojde k fázové transformaci. Skleněná a čedičová vlákna nebyla upravována, nedocházelo tedy v nich k žádné fázové změně.

Byl proveden literární průzkum, kde bylo seznámení s historií a vlastnostmi NiTiNOlových, čedičových a skleněných vláken. Jaké změny probíhají ve vláknech.

Nejprve jsem se zaměřila na výpočet dynamického modulu pružnosti. Pro výpočet tohoto modulu byla použita metoda DMT, která byla měřena na přístroji PPM4. Na kterém byly měřeny průměrné časy šíření zvuku jednotlivými vzorky. Tyto hodnoty byly naměřeny pro jednotlivé sady vzorků. Vláknem bylo vloženo mezi dva snímače a následně byl měřen čas průchodu vzruchu v jednotlivých vzdálenostech mezi snímacími senzory. Z časových hodnot následně byly stanoveny průměrné časy, ze kterých byla vypočítána rychlost šíření zvuku a dynamický modul pružnosti. Experimentálně bylo zjištěno, že rychlost šíření zvuku závisí na hustotě materiálu, na vlastnostech vláken a na jejich úpravě. Ze zjištěné rychlosti šíření zvuku byl následně vypočítán dynamický modul. Bylo zjištěno, že přístroj DMT je velice citlivý na otřesy a celkové podmínky okolního prostředí.

Statický modul pružnosti byl měřen na přístroji LabTech. Vláknem bylo namáháno prostým tahem definovaného tahu a byl zatížen osnovní silou ve směru nejdelší osy. Jednalo se o destruktivní zkoušku. Nebylo možné opakovat měření u jednotlivých vzorků, protože došlo k jejich destrukci.

Byl porovnán dynamický a statický modul pružnosti. Byly stanoveny průměrné hodnoty vláken. U vláken NiTi, které bylo ve třech fázích, bylo stanoveno, že $E_A > E_R > E_M$, toto platí u obou modulů.

Dále bylo zjištěno, že platí závislost $E < E_D$ ($\sim 30\%$). Byl určen koeficient lineární závislosti, že E z E_D byl 0,62. Mezi moduly byla lineární závislost. Podařilo se zjistit, že lze nahradit složitý způsob měření statického modulu, který byl měřen destruktivním způsobem, že jej lze nahradit nedestruktivní metodou zjišťování dynamického modulu. Statický modul se hůře zjišťuje, protože bylo složité upnutí vzorku mezi dvě čelisti, hrozilo prokluz vlákna, musí se také zvolit správná trhačka, aby výsledky mohly být správně vyhodnoceny. Stanovení dynamického modulu nebylo složité, protože vlákno bylo upnuto mezi dva snímače a byl zjištěn čas, za který se šířil zvukový impuls ve vlákne a z toho vypočítán akustický modul.

Testováním NiTiNOlových vláken typu NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6 na přístroji DSC bylo zjištěno, jak se mění transformační fáze během ohřívání a ochlazování vzorku vláken.

Odlišnosti naměřených parametrů testovaných NiTiNOlových vláken byly pravděpodobně spojeny i s chemickým složením materiálu. Jednotlivé příměsi mohou ovlivnit průběhy a výsledky zkoušek. Testováním bylo prokázáno, že žíhání skutečně ovlivní vlastnosti vláken. Tepelná úprava NiTiNOlových vláken je velmi důležitou operací, která vláknům dává charakteristické vlastnosti. Tepelná úprava by měla být volena dle potřeb aplikace vláken v praxi.

Speciální vlákna čedičová a skleněná se běžně používají. Tyto vlákna patří k nejstarším, které jsou známy. Skleněná vlákna mají širokou škálu použití, jsou ceněny pro svoje výborné vlastnosti. Tyto vlákna se používají hlavně ve výrobě kompozitních materiálů. Konečné výrobky se používají ve stavebnictví, automobilovém, chemickém, leteckém průmyslu a v jiných odvětvích. Budoucnost pro skleněné vlákno bude vyžadovat stále kvalitnější materiály. Budou se zdokonalovat hlavně pro kompozitní materiály v kombinaci s dalšími speciálními vlákny (např. s uhlíkovými vlákny). Čedičová vlákna jsou známa též dlouho dobu, ale pro textilní využití se začalo toto vlákno využívat až po druhé světové válce. Výroba těchto vláken je velmi rozšířená pro jejich dobré vlastnosti a také pro nízkou výrobní cenu. Materiál je chemicky stálý a je určený pro technické použití. Čedič se vyrábí z roztavené čedičové horniny, díky svým vynikajícím vlastnostem se používá v různých oborech. Velkou výhodou tohoto vlákna je, že není zdraví škodlivé, neobsahuje žádné karcinogeny, a nyní není ani obsaženo v současných ani v budoucích seznamech škodlivých látek pro země EU.

Budoucnost NiTiNOlových vláken je pro textilní průmysl neprobádaná, původně byly tyto vlákna používána pro automobilový průmysl. Karoserie, obsahující toto vlákno s pamětí, po zahřátí se snáze opraví, změnou fázového přechodu dojde k vyrovnaní povrchu kapoty. Pro textilní průmysl jsou NiTiNOlová vlákna stále ve vývoji. Zatím, lze vyrábět pouze krátká vlákna, která nemají takové využití. Pro budoucí použití NiTiNOlových vláken pro textilní průmysl, je důležitou součástí výroba stroje, který by zvládnul zpracování těchto vláken do materiálů, které by se daly využít pro snadnější nemačkovou úpravu látek. Výrobky z těchto vláken se působením tepla prakticky „vyžehlí“. Tato myšlenka je ovšem stále ve vývoji.

12 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Wikipedia, otevřená encyklopedie: Zvuk. [online]. [cit. 2011–11-11]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk>
- [2] LEPIL, O.: Fyzika II pro střední školy. Prometheus, spol s.r.o. Praha 2001
- [3] Lidovky.cz: Infrazvuk. [online]. [cit. 2011–10-14]. Dostupné z: <http://ireferaty.lidovky.cz/302/4589/Infrazvuk>
- [4] Lidovky.cz: Ultrazvuk. [online]. [cit. 2011–10-14]. Dostupné z: <http://ireferaty.lidovky.cz/302/5235/Ultrazvuk>
- [5] PanWiki: Zvuk a sluch. [online]. [cit. 2011–10-16]. Dostupné z: http://panwiki.panska.cz/index.php/Zvuk_a_sluch
- [6] Oko: Zvuk jako zbraň. [online]. [cit. 2011–10-17]. Dostupné z: <http://oko.yin.cz/30/zvuk-jako-zbran/>
- [7] Česká televize: Zázraky života. [online]. [cit. 2011–11-18]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/10214135017-zazraky-prirody/211522161700001/>
- [8] Wikipedie, otevřená encyklopedie: Rychlost šíření zvuku. [online]. [cit. 2012–11-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost_zvuku
- [9] Encyklopedie fyziky: Rychlost zvuku. [online]. [cit. 2011–11-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/189-rychlost-zvuku>
- [10] Fyzika: Rychlost šíření zvuku. [online]. [cit. 2011–11-28]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/win.cs/vyuka/zfp/110.htm>
- [11] Lawson Hemphill: Dynamic Modulus Tester. [online]. [cit. 2011-10-28]. Dostupné z: <http://www.lawsonhemphill.com/LH-551-dynamic-modulus-testers.html>
- [12] Vašina, M.; Šolc, F.: Paměťové materiály: Pohony pro robotiku. In Paměťové materiály – pohony pro robotiku 1. Vysoké učení technické v Brně: Ústav automatizace a měřicí techniky, 2003
- [13] Lagoudas, D. C.: Shape Memory Alloys: Modeling and engineering application, Springer, 2008
- [14] Hodgson, D. E., Brown, J. W.: Using Nitinol Alloys, Shape Memory Alloys, California, 2000.

- [15] Szurman, I.; Kursá, M.; Losertová, M.; Charakteristika a vlastnosti paměťových materiálů na bázi NiTi a možnosti jejich modifikace. Hradec nad Moravicí: VŠB – TU OSTRAVA, 2004
- [16] *Fyzikální ústav akademie věd* [online]. Materiály s tvarovou pamětí (SMA). Dostupné z WWW: http://department.fzu.cz/ofm/sma/brana_cz/index.php [cit. 2012–01-03]
- [17] Technik: Kovové slitiny s tvarovou pamětí. [online]. [cit. 2011–12-15]. Dostupné z: <http://technik.ihned.cz/c1-11264510-kovove-slitiny-s-tvarovou-pameti>
- [18] Militký, J.: *Textilní vlákna Klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 273 s.
- [19] Otsuka, K.; Ren, X.: Recent developments in the research of shape memory alloys. *ELSEVIER*. 1999, 7, s. 511–528.
- [20] Lizák, P.; Militký, J.: *Technické textilie*. Ružomberk: Nadácia pre rozvoj textilného vysokoškolského vzdelávania, 2002. 347 s.
- [21] Behl, M.; Lendlein, A.: Shape-memory polymers. *REVIEW*. 2007, 4, s. 19–28.
- [22] Lendlein, A.; Kelch, S.: *Shape-Memory Polymers*. Germany: Angewandte Chemie International Edition. 2034–2057 s., 2002
- [23] Lendlein, A.; Kelch, S. Shape memory effect. *Angewandte chemie*, 2002
- [24] Muhammad, Y. R.; Mathias, A.: Thermal, electrical and magnetic studies of magnetite filled polyurethane shape memory polymers. *Materials science and engineering*. s. 227–235, 2007.
- [25] Otevřená věda: Intermetalika a jevy tvarové paměti. NOVÁK, Václav. FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AKADEMIE VĚD ČR. Intermetalika a jevy tvarové paměti [online]. [cit. 2012–01-15]. Dostupné z: <http://archiv.otevrenaveda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/003.pdf>
- [26] Humbeeck, J. V.: Shape Memory Alloys: A Material and a Technology. *Advanced Engineering Materials* 2001
- [27] *Wikipedie, otevřená encyklopedie: Slitiny s tvarovou pamětí*. [online]. [cit. 2012–01-18]. Dostupné z: <http://archiv.otevrenaveda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/003.pdf>

- [28] Ryhänen, J.: *Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy*. Oulu: Oulu University Library Yliopisto, 2000
- [29] Nurveren, K.; Akdogan, A.; Huang, W. M.: Evolution of transformation characteristics with heating/cooling rate in NiTi shape memory alloys. *ELSEVIER*. 2008, s. 129–134.
- [30] Zpravodaje SPŠS: NiTiNOL. GRUBER, Josef. [online]. [cit. 2012–02-13]. Dostupné z: www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/nitinol.pdf
- [31] Šitner, P.; Sipola, M.: Thermomechanical model for NiTi shape memory wires. *Smart materials and structures*. 2010,
- [32] Memory Wire. *B-1490 Court-Saint-Etienne (Belgie)*. 2002, s. 1-8.
- [33] Wikipedie Commons: Funkční chování. [online]. [cit. 2012–02-25]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Funk%C4%8Dn%C3%AD_chov%C3%A1n%C3%AD.png
- [34] Novák, V.; Šitner, P.: Slitiny s tvarovou pamětí: slitiny s tvarovou pamětí. In *Slitiny s tvarovou pamětí*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, s. 8.
- [35] Stoeckel, D.; Weikang, Y.: Superelastic NiTi Wire. *Wire Journal International*. March 1991, s. 45-50.
- [36] *Fyzikální ústav akademie věd: Funkční materiály a kompozity*. [online]. [cit. 2012–01-25]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/oddeleni/oddeleni-funkcnich-materialu/significant-results/funkcni-materialy-a-kompozity#vysledek4>
- [37] Czech design: Skleněná vlákna – Historie a současnost. [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://www.czechdesign.cz/index.php?lang=1&clanek=34&status=c>
- [38] All – Biz: Skleněná vlákna sekaná. [online]. [cit. 2012–03-26]. Dostupné z: <http://www.ua.all.biz/cs/g296783/>
- [39] Wikipedia, otevřená encyklopedie: Skleněná textilní vlákna. [online]. [cit. 2012–03-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna
- [40] Volny.cz: Vlákna pro kompozity. [online]. [cit. 2012–03-12]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [41] Kompozity s textilní výztuží: Vláknové kompozity – rozdělení dle typu vláken. TOMKOVÁ, Blanka. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, 2010

- [42] Basaltex: Čedičová vlákna. [online]. [cit. 2012–03-10]. Dostupné z: <http://www.basaltex.cz/>
- [43] Militký, J.: Přednášky: *Textilní vlákna; Speciální vlákna*. Liberec: TU 2005. 423s.
- [44] CoJeCo: Čedičová vlákna. [online]. [cit. 2012–03-19]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&iddesc=16470&title=%E8edi%E8ov%E1%20vl%E1kna&s_lang=2
- [45] Institut geologického inženýrství: Tavené horniny. [online]. [cit. 2012–02-19]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html
- [46] LYONS, Donald W. A John GRAHAM. Acoustic Measurement of Fiber Properties. s. 1–6. DOI: 10.1177/004051757504500708. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/content/45/7/549.abstract>
- [47] Applied mechanics: Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva. KLOIBER, Michal a Mária KOTLÍKOVÁ. MENDELOVA ZEMĚDĚLSKÁ A LESNICKÁ UNIVERZITA V BRNĚ. [online]. [cit. 2012–04-22]. Dostupné z: http://www.kloiber.cz/docs/publik/2006/AM_Srni.pdf
- [48] Kursá, M.; Pacholek, P.: Metalurgické charakteristiky tvarově paměťových materiálů na bázi Ni-Ti-Me. Hradec nad Moravicí: Vysoká škola Báňská – TU Ostrava, Ostrava – Poruba, 2002. s. 10.
- [49] CZECHDESINGER/CZ: Skleněná vlákna – historie a současnost. In: GRÉGR, Jan. [online]. 21.7 2003. [cit. 2012-11-11]. Dostupné z: <http://www.czechdesign.cz/index.php?lang=1&clanek=34&status=c>
- [50] ALL.BIZ: Skleněné vlákno. In: [online]. 1999. vyd. [cit. 2012-23-11]. Dostupné z: <http://www.ua.all.biz/cs/g296783/>
- [51] WIKIPEDIE: Skleněná textilní vlákna. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna
- [52] KOŘÍNEK, Zdeněk. VOLNÝ.cz. *Vlákna* [online]. [cit. 2012-13-08]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [53] WIKIPEDIE: Nepolymerní syntetická vlákna. [online]. [cit. 2012-01-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Nepolymern%C3%AD_syntetick%C3%A1_vl%C3%A1kna#Vlastnosti_sklen.C4.9Bn.C3.BDch_vl.C3.A1ken

- [54] Tomková B.: Přednášky: *Kompozity s textilní výztuží*. Liberec: TU 2010
- [55] Tomková B.: *Kompozity s textilní výztuží: Vláknové kompozity – rozdělení dle typu vláken*. Liberec: TU 2010
- [56] Ptáčková, K.: *Geometrické parametry kontinuálních čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 2007. 68 s.
- [57] Basaltex [online]. 2004 [cit. 2012-11-05]. Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků. Dostupné z WWW: <http://www.basaltex.cz/>
- [58] Lehner, J., Surý, L.: *Silikátová vlákna v průmyslu a stavebnictví*. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1975. 368 s.
- [59] Militký, J.: Přednášky: *Textilní vlákna; Speciální vlákna*. Liberec: TU 2005. 423s.
- [60] Výroba čedičových vláken [online], [cit. 2011-04-19], dostupné na www: http://cs.wikipedia.org/wiki/Čedičová_vlákna
- [61] *Petrografie* [online]. 2009 [cit. 2012-12-21]. Bazalt (čedič). Dostupné z WWW: <http://petrol.sci.muni.cz/poznavanihornin/magmatity/bazalt.htm>
- [62] Čedičová vlákna [online], [cit. 2012-04-12], dostupné na www: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=16470&title=%E8edi%E8%E1%20vl%E1kna&s_lang=2
- [63] Materiál na výrobu čedičových vláken [online], [cit. 2011-04-20], dostupné na www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Čedič>
- [64] Technologie výroby čedičových vláken [online], [cit. 2011-03-13], dostupné na www: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html
- [65] Basaltex.com [online], [cit. 2011-03-21], dostupné na www: <http://www.basaltex.com/>
- [66] Pohánková I.: *Čedičová vlákna pro technické aplikace*. Liberec: Bakalářská práce – TU 2010
- [67] Menšíková, P.: *Chemická odolnost skleněných a čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 2008. 61 s.
- [68] Cibochová, M.: *Distribuce pevnosti čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 1997.
- [69] Basaltex [online], [cit. 2011-04-20], dostupné na www: <http://www.basaltex.cz/>
- [70] Roving [online], [cit. 2011-03-12], dostupné na www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Roving>

- [71] ALL.BIZ: Vláknó čedičové.: [online]. 1999. vyd. [cit. 2012-23-11]. Dostupné z: <http://www.ru.all.biz/cs/g1107414/>
- [72] WIKIPEDIE: Modul pružnosti v tahu. [online]. [cit. 2012-12-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Modul_pru%C5%BEnosti_v_tahu
- [73] Thorsen a Veneklasen P. The Spectral Distribution of Sound Produced by Fibers and Fabrics in Friction, Part I (1961)
- [74] Thorsen W. J. The Spectral Distribution of Sound Produced by Fabrics in Friction, Part II (1962)
- [75] Bernstein, B., Hall, D. A., a Trent, H. M., On the Dynamics of a Bull Whip, J. Acoust. Soc. Am. (1958)
- [76] Corte, H., Kallmes, O., and Jarrot, D., Mechanical Failure of Ideal 2-D Fiber
- [77] Networks, The Paper Maker, July (1961) Liptainem, R. G. a Harris, D. O., Acoustic Emission – An Introductory Review, Materials Research Standards (1971)
- [78] Vašina, M.; Šolc, F.: Paměťové materiály: Pohony pro robotiku (2003)
- [79] Vaníček, J.; Metody termické analýzy: *Metody termické analýzy*. Liberec: TU Liberec
- [80] Höhne, G. W. H.; Hemminger, W. F.; Flammersheim, H. J. *Differential Scanning Calorimetry*. Germany: Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003. 281 s., [cit. 2013-04-01].
- [81] Novák, V.; Šitner, P.: Slitiny s tvarovou pamětí: slitiny s tvarovou pamětí. In *Slitiny s tvarovou pamětí*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, s. 8.
- [82] Maršálková, M.: Přednášky: *Metody termické analýzy; Teorie termických metod*. Liberec: TU 2010
- [83] NiTiNOL Wire Types: NiTiNOL. *Fort Wayne Metals: NiTiNOL Wire* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: NiTiNOL Wire Types: NiTiNOL. <i>Fort Wayne Metals: NiTiNOL</i> [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.fwmetals.com/nitinol-wire.php>
- [84] L. Heller, et al., 3D flexible NiTi-braided elastomer composites for smart structure applications, *Smart Mater. Struct.* 21 (2012) Issue: 4 pp 13 (2012) [cit. 29. 4. 2013]

Normy:

- [85] (420310) ČSN EN 10002-1: Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1:
Zkušební metoda za okolní teploty
- [86] ČSN EN ISO 5079: Textilie – Vlákná – Zjišťování pevnosti a tažnosti
jednotlivých vláken při přetrhu

Seznam obrázků

- Obr.1 *Zvukové vlny, které vstupují do ucha [8]*
- Obr.2 *Frekvence zvuku [10]*
- Obr.3 *Šíření zvuku přes překážky [6]*
- Obr.4 *Rychlost šíření zvuku v mosazné tyči [10]*
- Obr.5 *Tvar typického akustického pulsu [46]*
- Obr.6 *Přehled některých slitin s tvarovou pamětí [17]*
- Obr.7 *Typické příklady prostorově centrovaných struktur – a) B2 (NiAl), b) B32 (NaTi), c) B11 (TiCu), d) D0B3 B (NiB³BAl) a plošně centrovaných struktur binárních slitin – e) L1B0B (CuPt), f) L1B1B (CuAu), g) L1B2B (AuCuB3B), h) D0B22B (TiAlB3B). Uvedeno je označení uspořádané struktury, v závorce je příklad slitiny.[25]*
- Obr.8 *Fázový přechod Austenitu a Martenzitu [27]*
- Obr.9 *Struktura austenitu [27]*
- Obr.10 *Struktura Martenzitu [17]*
- Obr.11 *Hysterezní křivka poměru mezi Martenzitem a Austenitem [12]*
- Obr.12 *Romboedrická (Rhombohedral) krystalická mřížka [29]*
- Obr.13 *A) Jednosměrná tvarová paměť; B) Vícesměrná tvarová paměť [32]*
- Obr.14 *24 fází Martenzitu [29]*
- Obr.15 *Základní termomechanické efekty [33]*
- Obr.16 *Superelastická SMA materiálů [34]*
- Obr.17 *Schéma a prototyp suchého zipu z SMA [36]*
- Obr.18 *Polotovary ze slitiny NiTi [25]*
- Obr.19 *Příklady užití slitin s tvarovou pamětí. a) Anténa přenosného telefonu, b) Marsovské vozítko – Mars Pathfinder – bylo vybaveno detektorem dopadajícího martánského prachu, pohyb byl zajištěn elektricky zahříváním SMA drátkem, c) směšovací vodovodní baterie (viz obr 7) d) stenty pro lékařské účely e) superelastické obroučky brýlí.[25]*

Obr.20	<i>Sekané skleněné vlákno [50]</i>
Obr.21	<i>Schéma výroby skleněných vláken [52]</i>
Obr.22	<i>Trojrozměrná síť skleněného vlákna [54]</i>
Obr.23	<i>Blokové schéma výrobků ze skleněných vláken je uvedeno na obrázku [52]</i>
Obr.24	<i>Porovnání složení čedičových a skleněných E vláken [52]</i>
Obr.25	<i>Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [52]</i>
Obr.26	<i>Krystal nefelinu [60]</i>
Obr.27	<i>Detail zvukově a tepelně izolační desky z krátkých čedičových vláken[64]</i>
Obr.28	<i>Schéma technologie výroby čedičovo-struskového vlákna [64]</i>
Obr.29	<i>Izolační výrobek vyrobený z čedičových vláken [71]</i>
Obr.30	<i>Teoretický DSC výstup křivky pro SMA materiály [81]</i>
Obr.31	<i>Schéma DSC [79]</i>
Obr.32	<i>Dynamic Modulus Tester [11]</i>
Obr.33	<i>Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti</i>
Obr.34	<i>Přístroj LabTech</i>
Obr.35	<i>Upínání vláken do čelistí u NiTiNOLu</i>
Obr.36	<i>Youngův modul pružnosti</i>
Obr.37	<i>Výsledné hodnoty statického modulu</i>
Obr.38	<i>Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti u vlákna NiTi</i>
Obr.39	<i>DSC křivky – NiTi 1</i>
Obr.40	<i>DSC křivky – NiTi 1 z FZU [84]</i>
Obr.41	<i>DSC křivky – NiTi 5 HARD</i>
Obr.42	<i>DSC křivky – NiTi 5 žíhaný</i>
Obr.43	<i>DSC křivky – NiTi 5 žíhaný – první cyklus měření</i>
Obr.44	<i>DSC křivky – NiTi 5 žíhaný – druhý cyklus měření</i>
Obr.45	<i>DSC křivky – NiTi 6 HARD</i>
Obr.46	<i>DSC křivky – NiTi 6 žíhaný</i>
Obr.47	<i>DSC křivky – NiTi 6 žíhaný – první cyklus měření</i>
Obr.48	<i>DSC křivky – NiTi 6 žíhaný – druhý cyklus měření</i>

Seznam tabulek

- Tab.: 1 *Vlastnosti slitin NiTi [12, 27]*
- Tab.: 2 *Složení sklovin (hmotnostní procenta) [52]*
- Tab.: 3 *Vlastnosti textilního skleněného vlákna [51]*
- Tab.: 4 *Vlastnosti některých druhů skleněných vláken [51]*
- Tab.: 5 *Porovnání fyzikálních vlastností čedičových a skleněných vláken [69]*
- Tab.: 6 *Porovnání chemických vlastností čedičových a skleněných vláken [69]*
- Tab.: 7 *Porovnání tepelných a elektrických vlastností čedičových a skleněných vláken [69]*
- Tab.: 8 *Základní termické analýzy [79]*
- Tab.: 9 *Chemické složení vláken, NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6 [83]*
- Tab.: 10 *Parametry materiálů NiTi 1, NiTi 5 a NiTi 6*
- Tab.: 11 *Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [69]*
- Tab.: 12 *Statisticky zpracované hodnoty časů z DMT*
- Tab.: 13 *Výsledné hodnoty rychlosti šíření zvuku*
- Tab.: 14 *Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti*
- Tab.: 15 *Výsledné hodnoty modulu pružnosti*
- Tab.: 16 *Průměrné hodnoty statického a dynamického modulu*
- Tab.: 17 *Hmotnosti vláken, misky + víčka – přístroj DSC*

Seznam příloh

PŘÍLOHA A

NiTi 1

Tab.: A1 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 1*

Tab.: A2 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 1*

Obr. A1 *Vztah času a vzdálenosti*

NiTi 5 HARD

Tab.: A3 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 HARD*

Tab.: A4 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 HARD*

Obr. A2 *Vztah času a vzdálenosti*

NiTi 5 žíhané

Tab.: A5 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 žíhané*

Tab.: A6 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 žíhané*

Obr. A3 *Vztah času a vzdálenosti*

NiTi 6 HARD

Tab.: A7 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 HARD*

Tab.: A8 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 HARD*

Obr. A4 *Vztah času a vzdálenosti*

NiTi 6 žíhané

Tab.: A9 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 žíhané*

Tab.: A10 *Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 žíhané*

Obr. A5 *Vztah času a vzdálenosti*

Čedičové vlákno

Tab.: A11 *Časový průchod zvuku vláknem čedičovým*

Tab.: A12 *Časový průchod zvuku vláknem čedičovým*

Obr. A6 *Vztah času a vzdálenosti*

Skleněné vlákno

Tab.: A13 Časový průchod zvuku vláknem skleněným

Tab.: A14 Časový průchod zvuku vláknem skleněným

Obr. A7 Vztah času a vzdálenosti

PŘÍLOHA B

Tab.: B1 Hodnoty dynamického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 1, NiTi 5 HARD a NiTi 5 žíhané

Tab.: B2 Hodnoty dynamického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 6 HARD, NiTi 6 žíhané, skleněné vlákno a čedičové vlákno

Obr. B1 Dynamický modul pružnosti

PŘÍLOHA C

Tab.: C1 Hodnoty statického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 1, NiTi 5 HARD a NiTi 5 žíhané

Tab.: C2 Hodnoty statického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 6 HARD, NiTi 6 žíhané, skleněné vlákno a čedičové vlákno

Obr. C1 Statický modul

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A

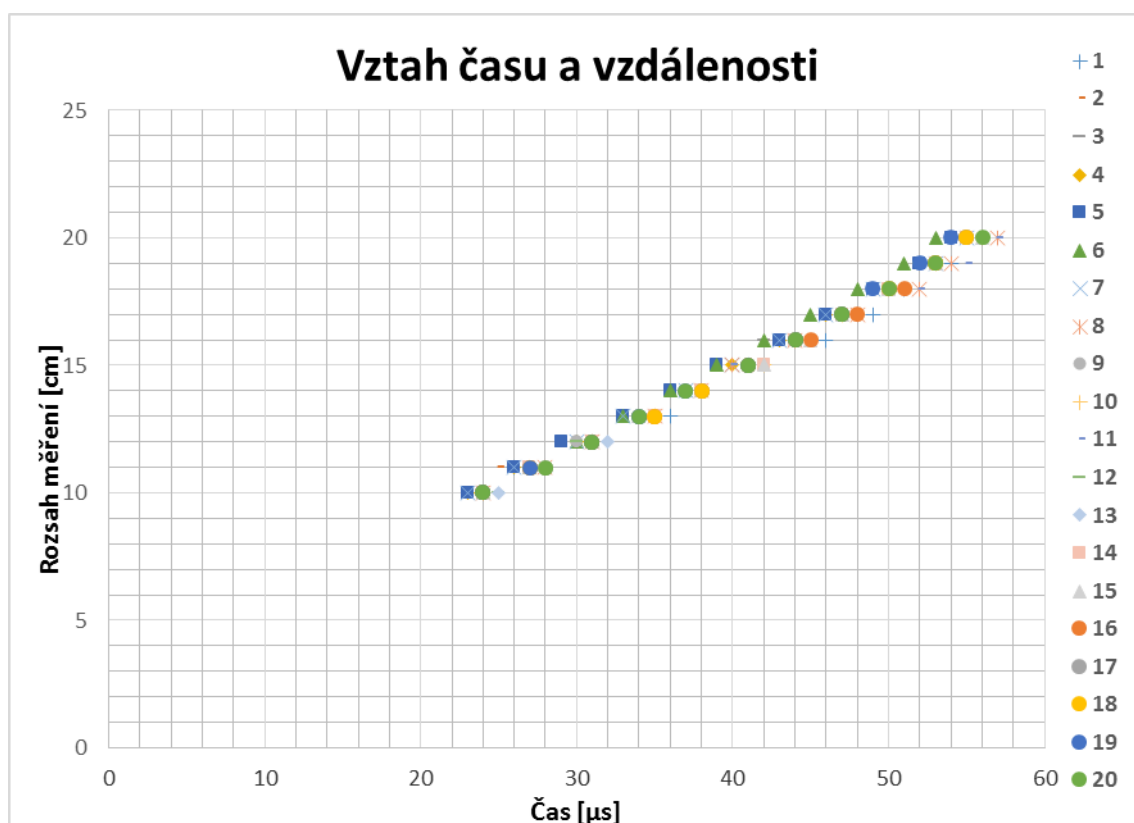
Niti 1

Tab.: A1 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 1

cm	μs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	24	23	23	23	23	24	23	24	24	24
11	26	25	26	26	26	27	26	28	27	27
12	31	30	29	30	29	30	30	31	30	31
13	36	33	33	34	33	33	33	35	34	35
14	38	37	36	37	36	36	37	38	37	38
15	41	40	39	40	39	39	40	40	41	42
16	46	42	42	43	43	42	43	44	44	44
17	49	46	46	46	46	45	46	48	47	47
18	51	49	49	49	49	48	49	52	50	50
19	54	52	52	52	52	51	53	54	53	53
20	56	55	54	55	54	53	55	57	56	56
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,973	3,079	3,128	3,126	3,118	3,382	3,076	3,013	3,077	3,121

Tab.: A2 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 1

cm	μs									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	24	25	25	24	24	24	24	24	24	24
11	27	27	28	27	27	27	28	27	27	28
12	30	30	32	31	31	31	31	31	31	31
13	34	34	34	35	34	35	34	35	34	34
14	37	38	38	38	38	38	38	38	37	37
15	40	41	41	42	42	41	41	41	41	41
16	44	44	44	44	45	45	44	44	44	44
17	48	47	47	47	47	48	47	47	47	47
18	52	50	50	50	50	51	50	50	49	50
19	55	52	53	53	53	53	53	53	52	53
20	57	54	55	55	56	55	55	55	54	56
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,903	3,242	3,267	3,161	3,093	3,104	3,189	3,166	3,247	3,14



Obr. A1 Vztah času a vzdálenosti

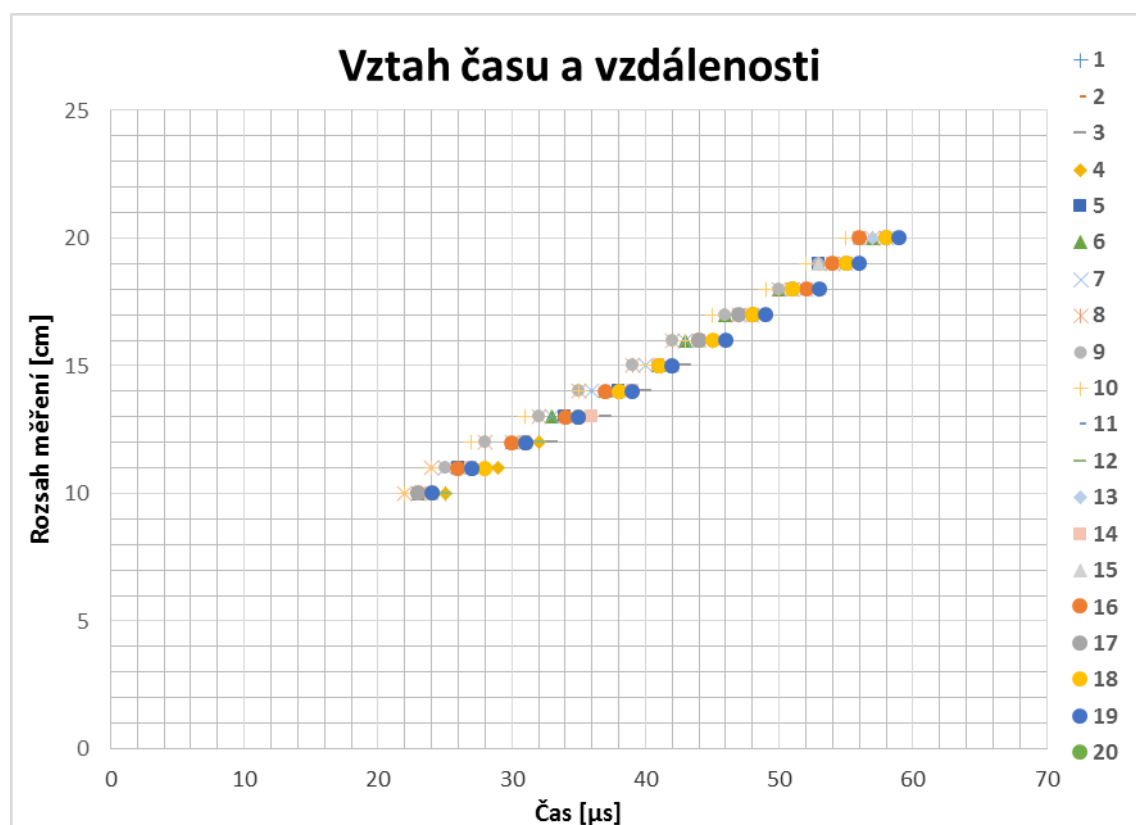
NiTi 5 HARD

Tab.: A3 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 HARD

cm	μs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	25	24	25	25	24	23	23	22	23	22
11	28	26	29	29	26	27	25	24	25	24
12	32	33	33	32	31	30	30	28	28	27
13	35	36	37	35	34	33	33	32	32	31
14	38	39	40	39	38	37	36	35	35	35
15	42	42	43	42	41	41	40	39	39	40
16	45	46	46	45	44	43	43	42	42	43
17	48	48	49	48	47	46	48	47	46	45
18	53	52	52	51	51	50	52	50	50	49
19	56	55	54	53	53	53	55	54	53	52
20	58	57	56	56	56	57	58	57	56	55
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,942	2,951	3,185	3,224	3,044	3	2,756	2,758	2,903	2,887

Tab.: A4 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 HARD

cm	μs									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	24	25	24	24	24	23	23	24	24	24
11	27	28	26	27	27	26	27	28	27	28
12	31	32	30	31	31	30	31	31	31	31
13	35	36	35	36	34	34	35	35	35	36
14	38	39	38	39	38	37	38	38	39	40
15	41	42	41	41	42	41	42	41	42	43
16	44	45	45	44	44	44	44	45	46	46
17	47	48	48	47	48	48	47	48	49	49
18	51	52	51	51	51	52	51	51	53	53
19	54	56	55	54	53	54	55	55	56	57
20	57	58	57	56	56	56	58	58	59	59
Rychlost šíření zvuku [m/s]	3,026	2,991	2,907	3,079	3,059	2,897	2,909	2,963	2,802	2,818



Obr. A2 Vztah času a vzdálenosti

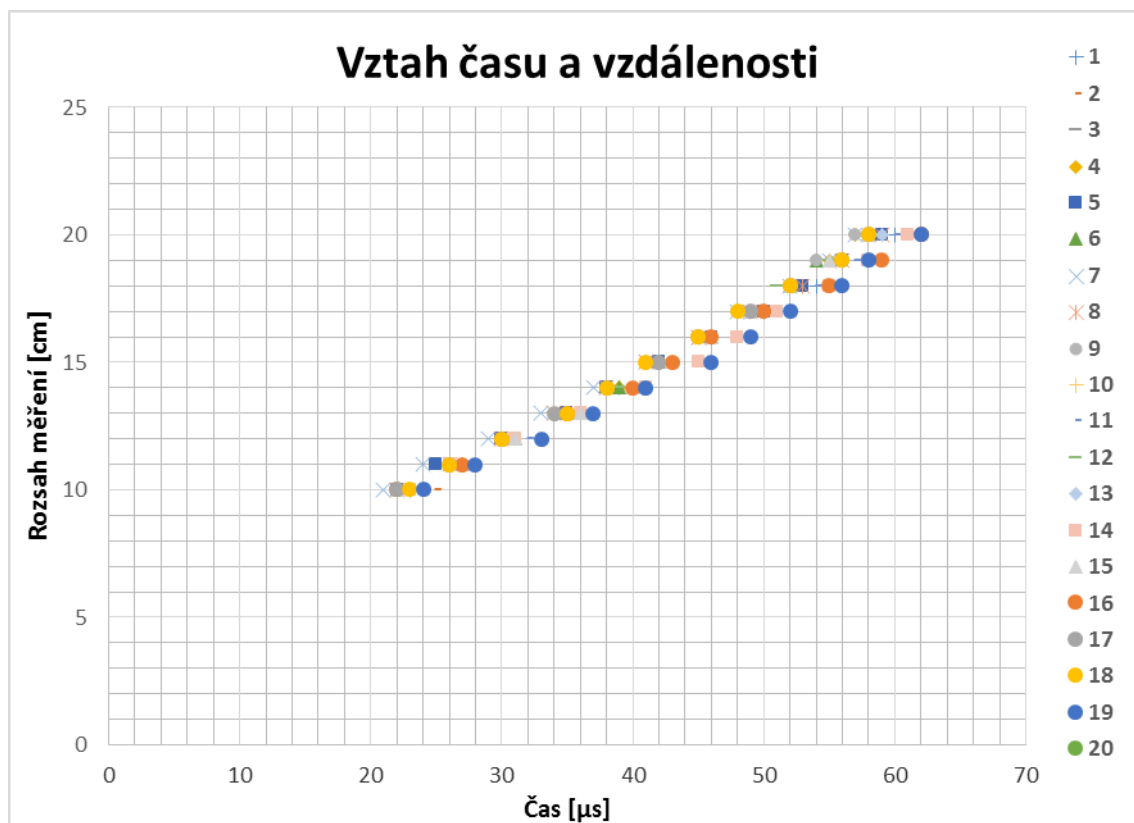
NiTi 5 žíhané

Tab.: A5 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 žíhané

cm	μs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	23	25	22	22	22	22	21	22	22	22
11	27	27	26	26	25	27	24	26	26	26
12	30	31	30	30	30	31	29	30	30	31
13	34	35	34	34	35	35	33	34	35	34
14	39	40	38	39	38	39	37	38	38	38
15	42	43	41	42	42	42	41	41	42	41
16	46	46	45	45	46	46	45	45	45	45
17	50	50	48	49	50	49	48	49	48	49
18	54	54	51	52	53	52	52	53	52	52
19	58	56	55	55	56	54	55	56	54	55
20	60	59	58	57	59	58	57	59	57	58
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,614	2,8	2,786	2,779	2,632	2,829	2,663	2,673	2,831	2,769

Tab.: A6 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 5 žíhané

cm	μs									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	24	22	22	23	22	22	22	23	24	22
11	27	26	26	26	27	27	26	26	28	27
12	32	30	31	31	31	30	30	30	33	31
13	36	35	35	36	36	35	34	35	37	34
14	40	39	38	41	40	40	38	38	41	38
15	43	42	41	45	43	43	42	41	46	41
16	46	45	45	48	46	46	45	45	49	44
17	50	48	49	51	49	50	49	48	52	48
18	54	51	52	55	52	55	52	52	56	51
19	57	55	56	58	55	59	56	56	58	54
20	60	58	59	61	58	62	58	58	62	57
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,742	2,797	2,723	2,554	2,812	2,499	2,721	2,785	2,62	2,908



Obr. A3 Vztah času a vzdálenosti

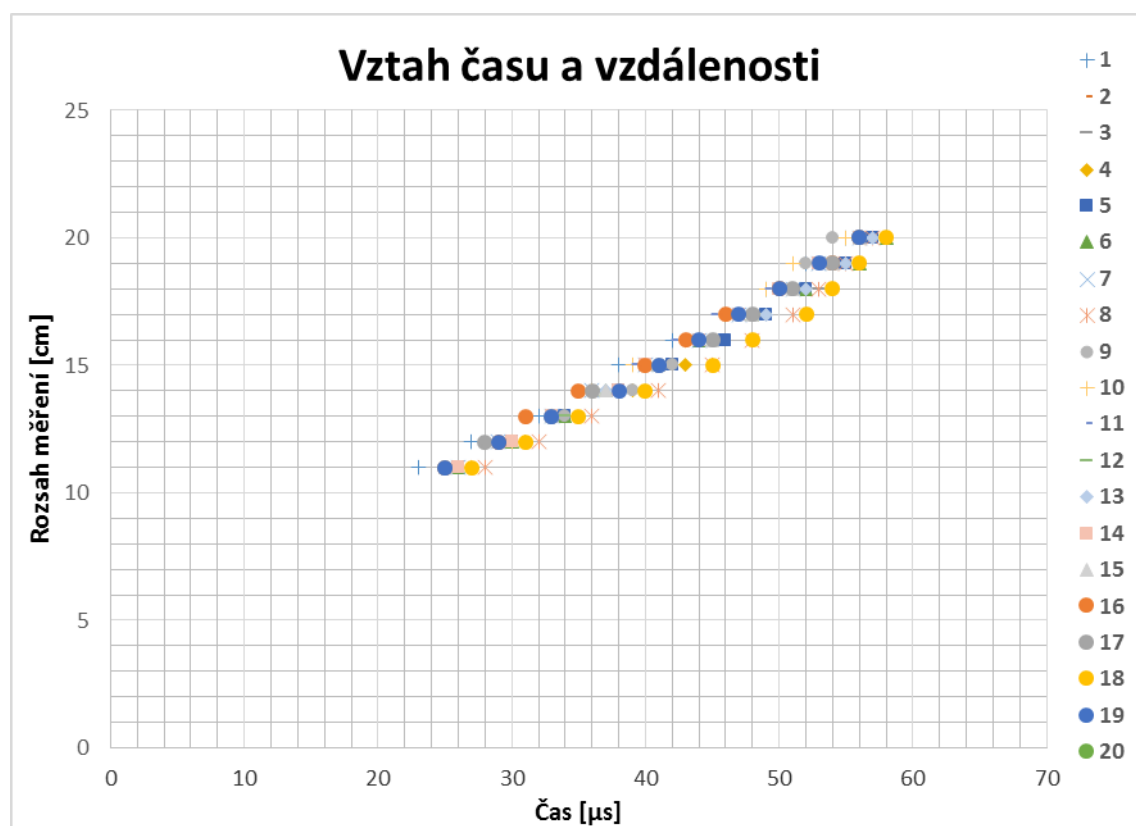
NiTi 6 HARD

Tab.: A7 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 HARD

cm	μs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	19	22	22	23	23	22	22	24	23	23
11	23	25	26	26	26	26	26	28	26	27
12	27	29	30	31	30	30	29	32	30	30
13	32	33	34	34	34	34	33	36	34	33
14	36	36	38	39	38	37	36	41	39	36
15	38	40	41	43	42	41	40	45	42	39
16	42	45	44	45	46	44	44	48	45	43
17	46	49	49	48	49	48	47	51	48	46
18	49	52	53	51	52	52	51	53	50	49
19	52	55	55	54	55	56	53	55	52	51
20	55	57	58	56	57	58	56	57	54	55
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,82	2,693	2,766	2,988	2,818	2,763	2,911	2,979	3,123	3,211

Tab.: A8 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 HARD

cm	μs									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	21	23	22	24	22	21	21	23	22	24
11	25	26	25	26	25	25	25	27	25	27
12	28	30	29	30	29	29	28	31	29	31
13	31	34	33	33	33	31	33	35	33	34
14	35	37	37	38	37	35	36	40	38	37
15	39	41	41	40	41	40	41	45	41	40
16	42	45	45	44	45	43	45	48	44	44
17	45	49	49	47	48	46	48	52	47	47
18	49	52	52	50	51	50	51	54	50	50
19	53	54	55	53	54	54	54	56	53	53
20	56	56	57	56	56	56	56	58	56	57
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,856	2,879	2,71	3,005	2,818	2,81	2,767	2,742	2,914	3,064



Obr. A4 Vztah času a vzdálenosti

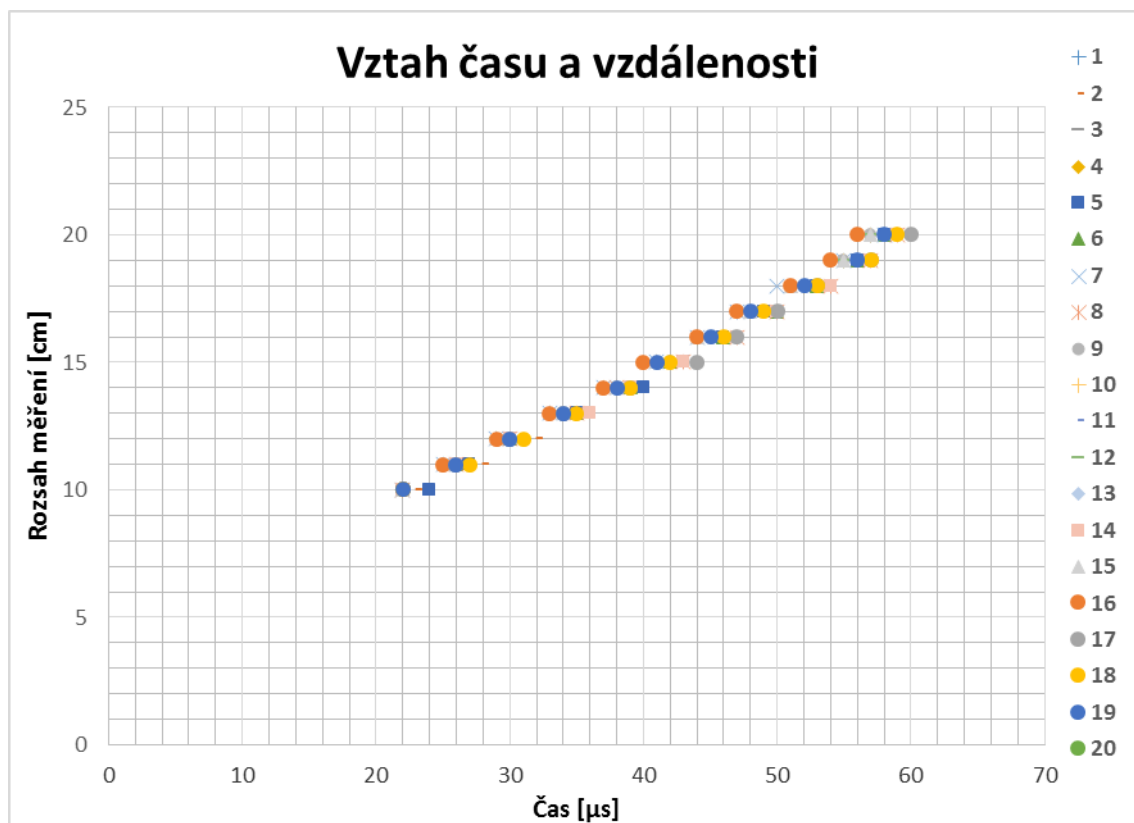
NiTi 6 žíhané

Tab.: A9 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 žíhané

cm	μs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	22	23	22	22	24	22	22	22	22	22
11	25	28	27	25	27	26	25	26	25	26
12	29	32	31	30	30	30	29	30	30	29
13	33	35	34	35	35	35	33	35	34	33
14	38	39	38	38	40	39	37	38	38	37
15	41	42	41	42	43	42	41	43	42	41
16	44	46	45	45	46	46	44	47	46	44
17	47	50	49	49	49	50	47	50	49	48
18	52	53	52	52	53	53	50	54	53	52
19	55	56	55	56	56	56	55	57	55	55
20	57	59	57	58	58	58	58	59	57	57
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,752	2,798	2,829	2,704	2,809	2,691	2,758	2,604	2,713	2,764

Tab.: A10 Časový průchod zvuku vláknem NiTi 6 žíhané

cm	μs									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	22	22	22	22	22	22	22	22	22	23
11	26	25	25	26	25	25	26	27	26	26
12	31	29	29	30	29	29	30	31	30	30
13	34	33	33	36	34	33	34	35	34	34
14	38	37	37	39	38	37	39	39	38	38
15	42	41	41	43	41	40	44	42	41	42
16	45	44	44	47	44	44	47	46	45	45
17	48	47	47	50	48	47	50	49	48	48
18	53	51	51	54	51	51	53	53	52	52
19	55	55	54	57	55	54	57	57	56	56
20	58	57	56	59	57	56	60	59	58	58
Rychlost šíření zvuku [m/s]	2,759	2,771	2,831	2,618	2,773	2,834	2,586	2,7	2,737	2,771



Obr. A5 Vztah času a vzdálenosti

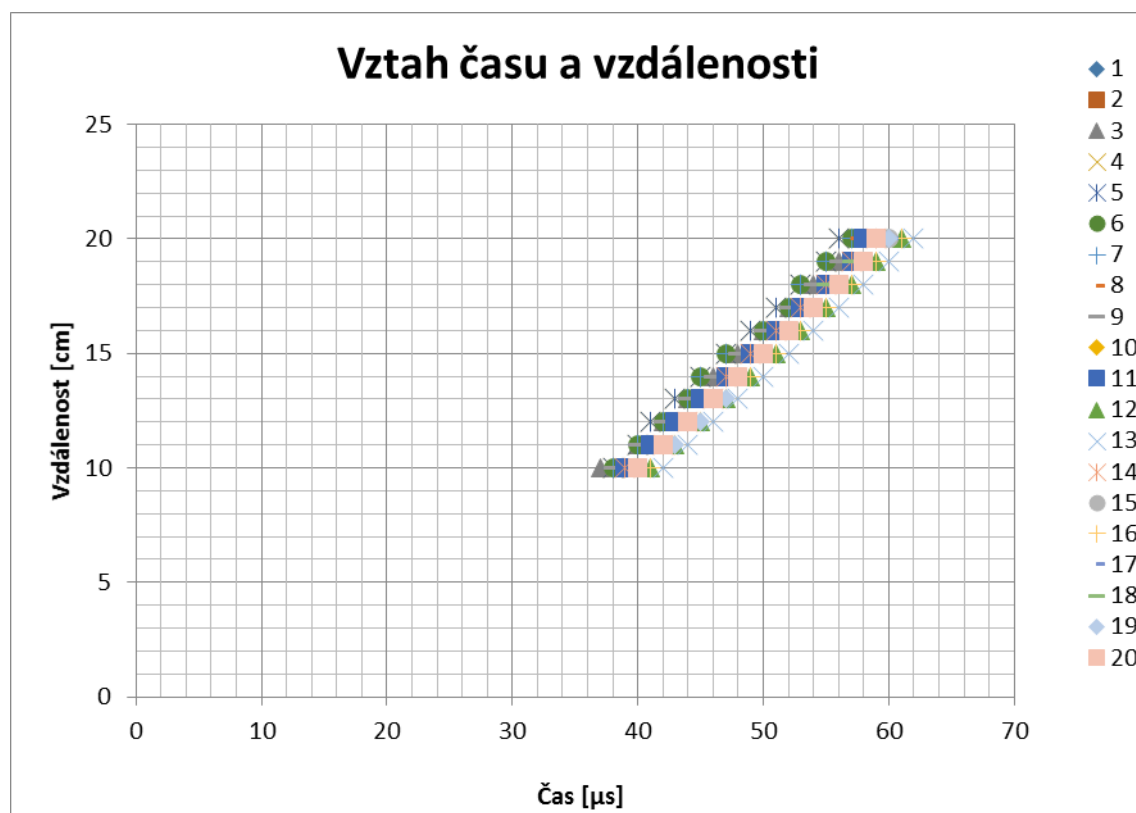
Čedičové vlákno

Tab.: A11 Časový průchod zvuku vláknem čedičovým

cm	μs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	39	39	37	38	38	38	38	38	38	39
11	42	41	40	40	40	40	40	40	40	41
12	44	43	42	41	41	42	42	42	42	43
13	46	45	44	43	43	44	44	44	44	45
14	48	47	46	45	45	45	45	46	46	47
15	50	49	48	47	47	47	47	48	48	49
16	52	51	50	49	49	50	50	50	50	51
17	54	53	52	51	51	52	52	52	52	53
18	56	55	54	53	53	53	53	54	54	55
19	58	57	56	55	55	55	55	56	56	57
20	60	59	58	56	56	57	57	57	58	59
Rychlost šíření zvuku [m/s]	4.882	5.000	4.882	5.324	5.324	5.242	5.242	5.108	5.000	5.000

Tab.: A12 Časový průchod zvuku vláknem čedičovým

cm	μs									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	39	41	42	39	40	41	40	40	40	40
11	41	43	44	42	42	43	42	42	43	42
12	43	45	46	44	44	45	44	44	45	44
13	45	47	48	46	46	47	46	46	47	46
14	47	49	50	47	48	49	48	48	48	48
15	49	51	52	49	50	51	50	50	50	50
16	51	53	54	51	52	53	52	52	52	52
17	53	55	56	53	54	55	54	54	54	54
18	55	57	58	55	56	57	56	55	56	56
19	57	59	60	57	58	59	58	57	58	58
20	58	61	62	59	60	61	60	59	60	59
Rychlost šíření zvuku [m/s]	5.108	5.000	5.000	5.195	5.000	5.000	5.000	5.277	5.195	5.108



Obr. A7 Vztah času a vzdálenosti

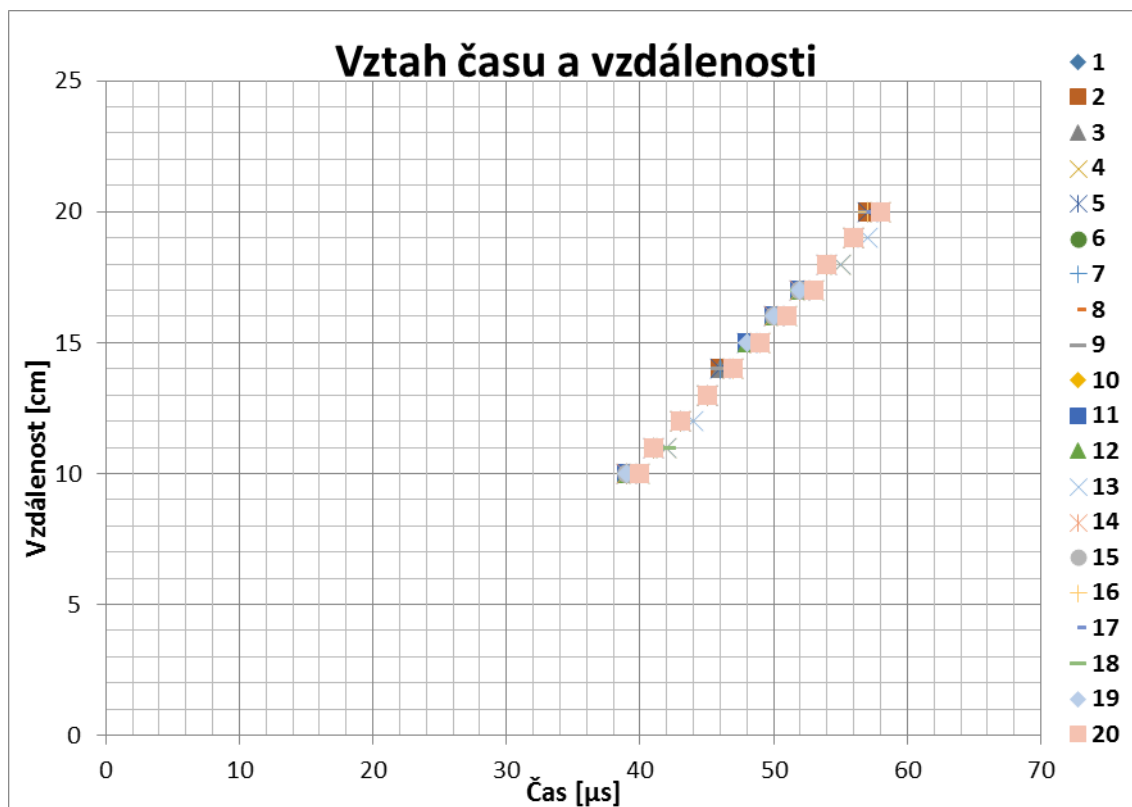
Skleněné vlákno

Tab.: A13 Časový průchod zvuku vláknem skleněným

cm	μs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	39	39	39	40	39	39	39	39	39	40
11	41	41	41	42	41	41	41	41	41	41
12	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
14	47	46	46	47	46	47	46	47	46	47
15	49	48	48	49	48	49	48	48	48	49
16	51	50	50	51	50	51	50	50	50	51
17	53	52	52	53	52	53	52	52	52	52
18	54	54	54	55	54	54	54	54	54	54
19	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
20	58	57	58	58	57	58	58	57	57	58
Rychlost šíření zvuku [m/s]	5.277	5.459	5.329	5.430	5.459	5.277	5.329	5.486	5.459	5.459

Tab.: A14 Časový průchod zvuku vláknem skleněným

cm	μs									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	39	39	40	39	39	39	39	40	39	40
11	41	41	42	41	41	41	41	42	41	41
12	43	43	44	43	43	43	43	43	43	43
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
14	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
15	48	48	49	49	49	48	48	49	48	49
16	50	50	51	50	50	50	50	51	50	51
17	52	52	53	52	52	52	52	52	52	53
18	54	54	55	54	54	54	54	54	54	54
19	56	56	57	56	56	56	56	56	56	56
20	58	58	58	58	58	57	57	58	58	58
Rychlost šíření zvuku [m/s]	5.356	5.356	5.404	5.356	5.356	5.486	5.486	5.571	5.356	5.404



Obr. A8 *Vztah času a vzdálenosti*

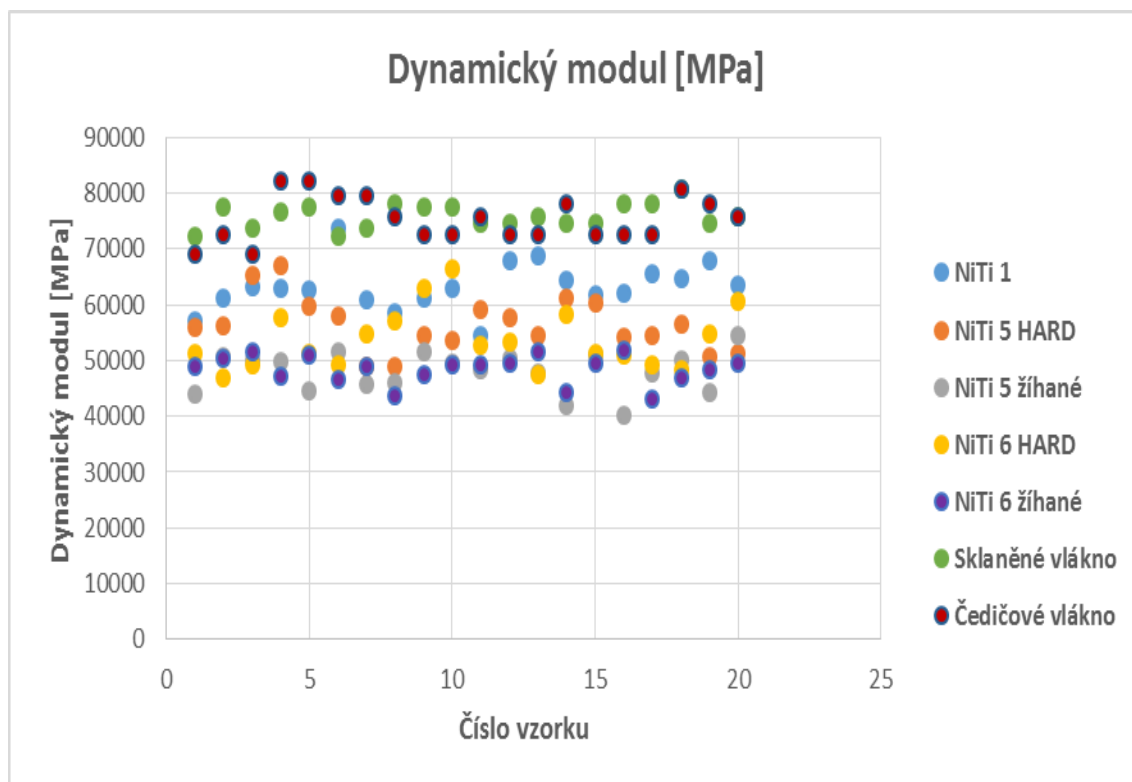
PŘÍLOHA B

Tab.: B1 *Hodnoty dynamického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 1, NiTi 5
HARD a NiTi 5 žíhané*

	NiTi 1 [MPa]	NiTi 5 HARD [MPa]	NiTi 5 žíhané [MPa]
1	57009,80205	55827,0978	44072,8242
2	61147,55445	56169,18645	50568
3	63109,2768	65430,25125	50063,5842
4	63028,6002	67042,4352	49812,32445
5	62706,4098	59765,2872	44681,8848
6	73774,6098	58050	51620,90445
7	61028,4552	48991,2072	45740,62005
8	58554,19005	49062,3378	46084,79205
9	61068,14205	54356,78805	51693,91845
10	62827,13445	53759,26005	49454,47845
11	54356,78805	59060,5602	48494,7378
12	67793,1378	57702,22245	50459,69805
13	68842,71405	54506,68605	47825,00205
14	64447,89045	61147,55445	42072,8082
15	61704,88605	60355,75245	51002,3688
16	62144,5632	54132,32805	40280,25645
17	65594,70045	54581,71245	47754,77445
18	64651,9362	56626,93005	50027,65125
19	68002,40805	50640,2658	44275,38
20	63594,42	51220,2498	54544,1928
	NiTi 1 [MPa]	NiTi 5 HARD [MPa]	NiTi 5 žíhané [MPa]
průměr	63269,38096	56421,40564	48026,51005
s	4198,981436	4733,693989	3529,425592
V	6,636672229	8,389890212	7,348911233
IS95			
-	61429,0962	54346,77277	46479,67108
+	65109,66571	58496,0385	49573,34901

Tab.: B2 *Hodnoty dynamického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 6 HARD,
NiTi 6 žíhané, skleněné vlákno a čedičové vlákno*

	NiTi 6 HARD [MPa]	NiTi 6 žíhané [MPa]	Skleněné vlákno	Čedičové vlákno
1	51292,98	48849,1008	72401	69118
2	46777,00605	50495,7858	77482	72500
3	49347,3762	51620,90445	73835	69118
4	57586,5288	47159,9232	76661	82200
5	51220,2498	50893,60245	77482	82200
6	49240,39005	46707,55245	72401	79688
7	54656,79045	49062,3378	73835	79688
8	57240,14445	43736,2632	78250	75666
9	62907,68205	47474,38005	77482	72500
10	66502,86045	49276,0392	77482	72500
11	52610,9472	49097,92245	74586	75666
12	53461,73445	49525,94445	74586	72500
13	47369,445	51693,91845	75928	72500
14	58243,66125	44207,8098	74586	78265
15	51220,2498	49597,46205	74586	72500
16	50929,845	51803,5362	78250	72500
17	49383,06405	43133,7042	78250	72500
18	48494,7378	47020,5	80694	80756
19	54769,5042	48318,04005	74586	78265
20	60553,2192	49525,94445	75928	75666
	NiTi 6 HARD [MPa]	NiTi 6 žíhané [MPa]	Skleněné vlákno	Čedičové vlákno
průměr	53690,42081	48460,03358	75964,55	75314,8
s	5222,919902	2484,333555	2196,96	4107,96
V	9,727843111	5,126561771	2,89	5,45
IS95				
IS --	51401,37524	47371,22639	75001,69	73514,41
IS +	55979,46639	49548,84076	76927,41	77115,19



Obr. B1 *Dynamický modul pružnosti*

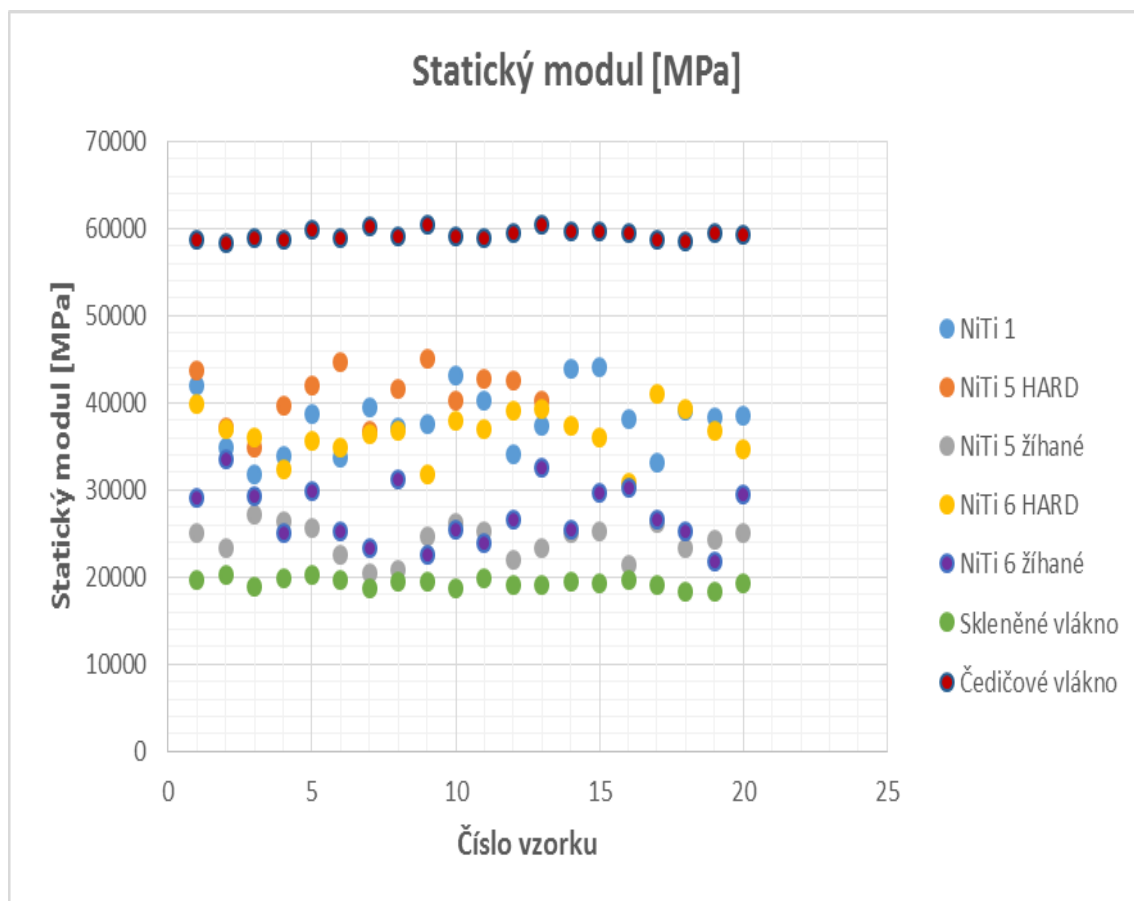
PŘÍLOHA C

Tab.: C1 Hodnoty statického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 1, NiTi 5
HARD a NiTi 5 žíhané

	NiTi 1	NiTi 5 HARD	NiTi 5 žíhané
1	41944,09	43773,23	25100,63
2	34923,12	37238,97	23224,33
3	31695,38	34796,32	27099,3
4	33971,66	39690,48	26302,32
5	38760,41	41991,97	25715,19
6	33790,62	44653,43	22563,79
7	39521,58	36862,83	20388,38
8	37090,94	41600,1	20863,4
9	37624,48	45073,73	24748,86
10	43092,28	40248,96	26226,41
11	40205,55	42745,02	25330,73
12	34126,75	42520,61	22059,88
13	37367,94	40171,57	23397,04
14	43849,37		24978,38
15	44057,46		25232,06
16	38098,55		21380,84
17	33053,04		26266,09
18	39158,23		23313,84
19	38293,38		24368,16
20	38541,69		25088,1
	NiTi 1	NiTi 5 HARD	NiTi 5 žíhané
průměr	37958,326	40874,40154	24182,3865
s	3506,0817	2997,97879	1892,320912
V	9,236660489	7,334612072	7,825203324
IS95			
IS --	36421,71794	39244,6817	23353,04029
IS +	39494,93406	42504,12137	25011,73271

Tab.: C2 Hodnoty statického modulu a průměrné hodnoty u vláken NiTi 6 HARD,
NiTi 6 žíhané, skleněné vlákno a čedičové vlákno

	NiTi 6 HARD	NiTi 6 žíhané	Skleněné vlákno	Čedičové vlákno
1	39860,57	29022,7	19673,87457	58791,98532
2	37014,14	33485,07	20268,6327	58328,62908
3	35980,14	29299,7	18816,96708	58991,68311
4	32277,49	25027,14	19761,522	58748,83686
5	35581,39	29900,64	20212,2793	59791,2046
6	34770,43	25298,12	19685,79616	58945,30245
7	36387,86	23385,69	18695,25601	60169,59152
8	36757,82	31183,94	19491,53986	59055,05887
9	31825,23	22534,15	19544,03793	60447,46467
10	37861,79	25477,64	18610,90583	59020,39681
11	37013,84	23833,79	19805,26074	58801,35965
12	39167,62	26580,53	19048,90538	59517,11625
13	39232,55	32505,63	19113,25581	60381,5577
14	37372,23	25403,73	19491,49679	59621,73767
15	36069,82	29579,97	19235,78753	59580,25511
16	30886,45	30220,24	19713,77852	59460,60731
17	40921,26	26557,51	19055,04637	58736,0403
18	39286,39	25230,88	18352,62623	58425,46105
19	36699,62	21698,6	18271,60329	59380,29429
20	34712,23	29407,07	19296,02014	59369,65419
	NiTi 6 HARD	NiTi 6 žíhané	Skleněné vlákno	Čedičové vlákno
průměr	36483,9435	27281,637	19307,23	59278,21
s	2599,298265	3280,193851	562,96	604,23
V	7,124499206	12,02344951	2,92	1,02
IS95				
IS --	35344,75081	25844,02866	19060,5	59013,4
IS +	37623,13619	28719,24534	19553,96	59543,03



Obr. C1 Statický modul