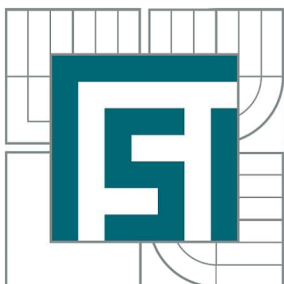


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

## MATERIÁLY PRO VÝROBU STRUN PRO HUDEBNÍ NÁSTROJE

MATERIALS FOR PRODUCTION OF CHORDS FOR MUSICAL INSTRUMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ŠTĚPÁN KRHUT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA MOLLIKOVÁ, Ph.D., Paed  
IGIP

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Štěpán Krhut

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Materiály pro výrobu strun pro hudební nástroje**

v anglickém jazyce:

#### **Materials for Production of Chords for Musical Instruments**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se seznámí s historií výroby strun pro hudební nástroje a pojedná o současné materiálové základně těchto výrobků, o vlivech, které způsobují degradaci strun i o možnostech ochrany strun před působícími vlivy.

Cíle bakalářské práce:

Student se má při zpracování tématu své závěrečné práce seznámit s historickým vývojem materiálů a technologií využívaných pro výrobu strun pro hudební nástroje. Dále pak pojedná o moderních materiálech, o vlivech, které způsobují degradaci strun a o možnostech, jak této degradaci předcházet.

Seznam odborné literatury:

1. FLETCHER, N.H., ROSSING, T.D.: The physics of musical instruments. 2nd ed. New York: Springer, 1998, xix, 756 s. : il. ; 25 cm. ISBN 0-387-98374-0
2. BEUCHAMP, J. W.: Analysis, synthesis, and perception of musical sounds: the sound of music. New York: Springer Science Business Media, 2007, xxiv, 325 s. ISBN 978-0387-32496-8.
3. Rezić, I., Ćurković, L., Ujević, M. (2010), Study of microstructure and corrosion kinetic of steel guitar strings in artificial sweat solution. Materials and Corrosion, 61: 524–529. doi: 10.1002/maco.200905368
4. Kitto, K.L., "Musical strings and sound board materials-new exercises for materials engineering," Frontiers in Education, 2004. FIE 2004. 34th Annual , vol., no., pp.F4F,6-11 Vol. 2, 20-23 Oct. 2004 doi: 10.1109/FIE.2004.1408665
5. ŽÁK, M.: Netradiční přístupy k užití strun v hudebních performancích na přelomu 20. a 21. století [online]. 2011 [cit. 2015-02-05]. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta. Vedoucí práce Martin Flašar.
6. Další literární, časopisecké a internetové prameny dle aktuální potřeby

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 6.2.2015

L.S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářská práce pojednává o materiálech použitých při výrobě strun pro hudební nástroje a jejich ochraně vůči opotřebení. V úvodní části je zmíněn vývoj a historie strun, dále je potom vysvětlen fyzikální podstata kmitání. Další část popisuje samotnou konstrukci a výrobu struny. V této práci jsou také vyzdvíženy a mnohokrát zmiňovány struny kytarové, protože jsou výrobci díky rozmanitým technikám hraní tlačeni řešit různorodé a vysoké požadavky na tyto struny.

## **Klíčová slova**

Struna, kmitání, degradace, opotřebení, pevnost, ovinutí, ochrana, hudební nástroj

## **Abstract**

My bachelor's work is about materials used for making the musical strings and its protection against its wear off. The introduction deals with evolution and history of the musical strings and the next chapters explain physical basics of the vibrations and how to make the musical string. There are also highlighted and many times mentioned guitar strings in my work due to the string manufacturers are made to develop and implement various high level demands into the strings because of the many various guitar playing techniques.

## **Key words**

Strings, vibration, corrosion, wear, strength, wrapping, protection, musical instrument

**Bibliografická citace**

KRHUT, Š. *Materiály pro výrobu strun pro hudební nástroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Materiály pro výrobu strun pro hudební nástroje vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Štěpán Krhut

## **Poděkování**

Děkuji tímto zaměstnancům Ústavu materiálových věd a inženýrství, Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně, zvláště Ing. Evě Mollikové, Ph.D., Paed IGIP za cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce.

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>HISTORIE STRUN .....</b>	<b>11</b>
2.1	HISTORICKÝ VÝVOJ STRUN .....	11
2.2	ZAVEDENÍ OCELI DO VÝROBY .....	12
2.3	POUŽITÍ POLYMERŮ .....	13
<b>3</b>	<b>TEORIE KMITÁNÍ.....</b>	<b>14</b>
3.1	MATEMATICKÉ VYJÁDŘENÍ: .....	15
3.2	DVOUROZMĚRNÉ KMITÁNÍ – CHLADNIHO OBRAZCE .....	16
3.2.1	<i>Použití Chladního obrazců v praxi .....</i>	<i>17</i>
<b>4</b>	<b>POPIS STAVBY STRUNY .....</b>	<b>18</b>
4.1	ROZDĚLENÍ KYTAR .....	18
4.2	JÁDRO STRUN.....	19
4.3	OVINUTÍ .....	20
4.4	UKONČENÍ STRUNY.....	21
<b>5</b>	<b>DRUHY STRUN .....</b>	<b>22</b>
5.1	ROZDĚLENÍ DLE ZPŮSOBY HRY .....	22
5.2	ROZDĚLENÍ DLE MATERIÁLU.....	23
5.3	DĚLENÍ DLE KONSTRUKCE .....	23
<b>6</b>	<b>VÝROBA STRUN.....</b>	<b>24</b>
6.1	VÝROBA STŘEVOVÝCH STRUN:.....	24
6.2	VÝROBA DRÁTŮ.....	24
6.2.1	<i>Válcování polotovarů.....</i>	<i>24</i>
6.2.1.1	<i>Válcování drátů.....</i>	<i>25</i>
6.2.2	<i>Tažení drátů .....</i>	<i>25</i>
6.3	VÝROBA NYLONOVÝCH STRUN .....	26
6.3.1	<i>Vytlačování .....</i>	<i>26</i>
6.3.1.1	<i>Šnekové vytlačování.....</i>	<i>26</i>
6.3.1.2	<i>Pístové vytlačování .....</i>	<i>26</i>
6.4	OVÍJENÍ STRUN: .....	27
<b>7</b>	<b>MATERIÁLY STRUN PRO HUDEBNÍ NÁSTROJE.....</b>	<b>28</b>
7.1	MATERIÁLY PRO VÝROBU JÁDRA STRUN.....	28
7.2	DRUHY KOVOVÝCH SLITIN PRO VÝROBU OPŘEDENÍ STRUN:.....	28
7.2.1	<i>Mosaz Ms 80 .....</i>	<i>28</i>
7.2.2	<i>Fosforbronz.....</i>	<i>29</i>
7.2.3	<i>Niklová ocel .....</i>	<i>29</i>
7.2.4	<i>Hydronálium .....</i>	<i>30</i>
7.2.5	<i>Syntetické materiály.....</i>	<i>30</i>



7.2.6	<i>Kombinované materiály</i> .....	30
7.2.7	<i>Struny ze střev</i> .....	30
7.3	SROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH MATERIÁLŮ .....	31
7.4	POKOVOVÁNÍ STRUN .....	31
7.5	POROVNÁNÍ CENOVÉ NÁROČNOSTI STRUN PRO RŮZNÉ DRUHY NÁSTROJŮ .....	31
<b>8</b>	<b>DRUHY A DEGRADACE STRUN</b> .....	<b>32</b>
8.1	MECHANICKÁ DEGRADACE.....	32
8.2	CHEMICKÁ DEGRADACE .....	34
<b>9</b>	<b>OCHRANA A ÚDRŽBA STRUN</b> .....	<b>35</b>
<b>10</b>	<b>TESTOVÁNÍ</b> .....	<b>36</b>
10.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	36
10.2	RELAXAČNÍ ZKOUŠKA .....	36
<b>11</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>37</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>38</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>42</b>

# 1 Úvod

Vývoj strun je úzce spjat s historií hudebních nástrojů, která je stará jako lidstvo samo. Nejprve šlo zřejmě o různé druhy jednoduchých bicích nástrojů, později to bylo rákosové stéblo, upravené tak, aby se na něj dal vyloudit tón a dále potom tětíva luku, vydávající při vypuštění určitý zvuk. Všechny tyto primitivní nástroje se začaly postupně zdokonalovat. [37] V dnešní době se hudební nástroje dělí do třech hlavních skupin:

<u>Strunné nástroje</u>	smyčcové	- housle, viola, violoncello
	klávesové	- klavír
	drnkací	- kytara, harfa
<u>Dechové nástroje</u>	dřevěné	- flétna, pikola, hoboj, klarinet
	žesťové	- trubka, lesní roh, pozoun
<u>Bicí nástroje</u>	blanozvučné	- tympány, djembe
	samozvučné	- činely, triangel, zvonkohra

Z tohoto rozdělení vidíme, že podíl využití strunných nástrojů je značný a tudíž i využití strun. Jejich volba může nástroj vyzdvihnout nebo mu naopak ubrat akustických vlastností. [38]

Důležitou roli zde hraje i životnost struny, protože má zásadní vliv na kvalitu vzniklého tónu. Díky potu a mechanickému poškozování způsobeného hraním dochází k oxidaci a poškozování jejího povrchu. Vlivem reakce potu se také z některých materiálů uvolňuje nikl, který je výrazným alergenem, způsobující kožní onemocnění. Proto se výrobci snaží vyvíjet kvalitnější materiály opředení nebo jiné způsoby ochrany a to zejména ochranné povrchy na bázi polymerů. Čím méně častěji se musí struny vyměňovat, tím je také méně namáhána konstrukce samotného nástroje opětovným napínáním.



Obr. 1.1 Hráč na hudební luk [36].

## 2 Historie strun

### 2.1 Historický vývoj strun

Obdobně jako u hudebních nástrojů lze vývoj strun dohledat až do pravěku. Ačkoliv za tento historický úsek obojí zaznamenalo různorodý rozvoj, většinou se pozornost více upíná k samotným nástrojům, zatímco struny jsou brány téměř jako samozřejmost. Ty ovšem mají za sebou také bohatou historii, kterou by bylo dobré zmínit.

Prvním primitivním strunným nástrojem byl nejspíše hudební luk. Díky nutnosti rozšířit tónový rozsah nástroje a zvýšení hlasitosti začali lidé vytvářet vhodnější tvary, než je hudební luk. Vznikly tak například první tvary lyry a posléze i harfy, o kterých sice nemáme žádné hmatatelné důkazy, ale přežily alespoň ve vyobrazeních. Pojďme ale zpátky k samotným strunám. [1]



Obr. 2.1 Vyobrazení ze starověku [34].

Ty se zhotovovaly z materiálů, které byly pro danou oblast charakteristické a snadno posloužily účelu. Na východě se hojně používalo hedvábí, které bylo zkrucováno a potíráno pryskyřicí, na severu ve Skandinávii se využívaly spletené koňské žíně, v tropech se struny vyráběly z různých rostlinných vláken a v Evropě ze zvířecích střev. [10]

Jejich výrobní postup byl značně pracný a díky jejich vlastnosti dobře absorbovat vzdušnou vlhkost, se hodně rozlaďovaly, což ubíralo zejména na jejich životnosti. Protože ale měly v tehdejší době nejlepší zvuk, používaly se jak mezi lidovými hudebníky, tak i u dvora. Popis výrobního postupu, bude uveden v kapitole výroba strun. [1]



Obr. 2.2 Struny vyrobeny ze střev [13].

Oblíbenost střevových strun spočívala hlavně v jejich zvukové barevnosti a hlasitosti. Protože byly takto vyrobené struny hodně tlusté a k dosažení požadovaného ladění nástroje je bylo potřeba hodně napnout, razantní hra na ně potom přinášela ceněnou hlasitost nástroje. Na druhé straně velký tlak smyčce, hrbatost a nepravidelná tloušťka strun způsobovaly jejich rychlejší třepení a přetrhávání. V dnešní době byly tyto defekty eliminovány pomocí moderní technologie umožňující zbavit struny jejich nepravidelného tvaru. Zejména se používá jemné vybrušování, které je značně finančně nákladné, a díky tomu jsou střevové struny jedny z nejdražších.

Významným objevem v historii strun byl vynález jejich opřádání, který zvýšil hmotnost struny, které se používaly pro basové nástroje. Střevo potom sloužilo jako jádro prvních opředěných strun. Výhoda takových strun spočívala v nižší absorpci okolní vlhkosti, což je oproti neopředěným střevovým strunám dodnes jejich velkou výhodou. Použitý materiál pro opřádání se volil v podobě měděných, stříbrných, hliníkových a později také ocelových drátků.

## 2.2 Zavedení oceli do výroby

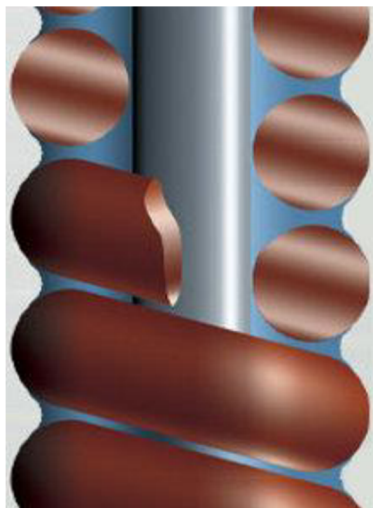
Zavedení ocelových strun lze datovat už od roku 1600, kdy byly použity v klavichordu. Klavichord je strunný klávesový hudební nástroj evropského původu. Využíván byl zejména jako nástroj k výuce hry a také jako pomůcka při komponování. Je předchůdcem klavíru. [2]



Obr. 2.3 Klavichord [35].

Důvodem proč se ocel pro výrobu strun nepoužívala již dříve bylo zejména technologické hledisko. Klavírní struny se vyrábějí ze speciální strunové oceli a jedním z nejdůležitějších vynálezů v oboru výroby ocelových strun je výroba lité oceli v tyglících. Proto kvalita strun byla přímo úměrná kvalitě oceli vyrobené v tyglících. Tyglíková (kelímková) ocel představuje celou řadu rozličných technik výroby oceli v tyglíku. Její výroba je v podstatě rafinační proces, ve kterém je jiná forma oceli, než byly získány kovááním (tzv. svářková ocel), roztavena v tyglíku za vzniku produktu homogennějšího než vzniká kovááním. [1],[3],[4]

Díky tomuto technologickému pokroku jejich popularita v 19. století prudce stoupla. Protože by struna pro basové nástroje musela mít značně velký průřez a tudíž i velkou pevnost, přišlo i tady na řadu opředení. Takto lze dosáhnout konstantního tahu v každé struně a konstrukce nástroje není zbytečně namáhána. [1]



Obr. 2.4 Schématický řez strunou [7].

### 2.3 Použití polymerů

Ve 20. Století přišly na řadu i plasty, které také významně ovlivnily výrobu strun. Začaly tak třeba vznikat struny s jádrem z plastických hmot s kovovým opředěním. Materiál jádra se volí zejména nylon nebo silon. Tyto struny se používají zejména pro kytary. Nevýhodou těchto plastů je příliš velká průtažnost – tzv. doba, po kterou se struna po naladění usazuje. Struny tohoto typu mají menší zvukový výkon, než struny kovové. [3]

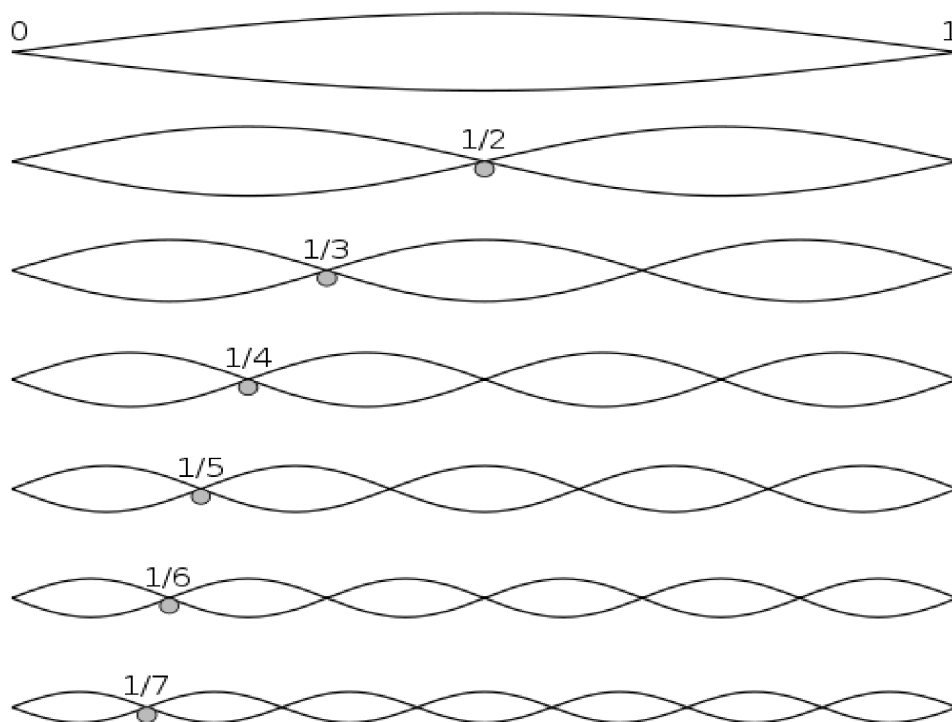
Opředené struny s polymerním jádrem jsou vlastně určitým spojením dobrých vlastností strun kovových a střeových, za současného odstranění špatných vlastností. Jednu je však obtížné odstranit a jedná se o její relativně krátkou životnost.

Je tedy zřejmé, že je vývoj strun významně ovlivněn technologickým pokrokem, a proto jsou stále hledány nové způsoby jejich výroby např. kombinované struny, jejichž jádro je složeno jak z vláken syntetických materiálů, tak i z kovových částic. Tyto postupy jsou však sřezeny výrobci z důvodů značné konkurence na trhu. [1]

### 3 Teorie kmitání

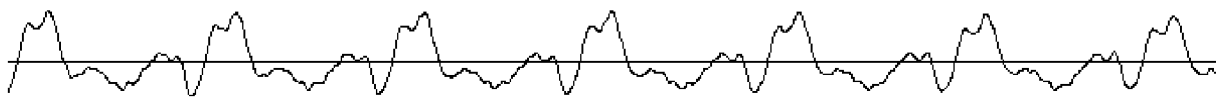
Struna je objekt o jedné dimenzi, který zprostředkovává šíření příčného stojatého vlnění. Nutná podmínka pro rozkmitání a znění struny je, aby byla upevněna na obou koncích a také aby byla dostatečně napjatá. Potom tedy vznikne na obou jejích koncích uzel stojatého vlnění. [5]

Výška tónu, který struna vydá je dána frekvencí, na které příčně kmitá. Jeden kmit – perioda je vychýlení struny do obou směrů a její návrat do rovnovážné polohy. Když strunu rozkmitáme v určitém místě drknutím, třením apod., vlnění postupuje směrem k pevným koncům, odkud se odrazí a vrací se proti sobě. V praxi když zahrajeme na hudební nástroj libovolný tón ( kromě elektronických nástrojů), rozezná se i další frekvence, které nazýváme vyšší harmonické tóny neboli alikvotní tóny, jejichž frekvence je celočíselnými násobky frekvence tónu základního. Přesně tyto frekvence dodávají nástroji jeho nezaměnitelnou barvu zvuku. U nástroje potom záleží na samotné konstrukci a materiálu hudebního nástroje, které z daných alikvotních tónů budou zesíleny a které naopak potlačeny. Zajímavým faktem je, že frekvence alikvotních tónů rostou lineárně, ale frekvence oktáv exponenciálně, to znamená, že každá další oktáva má dvojnásobnou frekvenci, než oktáva předchozí. To vysvětluje, že množství vyšších harmonických tónů k tónu základnímu se s každou další oktávou zvyšuje. Například první alikvotní tón komorního **a** má frekvenci 880 Hz a jeho vzdálenost od základního tónu **a1** o hodnotě 440Hz je přesně jedna oktáva. V následující oktávě k němu můžeme nalézt alikvotní tóny dva, v další čtyři, v následující osm, a tak dále. [1]



Obr. 3.1 Kmitání struny [5].

Na obrázku 3.1 je znázorněna kmitající struna. Nahoře obrázku kmitá základním módem – jmenovitým, na který se ladí. Pod ní je znázorněno, jak struna vypadá při alikvotních frekvencích. Jsou na ni vyznačeny i místa s nulovou výchylkou, které nazýváme uzlové body. Výsledný kmitočet může vypadat například takto:



Obr. 3.2 Frekvence tónu a1 na kytáře

Obrázek 3.2 je pořízen prostřednictvím softwaru Audacity používající se k vícestopému nahrávání. Záznam pochází z elektroakustické kytary.

### 3.1 Matematické vyjádření:

Vlastní rezonanční kmitů jsou dány výrazem:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1)$$

kde  $n$  je celé kladné číslo, které udává řád kmitů-vyšší harmonické frekvence,  $l$  je délka struny,  $F$  síla napínající strunu a  $\mu$  měrná hmotnost struny. Tento výraz můžeme snadno odvodit ze známých vztahů:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda n} \quad (3)$$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho s}} = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4)$$

$$l = n * \frac{\lambda n}{2} \quad (5)$$

kde  $\rho$  je hustota struny  $S$  je průřez struny a  $v$  je rychlost šíření vlnění po struně.

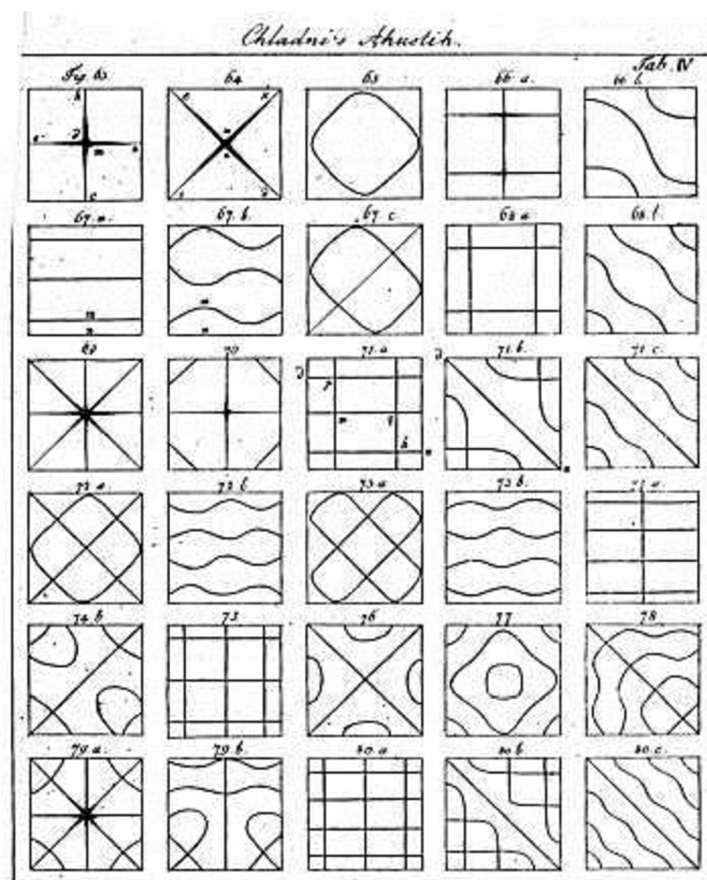
Z rovnice (1) je zřejmé, že rezonanční kmitočet struny lze nejsnadněji měnit změnou síly  $F$  napínající strunu a změnou délky struny  $l$ . [6]

Tyto matematické vztahy se dají shrnout do těchto bodů:

- výška tónu nezávisí na rozkmitu
- Výška tónu je přímo úměrná odmocnině napětí struny.
- Struna vydává tón tolikrát vyšší, kolikrát je průměr menší.
- Hmotnější struna vydává hlubší tón. [1]

### 3.2 Dvourozměrné kmitání – Chladniho obrazce

Také bych rád zmínil plošné kmitání – těles o dvou rozměrech. Jedná se zpravidla o kmitání desek nebo membrán. Chování těchto objektů zkoumal Ernst Chladni, který jako první zakreslil obrazce vznikající při jejich kmitání. Šlo o zviditelnění uzlu stojatého vlnění. Protože je matematický popis těchto kmitových módů složitý, provádíme chladniho fyzikální experiment. Klasicky tento experiment probíhá tak, že tenkou kovovou desku posypeme jemným sypkým materiálem např. krupicí a poté desku rozeznáme smyčcem nebo jiným oscilátorem. Poté se zrnka krupice na desce sesypou do těch míst, která kmitají s nejmenší výchylkou. Pokud použijeme smyčec, deska se rozezní svou základní rezonanční frekvencí, ale pokud používáme mechanický oscilátor kde můžeme frekvence měnit, můžeme na desce vytvořit i jiné složitější obrazce. Obecně platí, že čím je frekvence vyšší, tím je získaný obrazec složitější. Na obr. 3.2 můžeme vidět Chladniho obrazce, které si zakreslil při svých experimentech.



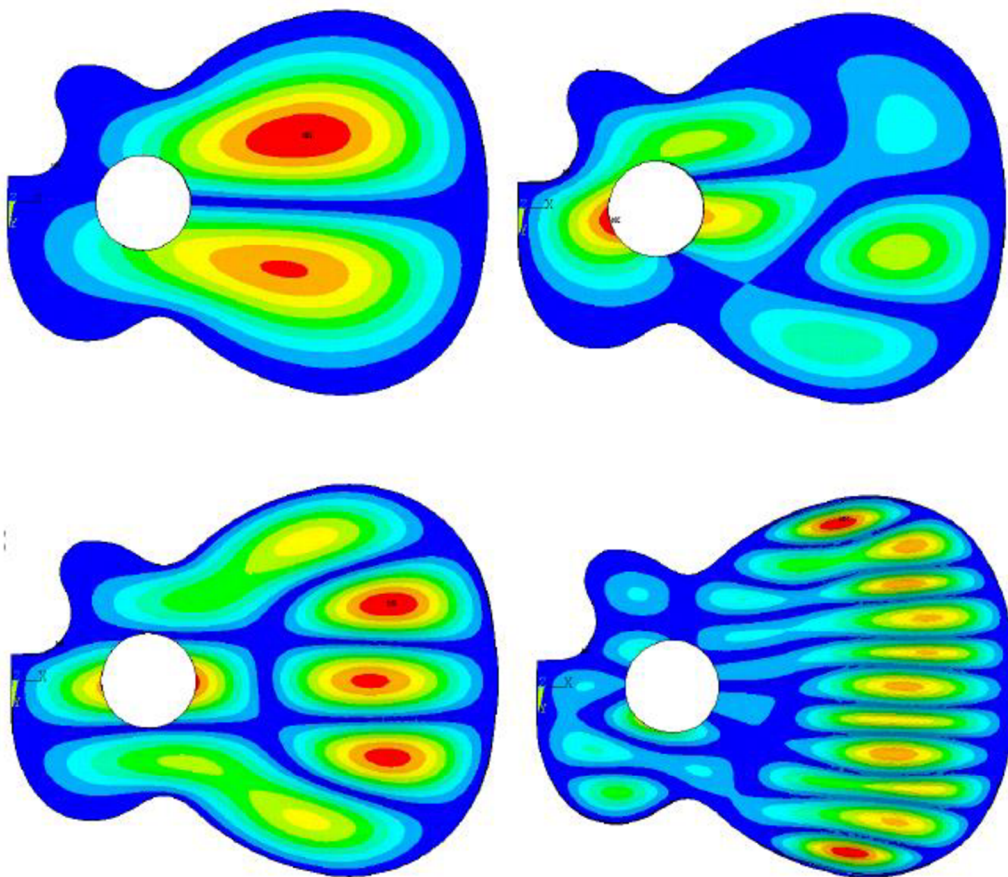
Obr. 3.2 Chladniho obrazce [5].



### 3.2.1 Použití Chladniho obrazců v praxi

Tyto poznatky mají i praktický význam při zkoumání chvění mechanických soustav, hledání kmitových módů a rozložení výchylky například při konstrukci hudebních nástrojů nebo při akustickém řešení uzavřených prostor. Například výrobcům hudebních nástrojů pomáhají při úvaze, kam by bylo dobré na kytaru umístit akustický snímač nebo jak volit výztuhy těla nástroje, aby nebránily efektivnímu šíření zvuku. [5]

Na obr. 3.3 jsou zobrazeny výsledky modální analýzy kytary z prostředí programu Ansys používající metodu konečných prvků. Výztuhy-žebra poté umístíme tam, kde je amplituda kmitání nejmenší tzn. do modře označených míst. Jelikož jsou tvary rezonančních frekvencí různé, často se hledá kompromis a řešení není nikdy ideální. [42]



Obr. 3.3 Chladniho obrazce na těle kytary [42].

## 4 Popis stavby struny

Většina strun je tvořena jádrem a ovinutím. Jádro má pevnostní funkci a opletení zajišťuje navýšení hmotnosti struny a její ochranu zejména vůči potu a vzdušné vlhkosti. V této kapitole budou uvedeny zejména kytarové struny, protože jsou jedny nejrozšířenějších a poměrně velké množství zdrojů pojednává o jejich problematice.

### 4.1 Rozdělení kytar

**Akustické** – tón je po rozechvění struny přenášen přes kobytku do zbytku těla nástroje, kde se vlivem materiálu přední desky a samotné konstrukce zvukové skříň zesílí potřebné zvukové frekvence. Na tyto kytary se používají jak kovové tak i nylonové struny. Výjimkou jsou tzv. klasické-španělské kytary, které díky své konstrukci a materiálu vyžadují výhradně struny nylonové.



Obr. 4.1 Klasická (Španělská) kytara [40].

**Elektroakustické** – jedná se většinou o akustické kytary s přidaným elektrickým snímačem, který zajišťuje snadnou práci s ozvučením.

**Elektrické** – tyto kytary nemají žádnou vzduchovou rezonanční skříň zesilující zvuk, ale elektronický snímač. Ten převádí chvění ocelových strun na elektrický proud, který se nadále zesiluje a upravuje dle požadavku hráče. Jelikož lze takto získaný signál snadno upravovat a měnit, nezáleží tak na kvalitě zvuku struny, ale rozhodujícími prvky jsou snímače a reproduktory. Protože u elektrické kytary nezáleží na jejím tvaru, může být vyrobena třeba i z obyčejné lopaty. [27]



Obr. 4.2 Elektrická kytara vyrobená z pracovní lopaty [39].

## 4.2 Jádru strun

Jádru může být vyrobeno buď ze syntetického materiálu jako např. nylon nebo z kovu. Nylon se používá u klasických kytar, které mají menší tuhost krku než kytary typu dreadnought mající v krku navíc laditelnou výztuž.

Analogicky se kovové jádru využívá u kytar s vyšší tuhostí krku. U elektrických kytar také záleží na elektromagnetických vlastnostech použitého materiálu struny. Z počátku se používal nikl kvůli vyššímu indukovanému napětí, ale s příchodem feritových jader cívek snímačů, které podstatně zlepšily elektrické vlastnosti vinutí (odpor vinutí, vlastní kapacita), se začala na jádru používat ocel, která má vyšší pevnost a je levnější.

Průřez jádru je buď kruhový nebo šestihřanný. Šestihřanný průřez nemá významný vliv na kvalitu zvuku, ale používá se především z technologických důvodů pro lepší usazení oplétacího drátu. Protože je zpravidla oplétací drát měkčí než jádru, při oplétání se snadno „zakousne“ do šestihřanného jádru a tím pádem vznikne těsnější kontakt než u jádru kulatého. Taková struna má potom delší životnost a nepovoluje se. U tenkých strun není potřeba opletu a jádru má kruhový průřez. U smyčcových nástrojů se jádru zhotovuje z kovového lanka. [23]

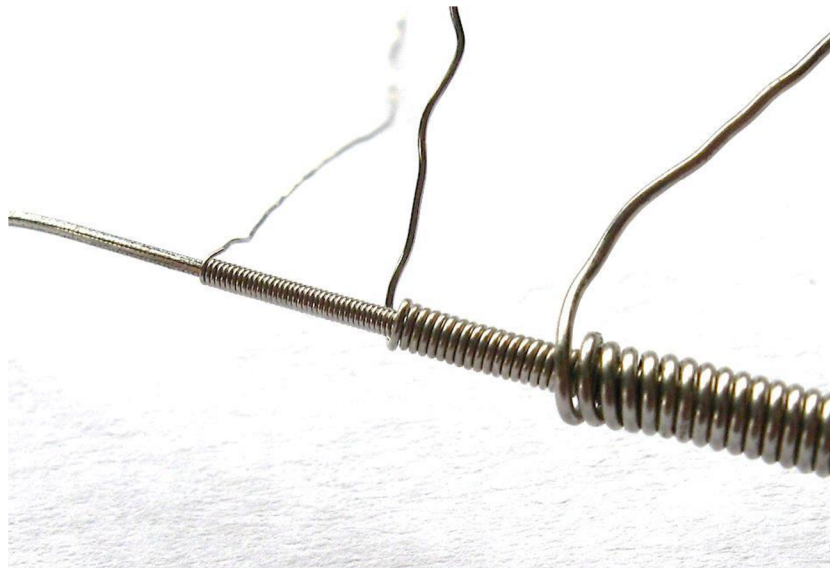
Na obr. 4.3 můžeme vidět schématický řez strunou, která má šestihřanné jádru a oplétací drát s kruhovým průřezem.



Obr. 4.3 Struna se šestihřanným jádrem [7].

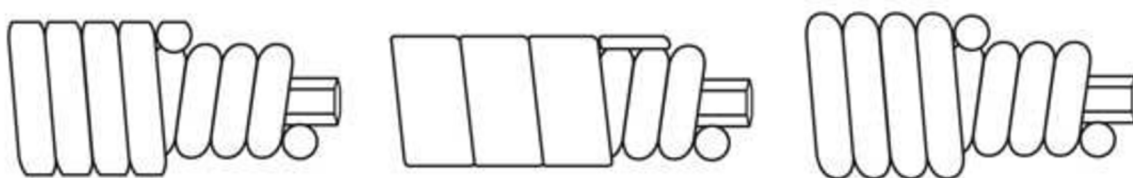
### 4.3 Ovinutí

Druh vnutí také rozhoduje o kvalitě zvuku, zejména ovlivňuje dozvuk a čistotu tónu struny. Zejména u basových strun je vnutí i několikavrstvé. První vrstva je navinuta nejtenčím drátkem (0,2-0,3mm), další vrstvy jsou navíjeny už ze silnějších drátů (0,3-0,5mm).



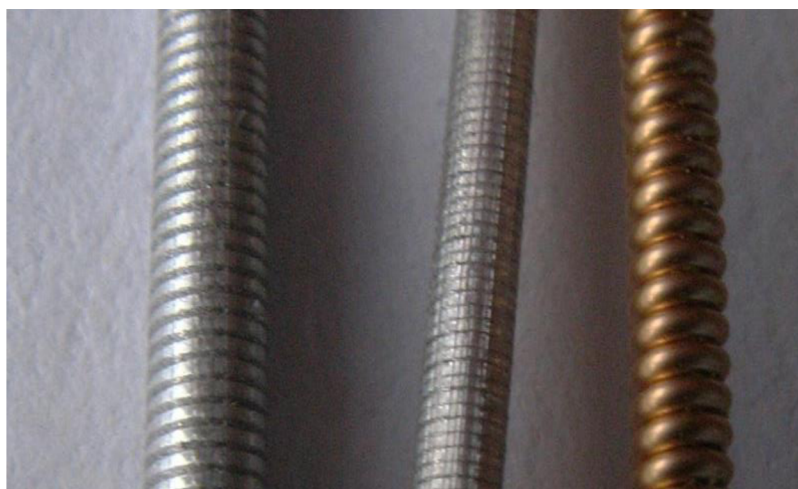
Obr. 4.4 Basová struna

Nejběžnější je ovinutí jádra drátem kruhového průřezu. Tato konstrukce struny sice zajistí jasný a průrazný tón, ale snadno se mezi jednotlivými závity usazují nečistoty. Tuto nevýhodu částečně odstraňuje vnutí půlkulovým drátem, které můžeme vidět vlevo na obr. 4.5. Struny mají delší životnost a jsou příjemnější na dohmat. Dohmat představuje celkový komfort při hraní na kytaru. Jde jak o tvrdost struny tak i výšku strun nad hmatníkem. Čím je struna méně vzdálena od hmatníku, tím lépe. Uprostřed obrázku je struna ovinuta kovovým páskem, který bývá zpravidla leštěný. Tyto struny se používají pro smyčcové nástroje, protože u opletu drátem s kruhovým průřezem by se jednotlivé žíně trhaly v mezerách mezi závity.



Obr. 4.5 Různé typy ovíjení strun [7].

Na obrázku 4.6 jsou od zleva první dvě struny používané pro violoncello, které mají vrchní oplet z tenkého hliníkového pásu a vpravo je struna kytarová ovinutá drátem s kruhovým průřezem.



Obr. 4.6 Violoncellové a kytarové struny

#### 4.4 Ukončení struny

Samotná struna je ukončená malou kovovou kladkou nebo smyčkou pro snadnější uchycení ve struníku. Od tohoto konce se také začíná struna oplétat.



Obr. 4.7 Kovová kladka pro uchycení do struníku [9].

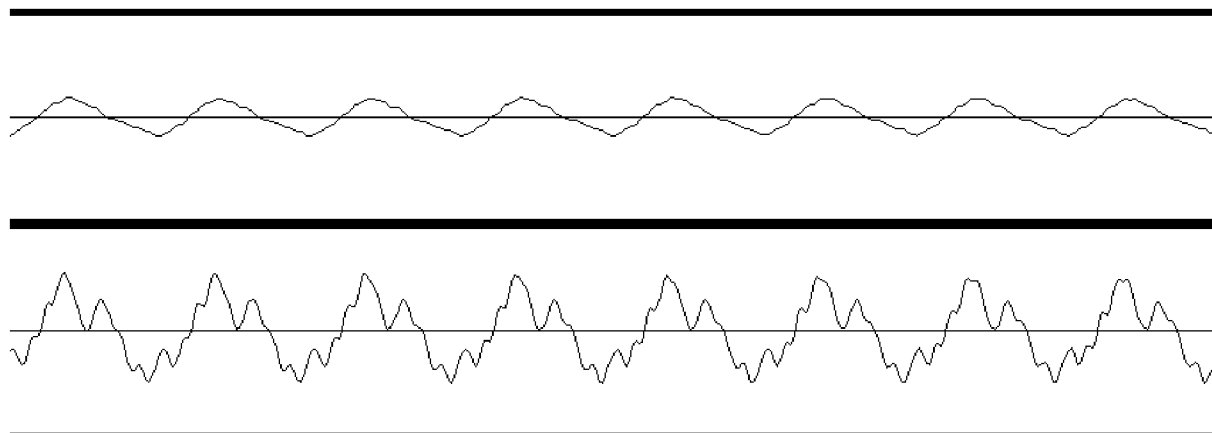
## 5 Druhy strun

Dle různých kritérií můžeme struny dělit dle způsobu hry, materiálu, konstrukce a použití.

### 5.1 Rozdělení dle způsobu hry

Pod pojmem způsob hry se myslí, pomocí čeho způsobujeme kmitání struny – tvorbu tónu. U drnkacích nástrojů jako jsou například kytary, mandoliny a citery se nejčastěji používají prsty, trsátka a náprstky. Způsob hraní je důležité zvážit, protože to může výrazně ovlivnit životnost struny. Například nemůžeme používat trsátko na nylonové struny, protože by ostrá hrana trsátka způsobila její brzké „přeříznutí“, na rozdíl od struny kovové, která je pro tyto účely konstruovaná. Čím na nástroj hrajeme nám také výrazně ovlivňuje barvu zvuku. Pokud konkrétně na kytaru vybrnkáváme prsty, tón je měkčí a o něco tlumenější než třeba při hře trsátkem nebo kovovým náprstkem, kdy je tón ostřejší a výraznější.

Na obrázku můžeme vidět audiozáznam tónu A2 o frekvenci 880Hz pořízený z kytary. Na prvním řádku můžeme vidět pravidelný kmitočet, způsobený hraním prstem, velice se podobající funkci sinus. Pravidelnost nám také prozrazuje, že tón neobsahuje příliš mnoho vyšších harmonických frekvencí. Na druhém řádku je stejná nahrávka jako v předchozím, avšak zde se tón tvořil pomocí trsátka. V tomto případě jasně vidíme, že je frekvence výrazně hrbolatější a má větší amplitudu, tudíž zní hlasitěji. „Hrbolatost“ nám říká, že je zde oproti předchozímu příkladu přítomno mnohem více vyšších harmonických kmitů a tón je pro poslech ostřejší a výraznější.



Obr. 5.1 Frekvence tónu A2

Obdobně pro struny určené pro hraní smyčcem platí, že kromě tahání smyčcem, by se na ně mělo brnkat pouze prsty (pizzicato), jinak by v případě trsátka velmi rychle došlo ke vzniku drážek a následně k mechanickému opotřebení. U smyčcových nástrojů je také poměrně důležité zvolit vhodnou kalafunu pro smyčec a velikost nástroje – strun. Kalafuna je destilační zbytek z pryskyřice borovic, nebo získávaný při výrobě buničiny, který se používá pro zvýšení tření mezi smyčcem a strunou. Obecně platí, že čím větší nástroj – cello, kontrabas tím musí být kalafuna „lepivější“ aby byl hráč schopen rozezvučet i hmotnější strunu. Pro housle jsou doporučovány kalafuny tvrdé. Při intenzivním používání nástroje je potřeba struny i nástroj jednou za čas od kalafuny vyčistit. [7]

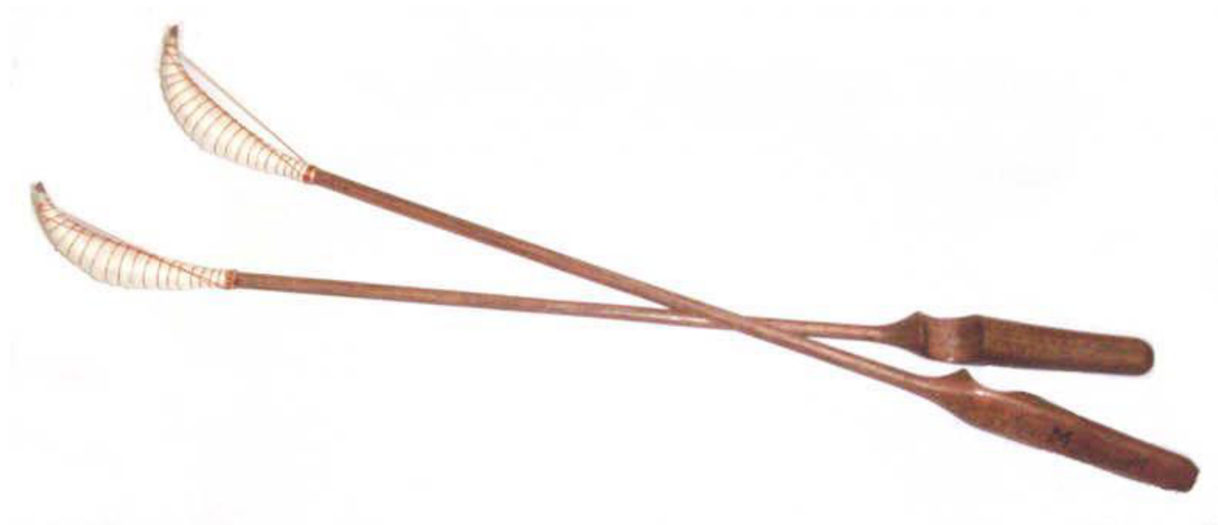
V úderných nástrojích jako jsou například klavír nebo cimbál se struny rozeznívají úderem kladívka napojeného na klávesu nebo úderem cimbálové paličky. Na tyto struny lze i drnkat.

## 5.2 Rozdělení dle materiálu

Struny můžeme také dělit dle materiálu použitého pro jejich výrobu. Nejčastěji se struny vyrábí z kovu, dále pak z polymerů jako třeba nylon. V minulosti, zejména ve středověku se struny zhotovovaly ze střev nebo spletených žíní.

## 5.3 Dělení dle konstrukce

Struny se také vyrábějí buď opředené nebo neopředené. Neopředené jsou zpravidla struny nylonové nebo střevové. Tenké kovové struny jsou vyráběny tažením, ale struny s hlubším laděním se pro zvýšení hmotnosti a odolnosti ovíjí drátem.



Obr. 5.2 Cimbálové paličky [41].

## 6 Výroba strun

V této kapitole bych se rád konkrétně zaměřil na samotnou výrobu strun. Budou zde zmíněny výrobní stroje a jednoduché výrobní postupy při výrobě strun kovových, nylonových a střeových.

### 6.1 Výroba střeových strun:

Střeové struny nejsou spojeny pouze s historií nebo s tzv. dobovou interpretací staré hudby, ale v dnešní době nachází uplatnění především pro smyčcové nástroje. Jejich kvalita se stále zvyšuje tak aby odpovídala zvukovým a provozním požadavkům současných hráčů. Pro srovnání jsou tyto struny asi 5x dražší než struny kovové. Zapříčiňuje to zejména dlouhý výrobní proces a použití drahých kovů pro jejich opředení.

Výchozí materiál jsou tradičně jehněčí nebo telecí střeva, která se nejprve namočí do studené vody, aby změkla. Poté se odstraňují další blány z povrchu střeva. Dále se třídí dle vnějšího průměru. Po vyschnutí se máčejí v louhu. Potom se krotí a opět suší. Nakonec se brousí na požadovaný průměr. [10]

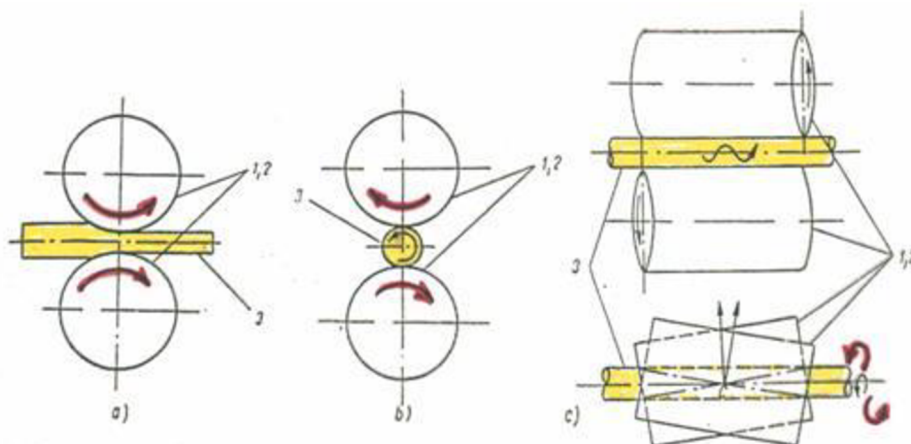
Zvuk těchto strun obsahuje mnoho vyšších harmonických frekvencí a má charakteristickou barvu. Zato však ztrácí o něco na své síle a velice rychle reaguje na vzdušnou vlhkost, která může způsobovat jejich povolování-změnu ladění. [23]

### 6.2 Výroba drátů

Výroba drátů je poměrně dlouhý technologický proces. Je to hutní výrobek většinou kruhovitěho průřezu vyráběný z polotovaru tážením nebo válcováním. [43]

#### 6.2.1 Válcování polotovarů

Polotovary (plechy) se válcují ve válcovacích stolicích s hladkými válci z plochých předvalků (ploštin). Nejdříve se válcuje napříč, aby se dosáhlo potřebné šířky plechu. Potom se plech otočí o 90° a válcuje se na délku. Tím se dosáhne stejnoměrné tloušťky a rovnoměrnějších vlastností materiálu v podélném i příčném směru válcování. Pokud chceme získat hladký povrch, velkou rozměrovou přesnost a dobré mechanické vlastnosti jsou dokončovány válcováním za studena. Původním polotovarem jsou pásy válcované za tepla. [44]



Obr. 6.1 Válcování polotovarů [45].

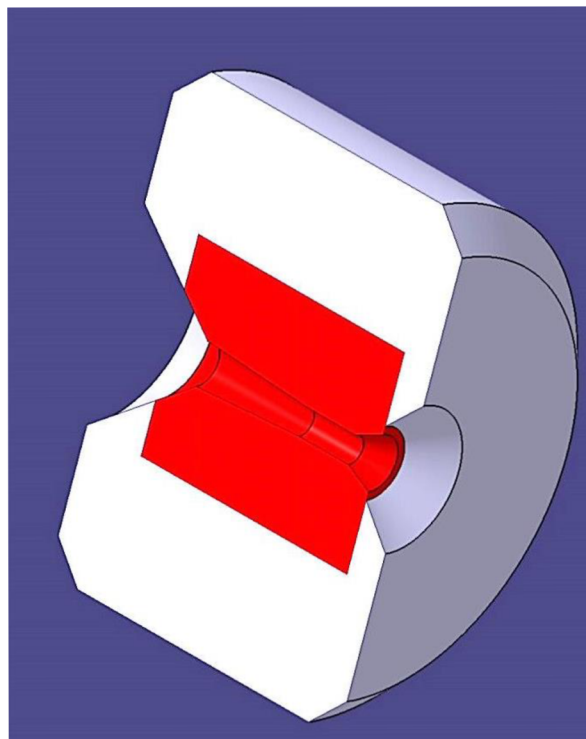


### 6.2.1.1 Válcování drátů

Drát do průměru 5 mm se válcuje na speciální válcovací stolici za tepla. Válcovací tratě jsou kontinuální. [44]

### 6.2.2 Tažení drátů

Proces tažení je způsob tváření za studena, kdy se polotovar protahuje otvorem průvlastu, při kterém se zmenšuje příčný průřez a zvětšuje se délka. Takto získáme přesné rozměry alepší se jakost povrchu. Protože je materiál tvářen a plasticita klesá, musíme ho po určitém počtu tažení žíhat, aby se mu vrátily původní vlastnosti. Pro snížení tření v průvlastu musíme polotovar také mazat. [46]



Obr. 6.2 Průvlast [46].

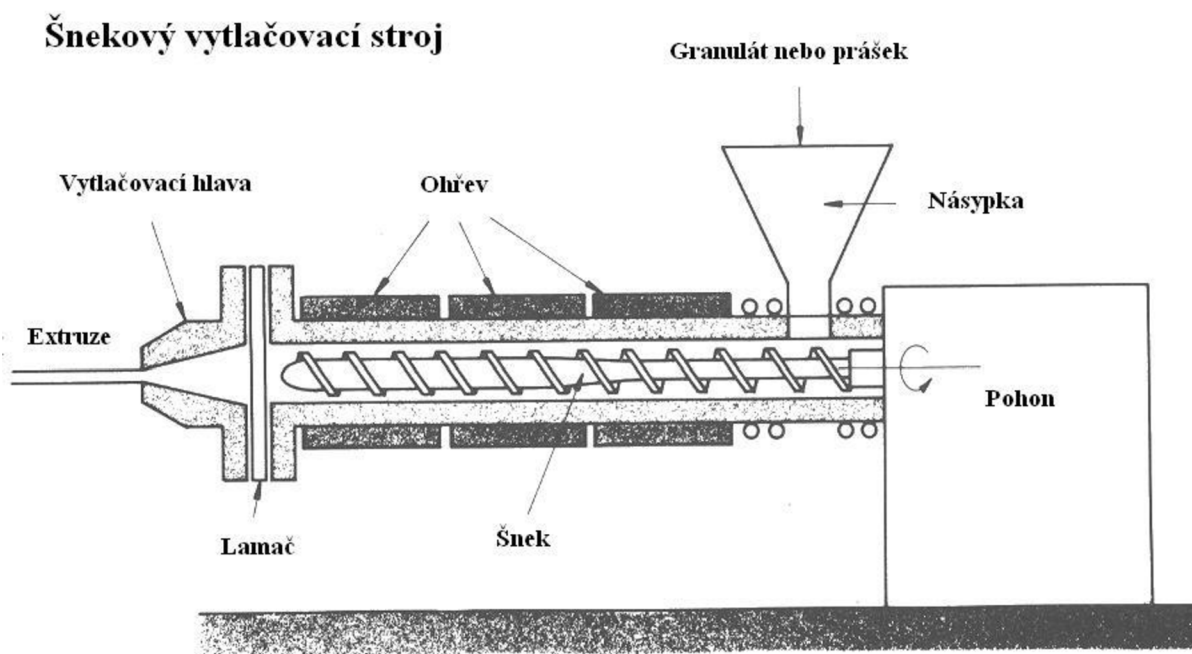
## 6.3 Výroba nylonových strun

### 6.3.1 Vytlačování

Nylonové struny se nejčastěji vyrábí vytlačováním, které může být uskutečněno buď pomocí šneku nebo pístu.

#### 6.3.1.1 Šnekové vytlačování

Princip šnekového vytlačování je na obr. 6.3. Do násypky se nasype polymer ve formě granulí nebo prášku. V samotném šneku dojde k ohřevu a stlačení což má za následek vznik taveniny. Ta je poté vytlačena skrz vytlačovací hlavu. Lamačem poté nastavíme požadované délky struny. [47]



Obr. 6.3 Šnekový vytlačovací stroj [47].

#### 6.3.1.2 Pístové vytlačování

Pístové vytlačovací stroje mají hlavní funkční část píst poháněný hydraulicky nebo mechanicky. Pracovní část je tvořena pístem, válcem a vytlačovací hlavou. Materiál pro vytlačování se vkládá do válce. Velikost stroje je určena maximální vytlačovací silou, průměrem pracovního válce a zdvihem pístu. Tyto stroje se nejčastěji používají k vytlačování materiálů citlivých na teplotu jako je například fenolformaldehyd nebo materiálů se špatnými tokovými vlastnostmi, jako je např. teflon. Vytlačovaný materiál není namáhán vysokým smykovým napětím a lze takto vyrábět profily v poměrně úzkých výrobních tolerancích. Pístové vytlačovací stroje nemají kontinuální výrobní proces. [47]

#### 6.4 Ovíjení strun:

Jak již bylo výše uvedeno, většina strun se musí pro zvýšení hmotnosti ovíjet drátem. Pro tyto účely slouží různé oplétací stroje. Mohou být ruční i plně automatizované. Na obrázku 6.4 můžeme vidět ruční oplétací stroj, který se už v dnešní době nepoužívá, ale je na něm zřejmý princip oplétání. Vpravo jsou ozubená kola, která zprostředkovávají převod na rychlé otáčky ovíjeného drátu, který je zároveň díky pákovému mechanismu a závaží natahován.



Obr. 6.4 Ruční oplétací stroj [14].

Na dalším obrázku je vyfocen už moderní stroj pro ovíjení nylonových i kovových strun. Stroj je vysoce produktivní a jeho otáčky jsou 20000 až 28000 za minutu. [12]



Obr. 6.5 Současný oplétací stroj [12].

## 7 Materiály strun pro hudební nástroje

Rád bych na začátku této kapitoly pojednal o pojmu životnost, protože se o něm bude v této kapitole často mluvit.

Životnost je u strun velice relativní pojem, je obtížně měřitelná. Jedná se především o co nejdélejší zachování kvalitního zvuku a dále aby nepraskla. Mnohem častější důvod k jejich výměně je, že ztratí své akustické vlastnosti („přestane hrát“) než že by se mechanicky poškodila. Životnost je také značně ovlivněna péčí o struny a množství času stráveného hraním a taky nároky hráče na kvalitu zvuku. Například profesionální hráči v orchestru si nechávají měnit struny co tři měsíce, studenti základních uměleckých škol po roce nebo i za deset let.

### 7.1 Materiály pro výrobu jádra strun

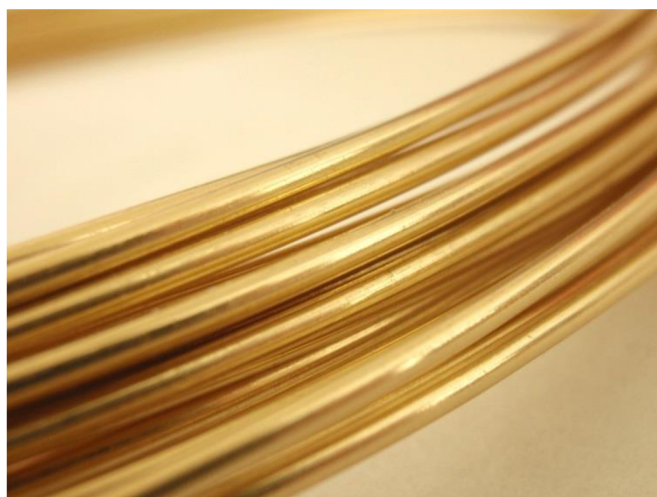
Jedním z nejpoužívanějších materiálů pro výrobu jádra strun je ocel. Bývá často kalená a popouštěná. Dále se také používají bronz nebo syntetické materiály jako je nylon.

### 7.2 Druhy kovových slitin pro výrobu opředení strun:

Materiál opředení se volí dle nástroje. Pokud je struna vystavena potu a agresivnímu prostředí, používají se oceli s vyšším obsahem chromu, niklu nebo různé slitiny mědi jako je bronz nebo mosaz. Pokovené dráty vzácnými kovy jako je zlato nebo stříbro jsou sice dražší, ale lépe odolávají korozi a nejsou tak alergenní. Nejhorší odolnost vůči mechanickému namáhání mají struny s hliníkovým opředěním – jedná se o tzv. hydronálieum. Pro své akustické vlastnosti se používají zejména na smyčcové nástroje. [23]

#### 7.2.1 Mosaz Ms 80

Nejběžněji používaný materiál je slitina mědi a zinku o poměru 80/20%. Je to mosaz, který je v hudebním průmyslu využíván nejen pro výrobu strun, ale i pro plechové dechové nástroje. Obchodní název je Bronz 80-20, který má průrazné výšky a burácivé basy. V technických normách se používá název tombak. Jsou to slitiny se žlutým zabarvením s obsahem mědi větším jak 80%, využívající se k výrobě plechů, pásů a drátů. Zpracovávají se zpravidla lisováním či tažením. [21],[22],[7]



Obr. 7.1 Charakteristická barva mosazi [32].

Prvek	Cu	Zn	Pb	Fe	Sb	Bi
Složení (%)	79-81	zbytek	0,03	0,1	0,005	0,002

Tabulka 7.1 Vlastnosti a složení mosazi [25].

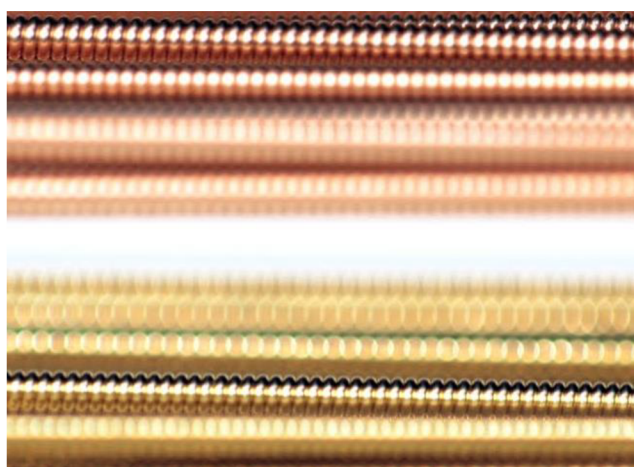
### 7.2.2 Fosforbronz

Dalším oblíbeným materiálem, který přišel na trh v sedmdesátých letech minulého století je tzv. fosforbronz. Je to slitina mědi, cínu a fosforu o poměru uvedeného v tabulce 7.2. Tyto struny mají delší životnost než struny vyrobené z předešlého materiálu. [8]

Prvek	Cu	Sn	P	Ni	Zn	Fe	Pb
Složení (%)	Zbytek	8,5	0,4	0,3	0,3	0,1	0,05

Tabulka 7.2 Chemické složení bronzu [8].

Na obr. 7.2 můžete vidět barevné srovnání fosforbronzu (nahore) a mosazi (dole):



Obr.: 7.2 Barevné srovnání mosazi a bronzu [33].

### 7.2.3 Niklová ocel

Díky svým elektrickým vlastnostem se také hojně používá niklová ocel. Obsah niklu je 8% a jedná se zřejmě o druh austenitické korozivzdorné oceli (18:8). Tyto struny mají větší odolnost, ale obsažený nikl často zapříčiňuje alergické reakce hráčům s citlivější pokožkou. Zvuk mají velmi jasný až nevhodný pro akustickou produkci, proto se využívají hlavně u elektrických nástrojů. [24]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Složení (%)	0,15	2	2	0,045	0,015	19	9,5	0,8	0,11

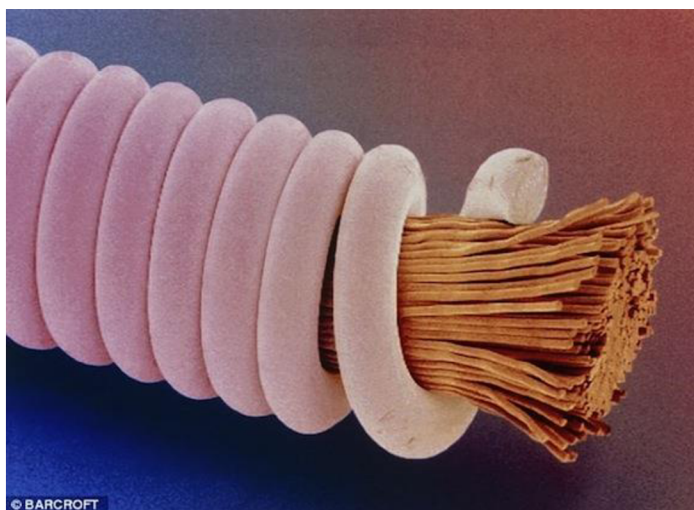
Tab.: 7.3 Chemické složení oceli [50]

#### 7.2.4 Hydronárium

Jedná se o slitinu hliníku a hořčíku. Obsah hořčíku se pohybuje v rozmezí 1,5 – 12%. Tato slitina se vyznačuje vysokou odolností vůči agresivnímu prostředí jako například slaná voda a proto se také s oblibou využívá pro stavbu trupů lodí, ražení mincí nebo výrobu strun. [28],[29],[30]

#### 7.2.5 Syntetické materiály

Pro výrobu strun se také používají nekovové materiály jako je zpravidla nylon. Protože má mnohem menší modul pružnosti (síla potřebná k napnutí struny je menší), je určen pro výrobu strun klasických kytar. Přesné označení a složení tohoto materiálu si firmy pečlivě střeží, protože se nejedná o obyčejný nylon – polyamid 6.6 používaný například do sekacích strojů, ale o nylon s přesnými vlastnostmi jako jsou například citlivost na vzdušnou vlhkost nebo změny teploty. [31]



Obr. 7.3 Nylonová struna pod mikroskopem [15].

#### 7.2.6 Kombinované materiály

Struny mohou být složeny i z více materiálů, např. jádro je zhotoveno z oceli, opleť je tvořen hedvábím, které je nakonec ovinuto postříbřeným drátkem. Tyto struny jsou velice příjemné na dohmat a jsou především stavěné pro prstovou hru, protože by při používání trsátka docházelo ke značnému opotřebení. I střežové struny se pro zvýšení trvanlivosti později ovíjely tenkým zlatým drátem. [23]

#### 7.2.7 Struny ze střev

Nakonec bych také rád zmínil struny ze střev. Jejich používání není tak rozšířené jako v minulosti a protože je jejich výroba značně nákladná cenově patří mezi ty nejdražší. Stále ale ještě určují i tzv. houslový standart – nejvyšší ocenění, které může syntetická struna získat je, že má hřejivý tón jako střevová struna. Výchozí materiál jsou tradičně jehněčí nebo telecí střeva. [23],[10]

### 7.3 Srovnání mechanických vlastností nepoužívanějších materiálů

V tabulce 7.4 jsou uvedeny materiály zleva od nejodolnějšího až po nejméně odolný.

			Niklová ocel 18:8	Fosforbronz	Mosaz Ms 80	Nylon (PA 6.6)
Mez kluzu	[Mpa]	Re	250	280	120	-
Mez pevnosti	[Mpa]	Rm	600-900	460	310	70
Kontrakce	[%]	A	40	30	52	-
Modul pružnosti	[Gpa]	E	200	115	99	2

Tab.: 7.4 Srovnání mechanických vlastností nepoužívanějších materiálů [8],[25],[31].

### 7.4 Pokovování strun

Struny mohou být také elektrolyticky pokoveny. Často se používá stříbro, které je nanášeno na měděný drát kruhového průřezu, který je navinut na nylonovém jádře. Díky tomu, že je měď dosti měkká a tažná, dochází k velkému opotřebení. Tyto struny mají nízkou životnost.

### 7.5 Porovnání cenové náročnosti strun pro různé druhy nástrojů

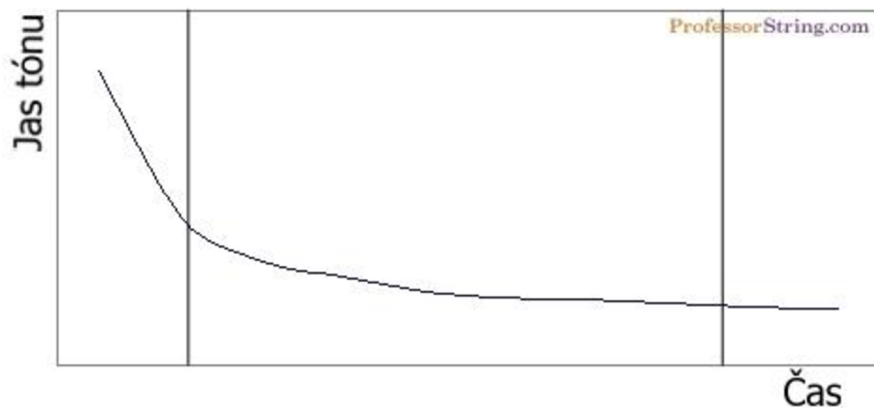
Struny se obvykle prodávají po sadách, ale lze je koupit i samostatně. Většinou když ale praskne struna, mění se celá sada, protože by nová struna zněla v porovnání s ostatními moc hlasitě.

	Housle	Viola	Violoncello	Kontrabas	Kytara	Mandolína	Klavír	Cimbál
Počet strun	4	4	4	4	6	8	230	133
Cena sady strun (Kč) min/max	500/3000	500/3000	500/4000	1000/5000	100/1500	200/1000	20000	13000

Tab. 7.5 Porovnání cen strun [48].

## 8 Druhy a degradace strun

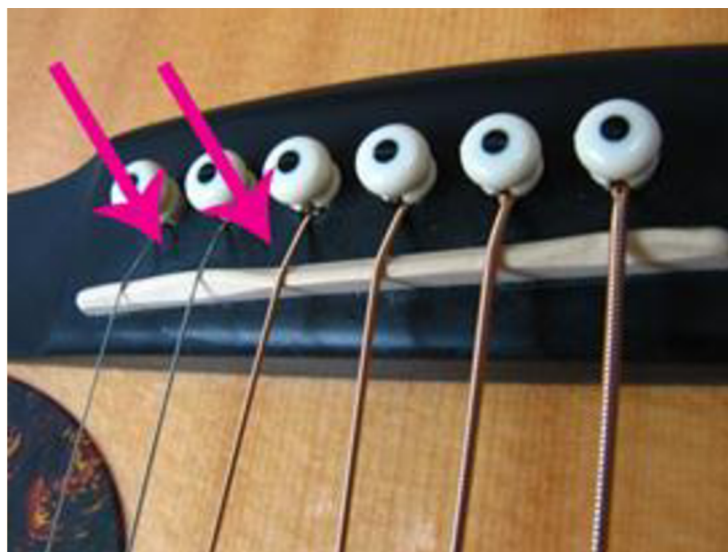
Struna se opotřebovává mechanicky a chemicky. Mechanická degradace je způsobena samotným hraním, údery do strun, otláčováním o pražce nebo stálým napětím struny, které způsobuje únavu materiálu. Takto potom na ní vznikají vruby, na kterých se koncentruje napětí. Chemické opotřebení se uskutečňuje hlavně potem, mastnotou a vlhkostí. Zvláště díky této chemické degradaci struna ztrácí své akustické vlastnosti a je nejčastějším důvodem k výměně.



Obr. 8.1 Křivka životnosti struny [16].

### 8.1 Mechanická degradace

Vlivem hraní – mechanických rázů je struna ohýbána, lámána a otláčena přes určité kritické místa na nástroji. U kytary jde především o kobylku a pražce. Tyto kritické místa nejsou pouze na kytarě, ale v různé podobě u většiny strunných nástrojů. Pokud tedy struna praskne, stává se to většinou v těchto namáhaných místech. Na obrázku 8.2 vidíme kobylku, která tvoří nejkritičtější místo, proto zde praská nejčastěji.



Obr. 8.2 Kobylka kytary [17].

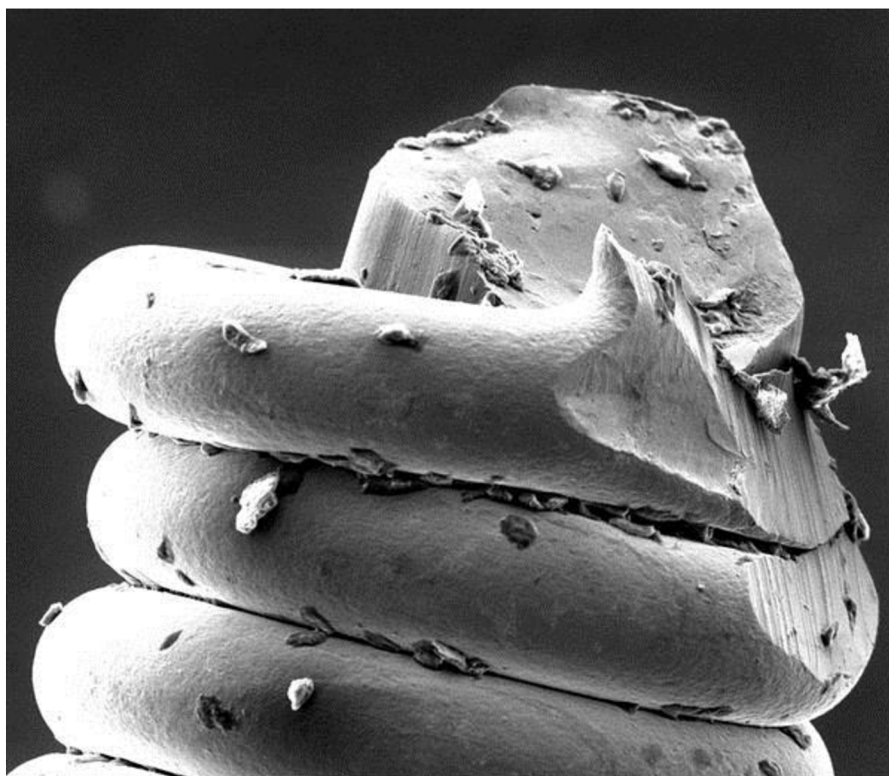


Na dalším obrázku 8.3 můžeme vidět poškození bronzového opletu způsobené otláčením pražců.



Obr. 8.3 Otláčená struna [20].

Obrázek 8.5 je pořízen z elektronového mikroskopu. Je zde zvětšen detail lomu struny. Na obrázku lze také snadno vidět nečistoty a prach mezi jednotlivými závity opletu jádra struny.

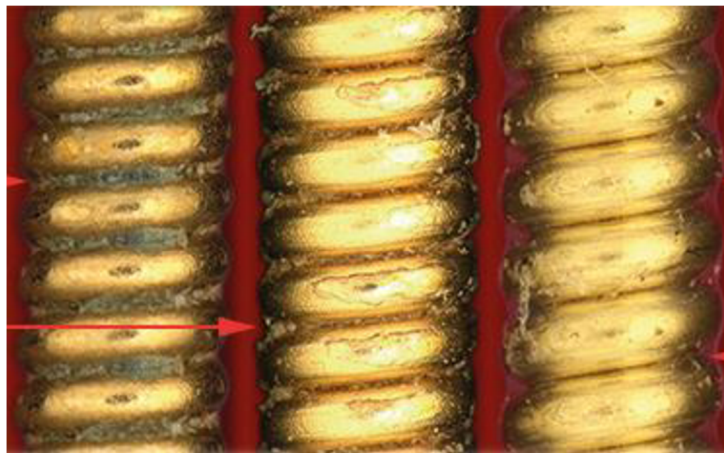


Obr. 8.4 Přetrhnutá struna pod elektronovým mikroskopem [18].

## 8.2 Chemická degradace

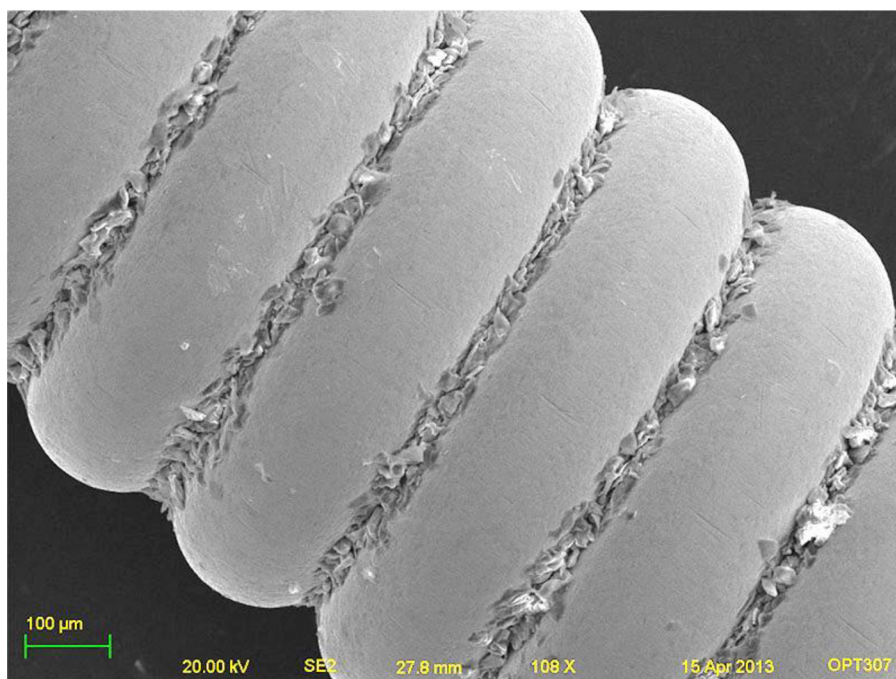
Díky atmosférickým vlivům a reakci mezi kyselinami obsaženými v potu a materiálem struny začne její povrch korodovat, což má za následek vznik oxidů, které se usazují mezi závitů opletu struny. Tyto oxidy včetně dalších nečistot výrazně působí na kmitání struny a to po zvukové stránce. Struna se díky nim stává méně hlasitější a ztrácí tzv. zvonivost. Tomuto jevu se snaží výrobci předcházet potahováním povrchu struny odolným polymerem zpravidla teflonem. Přesné složení tohoto materiálu výrobci opět z důvodu konkurence neuvádějí.

Na obrázku 8.5 je srovnání běžné struny (vlevo) se strunou ošetřenou polymerní vrstvou (vpravo).



Obr. 8.5 Srovnání strun [19].

Obrázek 8.6 je opět pořízen pomocí elektronového mikroskopu, kde vidíme nečistoty mezi závitů opletu.



Obr 8.6 Nečistoty v závitech opletu struny [18].

## 9 Ochrana a údržba strun

Jak již bylo výše uvedeno stav strun má zásadní vliv na zvuk i ladění nástroje. Vlivem koroze ztrácí struny zvukovou brilanci. Nečistoty a oxidy mají také vliv na samotné naladění nástroje.

Ochrana a péče o struny by měla začínat u samotného hráče, který by si měl před každým hraním umýt a vysušit ruce. Opotřebování a snižování zvukové kvality lze výrazně oddálit i pravidelným čištěním, a to po každém hraní. Čistící prostředek lze koupit ve většině prodejen s hudebními nástroji. Obvykle bývá na bázi pomerančového či citrónového oleje. Tyto prostředky mají za úkol vytvořit na povrchu struny ochranný film a eliminovat případné akustické vady. Nevhodné pro čištění jsou lihové roztoky, které mohou způsobit naleptání laku hudebního nástroje nebo poškodit přirozenou impregnaci hmatníku. Struny, které jsou potažené vrstvou polymeru, není potřeba čistit. [26]



Obr. 9.1 Čistič strun [48].

## 10 Testování

### 10.1 Tahová zkouška

Tahové zkoušky se mohou provádět například na počítačem řízeném univerzálním zkušebním systému PROMI PC, který je určen pro testování pružin a další typy zkoušek. Systém se skládá ze zkušebního stojanu s digitalizovaným motorickým posuvem a z počítačové řídicí jednotky. Stroj je dimenzován na tahovou sílu 3kN a jeho standartní zdvih je 450mm. Posuv je vyvozen kuličkovým šroubem a maticí. Použitý software Promi-PC je navržen s ohledem na maximální přehlednost a jednoduchost. [27]



Obr. 10.1 Příklad přístroje Promi [27].

### 10.2 Relaxační zkouška

Relaxace u strun vyjadřuje, jak dlouho si dokáže udržet své původní naladění, protože po určitém časovém úseku natahovací síla klesá. Tato ztráta zatížení, relaxace postupuje zpočátku rychle, ale pak se stává výrazně pomalejší.

## **11 Závěr**

Tato práce vytvořila poměrně obsáhlé shrnutí informací o problematice strun pro hudební nástroje. V první řadě byl zmíněn historický vývoj materiálů a technologií využívaných při jejich výrobě. Dále byla objasněna fyzikální podstata jednorozměrného a dvourozměrného kmitání a jejich praktické využití při konstruování hudebních nástrojů. Jako další bylo uvedeno rozdělení strun dle materiálu, způsobu použití, konstrukce, výroby a dalších vlivů.

Poté byly popsány jednotlivé druhy nejpoužívanějších materiálů používaných při výrobě strun. Dle materiálových listů bylo vytvořeno srovnání jejich mechanických vlastností. U samotných strun nejsou důležité pouze mechanické vlastnosti, ale třeba i elektrické a akustické vlastnosti - každý materiál „zní“ jinak. Dále také bylo vytvořeno srovnání finanční náročnosti strun pro různé hudební nástroje. Vlivem profesního růstu hráče rostou i jeho požadavky na kvalitu zvuku a trvanlivost, proto můžeme na trhu vidět diametrálně odlišné struny – na jedné straně jsou struny zejména pro žáky základních uměleckých škol, amatéry nebo samouky a na druhé můžeme vidět struny určené pro profesionální hráče. Tento kvalitativní rozsah jde samozřejmě ruku v ruce s cenou. Další jsou uvedeny způsoby poškozování strun. Jedná se zpravidla o chemickou degradaci nebo mechanické namáhání. Tyto vlivy se snažíme eliminovat zkvalitněním materiálu nebo ochrannou vrstvou struny zabraňující přístupu vzduchu a potu. Také je důležitá prevence-čištění strun, zmíněná na konci práce.

Materiály používané pro výrobu strun se stále vyvíjejí a lze očekávat, že se jejich vlastnosti budou stále zlepšovat. Také střevové struny začínají nabírat opět na popularitě a jejich využívání bude častější.

## 12 Seznam použitých zdrojů

1. ŽÁK, Martin. Netradiční přístupy k užití strun v hudebních performancích na přelomu 20. a 21. století [online]. 2011 [cit. 2015-02-05]. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta. Vedoucí práce Martin Flašar.
2. Klavichord. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Klavichord>
3. KURFÜRST, Pavel. *Hudební nástroje*. Vyd. 1. Praha: Togga, 2002, 1168 s. ISBN 80-902912-1-X.
4. TYGLÍKOVÁ (KELÍMKOVÁ) OCEL. *HISTORIE CHEMIE* [online]. 2011 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hist/tov/tyglikovaoce.html>
5. Kmitové módy. *Kmity a vlny* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://vojtahanak.cz/files/edu/kmity/chveni.html>
6. Studium kmitů struny. *Studentský server: Jihočeská univerzita České Budějovice* [online]. 2014 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://home.pf.jcu.cz/~kriz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=158:mereni10&catid=58:fpr4&Itemid=2](http://home.pf.jcu.cz/~kriz/index.php?option=com_content&view=article&id=158:mereni10&catid=58:fpr4&Itemid=2)
7. KRATOŠKA, Martin. Co byste měli vědět o kytarových strunách? *Kytara* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.kytara.net/struny/co-byste-meli-vedet-o-kytarovych-strunach>
8. Caro Bronze. *Looser* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.altmann-casting.ch/upload/datenblaetter/carobronze\\_looser.pdf](http://www.altmann-casting.ch/upload/datenblaetter/carobronze_looser.pdf)
9. The Guitar String Tone Curve. *Professor String* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.professorstring.com/archives/guitar\\_string\\_tone\\_curve.php](http://www.professorstring.com/archives/guitar_string_tone_curve.php)
10. LARSON, Daniel. Making Gut Strings. *Gamut music* [online]. 2010 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.gamutmusic.com/making-gut-stings/>
11. Teflon. *Water treatment solutions* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/teflon.htm>
12. Winding machines. *Cicchitti mechanical solutions* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.cmsmachines.net/pdf\\_prodotti/WVY\\_190SPEED.pdf](http://www.cmsmachines.net/pdf_prodotti/WVY_190SPEED.pdf)
13. HIGH TWIST GUT STRINGS. *King String Web Shop* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://shop.stringking.net/aquila/index.htm>

14. Factory Tour: D'Addario Strings. 2015. *The Music Zoo* [online]. [cit. 2015-05-04].  
Dostupné z: <http://www.themusiczoo.com/blog/2010/factory-tour-daddario-strings/>
15. GUITAR STRING UNDER MICROSCOPE. 2013. *The Music Zoo* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://memolition.com/2013/01/05/guitas-string-under-microscope/>
16. What is The Guitar String Tone Curve Doing To Your Sound. 2013. *Proffesor string* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:  
[http://www.professorstring.com/archives/guitar\\_string\\_tone\\_curve.php](http://www.professorstring.com/archives/guitar_string_tone_curve.php)
17. Péče o nástroj. 2014. *S kytarou* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:  
<http://www.skytarou.cz/index.php?strana=pece-o-nastroj>
18. BERSON, Benjamin. 2012. Guitar String Gunk: What an Electron Microscope Sees. *S kytarou*[online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:  
<http://www.optics.rochester.edu/workgroups/cml/opt307/spr13/ben/>
19. Why use Elixir Strings. 2014. *Elixir strings* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:  
<http://www.elixirstrings.com/support/why-elixir-strings.html>
20. Elixir Strings. 2015. *Bluechargeboy's Bucket* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:  
<http://s812.photobucket.com/user/bluechargeboy/library/Elixir%20Strings?sort=3&page=1>
21. VETIŠKA, Aleš. *Nauka o materiálu V: určeno pro posluchače fak. Strojní*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1960, 72s.
22. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-7080-600-1.
23. Časté dotazy ke strunám. 2007. *Servis pro hudebníky* [online]. [cit. 2015-05-10].  
Dostupné z: <http://www.servisprohudebniky.cz/info/Diskuse-odpovedi.aspx>
24. Stainless Steels. 2015. *Department of Materials Science & Metallurgy* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/Stainless\\_steels/stainless.html](http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/Stainless_steels/stainless.html)
25. DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. 2012. *Elektrotechnické materiály*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2570-0. Dostupné také z:  
<http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>
26. SEIDL, Zdeněk. 2011. Údržba strunných hudebních nástrojů. *Zdeněk Seidl: Historické hudební nástroje* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z:  
<http://www.zdenekseidl.cz/udrzba%20strunnych%20nastroju.pdf>
27. VU MINH, Hiep. *Mechanické zkoušky na zkušebním zařízení PROMI-PC*. Zlín, 2012. Dostupné také z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/21658>. Bakalářská.

28. Ján Kulich. MALINOVSKÝ, Ľudovít. *Mince na území Slovenska, Čiech a Moravy od r. 1918 do súčasnosti* [online]. 2012 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://coins.lmsystem.sk/index.php?p=Tema/Autor/KulichJan>
29. Warchal Product Overview. ,. *Thomann. Hans Thomann* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.thomann.de/gb/warchal.html>
30. WOLDMAN, Norman Emme a John P. FRICK. *Woldman's Engineering Alloys: Materials data series*. ASM International: ASM International, 2000. ISBN 0871706911, 9780871706911. Dostupné také z: [https://books.google.co.uk/books?id=RzMOiOEq-oMC&dq=Woldman%27s+Engineering+Alloys&hl=cs&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.co.uk/books?id=RzMOiOEq-oMC&dq=Woldman%27s+Engineering+Alloys&hl=cs&source=gbs_navlinks_s)
31. [Http://www.heyman.cz/](http://www.heyman.cz/). *Heyman* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: [http://www.heyman.de/media/useruploads/files/de/documentation/eigenschaften\\_kunststoffen.pdf](http://www.heyman.de/media/useruploads/files/de/documentation/eigenschaften_kunststoffen.pdf)
32. Round Brass wire. *Etsy* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <https://www.etsy.com/listing/92161396/rich-low-brass-wire-you-pick-4-6-8-10-12>
33. Phosphor Bronze vs. 80/20 Guitar String Comparison. *Cleartone* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.cleartonestrings.com/phosphor-bronze-vs-8020-guitar-string-comparison/#!prettyPhoto>
34. Starověká řecká hudba a hudební nástroje. SVOBODOVÁ, Kateřina. *Archeologie na dosah* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.archeologienadosah.cz/clanky/staroveka-recka-hudba-hudebni-nastroje>
35. Andre tangentinstrumenter. *Musikipedia* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.musikipedia.dk/tangentinstrumenter>
36. Musical bow. *Clip art and photos* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://www.wpclipart.com/music/instruments/string\\_instruments/musical\\_bow.png.html](http://www.wpclipart.com/music/instruments/string_instruments/musical_bow.png.html)
37. Vývoj nástrojů. *Stavba hudebních nástrojů na zakázku* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.oldharp.com/z-historie/>
38. Hudební nástroje. *ZŠ Brno Hudcova* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.zshudcova.cz/hudebni-nastroje>
39. National Music Centre. *Media* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://www.google.cz/imgres?imgurl=http://www.nmc.ca/wp-content/uploads/2014/07/Groundbreaking\\_Guitar\\_Shovel\\_designed\\_and\\_built\\_by\\_Sean\\_Mair.jpg&imgrefurl=http://www.nmc.ca/media/&h=2778&w=5184&tbnid=08-wCAcbz2yqsM:&zoom=1&docid=3E8QC1LSEGGP9M&ei=HcFhVdGUOcT-ywOgqYHIAg&tbnid=0CB8QMygAMAA](http://www.google.cz/imgres?imgurl=http://www.nmc.ca/wp-content/uploads/2014/07/Groundbreaking_Guitar_Shovel_designed_and_built_by_Sean_Mair.jpg&imgrefurl=http://www.nmc.ca/media/&h=2778&w=5184&tbnid=08-wCAcbz2yqsM:&zoom=1&docid=3E8QC1LSEGGP9M&ei=HcFhVdGUOcT-ywOgqYHIAg&tbnid=0CB8QMygAMAA)



40. Jak vybrat kytaru pro začátečníka. *Prokapelu* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.prokapelu.cz/clanky/jak-vybrat-kytaru-pro-zacatecnika/>
41. Video. *ZŠ ZNOJMO* [online]. 2012 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://zsmladeze.cz/video?clanek=ve\\_4.c\\_hrajeme\\_osmirucne\\_na\\_cimbal\\_\\_\\_\\_&lmt=&l m=&id=821](http://zsmladeze.cz/video?clanek=ve_4.c_hrajeme_osmirucne_na_cimbal____&lmt=&l m=&id=821)
42. JÄGER, Ondřej. *Návrh konstrukce kytary na základě vlastních tvarů ozvučné desky*. Brno, 2006. Dostupné také z: <http://is.mendelu.cz/zp/index.pl?podrobnosti=6758>. Diplomové práce.
43. Drát. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dr%C3%A1t>
44. Dvorák, M., a kol. *Technologie II*, vyd. VUT v Brně, CERM s.r.o, 2004, 240s. ISBN 80-214-2683-7
45. Technologie objemového tváření: Válcování. *Technologie 2* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/02.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm)
46. Technologie objemového tváření: Tažení drátů a profilů. *Technická univerzita Liberec: Fakulta strojní* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/04.htm)
47. Vytlačování. *Technická univerzita Liberec: Fakulta trojní* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/06.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm)
48. Houslové struny. *Hudební ráj* [online]. 2015 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.hudebniraj.cz/smycce/prislusenstvi/houslove-struny/>
49. Psarianos Violin Cleaner. *WeBeMusic* [online]. 2015 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.webemusic.com/products/Psarianos-Violin-Cleaner-and-Polish-1oz-Bottle-6498.html>
50. EN 1.4310 / AISI 301. *Acerinox* [online]. 2013 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.acerinox.com/en/productos/tipos-de-acero/EN-1.4310---AISI-301-00001/>

### 13 Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
$f_n$	[Hz]	Vlastní rezonanční kmitý
$n$	[-]	Řád kmitu vyšší harmonické frekvence
$l$	[m]	Délka struny
$m$	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Měrná hmotnost struny
$v$	[m/s]	Rychlost šíření vlnění po struně
$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Průřez struny
$R_e$	[Mpa]	Mez kluzu
$R_m$	[Mpa]	Mez pevnosti
$E$	[Gpa]	Modul pružnosti v tahu
$A$	[%]	Tažnost
PROMI-PC	[-]	Řízený univerzální zkušební systém