

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Návrh přípravku pro měření senzitivity

Diplomová práce

Jan TRUNČKA

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D., Ing. Michal Koptiš

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Trunčka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **437233**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh přípravku pro měření senzitivity

Název diplomové práce anglicky:

Design of sensitivity measuring device

Pokyny pro vypracování:

- 1) Přehled tenzometrických senzorů.
- 2) Využití piezoelektrické keramiky.
- 3) Vlastní návrh konstrukce přípravku.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

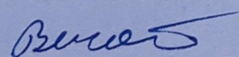
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

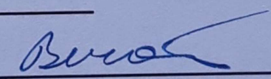
Ing. Michal Koptiš, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

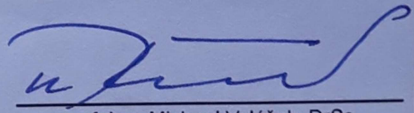
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

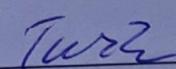

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29. 06. 2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne:.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucím Ing. Michalovi Koptišovi a Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D., za celkové odborné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování této diplomové práce, vstřícnost a čas, který byli ochotni věnovat konzultacím. Poděkování patří také i Ing. Vytautas Bakanauskas za vedení návrhu a cenné rady.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá konstrukcí přípravku pro kvantifikaci citlivosti piezotenzometru ve výrobním procesu. První teoretická část se zabývá piezoelektrickou keramikou a přehledem tenzometrů. Druhá část se zabývá konstrukcí přípravku a jeho výrobou.

Klíčová slova

tenzometr, metrologie, piezoelektrický jev, keramika, měření, kvalifikace, prodloužení, síla.

Abstract

The diploma thesis is about constructing jig for qualification of piezoelectric strain gauge in production. First part is about piezoelectric ceramics, overview of strain gaug. Second part is about developing the jig and construction of the jig.

Keywords

Strain gauge, metrology, piezoelectric effect, ceramic, measuring, qualification, extension, force.

Bibliografická citace

TRUNČKA, Jan. Návrh přípravku pro měření senzitivity. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	- 9 -
1. Úvod.....	- 8 -
2. Piezoelektrická keramika.....	- 9 -
2.1. Historie piezoelektriky.....	- 9 -
2.2. Piezoelektrický jev.....	- 11 -
2.2.1. Přímý piezoelektrický jev.....	- 11 -
2.2.2. Nepřímý piezoelektrický jev.....	- 12 -
2.2.3. Ostatní piezoelektrické materiály.....	- 12 -
2.3. Chemické složení.....	- 12 -
2.3.1. Tvrdé materiály.....	- 13 -
2.3.2. Měkké materiály.....	- 14 -
2.3.3. Stárnutí.....	- 15 -
2.4. Výroba.....	- 16 -
2.4.1. Slinování.....	- 16 -
2.4.2. Broušení.....	- 16 -
2.4.3. Polarizace a stříbření.....	- 16 -
2.4.4. Zdravotní rizika.....	- 18 -
2.5. Výrobky z Piezoelektrické keramiky.....	- 20 -
2.5.1. Sensorika.....	- 20 -
2.5.2. Emitace.....	- 21 -
2.5.3. Aktuátory.....	- 21 -
2.5.4. Pyroelektrické senzory.....	- 21 -
3. Přehled tenzometrických senzorů.....	- 24 -
3.1. Mechanické.....	- 24 -
3.2. Optické.....	- 24 -
3.3. Odporové.....	- 26 -

3.4.	Hydraulické	- 28 -
3.5.	Piezoelektrické	- 28 -
4.	Návrh přípravku.....	- 29 -
4.1.	Měření prvních prototypů	- 29 -
4.2.	Princip funkce	- 31 -
4.2.1.	Nároky na přípravek.	- 32 -
4.3.	Verze 1A až 2C	- 33 -
4.4.	Verze 3A až 5C	- 37 -
4.5.	Výběr lisu	- 43 -
4.6.	Finální verze.....	- 45 -
4.6.1.	Montáž a demontáž.....	- 46 -
4.6.2.	Návštěva VVP-Martin- první zkoušky	- 48 -
4.6.3.	Nutné konečné úpravy finální verze	- 52 -
4.7.	Dokumentace spojená s návrhem.....	- 53 -
4.7.1.	Cena přípravku.....	- 53 -
5.	Současný stav	- 54 -
6.	Závěr.....	- 57 -
	Literatura a zdroje.....	- 58 -
	Seznam obrázků a grafů.....	- 61 -
	Přílohy.....	- 63 -

Seznam zkratk a symbolů

$\mu\epsilon$	mikroprodloužení	[1·10 ⁻⁶]
V	napětí	[V]
d33	tenzor piezoelektrického modulu	[C/m ²]
kt	spojovací/spojovací faktor-	[1·10 ⁻⁶]
f _r	Rezonance	[Hz]
f _a	Antirezonance	[Hz]
t	Čas	[s]
σ	Napětí	[Pa]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[Pa]
F	Síla	[N]
S	Plocha	[m ²]
ε	Poměrné prodloužení	[1]
PZT	Piezoelektrická keramika (Pb + Zr + Ti)	
Q	Náboj	[C]
R&D	Vývoj a výzkum	

1. Úvod

Piezoelektrická keramika je nedílnou součástí světa senzorů, jemné mechaniky, zdravotnické a vojenské techniky. Jedná se o materiál s velmi širokým využitím napříč výrobními a zpracovatelskými sektory. Výrobky z piezoelektrického světa používáme denně, i když si to nemusíme uvědomovat.

Tato práce vznikla za účelem vytvoření přípravku pro kvalifikaci výroby tenzometru společnosti CTS Ceramics. Jedná se o součást přechodu z prototypové části do vícekusové výroby. Zatím se senzory vyrábí v laboratorním prostředí, manufakturním způsobem za pomoci dvou inženýrů. Po konci této prototypové fáze, která zahrnuje i přechod z první generace senzoru na druhou, se celý proces musí přesunout z R&D laboratoře do výrobní haly za asistence procesních inženýrů. Součástí výroby musí být kvalifikace. Senzor se musí prověřit, zdali je správně vyrobený a citlivost odpovídá specifikacím. Tato kvalifikace není součástí výstupní kontroly, je umístěna před finalizací senzoru, aby mohlo dojít k případné korekci senzoru v případě, že neodpovídá specifikacím.

První část práce popisuje piezoelektrickou keramiku a snaží se nastínit její důležitost v dnešní době nejen na poli sensoriky. Zabývá se taky principem funkce piezoelektrických materiálů, historií, výrobou piezoelektrické keramiky, výrobky a použití z této keramiky. Práce se snaží nastínit základy celkové problematiky práce s piezoelektrickou keramikou, včetně zdravotních rizik.

Druhá část se zabývá samotnou konstrukcí takového přípravku a popisuje celý konstrukční proces včetně nároků, principu řešení, problémů při realizaci a potřebné dokumentace. Zároveň představuje nároky na tento přípravek, který musí být umístěn do výrobní haly a bude s ním manipulovat operátor výroby. Výroba samotného přípravku byla realizována firmou VVP-Martin, včetně složení a následné nitridace, kterou zajišťovala firma Bodycote. Součástí práce je i testování částečně vyrobeného přípravku a další kroky pro jeho celkovou realizaci.

2. Piezoelektrická keramika

Základním principem piezoelektrických materiálů je přeměna elektrické energie na mechanickou a opačně. Zatím dostupné piezomateriály jsou krystaly, keramika a polymery. V dnešní době se začínají objevovat i kompozitní materiály. Samotný materiál se volí na základě elektrických požadavků senzoru/emitátoru (častěji používáno anglicky: Transducer). (1)

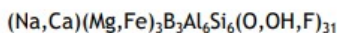
2.1. Historie piezoelektriky

První známky o materiálech schopných měnit změnu vnějšího parametru na elektrickou energii, jsou z poloviny 18. století. Studie Caroluse Linnaeuse a Franze Aepinuse popisuje pyroelektrický jev u krystalu Turmalín. Jedná se o změnu elektrického potenciálu na základě změny teploty.



Tourmaline crystal.

tourmaline = lapis electricus

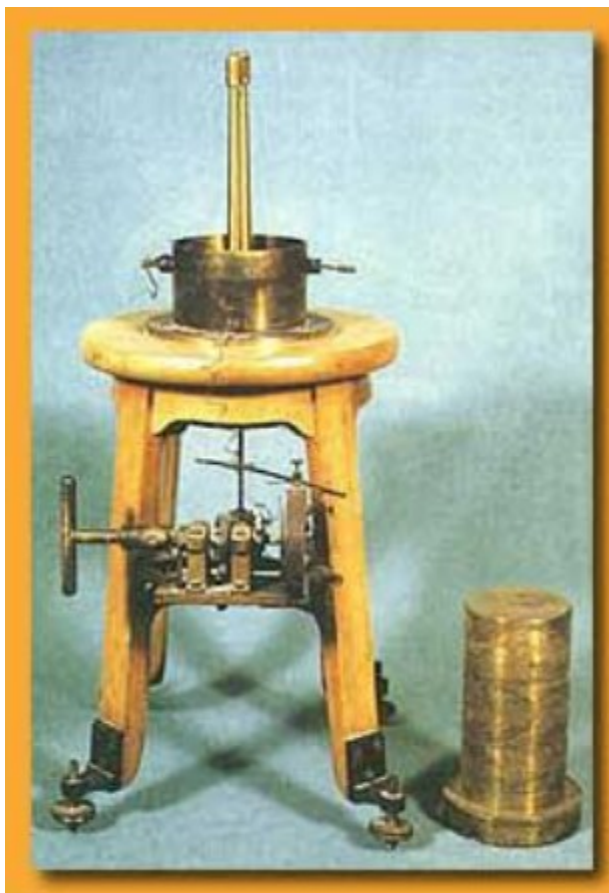


Franz Ulrich Theodor Aepinus
(1724 - 1802) - polar phenomenon

Obrázek 1: Krystal Turmalínu (2)

Přesně je pak pyroelektrický jev popsán v roce 1824 Davidem Brewsterem (1781–1868). Kdy popisuje přímou změnu elektrického potenciálu při ohřívání nebo chlazení materiálu. Na jeho práci pak navazují René Just Haüy a Antoine César Becquerel a vyslovují hypotézu o relaci mezi mechanickým zatížením a elektrickým potenciálem u hypotetického materiálu a provádějí první pyroelektrické měření v roce 1828, bohužel s neprůkaznými výsledky. Díky těmto vědcům si lidé uvědomují i v takto brzké době, že existují materiály, které reagují na změnu okolního prostředí, a tak nevědomky otevírají novou éru sensoriky, která dnes nachází uplatnění prakticky ve všech sektorech. V roce 1880 probíhá první demonstrace přímého piezoelektrického jevu (Kapitola 2.2.1.). Bratři Pierre Curie (1859–1906) a Paul-Jacques Curie (1856–1941) dokazují přímý piezoelektrický jev a mění mechanické namáhání krystalu v podobě disku na elektrické napětí.

O rok později, v roce 1881, odvozuje Gabriel Lippmann (1845–1921) na základě fundamentálních zákonů termodynamiky důkaz o existenci nepřímého piezoelektrického jevu. Během následujících pár let se piezoelektrický jev dočkává i prvního použití v podobě elektroměru, který měří radioaktivitu a tím tak přispívá Marie Curie-Sklodowské (1867–1934) k objasnění této vlastnosti. (2)

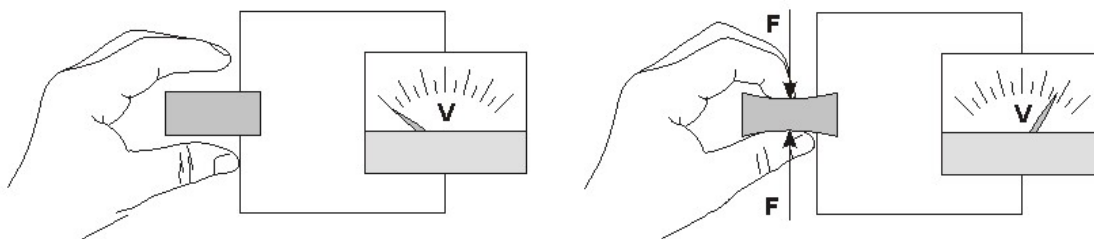


Obrázek 2: Elektrometr používaný pro měření radioaktivity (2).

2.2. Piezoelektrický jev

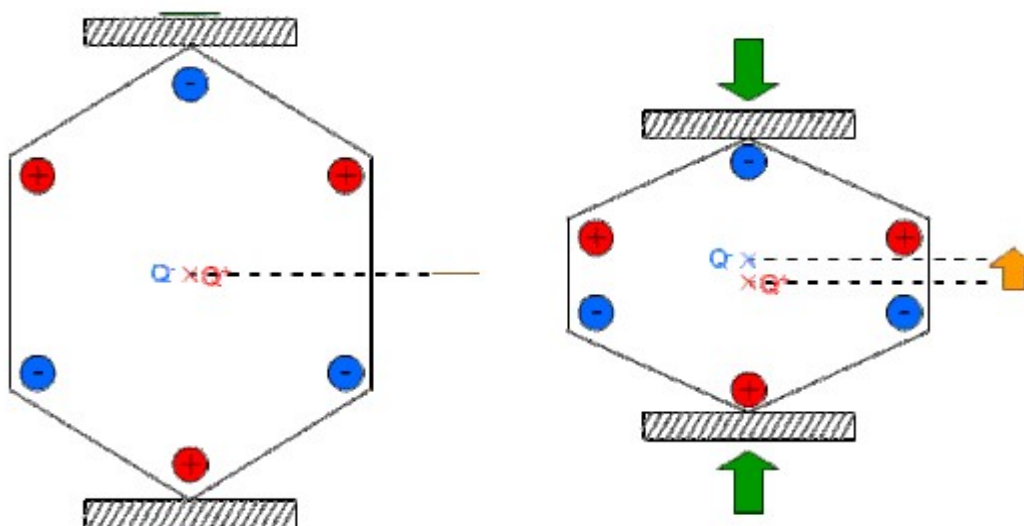
2.2.1. Přímý piezoelektrický jev

Jedná se o změnu elektrického potenciálu v závislosti na mechanickém namáhání. Zjednodušeně se dá říci, že přímý piezoelektrický jev se využívá v senzorech při snímání. Základní princip zajišťují ionty v materiálu a jejich rozmístění. Kdy při použití mechanického napětí dojde k prodloužení nebo zkrácení mezimolekulární vazby a tím ke změně vzdálenosti mezi jednotlivými ionty, která způsobí změnu elektrického potenciálu.



Obrázek 3: Přímý piezoelektrický jev- Makro (3)

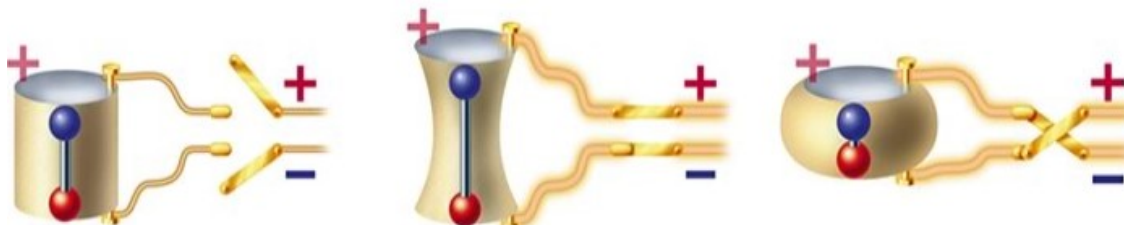
U reálných materiálů je potřeba tyto vlastnosti podpořit polarizací (Kapitola 2.4.3.). Senzory ve většině případů fungují v jednom směru, ve kterém se polarizují, aby se zlepšila citlivost na úkor anizotropie. Keramika má po polarizaci pozitivní a negativní stranu, potažmo tedy elektrodu.



Obrázek 4: Přímý piezoelektrický jev- Mikro (4).

2.2.2. Nepřímý piezoelektrický jev

Principem je opak přímého jevu. Na materiál (polarizovaný) se připojí napětí a vysílá se elektrický signál. Ionty materiálu pak na tento signál, resp. změnu potenciálu, reagují oddalováním nebo přibližováním. Pro většinu využití se používá signál v podobě sinusů. Materiál tedy kmitá v polarizovaném směru.



Obrázek 5: Nepřímý piezoelektrický jev (5)

2.2.3. Ostatní piezoelektrické materiály

Jak již bylo zmíněno, existují přírodní krystaly, které disponují piezoelektrickým jevem. Mezi tyto krystaly patří křemen, topaz či celá skupina turmalínů. Mezi ty vzácnější patří berlinit (AlPO_4), což je fosfátový minerál, strukturálně totožný s křemenem. Minerály s piezoelektrickým jevem můžeme najít i doma v podobě třtinového cukru.

Minerál s touto vlastností lze samozřejmě i syntetizovat a to například v podobě GaPO_4 , orthofosfát galia, nebo $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, Langasit.

Dalším materiálem, který se v dnešní době hodně využívá, jsou piezoelektrické polymery. Polyvinylidenfluorid (PVDF) má několikanásobně silnější piezoelektrický jev než křemen. Na rozdíl od keramik se v polymerech přitahují či oddalují celé polymerní řetězce.

Piezoelektrický jev můžeme najít i v našem těle. Kosti jsou piezoelektrické a to s konstantou zhruba $0,7 \text{ pC/N}$ i dentin v zubech vykazuje známky piezoelektrického chování (2).

2.3. Chemické složení

Piezoelektrických materiálů je celá řada. Tato kapitola se bude věnovat výhradně piezoelektrické keramice. Piezoelektrická keramika nemá na začátku svého výrobního procesu piezoelektrické vlastnosti. Dipóly v keramice jsou umístěny tak náhodně, že nedochází k piezoelektrickým jevům. Ty se objeví až po polarizaci. První piezokeramika byla BaTiO_3 . V dnešní době se užívají převážně keramiky na bázi Olova (Pb), Zirkonu (Zr) a Titanu (Ti), tato kategorie má svoji zkratku PZT keramiky od prvních písmen jednotlivých základních prvků (6).

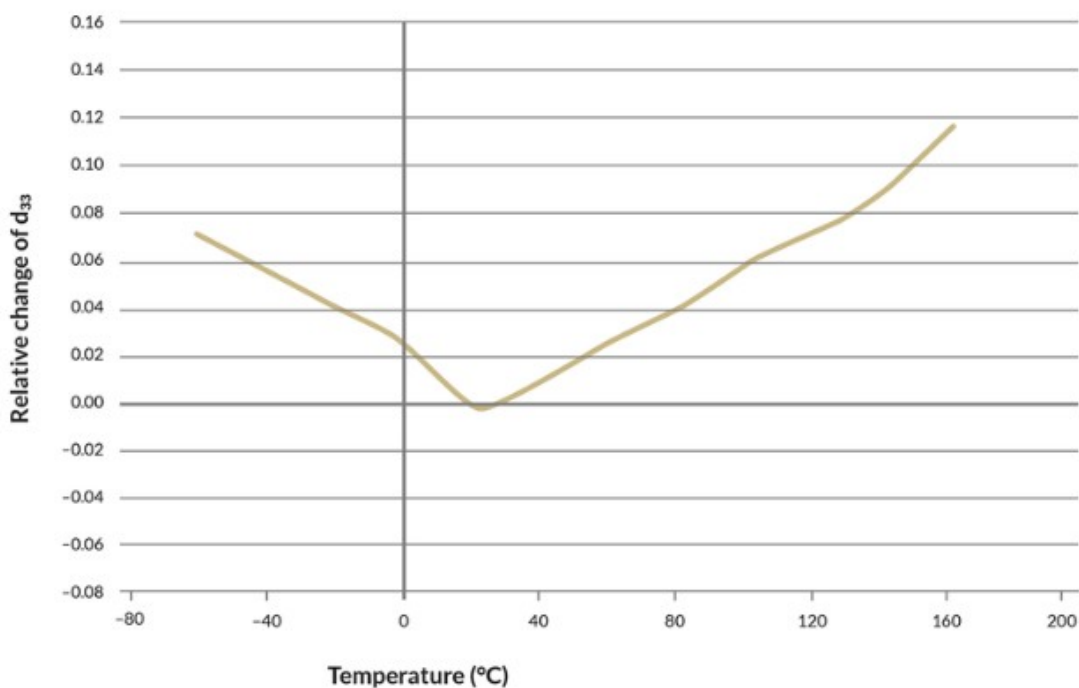
Nejpoužívanější Piezoelektrické keramiky:

- PbTiO_3
- KNbO_3
- LiNbO_3
- LiTaO_3
- Na_2WO_3
- $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$
- $\text{Pb}_2\text{KNb}_5\text{O}_{15}$

Piezoelektrické keramiky se dají řadit mnoha způsoby, avšak nejčastějším dělením je na tvrdé a měkké materiály, což je základní dělení podle použití.

2.3.1. Tvrdé materiály

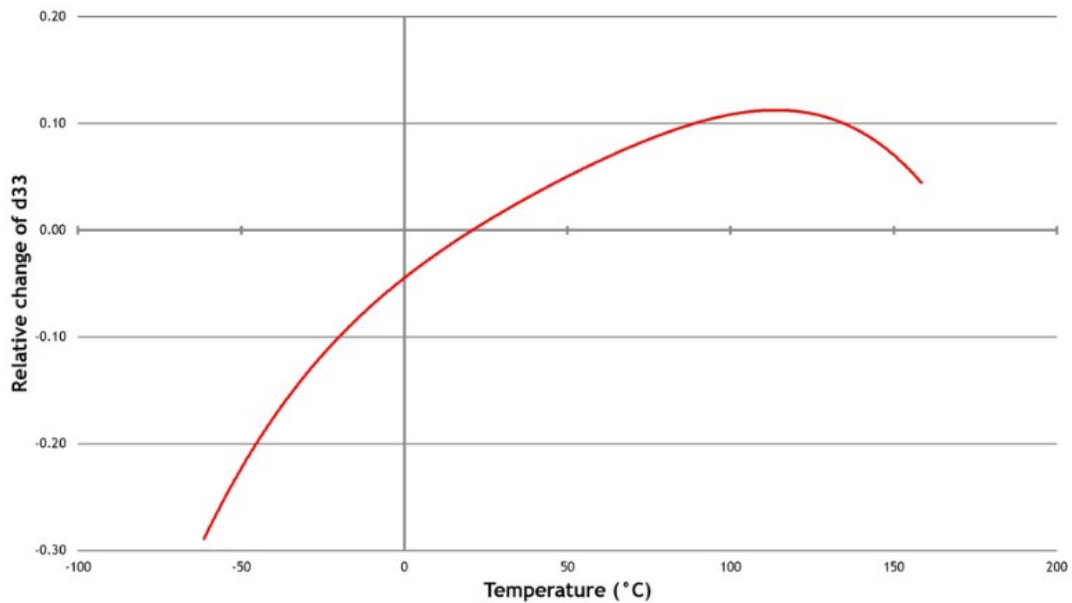
Tvrdé materiály jsou určeny pro dynamické nebo rezonanční použití. Při buzení mají tendenci dlouho rezonovat z důvodu menšího útlumu. Zvládnou také vydržet vyšší míru elektrického buzení i mechanického namáhání. Naopak je u nich složitější polarizace, je potřeba vyšších energií a používá se u vyšších teplot. Obecně jsou ztráty u tvrdých materiálů o 10% nižší než u měkkých, toho lze využít u výkonnostních prvků, jako jsou například ultrazvukové čističky a pračky, kde se nám nebude ultrazvukový piezoemitátor tolik zahřívat, díky nižším ztrátám. (7)



Obrázek 6: Závislost d_{33} na teplotě u tvrdého materiálu NCE40 (8)

2.3.2. Měkké materiály

Měkké materiály disponují daleko větší citlivostí. Hodí se pro statické určení, tudíž spíše pro senzorku. Jejich poměrné prodloužení je v porovnání s tvrdými materiály velké. Naopak trpí na velké ztráty při dynamických použití. I d_{33} konstanta je u tvrdých materiálů daleko vyšší, vysvětlení d_{33} naleznete v kapitole 2.4.3. (7)



Obrázek 7: Závislost d_{33} na teplotě u měkkého materiálu NCE51 (9)

Typ keramiky	Měkká piezokeramika	Tvrdá piezokeramika
Piezo konstanta (Prodloužení staticky)	Vysoká	Nízká
Kapacita	Vysoká	Nízká
Ztráty (ohřev)	Vysoká	Nízká
Depolarizace	Nízká	Vysoká
Prodloužení při rezonanci	Nízká	Vysoká

Obrázek 8: Porovnání vlastností tvrdých a měkkých piezoelektrických keramik (7)

2.3.3. Stárnutí

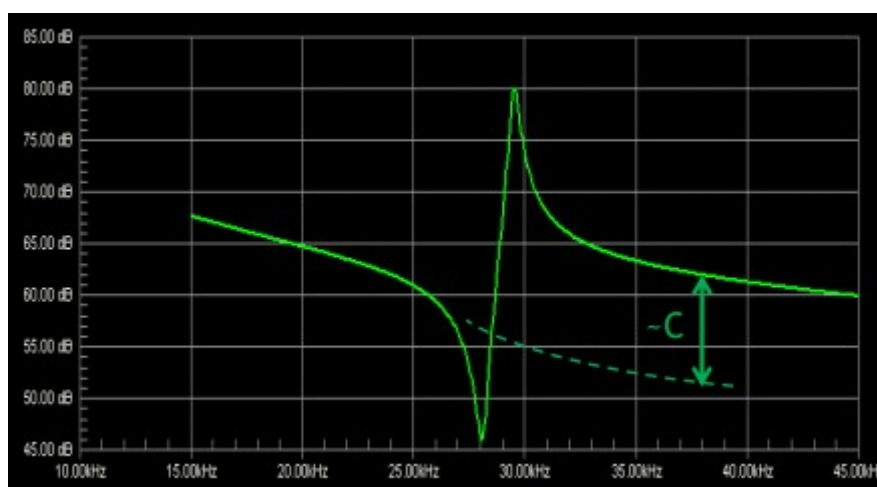
Ke stárnutí piezoelektrické keramiky dochází z důvodů polarizace. Dipóly mají tendenci vracet se do původní polohy. Po polarizaci tak dochází k lehkému nasměrování dipólů mimo ideální směr (viz. obr. 10). Stárnutí má logaritmický charakter a je nedílnou součástí výrobního procesu. U každého materiálu je potřeba znát koeficient stárnutí a počítat s ním při navrhování. U některých složitějších a přesnějších použití je předepsaný počet dní stárnutí. Keramika se tak připraví do finální podoby před montáží, čeká se na snížení hodnot v důsledku stárnutí (např. 100 dní), a následně se znovu změří, jestli odpovídá požadavkům. Koeficient stárnutí lze zjistit jednoduše z měření ve dvou bodech stárnutí, dle rovnice (8).

$$d(t) = d(t_0) + A \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

Po měření máme hodnoty t_0 a t , které představují časy měření, většinou t_0 představuje hodnotu na začátku stárnutí (čas těsně po vychladnutí po polarizaci) hodnota t představuje čas druhého měření, respektive dobu stárnutí. Hodnota funkce d představuje zkoumanou stárnoucí veličinu, která je závislá na čase, ve většině případů se jedná o faktor k_t , který představuje indikátor efektivity piezoelektrické keramiky při přeměně elektrické energie na mechanickou a naopak. Lze ho spočítat dle rovnice

$$k_t = \sqrt{1 - \frac{f_r^2}{f_a^2}}$$

Kde f_r je vlastní rezonance keramiky, při této frekvenci má nejmenší útlum (nejvíce rezonuje), a f_a je antirezonance keramiky, při které naopak dochází k největšímu útlumu. Graf můžeme vidět na obrázku. 9. Rezonance je hodnota minima na křivce a rezonance maxima, jedná se tedy o vrcholy frekvenční křivky (2).



Obrázek 9: Frekvenční křivka pro zjištění f_a a f_r . (2)

Další možností pro zkoumanou veličinu je d_{33} , jedná se o základní kvalitativní veličinu při výrobě keramiky a při polarizaci.

2.4. Výroba

Jako každý výrobní proces je i výrobní proces piezoelektrické keramiky složitý a doprovází ho řada vedlejších problémů. V této kapitole se budu věnovat klíčovým bodům výroby piezoelektrické keramiky, včetně základní problematiky.

2.4.1. Slinování

Proces začíná v práškovně, keramika se slinuje do polotovaru, který se brousí na požadovanou tloušťku. Keramika se většinou dodává v granulátu nebo již v prášku s požadovanou velikostí částic. Ta je zde nesmírně důležitá. Slinování musí mít co největší míru homogenity, jakékoli dutiny, nespečené částice či rapidní změny hustoty způsobí praskliny v dalším průběhu výrobního procesu. Vzhledem k charakteru keramiky, zde dochází ke stejné problematice jako u slinování břitových destiček pro obrábění a to, že nelze spékat velmi ostré rohy a složité tvary (9). Naštěstí oproti břitovým destičkám to u piezoelektrické keramiky není takový problém. Tvary keramik tohoto použití jsou z 98% ploché kvádry (destičky), disky nebo prstence.

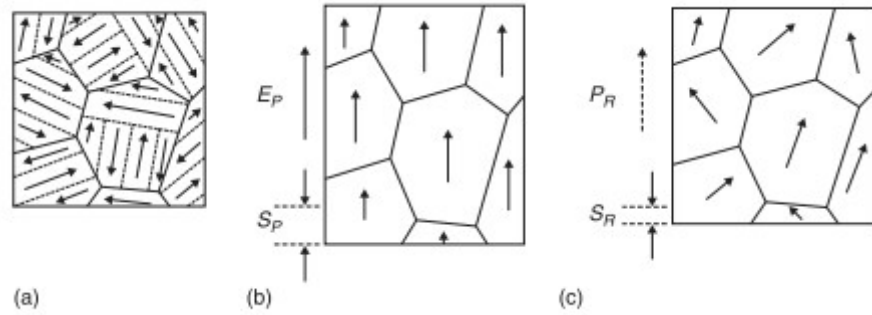
Pro příklad tedy uvedu výrobní postup polotovaru tvaru destičky. Po vstupní kontrole granulátu se připraví slinovací proces a slinují se zpravidla větší desky, které se následně řezou na požadovaný rozměr (šířka a délka) pomocí strunové pily nebo kotoučové pily v případě prstenců. Máme tedy požadované rozměry ve dvou osách, nyní je potřeba keramiku zbrousit na požadovanou výšku, která bývá velmi přesně dána.

2.4.2. Broušení

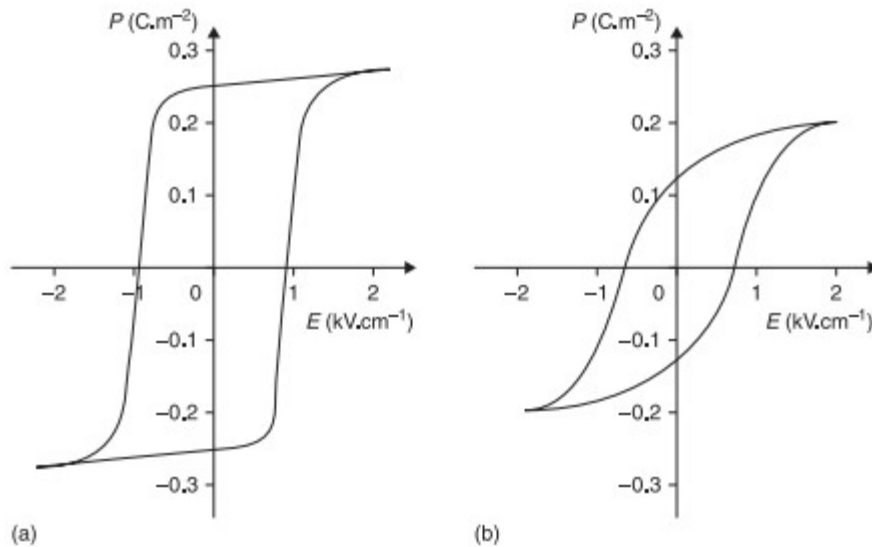
Výška keramiky je velmi důležitý rozměr. Polarizace keramiky probíhá v 99% v ose její výšky, v tomto směru keramika "měří". Výšky se na výkresech kótují pomocí hodnoty frekvence, které má keramika dosáhnout ve směru výšky. Protože je zde přímé spojení s vlnovou délkou resp. frekvencí a výškou. Vzhledem k tomu, že na výslednou kvalitu má vliv mnoho faktorů, je zapotřebí, aby broušení bylo přesné a tím dávalo prostor pro další odchylky ve výrobním postupu.

2.4.3. Polarizace a stříbření.

Materiál je tedy v požadovaném rozměru, ale stále nemá piezoelektrické vlastnosti, ty keramika získává po polarizaci. Nejprve se nanese stříbrná elektroda na příslušné plochy, které jsou kolmé na směr polarizace. Polotovary se umístí do olejové lázně a vystaví se intenzivnímu elektrickému poli. Dipóly se nasměrují ve směru toku. Poté, co elektrické pole přestane působit, mají dipóly tendenci se nasměrovat částečně do původní polohy, viz obr. 10.



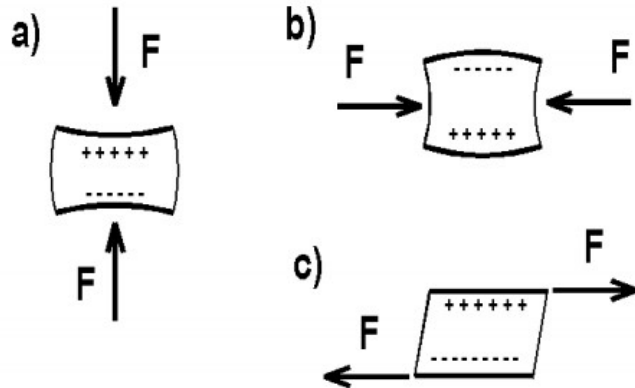
Obrázek 10: Průběh polarizace: (a)- přirozený stav; (b)- během polarizace; (c)-stav po polarizaci (1)



Obrázek 11: Polarizační křivky (průběh polarizace) pro monokrystal $BaTiO_3$ (a) a keramiku $BaTiO_3$ (b) (1)

Díky těmto procesům máme nyní piezoelektrickou keramiku, která je připravená pro zasazení do senzoru, či jiné použití. Před instalací do soustavy se keramiky měří. Podle potřeby i před polarizací. V drtivé většině případů se měří d_{33} . Tato veličina přímo definuje náboj indukovaný v keramice na zatížení silou v určitém směru, d_{33} je konkrétně zatížení ve směru polarizace, tudíž síla kolmá na elektrody, viz obr 12 (2). Například pro materiál NCE51 je hodnota $d_{33} = 405\text{pC/N}$ (2).

- a) Collinear - d_{33}
- b) Transversal - d_{31}
- c) Shear - d_{15}



Obrázek 12: Vysvětlení d_{33} (2)

2.4.4. Zdravotní rizika

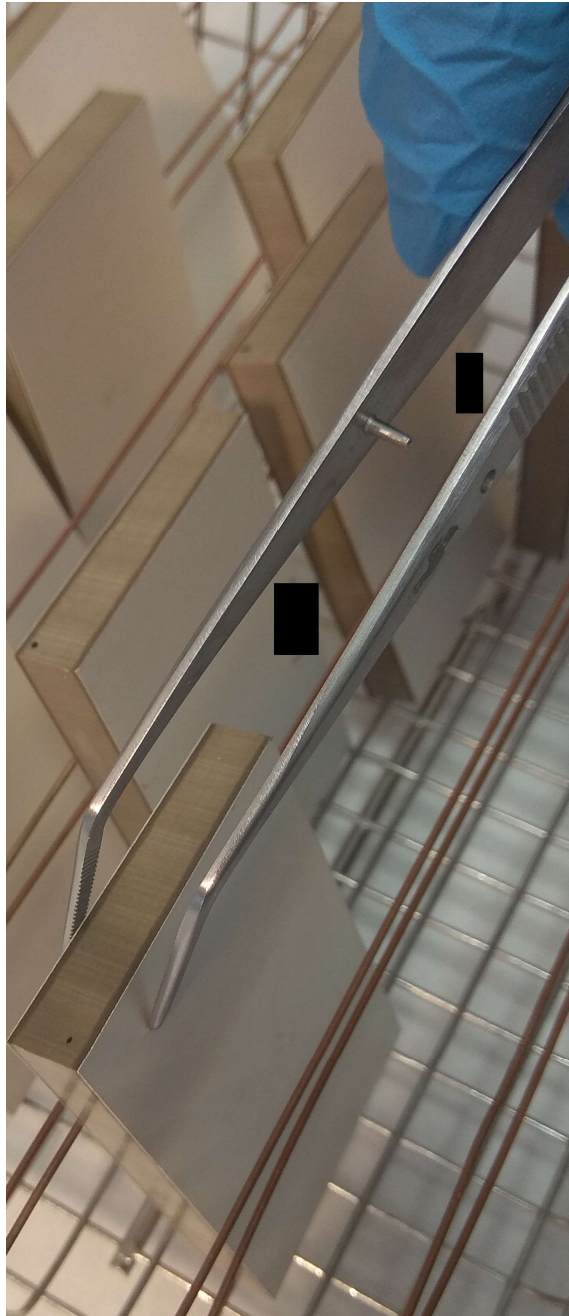
Bohužel práce s piezoelektrickou keramikou s sebou nese nemalé zdravotní rizika. Kromě klasických rizik výrobních hal, jako jsou pády, popáleniny a úrazy, je práce s piezoelektrickou keramikou mnohem nebezpečnější a to hlavně díky těmto třem aspektům.

Prvním je práce s ultrazvukem. Ultrazvukové pračky nebo samotné piezoelektrické výrobky (sonary, ultrazvuky apod.) mají poměrně vysokou úroveň hlasitosti a často i v neslyšitelném spektru, mohou tak poškodit například sluch či zuby. Existují případy, kdy práce s ultrazvukovou pračkou urychlila paradontózu, a v řádu jednoho měsíce došlo k vypadání zubů. Je tedy potřeba vždy číst návody k obsluze a při měření určitých emitačních výrobků nosit protihluková sluchátka.

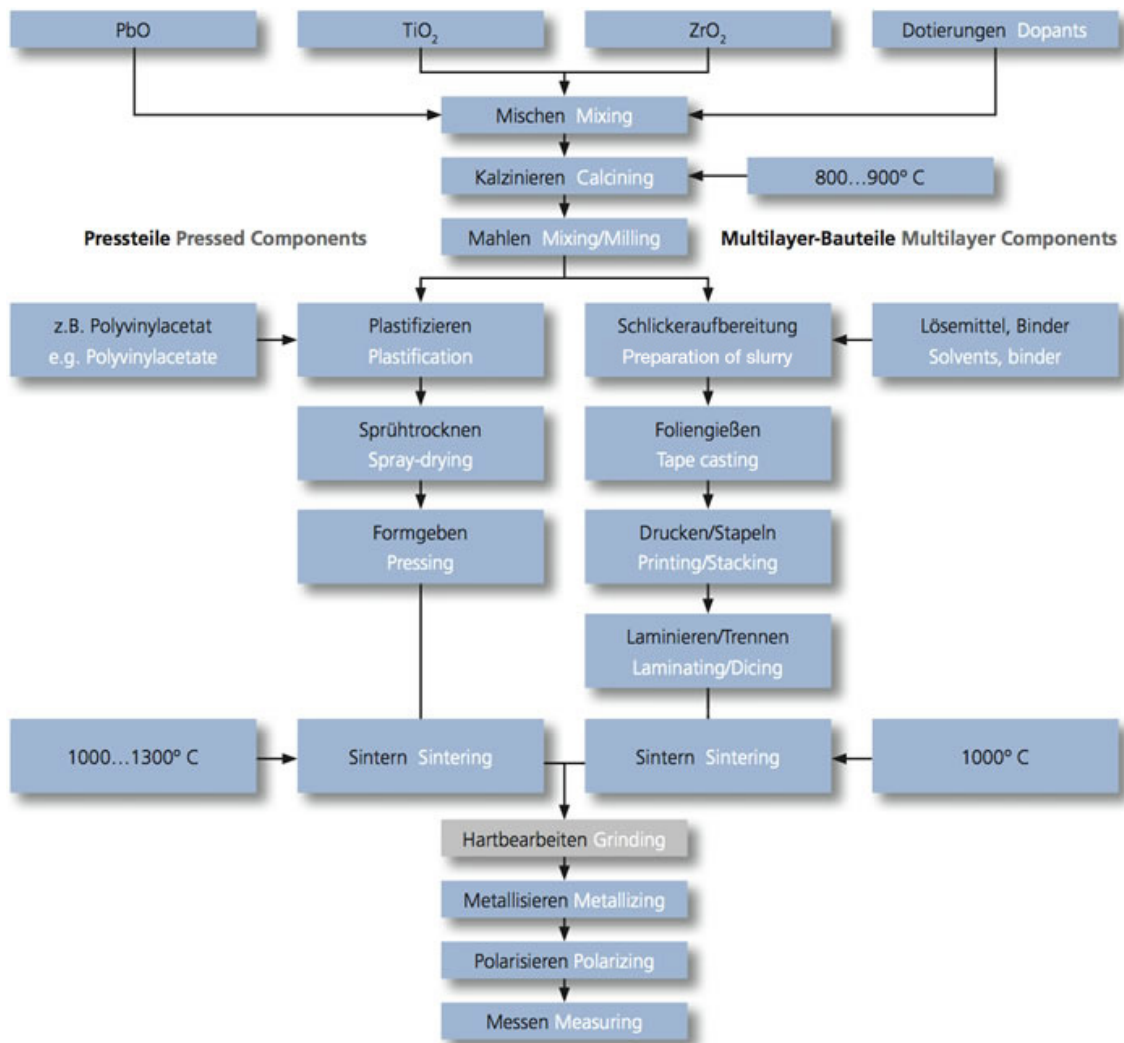
Druhým nebezpečným aspektem je samotná keramika, která se při změně teploty nabíje. Pokud manipulujeme s keramikou, nikdy se nedotýkáme obou elektrod zároveň, nejlépe keramiku před manipulací vybijeme, například pinzetou, viz obr. 13. Ačkoli u jednotlivých keramik je riziko malé, například u velkých složených tzv. stacků (čti staků), kdy je několik keramik na sobě, je riziko větší, především pro osoby, které trpí srdečními chorobami nebo vysokým tlakem.

Posledním největším rizikem je olovo, které piezoelektrická keramika obsahuje. Olovo představuje pro lidský organismus riziko, negativně ovlivňuje krevní oběh, ledviny, nervový, imunitní a reprodukční systém. Při vyšších dávkách se hromadí v kostech, játrech a ledvinách a při dlouhodobému

vystavení můžou nastat poruchy chování (10). Proto se například do práškovny musí vstupovat pouze v celotělovém ochranném obleku a s respirátorem. V obrobně se musí používat respirátor či rouška a při jakékoli manipulaci s keramikou je zapotřebí mít rukavice, především u brusek a obráběcích center, kde je přítomná chladicí kapalina, která je kontaminovaná malými částicemi olova.



Obrázek 13: Ukázka vybití keramiky před manipulací.



Obrázek 14: Ukázka výrobního procesu piezoelektrické keramiky (11)

2.5. Výrobky z Piezoelektrické keramiky

Jak již bylo zmíněno, piezoelektrická keramika má velmi široké využití. Oba piezoelektrické jevy se dají velmi dobře využít v nových technologiích nebo při měření.

2.5.1. Senzorika

Senzory v drtivé většině případů fungují na principu přímého piezoelektrického jevu. Jejich použití zahrnuje průtokoměry, u kterých se na základě změny tlaku v potrubí měří rychlost proudění resp. průtok. Další využitím jsou parkovací senzory. Zde se propojuje přímý i nepřímý piezoelektrický jev. Do keramiky se pošle periodický signál (většinou sinusového charakteru) a keramika na základě nepřímého jevu funguje jako ultrazvukový emitátor. Vlny se odrážejí od blízkých objektů a vracejí se do sensorické části, která je vlnami buzena a vysílá signál do počítače, který vyhodnocuje na základě časového rozdílu vzdálenost od překážky. Nedílnou součástí portfolia jsou tenzometry ve velkém množství variant. Piezoelektrické senzory se využívají například k měření pod hladinou. Ve vodě se zvuk šíří lépe

než na vzduchu, senzory jsou tak schopny fungovat na větší vzdálenost. Toho využívají pasivní sonary. U hlubinných senzorů je ale zapotřebí počítat s hydrostatickým tlakem, který může být enormní. Další použití je například v potravinářství. Piezoelektrické senzory kontrolují vajíčka, jelikož prasklina ve skořápce mění vlastní frekvenci, kterou senzor rozpozná, a systém vadné vajíčko odstraní.

2.5.2. Emitace

V dnešní době se pasivní sonary, které snímají venkovní vibrace, kombinují s aktivními sonary, kdy samotná loď/ponorka vypustí signál, který se odrazí od předmětů ve vodě a vrací se do lodě, kde ho snímá pasivní část. Obě tyto části lze postavit na piezoelektrické bázi.

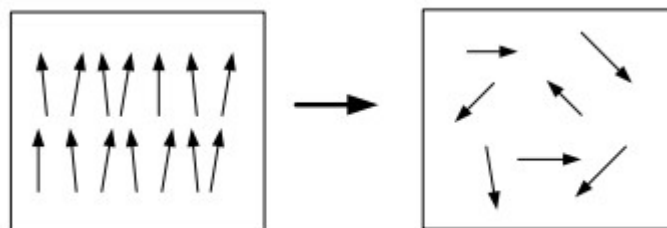
Lékařský ultrazvuk také pracuje na principu nepřímého piezoelektrického jevu. Pokud vytvoříme vícevrstvou keramiku tzv. stack, která je dostatečně silná. Vibrace se stanou natolik znatelné, že při správné rychlosti lze tento aktuátor umístit jako pohon do zubních vrtaček a chirurgických nástrojů, převážně řezných jako například vibrační skalpely.

2.5.3. Aktuátory

Poslední větší částí piezoelektrického portfolia jsou aktuátory, jedná se o pohony a motory. Používají se na velmi přesnou manipulaci. Jejich velkou výhodou je prakticky lineární převod prodloužení z elektrického signálu, jsou tudíž velmi přesné, nicméně jejich rozsah prodloužení se pohybuje v rámci μm . Lze vytvořit i rotační piezomotory. Ve spojení s výpočetní technikou můžou aktuátory sloužit jako vyrovnávací zařízení pro velmi malé délky. I když je jejich rozpětí v řádu μm , jejich přesnost a ovladatelnost je velmi jednoduchá. Jsou to také bezvůlové pohony, hodí se tak například pro přesné obrábění, astronomické dalekohledy či biotechnický výzkum (12).

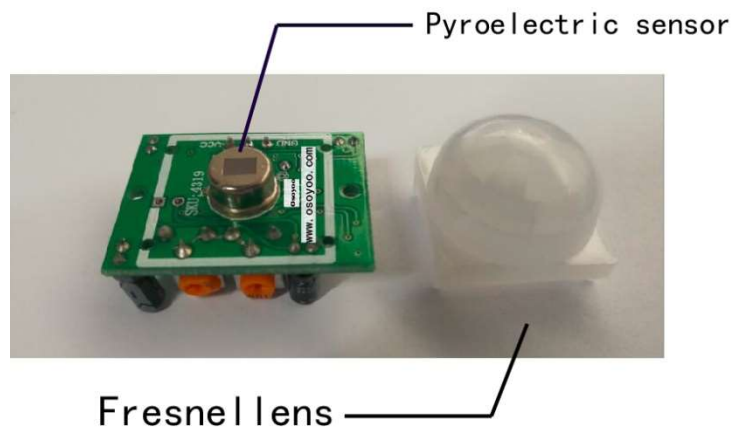
2.5.4. Pyroelektrické senzory

Pyroelektrický jev je nedílnou součástí piezoelektrické senzoričky. Principem je změna polarizace při změně teploty, to způsobí změnu elektrického potenciálu. Po uplynutí určité doby se materiál navrátí do původní podoby, této době říkáme relaxační. Pro toto použití lze použít i piezoelektrickou keramiku, například PZT. Typickou hodnotou pyroelektrického jevu pro tuto keramiku je $30\text{V}/\text{mm}/^\circ\text{C}$ (2).



Obrázek 15: Ukázka principu pyroelektrické senzoričky při zvýšení teploty (2).

Změny potenciálu lze ale využít v sensorice i pro tepelná čidla, jako jsou detektory kouře či pohybu. Detektory pohybu tzv. PIR (Passive Infra Red) senzory, jsou senzory na pyroelektrické bázi, které detekují infračervené světlo vyzařované lidmi či většími zvířaty. Slovo Passive v názvu znamená, že není potřeba udržovat senzor pod proudem. Senzor se tedy sepne pouze při detekci, pokud k detekci nedochází, obvodem proud neprotéká (12).



Obrázek 16: Technické řešení pyroelektrického senzoru pohybu (13).

Jako u ostatních piezoelektrických senzorů a pohonů mají pyroelektrické senzory svoje využití i ve vojenské technice. Armády vždy řešily problém tréninku pěchotních vojsk. Kromě ostrých střelb na terč hledaly armády světa věrný způsob simulace bitvy, alespoň tedy střetnutí dvou pěších vojsk. Velká cvičení se slepou municí neposkytují dostatečnou představu o reálném střetu.

V minulosti se snažily použít painballové zbraně, ty ovšem disponují dostřelem kolem 30metrů a nesimulují reálnou manipulaci. Posléze se vyvíjely airsoftové zbraně speciálně pro armádu s reálnou manipulací tzv. PTW (Personal Training Weapons). S airsoftovými zbraněmi se tedy manipuluje o něco reálněji než se zbraněmi painballovými, mají i vyšší dostřel (kolem 70metrů), pořád ale zbraním chybí zpětný ráz a hlasitost střelby.

V posledních letech se objevoval nový trend v podobě painballových kuliček umístěných do ostrých nábojů s menší prachovou náplní, jenže tato metoda nesla velké zdravotní riziko a zbraně měly stále malý dostřel (tento systém si hojně osvojila policie). Dalším trendem bylo použití airsoftových zbraní poháněných plynem, které naprosto reálně napodobují ostré zbraně, až na hlasitost a dostřel. Žádný z nich ale neuspěl ve velkém měřítku.

Pak se objevil systém MILES (Multiple Integrated Laser Engagement System), který slaví velký úspěch a zavedení do mnoha armád světa, včetně Armády ČR. Jedná se o systém složený ze dvou částí, jednou je laserový vysílač, ten se umístí na ústí zbraně, do které se nabíjí slepé náboje. Při výstřelu slepého náboje dojde k sepnutí systému a ten vyšle laserový paprsek. Druhou částí je snímač, respektive soustava snímačů, která se umístí na helmu a nosič plátů. Snímače detekují laserové paprsky a dávají informaci o zásahu. Soustava pyroelektrických snímačů je sestavena tak, aby snímala velikost lidského těla a nemusel se zasáhnout přímo jednotlivý snímač. Prakticky jedinými nevýhodami

jsou nereálná balistická křivka a přidaná váha. Jedná se o patent společnosti Lockheed Martin Corporation a autorem je Rudolph R. Gammarino (14).



Obrázek 17: Vysílací část systému MILES při použití Jihokorejskou armádou. (Červená koncovka není součástí systému, jedná se pouze o adaptér pro střelbu slepými náboji) (15)



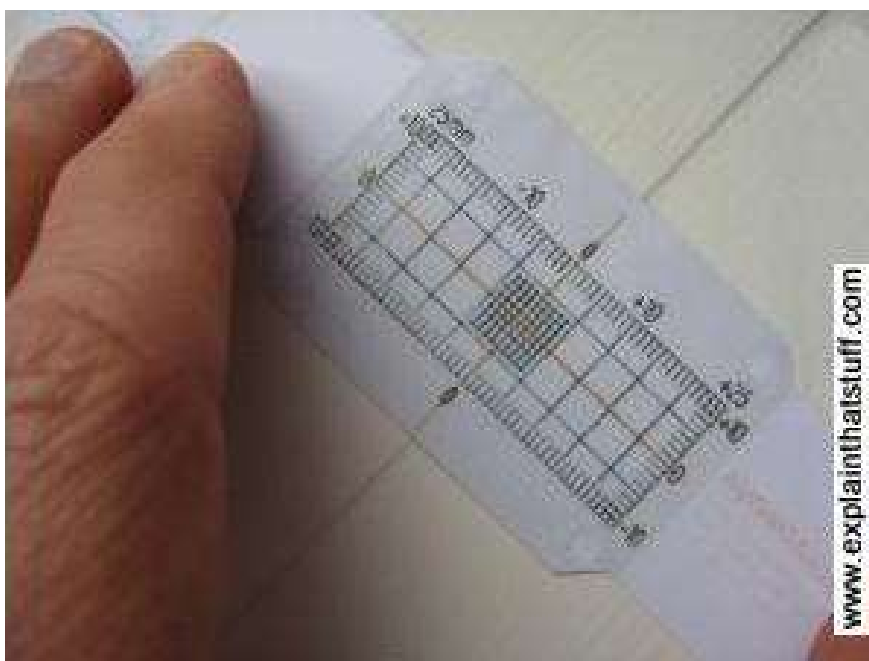
Obrázek 18: Senzorová část systému MILES (16)

3. Přehled tenzometrických senzorů

Tenzometry můžeme rozdělit do 5 základních skupin, které je rozlišují podle principu měření. Každý tenzometr má své výhody i nevýhody a je vhodný pro určitá použití.

3.1. Mechanické

Jedná se o nejjednodušší formu tenzometru. Používají se například ve stavebnictví. Jde o dvouvrstvé sklo či plexisklo, které se přilepí přes trhlinu v budově. První vrstva má na sobě měřítko ve dvou směrech, druhá vrstva má pak na sobě nulový kříž. Tato nálepka se musí nalepit přesně, tak aby nulový kříž jedné vrstvy byl v nule měřítka na druhé vrstvě. Pak po určité době, pokud se trhlina rozevře nebo jinak pohne, nulový kříž se oproti měřítku také pohne. Díky měřítku a času, který známe, můžeme zjistit šířku trhliny v čase (12).



Obrázek 19: Ukázka mechanického tenzometru (12)

3.2. Optické

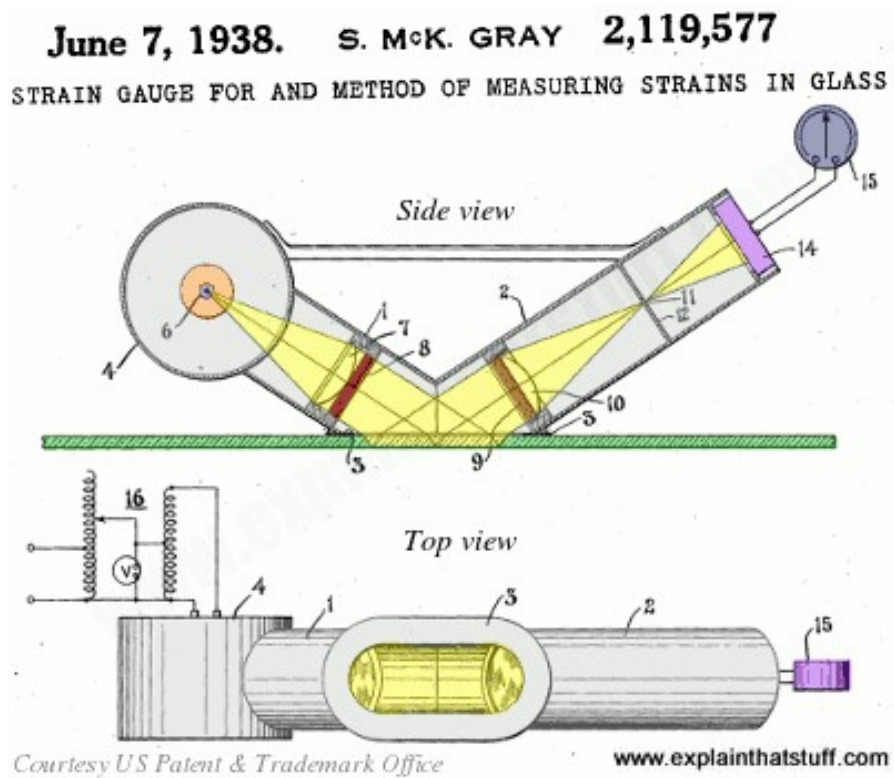
Jsou založeny na principu přenosu či odrazu světla. Materiály jako například plasty či sklo přenáší i odrážejí světlo. Použijeme-li polarizované světlo, které dopadá na sklo pod určitým úhlem, část světla se odrazí a část přenesou sklem. Tento poměr je ale ovlivňován prodloužením (zatížením) skla. Tohoto lze využít k měření zatížení. Dnes se optické tenzometry už tolik nevyužívají. V této době je vyžadováno přímé propojení s výpočetní technikou (12). Stále jsou ale technická odvětví, kde se používají. Moderní optické tenzometry jsou řešeny na principu průchodu světla přes medium, které má na sobě přesně dané měřítko/“zebru“ ta se pod napětím roztahuje či smršťuje.



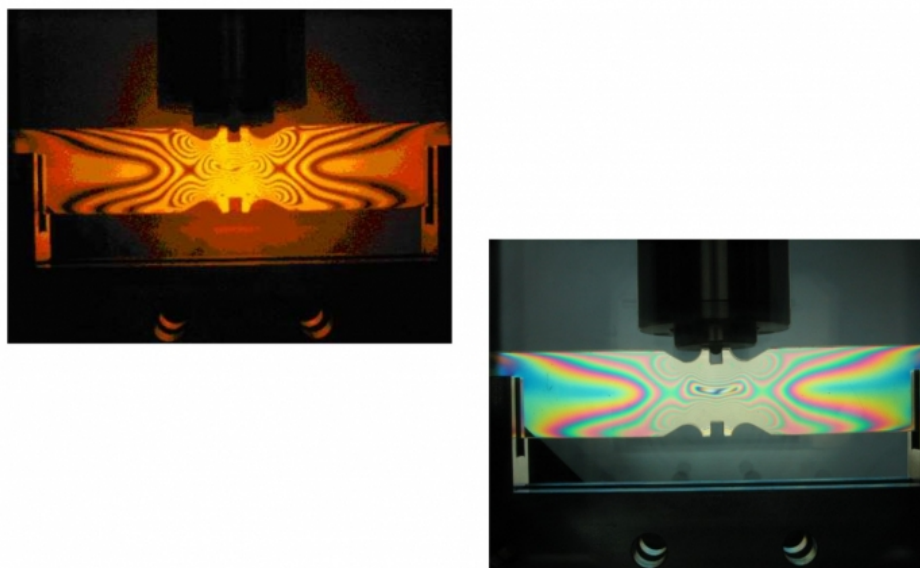
Obrázek 20: Ukázka vnitřního měřítka optického tenzometru (13)



Obrázek 21: Moderní optický tenzometr (14)



Obrázek 22: Ukázka optického tenzometru– Polariskop (12)

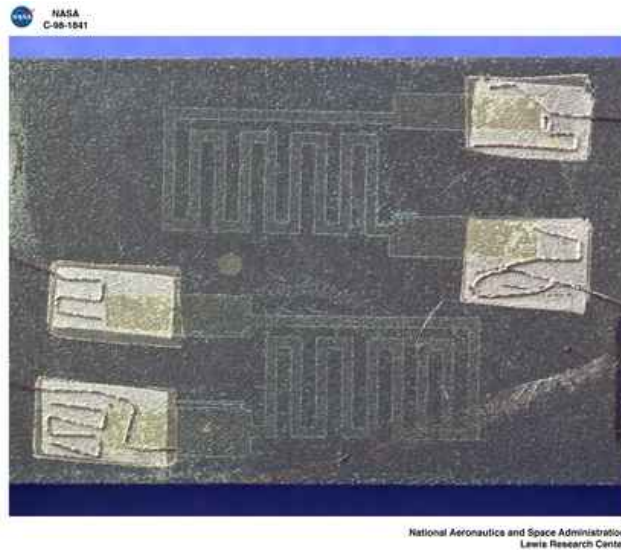


Obrázek 23: ukázka funkce Polaroskopu/optického tenzometru. (15)

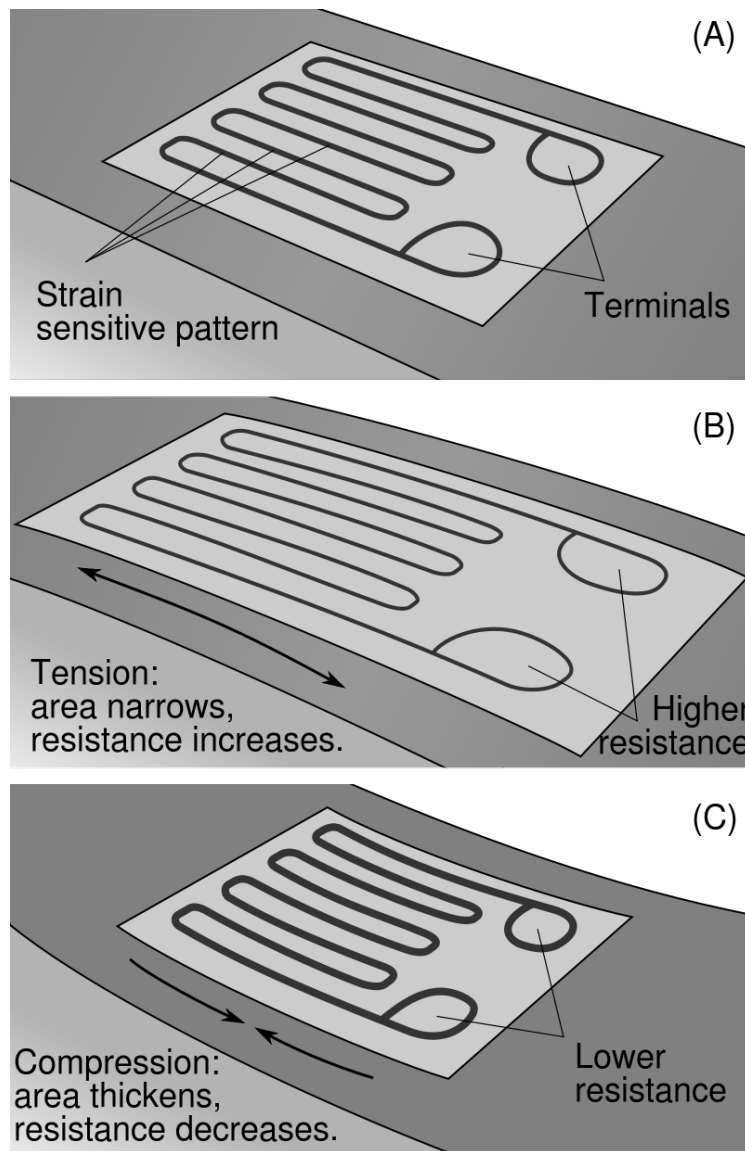
3.3. Odporové

Základní konstrukcí je tenký drát (či jiná vodivá entita), který je pravidelně smotaný v pouzdře. Drát mění svůj odpor v závislosti na vzdálenosti jednotlivých ohybů od sebe. Tato vzdálenost se mění i při zatížení, viz obr. 25. Přilepíme-li tedy tento tenzometr na měřenou součástku, napětí se přenáší skrz lepidlo do tenzometru. Výroba těchto tenzometrů je poměrně levná ve srovnání s jinými. Další výhodou je přímá konverze odporu na napětí přes jednoduché výpočty. Stačí tedy připojení na výpočetní techniku. Nevýhodou je omezení použití. Pokud dojde k překročení plastické deformace tenzometru je tím nevratně narušena opakovatelnost měření. Tento typ tenzometru v takové podobě byl prvně prezentován v roce 1938 Profesorem Arturem Rugem (1905–2000) z MIT, za účelem detekce zemětřesení (12).

Podmnožinou odporových tenzometrů jsou polovodičové. Jedná se o stejný koncept pásky, který je nyní vyříznutý z monokrystalu polovodiče např. křemíku nebo germania, viz obr. 24. Tento materiál se difúzně znečistí jiným materiálem a nyní při mechanickém namáhání dochází ke změně pohyblivosti nosičů náboje a tím i ke změně měrného odporu tenzometru. Odpor může růst či klesat, záleží na typu znečistění. Křemíkové pásky mají šířku v desetinách mm, tloušťku v setinách mm a délku v jednotkách mm. Hlavní výhodou takových to tenzometrů je vyšší citlivost než u kovových, a to až o dva řády. Pomocí difúze nečistot lze tenzometr vytvořit přímo na deformačním tělese například na křemíkové membráně snímače tlaku (16).



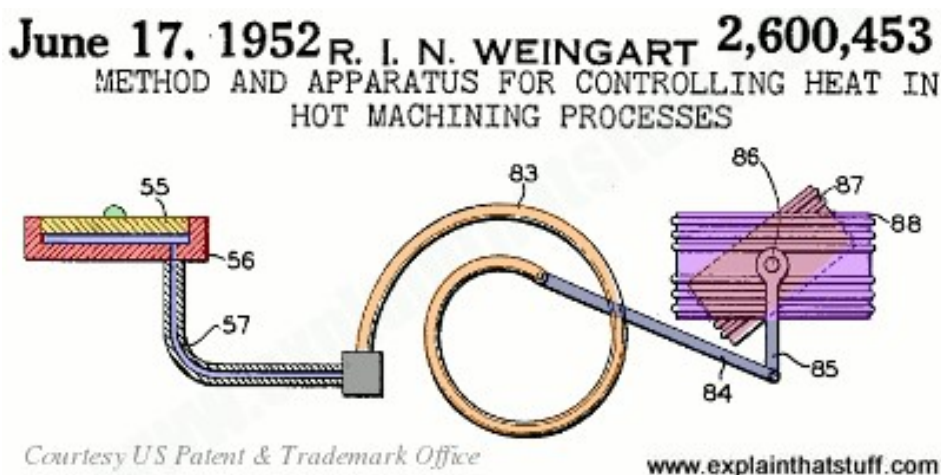
Obrázek 24: Ukázka řešení odporového polovodičového tenzometru (NASA– Glenn Research Center) (12)



Obrázek 25: Princip funkce odporového tenzometru. (17)

3.4. Hydraulické

Jeden z nedostatků tenzometrů je detekce menších změn. Tímto nedostatkem ovšem netrpí hydraulické tenzometry. I když je tento koncept na ústupu, v minulém století byly tyto tenzometry používány. V dnešní době se používají jako například průtokoměry, které pracují na stejném principu (12).



Obrázek 26: Princip funkce hydraulického tenzometru (12)

3.5. Piezoelektrické

Princip piezoelektrických tenzometrů je založený na přímém piezoelektrickém jevu. Piezoelektrická keramika je uchycena k vrstvě, která do ní přenáší napětí ze zkoumané součástky. V našem případě je přenašecí vrstvou tenký titanový U profil. Takto zatěžovaná keramika indukuje náboj, který přes elektrody připojené ke keramice prochází do malého tištěného spoje, jenž je součástí tenzometru. Tištěný spoj má za úkol signál zesílit a vyčistit. Následně se tento signál zachytává v osciloskopu, většinou v podobě vrcholku tzv. peaku (čti píku) o určité velikosti mV. Velikost toho peaku v mV lze snadno přepočítat na prodloužení přes známou citlivost senzoru.

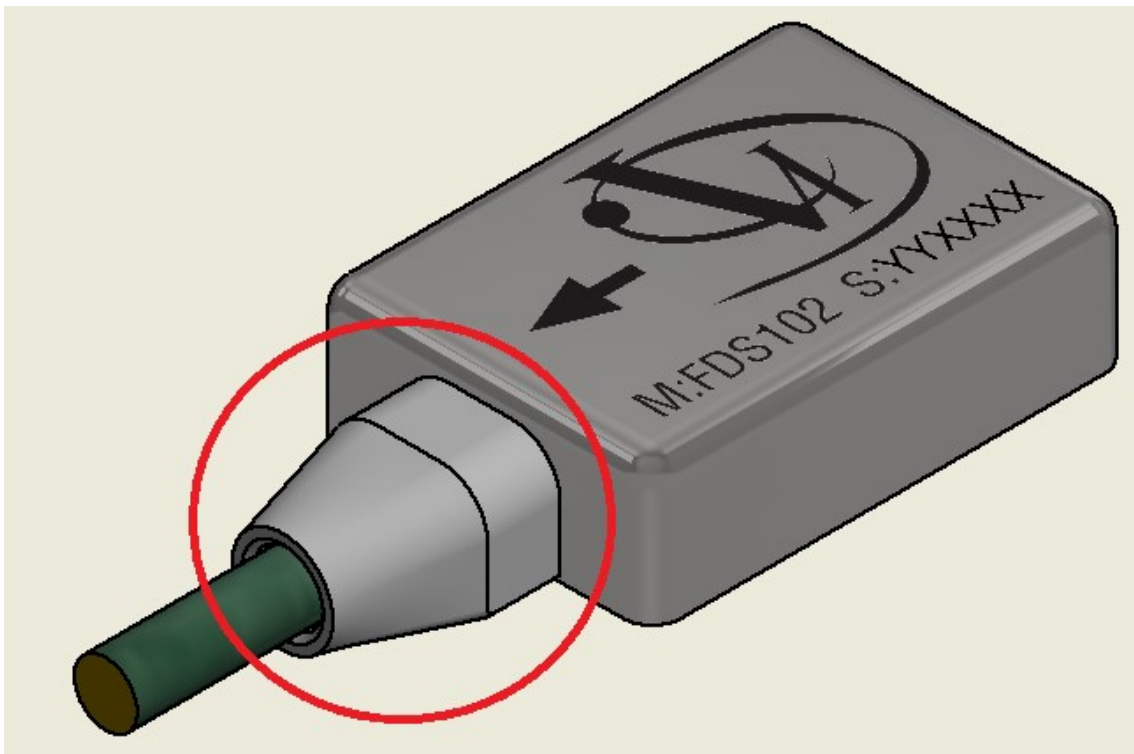
Parametr	Jednotka	Hodnota
Citlivost	mV/με	50 ± 20%
Rozsah měření	με	± 100
Frekvenční rozsah	Hz	0.5-10k
Nelinearita	-	≤4%
Příčná citlivost	-	≤5%
Teplotní rozsah	°F	-22 – 250
	°C	-30 – 121,1
Budicí napětí	V	18 – 30
Konstantní budicí proud	mA	2 – 20
Výstupní BIAS napětí	V	10 – 14
Vnější rozměry	mm	10,8 x 15,2 x 4,6
	inch	0.425 x 0.600 x 0.182
Zatěžovaný materiál	-	Titan
Materiál krytu	-	316 Nerezová ocel
Konektor	-	Integrovaný 10 – 32
Metoda připojení	-	Adhesivní



Obrázek 27: Ukázka specifikace piezoelektrického senzoru firmy Voyager Instruments, vyráběného firmou CTS Ceramics (18).

4. Návrh přípravku

V září 2019 jsem dostal za úkol návrh konstrukce přípravku pro kvalifikaci senzitivity nově připravovaného piezoelektrického senzoru. Jedná se o klasický lepený tenzometr keramikou NCE51 a titanovou základnou. Jako první se počítalo s testováním ve finální fázi výroby. V konečně podobě toho tenzometru jsou vnitřní komponenty zality polyuretanem v malém plechovém krytu. Titanová základna přesahuje kryt a polyuretan o pouhých 0,43 a bylo potřeba vyřešit měření bez lepení. Dalším důležitým faktem pro návrh nového přípravku byl přechod na druhou generaci tenzometrů. První prototypy byly navrženy k manuálnímu sestavení. Ovšem návrh bylo možno vylepšit spojením určitých součástí a zjednodušením tištěného spoje došlo k celkovému zjednodušení senzoru i jeho výroby. Jedním ze zjednodušení bylo přidání průchodky kabelu (anglicky Gland), která zajišťovala, že fixační polyuretan nevytéká ze senzoru podél kabelu.



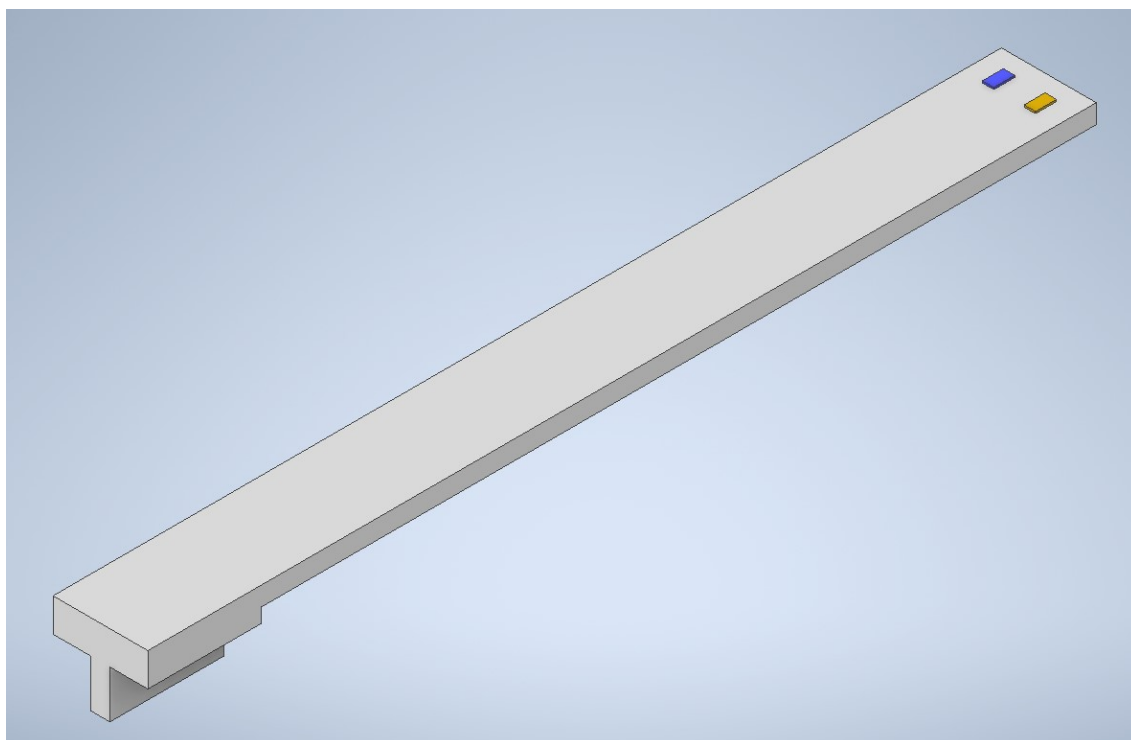
Obrázek 28: Ukázka kabelové průchodky

4.1. Měření prvních prototypů

První prototypy, které vznikly v roce 2018, se měřily pomocí prvního “zlatého” tenzometru. U “Zlatého” prototypu se, pomocí úprav tištěného spoje a dalších měření, dosáhlo požadované citlivosti, která je $50 \text{ mV}/\mu\epsilon \pm 20\%$, a umístil se pomocí lepidla na dlouhý železný nosník, který byl upnutý v horizontální poloze. Lze tedy říct, že “zlatý” prototyp je umístěn přesně podle návodu. Problém nastává s montáží produkčního kusu. Ten nemůže být přilepen klasicky, protože při jeho demontáži by mohlo dojít k poškození. Montáž se řeší pomocí speciálního vosku tzn. Bywax. Zde ale nastává problém. Vrstva Bywaxu pod titanovou

základnou není vždy stejná, nedochází tedy vždy ke stejnému transferu napětí z nosníku do piezoelektrické keramiky a tím se výsledek testu zkresluje. Test se provádí úderem ruky či gumového kladívka do nosníku a sleduje se, zda vrcholek na osciloskopu u obou tenzometrů je stejný, resp. stejně vysoký.

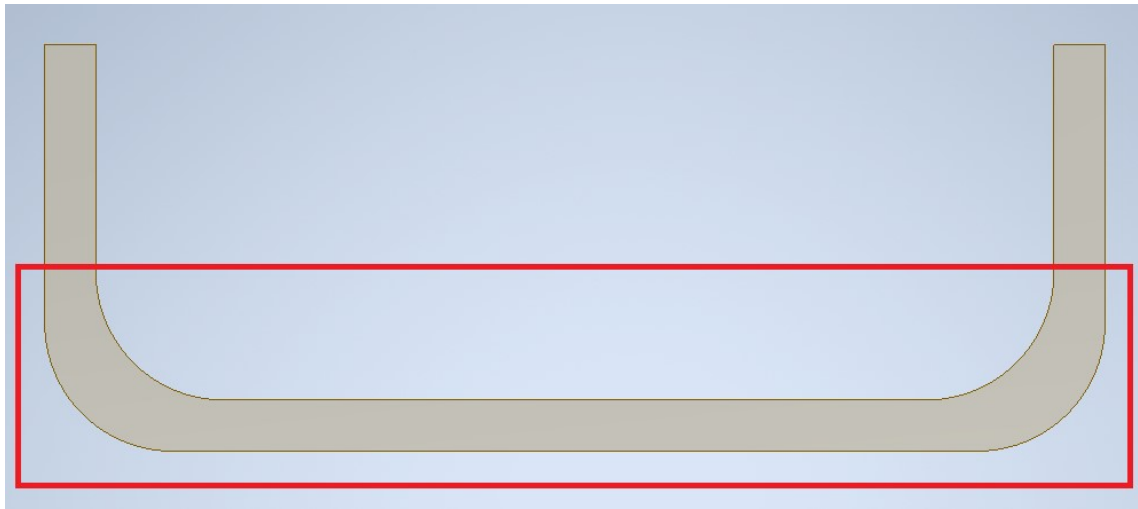
Dalším problémem je, že úder musí mít stejný důsledek na oba tenzometry. Opakovatelnost tohoto testu je tedy nedostačující. Úkolem tak bylo navrhnout přípravek, který by se vyvaroval těmto problémům a zároveň provedl test v rozmezí deseti minut. K manipulaci přípravu by měla být vybrána skupina operátorů, kteří budou zaškoleni pro používání a vyhodnocování, k obsluze však bude potřeba jen jeden.



Obrázek 29: Ukázka koncepce měření prvních prototypu.

4.2. Princip funkce

Po domluvě byla zvolena varianta pro podélný tlak na titanovou základnu. Tlak měl být veden pouze v dolní části základny, viz. obr. 30.



Obrázek 30: Titanová základna, červený rámeček vyznačuje rámcovou oblast pro tlak

V prvních fázích konstrukce se počítalo s uplatněním “zlatého” prototypu při měření. Princip by tedy zůstal stejný, změnilo by se aplikování síly na tenzometr. Později se zjistilo, že při správném navržení a použití zdroje síly, který bude tlačít na tenzometr, lze přípravek navrhnout bez “zlatého” tenzometru. Pokud budeme přesně znát sílu, s kterou se působí na tenzometr resp. napětí, které vybudí v tenzometru, jsme schopni citlivost dopočítat dle rovnice:

$$K = \frac{U}{\varepsilon}$$

standardně používaná jednotka citlivosti je $\left[\frac{\text{mV}}{\mu\text{l}} \right]$

$$\text{Kde } \varepsilon = \frac{\sigma}{E_{Ti}} = \frac{\frac{F}{S}}{E_{Ti}} = \frac{F}{E_{Ti} \cdot S}$$

K [mV/ μl]: Citlivost senzoru

U [mV]: Elektrické napětí vyvolané zkušební silou, měřeno osciloskopem

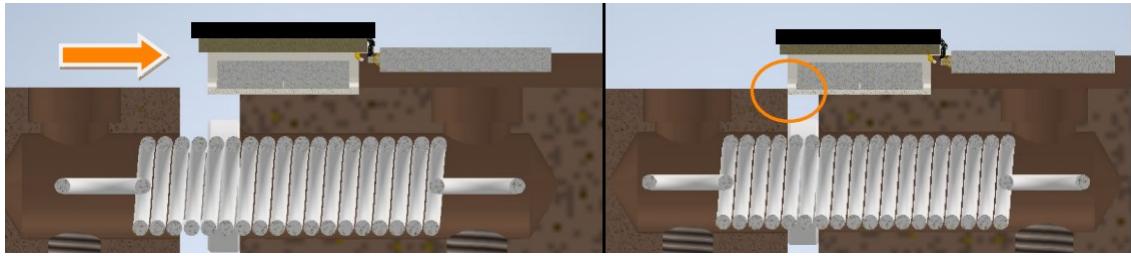
ε [$\mu\text{l} = 1 \cdot 10^{-6}$]: Poměrné prodloužení sledované součástky, které by mělo být shodné s poměrným prodloužením titanové základny. Zde je velmi silná na aplikaci a lepení. V případě zkoušky je ε pouze poměrné prodloužení titanové základny.

σ [MPa]: Napětí vyvolané poměrným prodloužením ε

E_{Ti} [MPa]: Youngův modul pružnosti v tahu, materiálová konstanta

F [N]: Síla působící a titanovou základnu

S [mm^2]: Plocha, na kterou působí síla



Obrázek 31: Ukázka principu funkce přípravku

I když lze citlivost takto vypočítat, nelze se spolehnout na správnost, vzhledem ke konstrukci a mnoha faktorům. Nicméně existuje daleko lepší a spolehlivější metoda, a to s použitím “zlatého“ tenzometru. Pokud již máme tenzometr se známou citlivostí, je možné za jeho pomoci stanovit sílu, resp. poměrné prodloužení, kterým působí přípravek na tenzometr. Umístíme-li tento tenzometr do finálního přípravku i osciloskopu a provedeme cyklus, osciloskop změří velikost vrcholku napětí při nárazu a z citlivosti lze reverzně dopočítat poměrné prodloužení dle rovnice:

$$\varepsilon = \frac{U}{K}$$

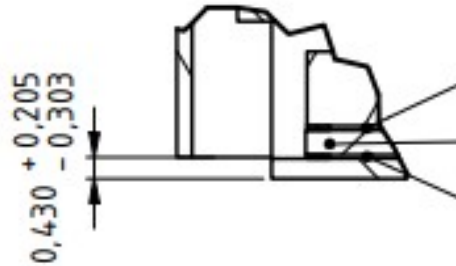
Toto řešení tedy nespolehá na “zlatý“ tenzometr, který vkládá do konstrukce problematiku rovnoměrného rozložení síly na oba tenzometry. Nicméně přípravek nyní musí mít velmi vysokou opakovatelnost, aby síla při každém cyklu měla stejnou hodnotu. Proto byl pro pohon zvolen pneumatický lis, který by měl zvládat tyto nároky.

4.2.1. Nároky na přípravek.

Jak již bylo řečeno, finální verze přípravku neobsahuje “Zlatý“ tenzometr. Přípravek musí mít velice dobře opakovatelný cyklus, co se týče síly, kterou aplikuje na základnu tenzometru. Dalším nárokem byla obsluha. Ta by měla být prováděna jedním operátorem a celková konstrukce musí klást důraz i na bezpečnost operátora, vzhledem k manipulaci s lisem. Cyklus jednoho měření by měl být kratší než 10 minut, včetně všech manipulací. Zároveň musí být konstrukce robustní, aby odolala horší manipulaci a nedala se jednoduše znehodnotit kalibrace či celá funkce. Hlavní části konstrukce by také měly být odolné vůči korozi.

4.3. Verze 1A až 2C

Všechny tyto verze byly navrhovány na finální podobu tenzometru, tenzometr s krytem a zalitý polyuretanem. Přípravek musí být navrhován na přesah titanové základny od krytu, který je $0,430^{+0,205}_{-0,303}$ mm (původně kótováno v palcích).

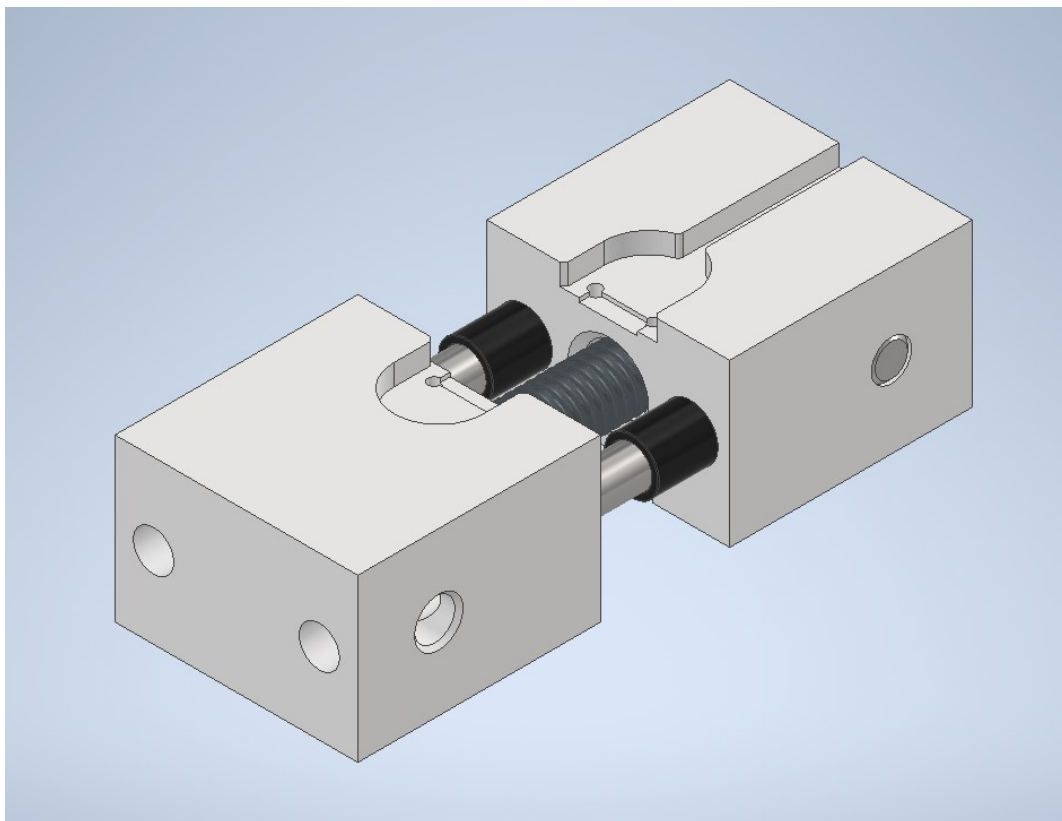


Obrázek 32: okótovaný přesah základny vůči krytu. Viz příloha: R1225-3 V1A Assembly

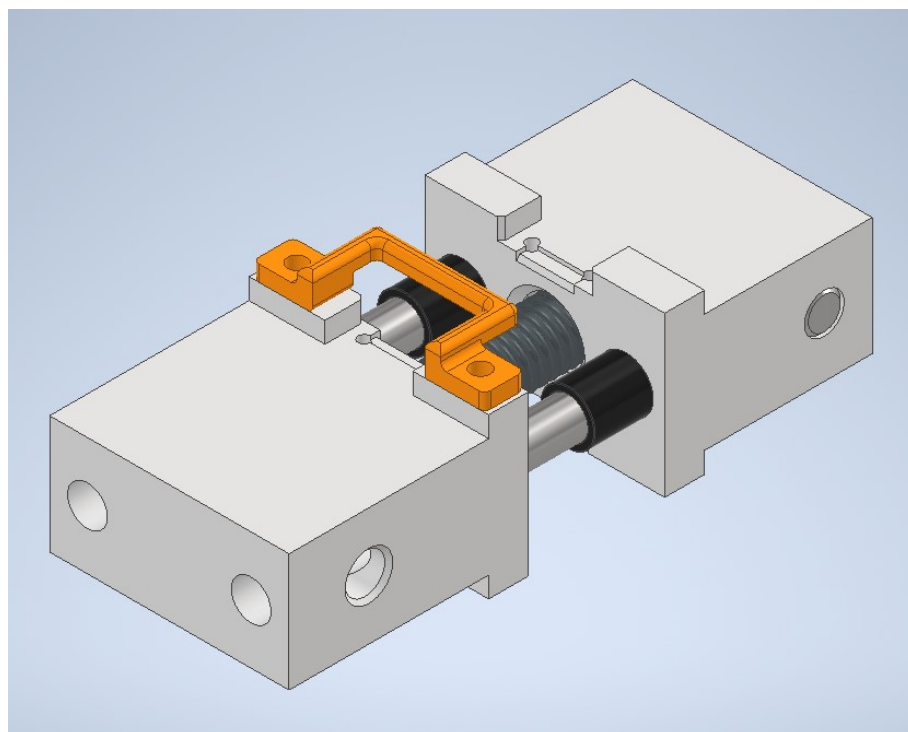
Realita je ovšem taková, že poměrně hodně viskózní polyuretan často není zarovnaný s krytem, ale přesahuje ho. To způsobuje, že i tak malý prostor pro aplikaci síly se ještě zmenší. To může způsobit vyskočení senzoru z přípravku v okamžiku aplikace síly, z tohoto důvodu je na většině těchto verzí navržen 3D tištěný držák. Na všech verzích je v konstrukci umístěna tažná pružina, ta má tři úkoly. Prvním je udržení senzoru na místě, aby nevypadl z přípravku. Druhým úkolem je korekce vložení a celkové zajištění správného dosednutí aplikačních ploch a posledním třetím úkolem je odstranění rezonance při aplikaci síly. Při dopadu lisu na přípravek má součástka, na kterou dopadá tendenci odskakovat od tenzometru a následně tím způsobovat jakousi kvazi rezonanci. Ta se projevuje na osciloskopu více než jedním vrcholkem. První vrchol bývá největší, následné se zmenšují. Tažná pružina sice tento problém zcela neodstraní, nicméně ho znatelně potlačí a redukuje množství rezonančních vrcholků.

Přípravek se vždy skládá ze dvou částí, z nichž jedna je pevná, do které se vkládá senzor a druhá je pohyblivá. Pohyblivá část tzv. Impacter je umístěna na z pravídla dvou hřídelích menšího průměru, po kterých se pohybuje.

Verze 1A a 1B se od ostatních liší nejvíce. Zde se počítalo s umístěním senzorů seshora a zespoda. Přípravek je tedy souměrný. Každý přípravek je opatřen dorazy v podobě soustružených podložek z teflonu či silonu. Tyto podložky zabraňují kontaktu impacteru se senzorovou základnou. Až na verzi 2C, 3A a 3B, zde se experimentovalo s dorazy v podobě pera, které je rozděleno na půl viz obr. 37. Cílem toho nápadu bylo ušetřit náklady. Nicméně od tohoto nápadu se upustilo, vzhledem k možnosti, poškození pevné základny kovovými pery a složitosti řezání a lepení.

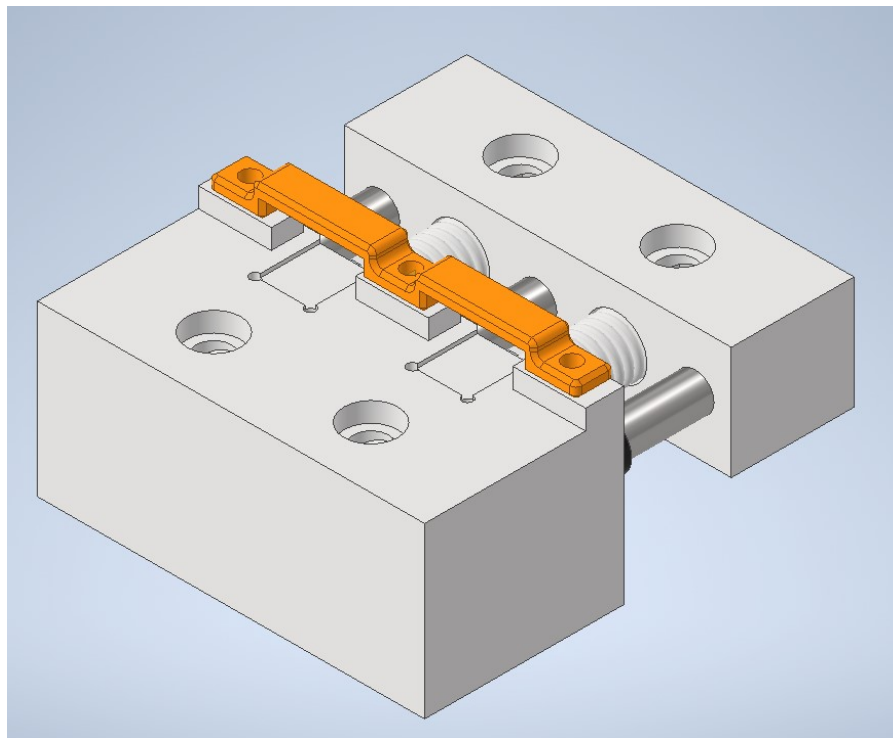


Obrázek 33: Verze 1A, oboustranné řešení

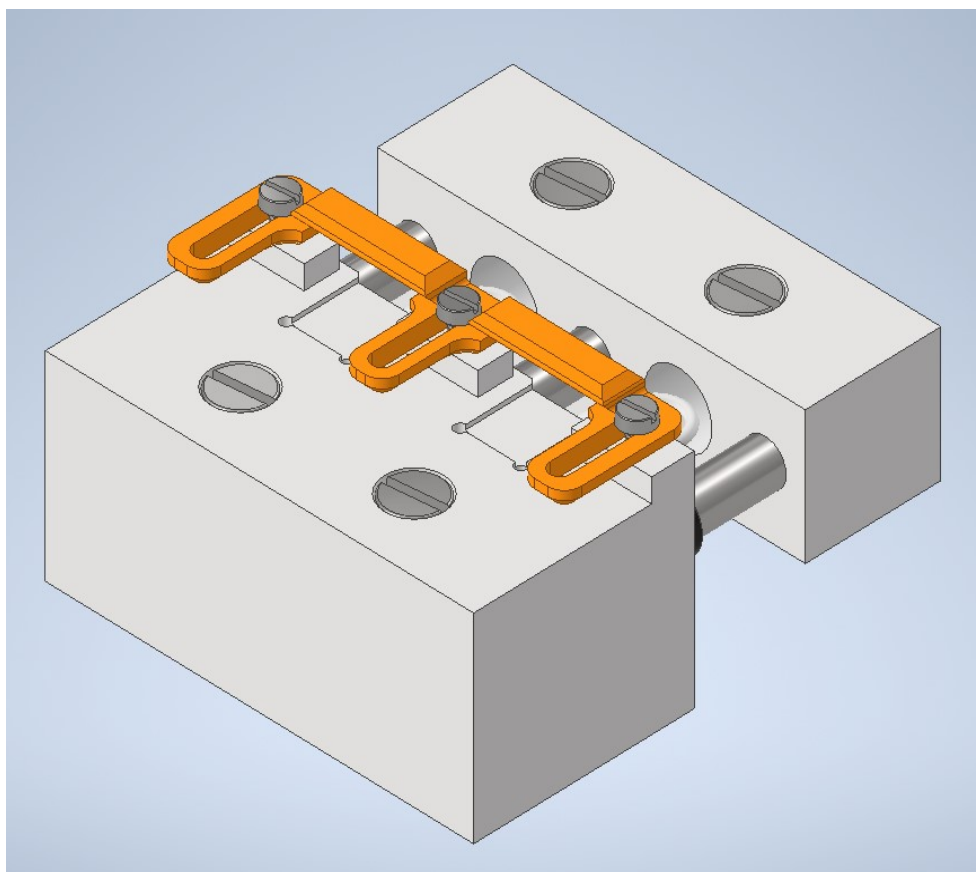


Obrázek 34: Verze 1B

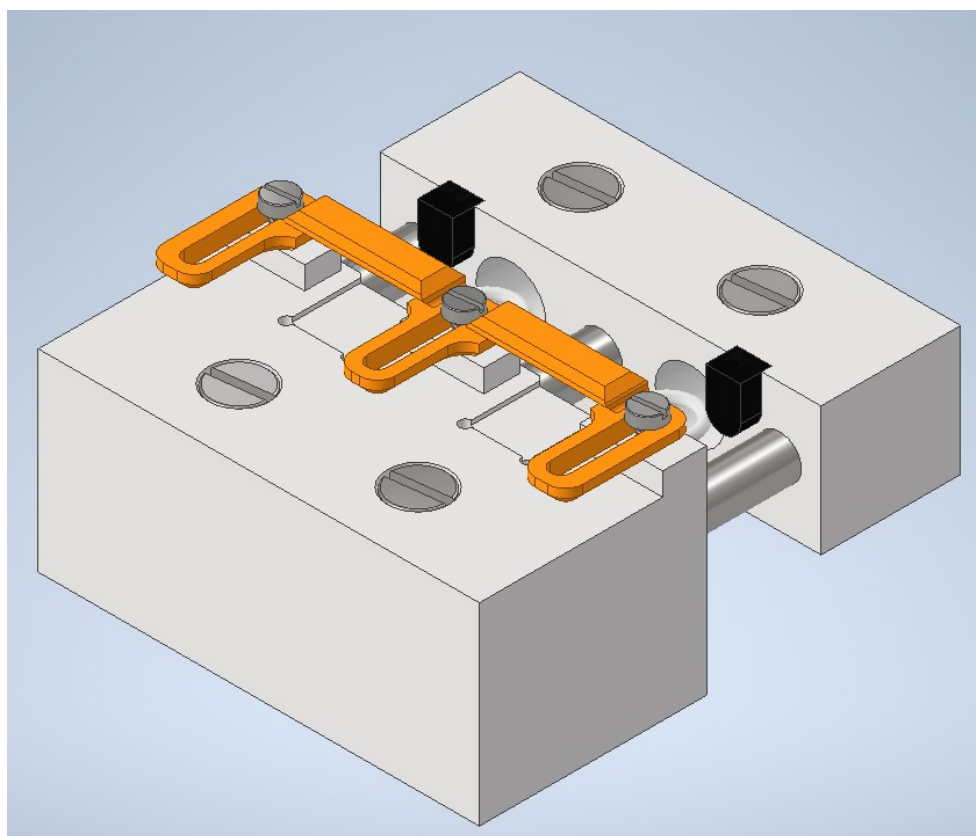
Verze 1B je pouze opatřena jednoduchým 3D tištěným držákem. Od verze 2A jsem zvolil klasičtější horizontální řešení. Nyní jsou tedy “Zlatý“ tenzometr a testovaný tenzometr umístěny vedle sebe. Jsou tedy zapotřebí dvě pružiny a tři vodící hřídele. Impacter už nyní není souměrný a u sensorové základny se zvětšila plocha pro umístění senzoru, aby těžiště bylo na podložce a senzor nevypadával. Verze 2B disponuje novým designem výsuvného přidržovače senzoru.



Obrázek 35: Verze 2A



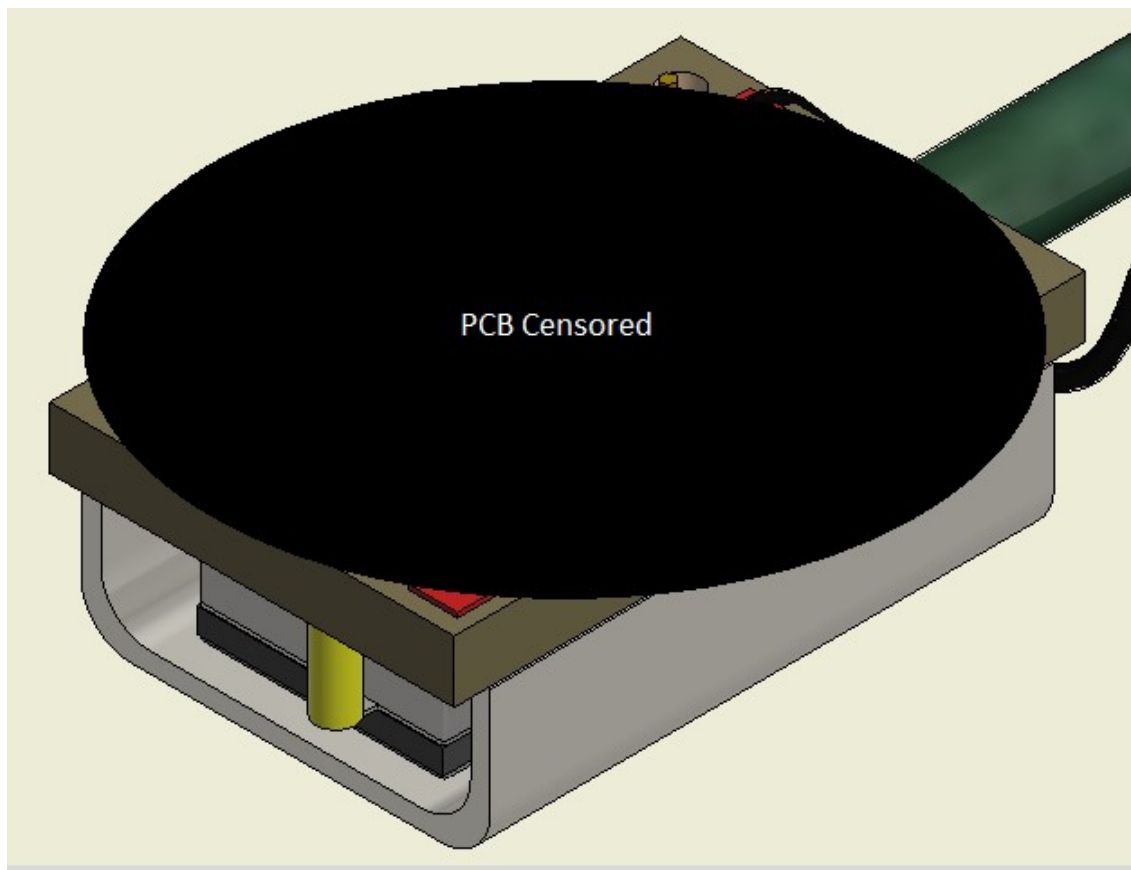
Obrázek 36: Verze 2B s výsuvným přídržovačem.



Obrázek 37: Verze 2C, oproti 2B disponuje jiným řešením zarážek

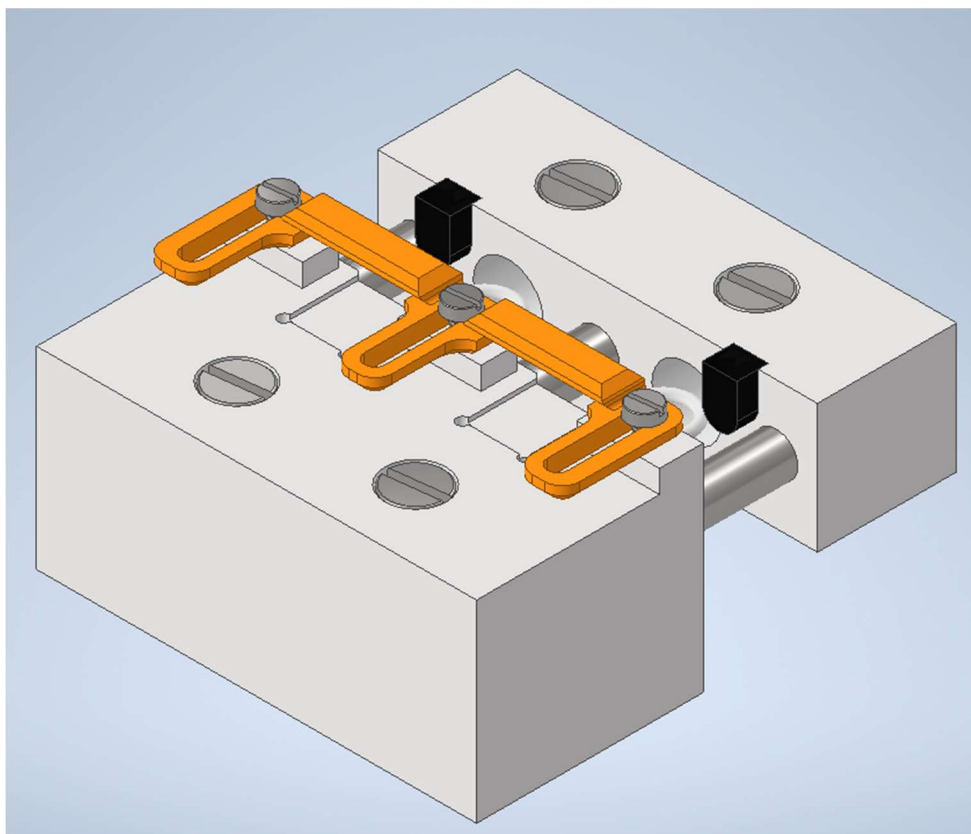
4.4. Verze 3A až 5C

Verze 3A až 5C jsou konstruovány pro senzor bez krytu a polyuretanu. K tomuto řešení se přistoupilo z procesních důvodů. Senzor bez krytu lze ještě upravovat. Tenzometr, který nebude vyhovovat specifikacím lze tedy opravit. Z důvodu absence polyuretanové fixace bude i realizace přípravku jednodušší.

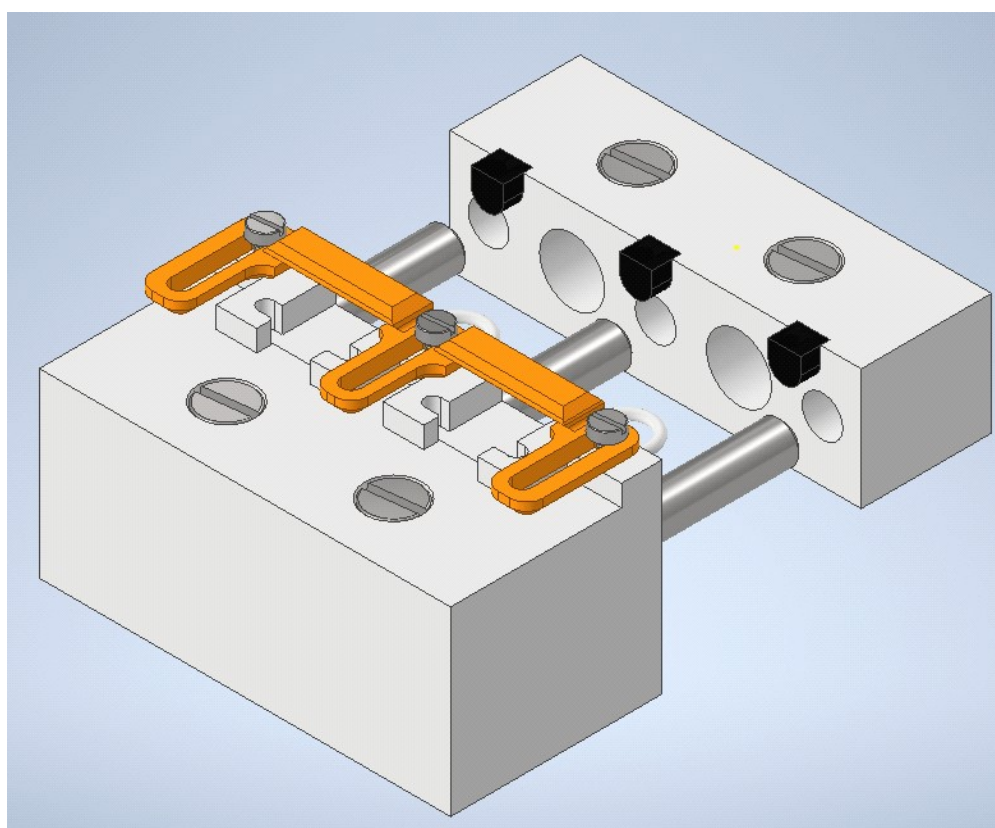


Obrázek 38: Ukázka stavu senzoru bez krytu protestování (Tiskový spoj cenzurován)

První verze 3A je pouze verze 2C upravena pro senzor bez krytu. Impacter má pouze lehce jinou výšku. Verze 3B experimentuje s jiným tvarem základací roviny pro snazší obrábění.

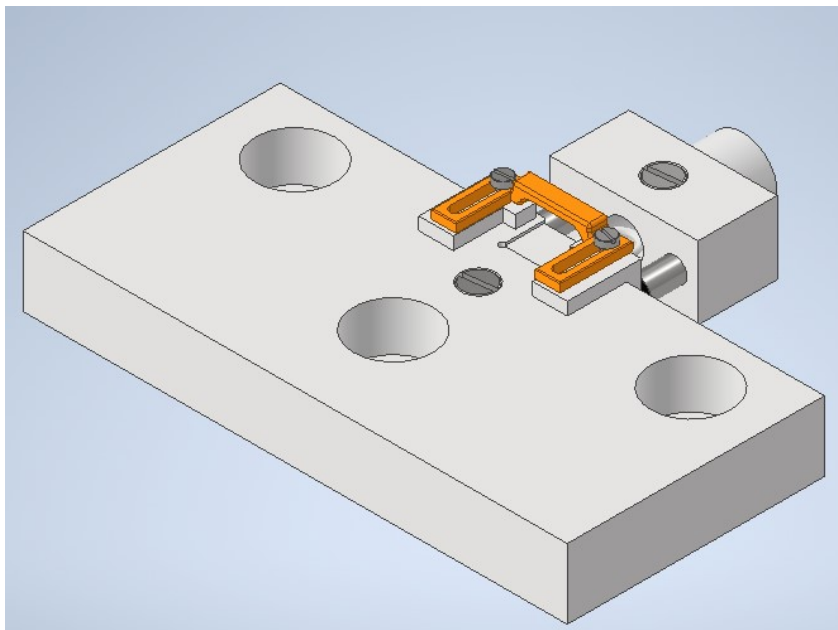


Obrázek 39: Verze 3A pro senzor bez krytu

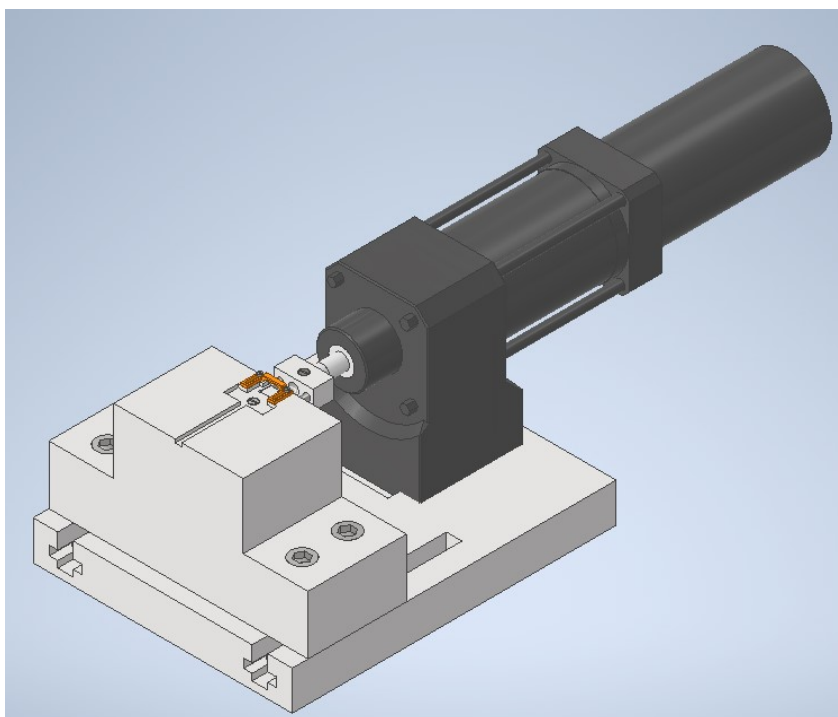


Obrázek 40: Verze 3B

Bylo jasné, že konstrukce nemá dostatečnou váhu a robustnost, aby vydržela náraz lisu. Bylo nutné ji spojit s větší základnou či jinou konstrukcí pro získání potřebné váhy a propojení s lisem. Verze 4A byl první prototyp, který měl vyřešené uchycení pevné základny na jinou konstrukci. Verze 4B vyřešila i obavy z nedostatečné tuhosti a zároveň byla vybrána i řada lisů vhodná pro toto použití. Ve verzi 4B tedy přibyla velká montážní základna, který obsahuje uchycení jak pro lis, které je pevné, tak pro přípravek, u kterého lze regulovat vzdálenost od lisu. Regulace vzdálenosti byla přidána pro možnost odladění chodu v závislosti na provozním zdvihu lisu.

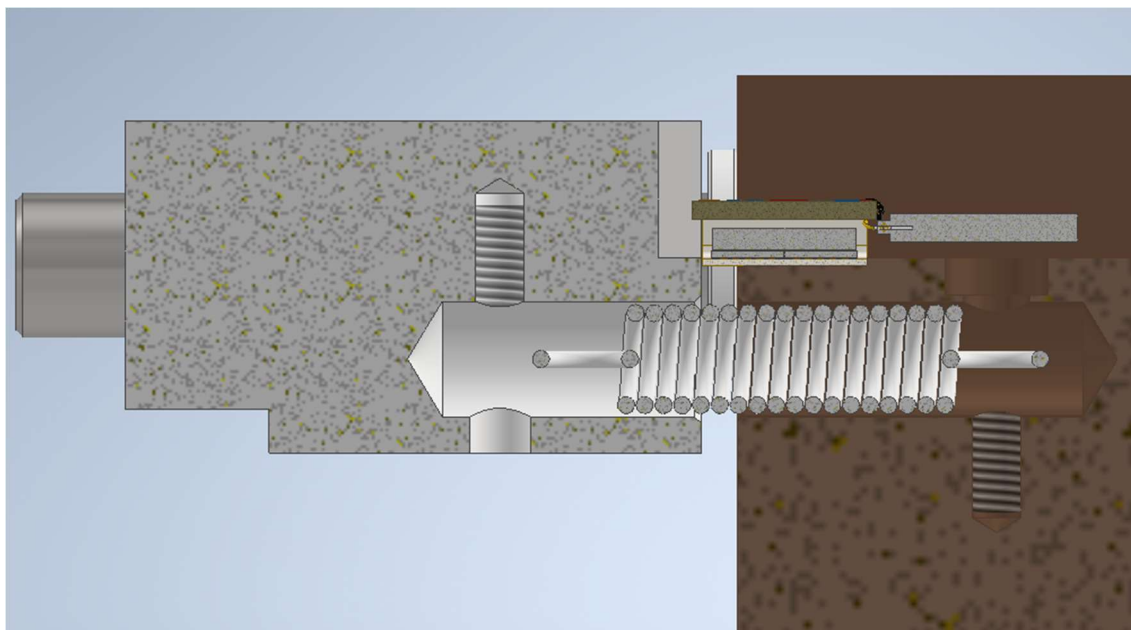


Obrázek 41: Verze 4A, pevná základna pro uchycení

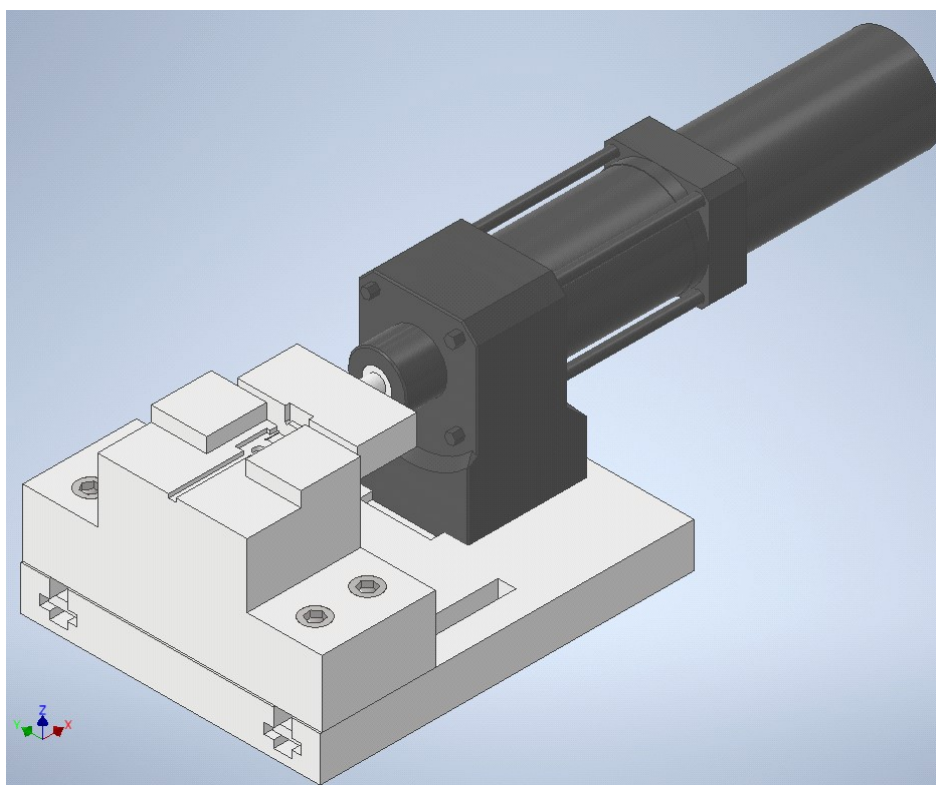


Obrázek 42: Verze 4B s Lisem Schmidt

Největší změna přichází s verzí 5A, do této verze impacter narážel na tenzor hranou, která byla cca 7,4 mm nad středem vodících hřídelí. To mohlo způsobovat zpříčení impacteru, tím větší odírání a celkově mohl tento fakt podporovat vyskakování senzoru. Verze 5A má upravený impacter a základnu tak, aby síla působila na spojnici mezi středy hřídelí, vše tedy působí v ose.



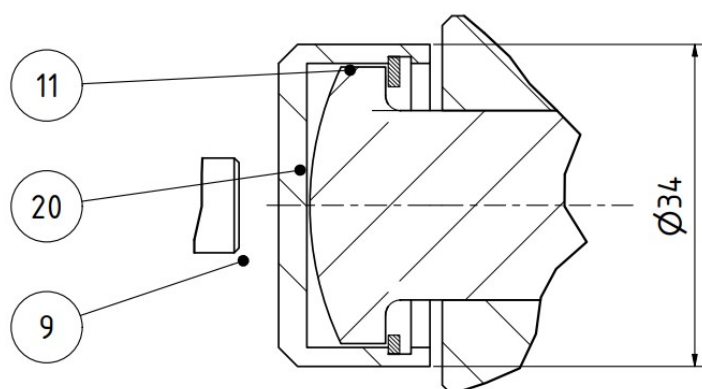
Obrázek 43: Řez verzí 5A, ukázka řešení působení síly v ose



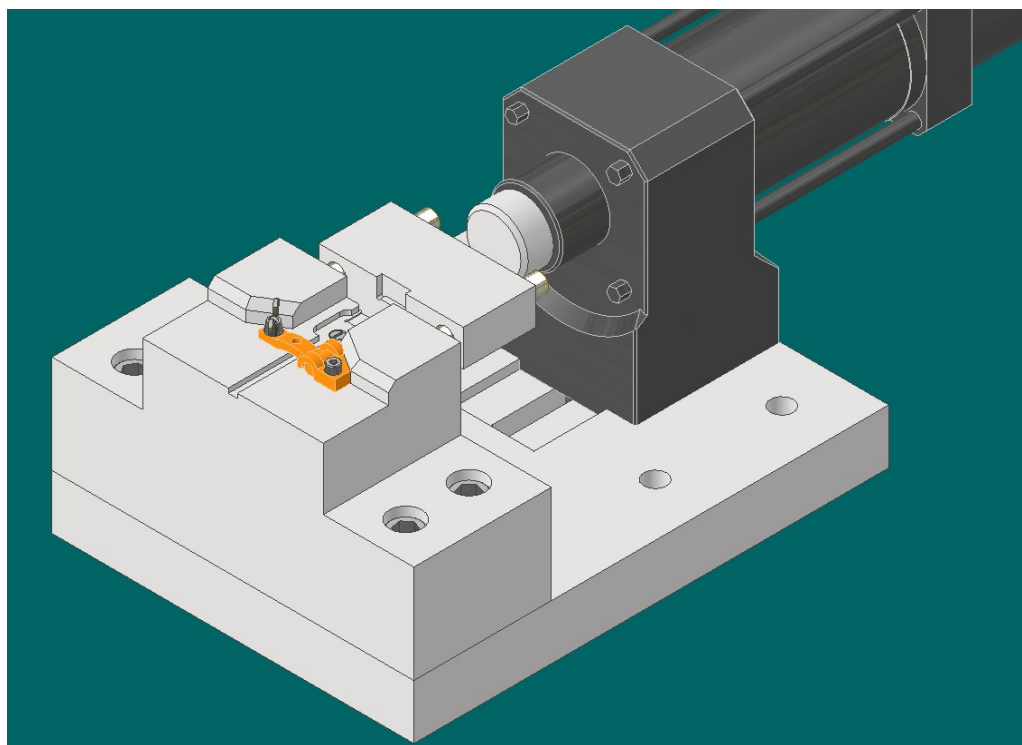
Obrázek 44: Verze 5A s působením síly v ose

Verze 5B má upravenou montážní základnu tak, že nyní posuvný lis a přípravek zůstává na místě. Zároveň jsou na montážní základně přidány čtyři díry pro případnou montáž například ke stolu. Další úpravou je tak tzv. Pusher, jedná se o soustavu tří součástek, které se upínají do lisu a přímo tlačí na impacter. Řešení je převzato z uzavírání kuželek v armaturách. Hlavním cílem pusheru je eliminace případných vyosení a naklonění v soustavě, zároveň díky němu lis tlačí na soustavu pouze jedním bodem, to napomáhá opakovatelnosti celého cyklu. Poprvé se také na verzi 5B objevuje přídržovač kabelu. Kabel tohoto tenzometru je velmi tuhý, vznikla proto obava, aby kabel neovlivňoval uložení senzoru.

L (2 : 1)



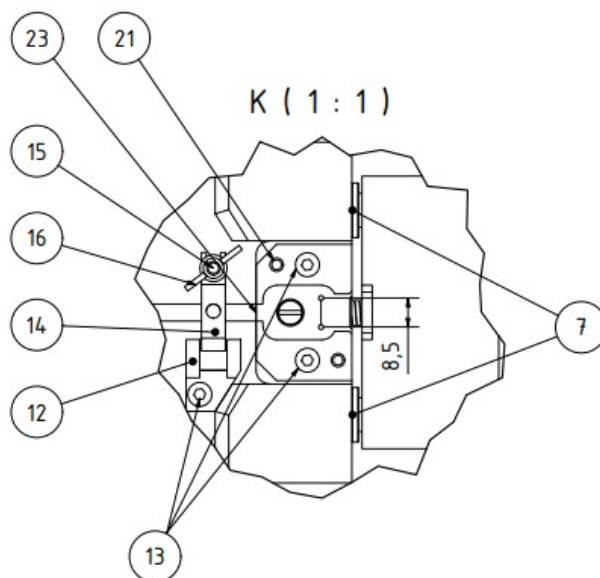
Obrázek 45: Detail L výkresu R1225_01_Assembly (V5B) ukázka konstrukce pusheru



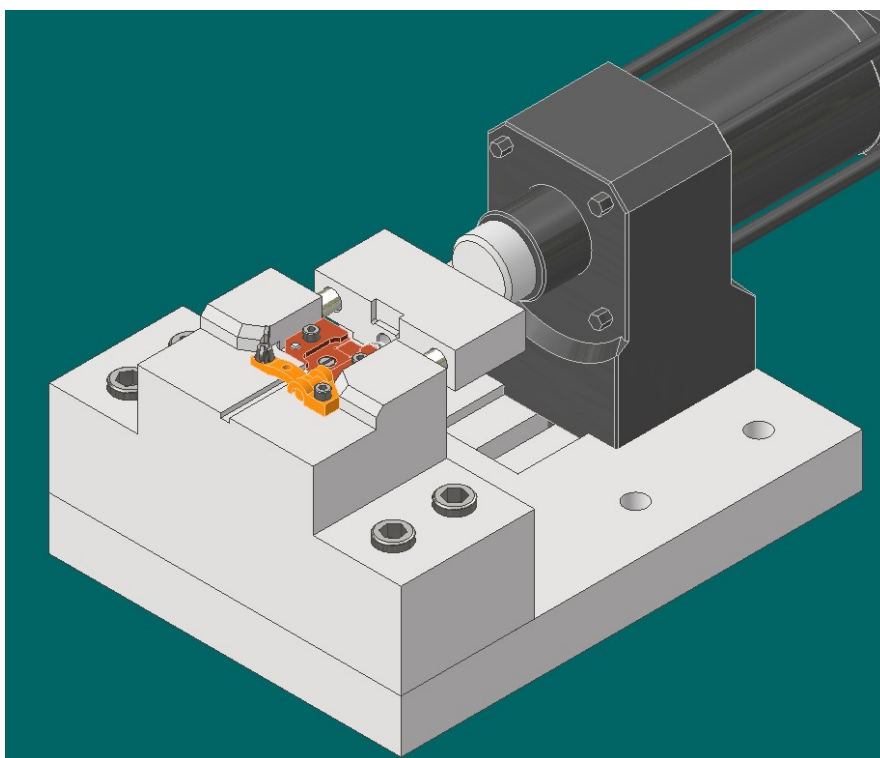
Obrázek 46: Verze 5B

Verze 5B je finální verzí, která byla schválena pro výrobu. Více v kapitole 4.6.

Verze 5C je unikátní ve své vyměnitelné základně pro usazování senzoru. Ta je usazena v přípravku pomocí dvou středících čepů a dvou šroubů. Důvodem byla snazší iterace v případě neúspěchu přípravku. Bohužel toto řešení snižuje tuhost celé konstrukce. Tato verze byla naceněna na stejnou částku jako verze 5B, na základě nižší tuhosti se od této varianty ustoupilo.

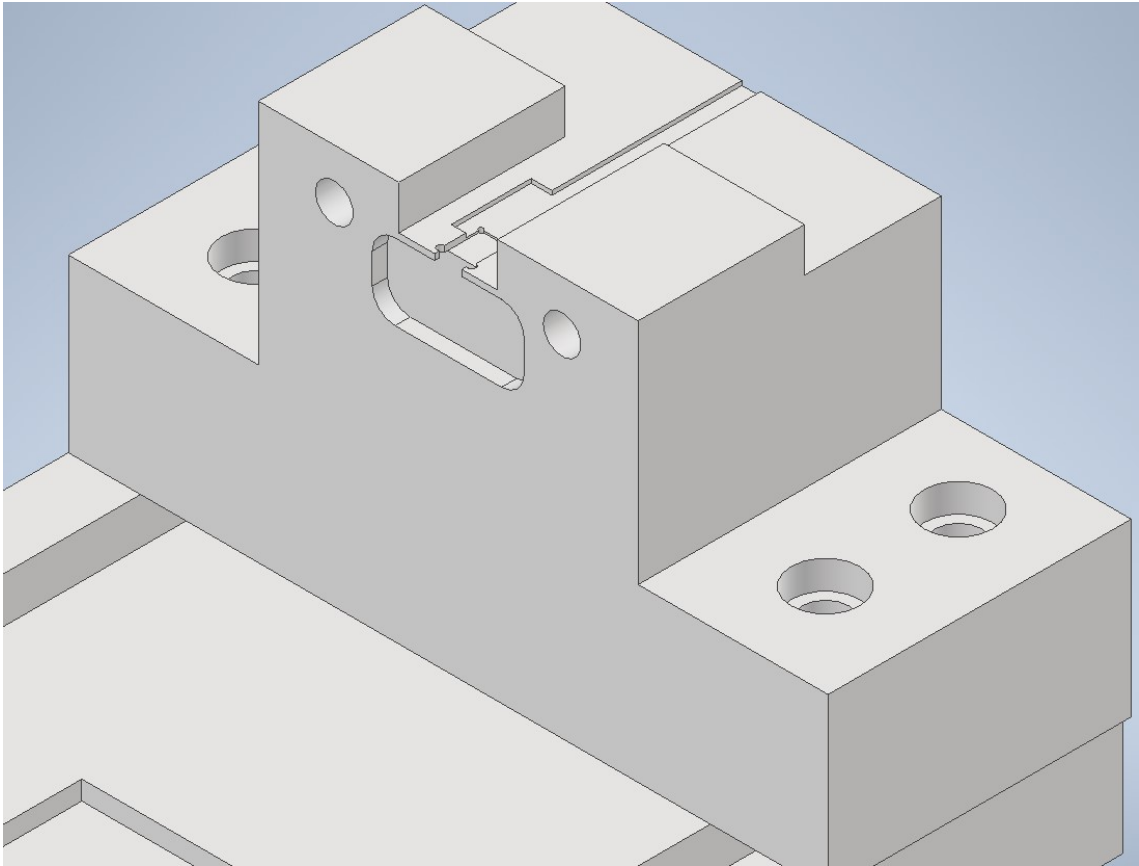


Obrázek 47: Detail K výkresu R1225_01_Assembly (V5C) pro ukázkou konstrukce vyměnitelné základny pro uložení senzoru



Obrázek 48: Verze 5C s vyměnitelnou základnou pro senzor

Verze 5J je experimentální verze obsahující pouze pevný přípravek, který je přepracován do nové podoby v oblasti zakládání senzoru. Od této varianty se upustilo z důvodu složitosti a horší aplikace síly na senzor.



Obrázek 49: Senzorová základna verze 5J

4.5. Výběr lisu

K přípravku byl vybrán lis značky SCHMIDT Technology. Od této značky již v minulosti firma CTS Ceramics odebírala. Lisy jsou vysoké kvality a v produkci s nimi není problém. Maximální pracovní tlak 6 Barů koresponduje se 7 barovými rozvody ve výrobní hale. Velkou výhodou těchto lisů je možnost regulace síly pomocí pracovního tlaku. Spojíme-li lis s regulačním ventilem, můžeme regulovat jeho sílu zhruba do poloviny maximální, což je v našem případě velké plus. Pro rámcový výpočet potřebné síly lisu byl použit maximální možný rozsah senzoru tedy $\pm 100\mu\epsilon$ a hodnota Youngova modulu pružnosti pro titan 105-120 GPa (19). Výpočet byl stavěn pro maximální možnou sílu, pak se Youngův modul pružnosti rovná 120Gpa a poměrné prodloužení $100\mu\epsilon$, plocha titanové báze byla měřena pomocí softwaru Inventor a její hodnota je $5,544\text{mm}^2$.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \rightarrow F = \sigma \cdot S$$

$$F = E \cdot \epsilon \cdot S = 120 \cdot 10^9 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 5,544 \cdot 10^{-4} = 6,6528\text{kN} \cong \mathbf{6,65\text{kN}}$$

Dle výpočtů byly zvoleny dva lisů s maximální možnou silou 1,6kN a 4,2kN (Type 20 a Type 23).



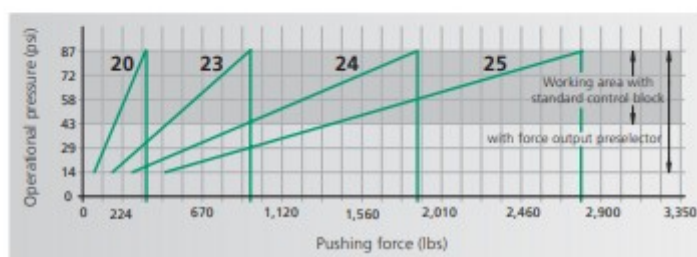
Press Type 20



Press Type 23



Pneumatic Cylinder with piston and magnet kit for ram position via cylinder switch.

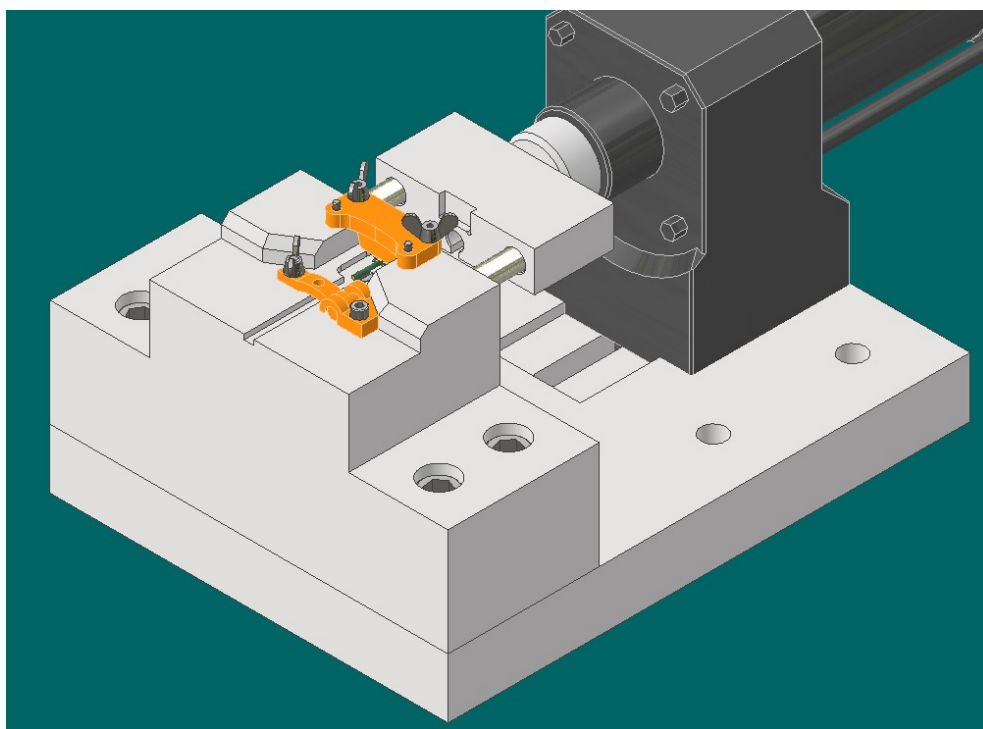


Obrázek 50: Ukázka vybraných lisů a graf jejich pracovního prostoru (20)

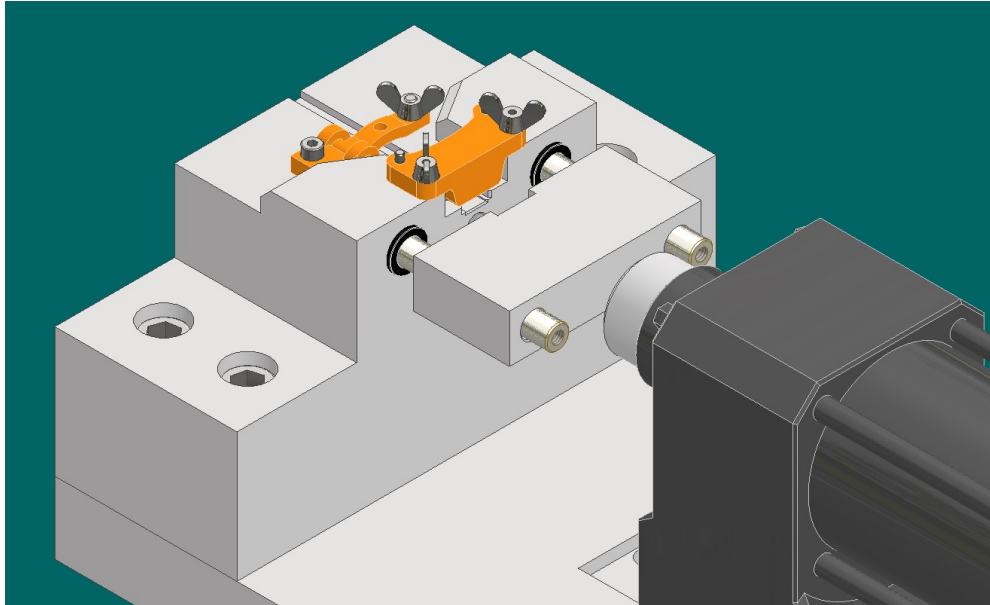
4.6. Finální verze

Finální verze určená pro výrobu je 5B. Na základě vyšší tuhost a upraveného impacteru, který aplikuje sílu v ose vodících hřídelí, dále kvůli jednoduchosti montáže a posuvnému lisu. Po návržení veškerých potřebných tolerancí bylo potřeba konzultovat výrobu. Rozhodli jsme se pro firmu VVP-Martin s.r.o. Firma má zkušenosti s jemným obráběním, konstrukcemi nástrojů pro menší lisy atp. Po konzultaci s touto firmou byl zvolen materiál, a to ocel ČSN třídy 19 s následnou nitridací kritických částí. Nitridaci provádí firma Bodycote HT, s.r.o., se kterou firma VVP-Martin spolupracuje.

Při navrhování přípravku bylo vždy drženo v paměti, aby celý přípravek byl dobře obrobitelný. Nebyly voleny zbytečně složité tvary. Při obrábění jsou radiusy voleny dle přepokládaného poloměru nástroje a hrany jsou navrhovány dle chodu nástroje. Druhou důležitou součástí jsou tolerance. Přesně tolerovány jsou pouze funkční plochy, tolerance jsou voleny dle potřeby použití. Nefunkční plochy jsou tolerovány nízkými požadavky například pro drsnost z důvodu hrubování. Pro 3D tištěný přídržovač kabelu je volena jedna z vrchních hran jako pojistka proti protáčení. Následně je přídržovací část na kloubu a přichycena křídlovou matkou, pro rychlou montáž a demontáž. Křídlové matky jsou zvoleny i pro úchyt přídržovače senzoru. Šrouby u těchto matek jsou zkráceny k rychlejší demontáži, vzhledem k charakteru přídržovače není nutné mít šrouby ve větší délce a vyšší nosnost závitu.



Obrázek 51: Finální verze 1/2



Obrázek 52: Finální verze 2/2

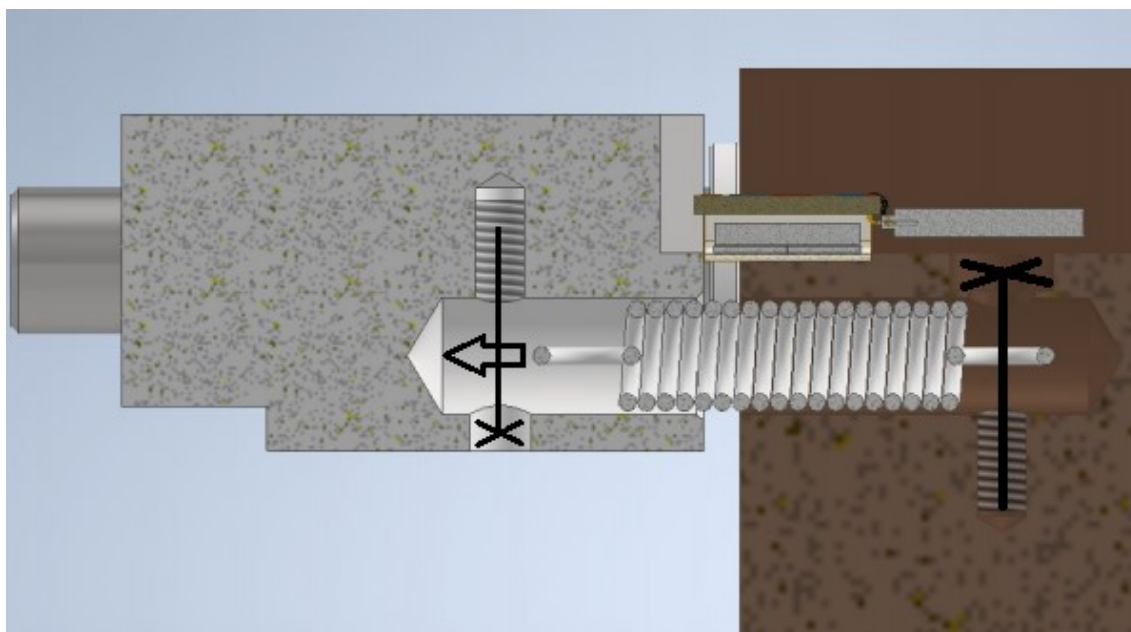
4.6.1. Montáž a demontáž

Při navrhování každé sestavy je potřeba myslet na smontovatelnost. Pokud sestava nebude smontovatelná, nelze ji použít. V přípravku jsou dvě stěžejní místa, která bylo potřeba vyřešit, uložení vodicích hřídelí a montáž vratné pružiny. Vodicí hřídele měly mít v senzorové základně pevné uložení, oproti tomu v impacteru mělo být volné uložení s vyšší přesností. Zároveň muselo být umožněno hřídele demontovat ze základny pro případ, že by přípravek nebyl funkční a bylo by potřeba navrhnout novou senzorovou základnu. V rámci dobré obrobitelnosti by bylo výhodnější zachovat jeden průměr.

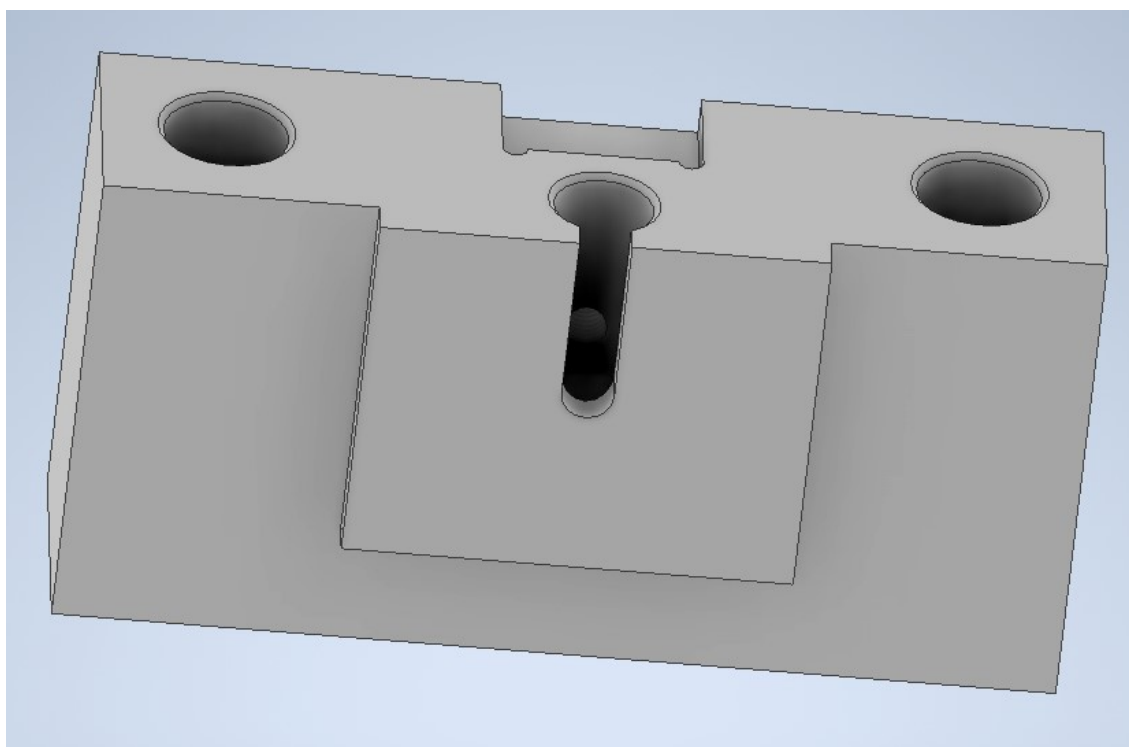
Pro přesnější uložení a lepší funkci jsem zvolil lisování malou silou, tedy uložení přechodné, u kterého byla zároveň kvůli obrobitelnosti tolerována díra v tolerančním poli H. Uložení senzorové základny s vodicí hřídelí jsem zvolil $\text{Ø}10\text{H}7/\text{r}6$, jenž je smontovatelné zatlačením rukou či gumovým kladivem. K tomu bylo potřeba navrhnout uložení pro vodicí hřídele a impacter a to konkrétně $\text{Ø}10\text{D}8/\text{r}6$. Obě uložení jsou zvoleny za pomoci strojírenských tabulek a přepočtu dle nejběžnějších uložení (27).

Pro rozebrání přípravku bylo potřeba dodělat demontážní prvek hřídelí, viz. kapitola 4.6.1. I když jde o uložení přechodné s lisováním malou silou, je potřeba tento prvek vytvořit. I při uložení s montáží pomocí gumového kladiva, lze dosáhnout síly, při které prvek nelze rozebrat pouze rukou. Navíc je vždy možnost špatného obrábění, kdy se může vodicí hřídel vzpříčit či zaseknout. Dále může být nutnost přípravek rozebrat po delší době ve výrobě, kde je vystaven spouště chemickým faktorů včetně kyselin a může tak být zarezlý. Jako nejjednodušší variantu jsem zvolil vnitřní závit na konci hřídelí. Pak bude možnost na hřídel připojit například šroub či upravený stahovák řemenice.

Druhým stěžejním místem je montáž tažné vratné pružiny. Nejen že pružina musí být v tahu při vložení senzoru, ale měla by být v mírném tahu (prodloužení $\Delta l \approx 1-2\text{mm}$) i při dosednutí na silonové dorazy. Jako řešení jsem zvolil upnutí pomocí šroubů na obou stranách, pružina musí být vybavena oky dostatečného průměru pro průchod šroubů. Uložení v impakteru je řešeno pomocí částečného profrézování dna u díry pro pružinu. Vznikne tak drážka, kterou se dá prostrčit šroub na kterém je zavěšena pružina a na konci drážky je (kolmo na drážku) umístěn závit, viz obr. 53 a 54.



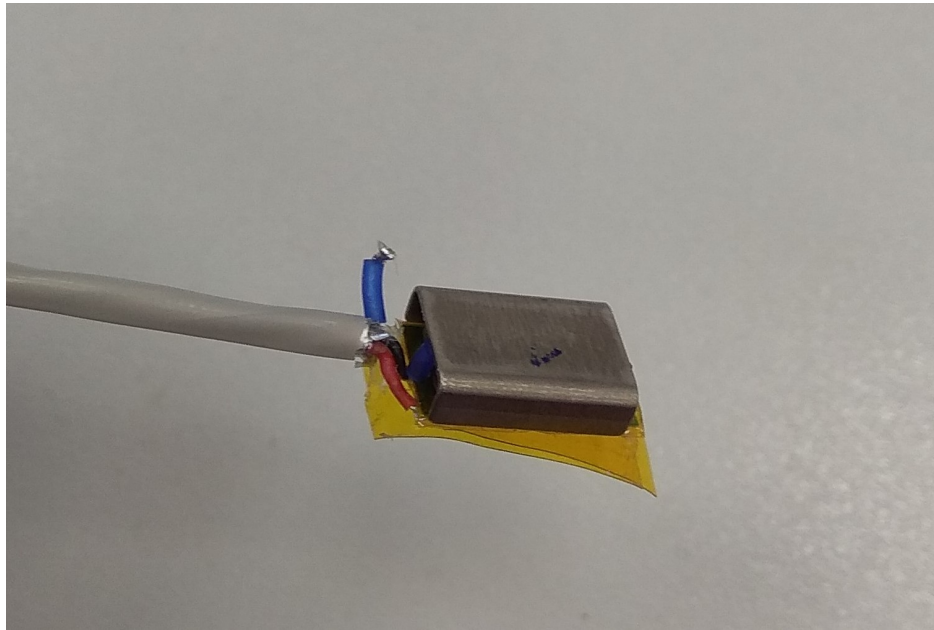
Obrázek 53: Náčrt principu uložení vratné pružiny.



Obrázek 54: Spodní pohled na impakter, ukázka montážní drážky.

4.6.2. Návštěva VVP-Martin- první zkoušky

Vzhledem ke složitosti obrábění a funkce přípravku jsme byli pozváni na kontrolu přípravku před nitridací. Pro návštěvu a odzkoušení jsme potřebovali senzor ve zkušební fázi, tedy bez krytu, polyuretanového zalití a kabelové průchodky. Dále samotnou titanovou základnu senzoru, osciloskop a jeho napájení.

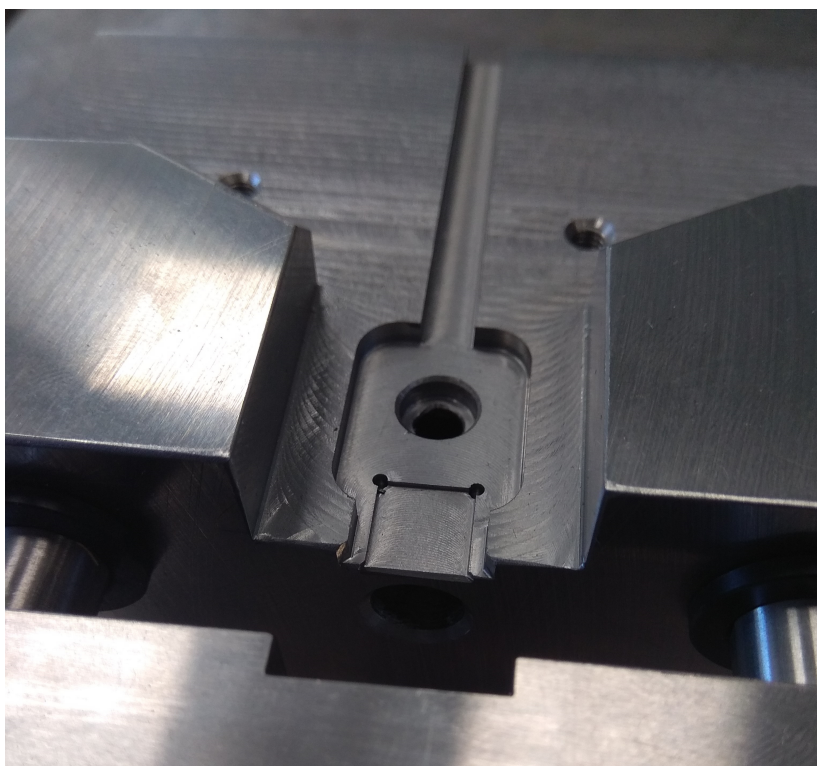


Obrázek 55: Podoba senzoru pro první zkoušku

Jedním ze základních cílů návštěvy bylo odzkoušení pozice senzoru a jeho doléhání na impacter. Mělo by být zajištěno co nejpřesnější dosednutí, aby se síla z lisu rovnoměrně rozložila. Dále měl být zajištěn chod přípravku, zdali se impacter při pohybu nikde nezadrhává a zároveň je uložení přesné a nedochází k příčnému pohybu. Samozřejmě musela být zkontrolována i celková kvalita obrábění. Na obrázku 57 je vidět rozdílné zpracování funkční a nefunkční plochy.



Obrázek 56: Zpracování přípravku



Obrázek 57: Zpracování prostoru pro uložení senzoru

Zpracování přípravku se jeví na velmi dobré úrovni. Po vybalení potřebného materiálu jsme přistoupili k testování. Jako první jsme do přípravku umístili samotnou titanovou základnu.



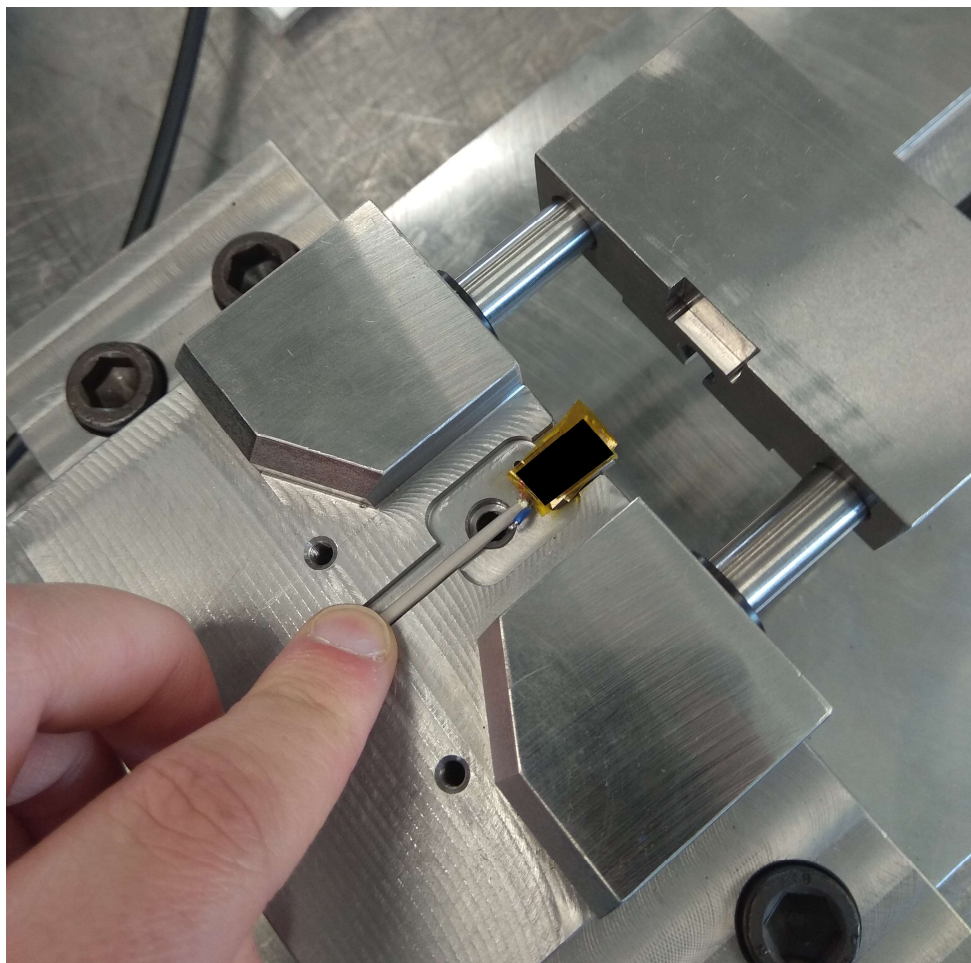
Obrázek 58: Zkouška s titanovou základnou

Prvotní zkouška proběhla v pořádku, nebyla zjištěna žádná nesouosost či špatné doléhání. Funkce tlačného zařízení byla také velmi dobrá. Při zkoumání bylo vidět, že vnitřní část doléhá do vnější se správnou tolerancí, která jí poskytuje volnost. Zároveň při natáčení bylo zjištěno, že díky kulovému zakončení vnitřní části se tlak přenáší vždy přes jeden bod.



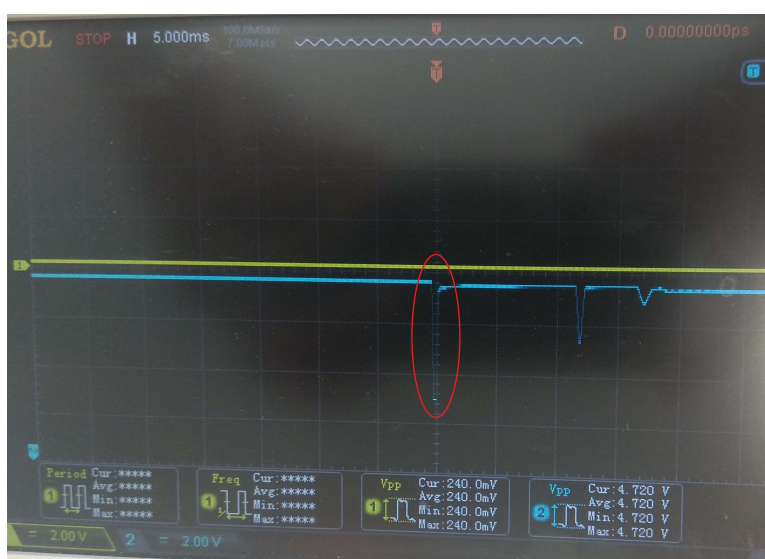
Obrázek 59: Foto obou částí tlačného zařízení.

Následoval test se skutečným senzorem. S impacterem přípravku bylo manipulováno rukou. Principem testu bylo zjistit, zdali přípravek vůbec funguje a zdali nedochází k nepříjemnostem jako třeba větší odskoky a tím následná rezonance.



Obrázek 60: Senzor vložený do přípravku.

První měření ukázalo velmi dobré výsledky. Senzor je buzený správně, nevznikají žádné větší parazitické rezonance a maximální vrcholek je velmi jasný a ostrý. První výsledek tedy ukázal maximální vrcholek a následně dva menší, které vznikají odskočením impacteru při nárazu do senzoru, viz. obr. 61.



Obrázek 61: Výsledky prvního měření zobrazené osciloskopem

Tyto dva menší vrcholky mohou být eliminovány nebo alespoň zmenšeny pomocí přídavné pružiny, která má být umístěna mezi vodící hřídele.

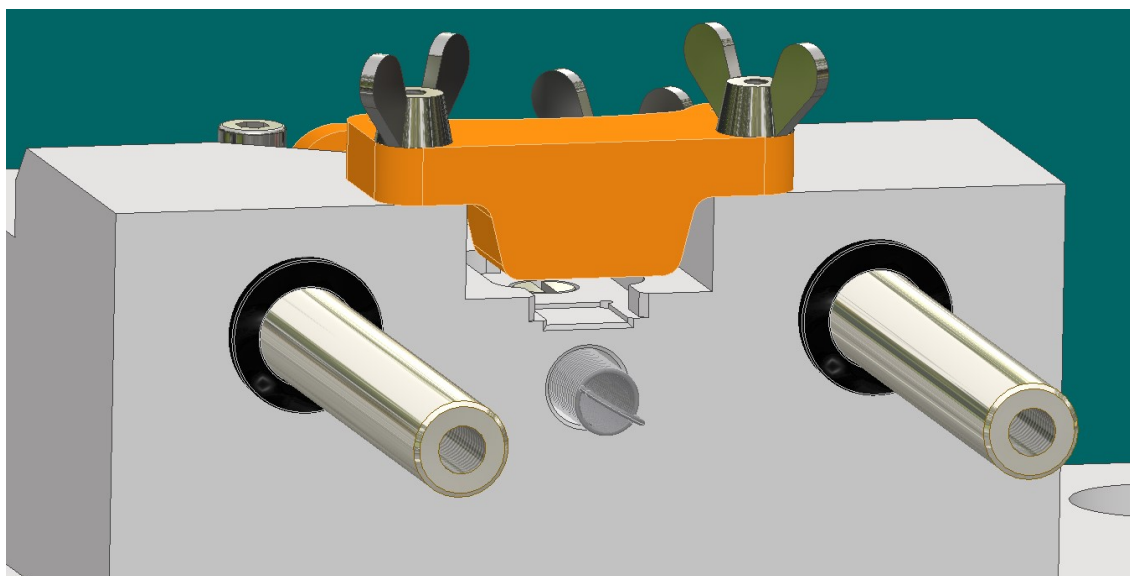
Bohužel se ale při testování objevili i nedostatky. Při doražení impacteru na senzor docházelo k vyskočení senzoru z přípravku. Mohlo by dojít k eliminaci při použití již zmíněné pružiny, tak by nyní byl impacter celou dobu v kontaktu se senzorem a silový impulz by kontakt neměl přerušit. Nicméně jsme se rozhodli pojistit tento nedostatek pomocí držáku senzoru, který je popsán v kapitole 4.6.3.

Další nedostatek není problém přípravku, ale senzoru. Při zkoušení bylo zjištěno, že citlivost tenzometru se jeví vyšší, než je požadováno. Při buzení pouze rukou docházelo k měření poměrně vysokých vrcholků. To nasvědčovalo určité chybě v návržení nebo procesu výroby senzoru a bylo potřeba zjistit důvod tohoto vysokého buzení. Momentálně se pokračuje se sestavováním přípravku do fáze výběru lisu, kde se musí počkat na vyřešení vysoké citlivosti senzoru, aby nedošlo k výběru příliš silného lisu.

4.6.3. Nutné konečné úpravy finální verze

Těsně před odesláním výkresové dokumentace pro výrobu byly umístěny závity na konce vodících hřídelí kvůli případné demontáži.

Při zkoušení se bohužel potvrdili obavy z toho, že senzor bude odskakovat při aplikování síly. Bylo tedy potřeba se domluvit na přidání čtyř děr se závity na vrchní straně přípravku pro návržení přídržovače senzoru. Původně se o přídržovači u verzí pro senzor bez krytu neuvažovalo, kvůli možnosti ovlivnění měření či poškození odkrytého tištěného spoje. Nicméně při zkoušení nedocházelo k ovlivňování měření a senzor se jevil robustně. Přídržovač jsem zvolil 3D tištěný, na jehož konec se nalepí měkký materiál, u kterého nehrozí poškození tištěného spoje.



Obrázek 62: Nutné finální úpravy: Demontážní díry se závitem a Přídržovač senzoru

4.7. Dokumentace spojená s návrhem

S návrhem přípravku v korporátním prostředí se pojí dokumentace, která je potřeba pro výrobu či schválení návrhu.

Prvním dokumentem potřebným pro realizaci procesu byla matice risků. Jedná se o matici, která obsahuje kritické body výroby, kde by mohl projekt selhat a zároveň obsahuje kroky, které jsou podniknuty pro snížení či odstranění risku, který ohrožuje projekt viz příloha R1225 Risk-Management-Matrix 2020.

Dalším dokumentem byl tzv. Test plán viz příloha R1225- Sensitivity Jig- Test case planning 2020. Jedná se o tabulku s předpokládanými daty a procesy. Slouží ke sledování procesu a zjištění předpokládaného dokončení projektu. Zároveň se zde uvádějí veškeré informace například takové, na základě kterých byly nebo budou uskutečňována rozhodnutí.

4.7.1. Cena přípravku

Cena je vždy velmi důležitý faktor. Při navrhování jsem se snažil mít na paměti obráběcí procesy a navrhovat tvary a tolerance, které se budou snáze obrábět. To se projevilo i na ceně. Odhadovaná cena samotného přípravku bez lisu byla 2000 Usd (tedy zhruba 44 000 Czk). Od firmy VVP-Martin přišla nabídka ve výši 19 500 Czk, která zahrnovala výrobu, materiál, montáž a nitridaci. Skutečná cena byla tedy o více jak polovinu menší než předpokládaná. Nechali jsme si vyčíslit i cenu samotné senzorové základny (Příloha: R1225_01_01 Jig 1_Guidance), pro případ nefunkčnosti přípravku a nutnosti druhé generace. Tato cena byla stanovena na 4 500 Czk. Cena 3D tištěných částí, dokoupení několika montážních šroubu a tří tažných pružin činila zhruba 1500Czk. Cena lisů byla stanovena českým distributorem značky Schmitz na 887,10 Eur (23 265Czk) za typ 20 (1,6kN) a 1190,7 Eur (31 222 Czk) za typ 23 (4,2kN). Ceny lisů jsou bez stojanů a regulačních prvků.

Finální cena:

Přípravek s lisem Type 20 ≈44 265 Czk

Přípravek s lisem Type 23 ≈52 225 Czk

Ceny jsou uvedeny bez DPH.

Cena je tedy o zhruba 15% nižší než se předpokládalo. Zároveň si musíme uvědomit, že správně by se do celkové ceny měla započítat i cena návrhu. Celkově jsem na návrhu pracoval střídavě téměř rok.

5. Současný stav

Navržení přípravku trvalo skoro rok. Jedná se o jeden ze dvou hlavních projektů, na kterých pracuji, tento návrh byl první úkol, který jsem ve společnosti CTS dostal.

Ke dni 27. 7. 2020 je přípravek vyrobený, po nitridaci a doručen. Nyní se čeká na doručení 3D tištěných přídržovačů a drobných dílů včetně pružin. Byla odzkoušena základní funkčnost bez lisu s dobrými výsledky. Jak již bylo řečeno, při zkoušce jsme odhalili, že samotné tenzometry mají nejspíše vyšší citlivost, než jaká má být dle výrobních specifikací. Sensory silně reagovaly i na poklepání rukou. Je nutné tedy prověřit návrh a výrobní postup samotných senzorů. Z tohoto důvodu se čeká s testováním na výběr lisu. Pro výběr lisu bude přípravek odvezen do zkušební laboratoře Schmidt, jenž disponuje lisem s měřicími hlavicemi, které vykreslují nejen lisovací sílu. Na základě tohoto měření bude možné přesně stanovit potřebný typ lisu a provozní tlak. Prozatímni stav i vývoj je uspokojující i vzhledem ke světovému dění.

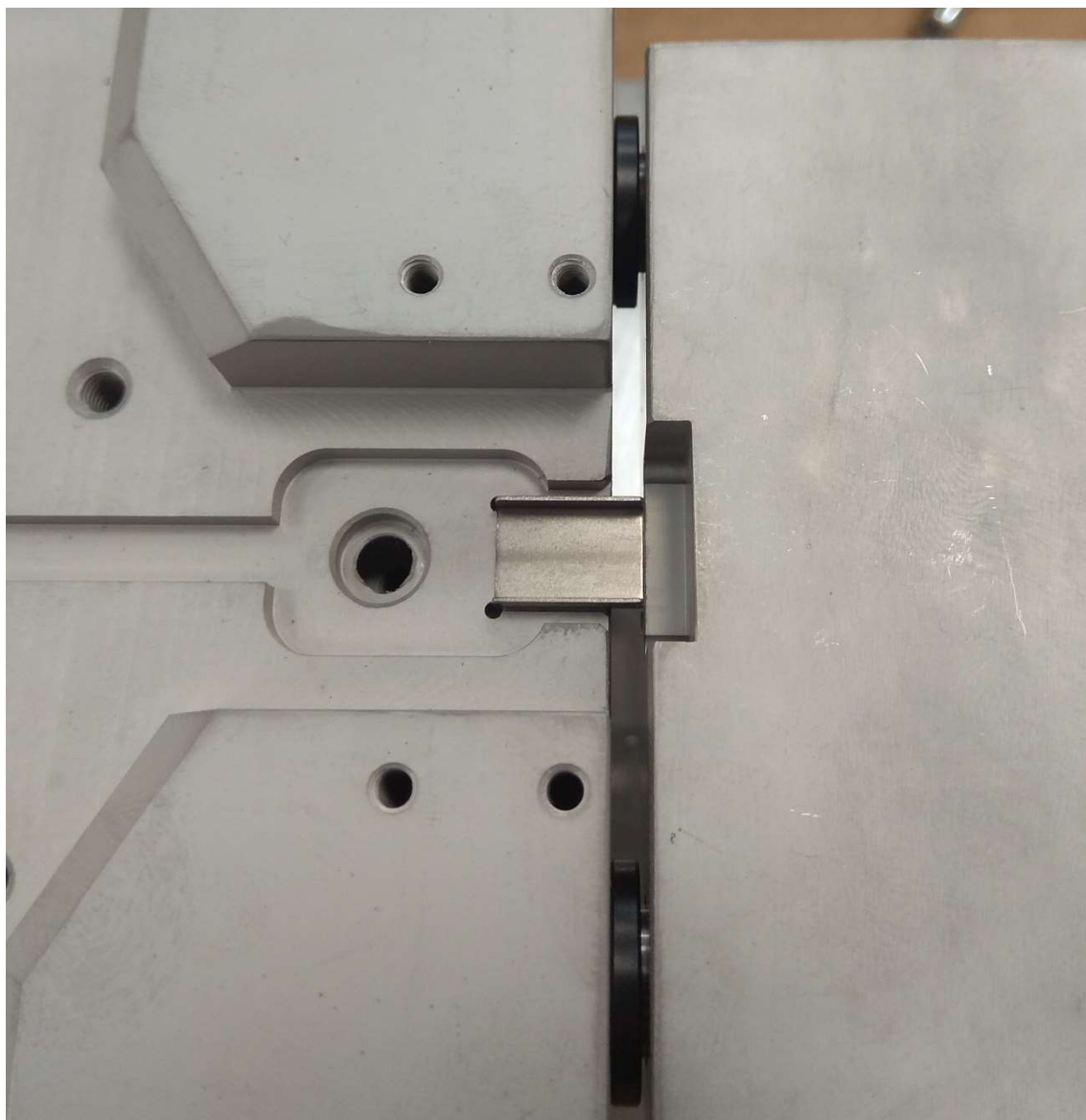
Finální verze je tedy výsledkem několika měsíců navrhování a řešení. Při navrhování jsem se našel vždy myslet na všechny funkce a operace, kterými má přípravek projít, jako například obrábění, bezpečnost, robustnost a jednoduchost při ovládání. Důvodem delší doby navrhování byly i změny v senzoru, respektive přechod na druhou generaci a několik úprav tištěného spoje. Na návrhu druhé generace jsem se osobně také podílel. Hlavním účelem bylo zjednodušení konstrukce a eliminace možnosti špatného založení součástek. Dalším důvodem byly experimenty s vyměnitelnou sensorovou základnou. Osobně jsem byl přesvědčen spíše o pevné variantě, která se nakonec ukázala jako lepší. Veškeré tolerance byly navrhovány mnou a následně konzultovány se starším R&D inženýrem. I přes drobné chyby byly navrženy správně a to se i projeví na výsledné kvalitě funkce.

Věřím, že mé rozhodnutí přemístit nárazovou hranu impacteru do osy mezi vodící hřídele a návrh kulového tlačného zařízení, pomohlo funkci a chodu přípravku. Nyní síla působí vždy v jedné ose a skrz jeden bod, to ve velké míře napomáhá opakovatelnosti měření. Dále jsem si jistý, že posuvné ukotvení lisu zjednoduší celkovou kalibraci přípravku.

I přes dvouměsíční zpoždění v důsledku světové pandemie nemoci Covid-19 je výsledkem kvalitní robustný přípravek, který plní funkci jakožto aplikátoru přesné síly na velmi malou plochu. Vše nasvědčuje tomu, že je dostatečně odolný a jednoduchý, aby vydržel potřebný počet cyklů měření a zároveň si udržel opakovatelnost. Posledním krokem je tedy výběr lisu a kalibrace celého přípravku. Dosavadní vývoj i přes zpoždění má velmi dobré výsledky, finální kvalita a funkce je vyšší, než bylo očekáváno a přípravek měl o 15% menší náklady, než bylo očekáváno.



Obrázek 63: Finální přípravek po nitridaci.



Obrázek 64: Finální přípravek se zasazenou titanovou základnou

6. Závěr

Zadáním této diplomové práce byl návrh přípravku pro měření senzitivity (citlivosti) piezoelektrického tenzometru vyráběného firmou CTS Ceramics. Nejprve bylo potřeba čtenáře seznámit s principem funkce tenzometru a piezoelektrickou keramikou samotnou.

Proto druhá kapitola této práce obsahuje stručný úvod do problematiky piezoelektrické keramiky, jako je její složení, výroba či přehled výrobků z ní vyráběné. V třetí kapitole jsou zpracovány ostatní principy tenzometrických měření, včetně rozdělení tenzometrů a základního popisu jejich funkce a vlastností.

Hlavní cíl práce, tedy návrh přípravku pro měření začíná kapitolou čtyři. Tato část práce se věnuje měření první prototypů tenzometru, požadavkům na nový přípravek a celkové měření. Je zde vysvětlena základní funkce, kterou musí přípravek disponovat a tedy princip, na kterém bude měřit. Následují první verze přípravku pro měření senzoru ve finální podobě a verze pro měření senzoru bez krytu a polyuretanové fixace. Tato část práce obsahuje i kapitolu o lisu, který je součástí přípravku a jedná se o zdroj síly na tenzometr.

Poslední část práce popisuje finální verzi přípravku a to jak návrhovou část, která se věnuje úpravě verze pro montáž a případnou demontáž, tak i výrobě prvního prototypu přípravku a jeho finálními úpravami. Jsou zde popsány i dokumenty nutné pro schválení výroby experimentálního přípravku a ekonomické hledisko.

Kapitola 5 se věnuje současnému stavu přípravku je dne 27. 7. 2020. Popisuje také další kroky, které budou učiněny k dokončení přípravku a zavedení do výrobního procesu piezoelektrického tenzometru.

Díky návrhu popsanému v této práci byl vytvořen přípravek, který splňuje firemní požadavky. V současné době sestava neobsahuje lis, u kterého probíhá výběrové řízení, ale již lze říci, že přípravek je funkční a plní účel. Ovšem o plné funkčnosti lze mluvit až po finální kalibraci s vybraným lisem.

Literatura a zdroje

1. NAKAMURA, K., ed. *Ultrasonic transducers: Materials and design for sensors, actuators and medical applications* [online]. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2012 [cit. 2020-07-13]. ISBN ISBN 978-0-85709-630-2. Dostupné z: <https://www.sensorsportal>.
2. *Sensors & Transducers: Noliac piezo technology course* [online]. In: . September 2017, s. 149 [cit. 2020-07-13].
3. KRÁLOVÁ, Mgr. Magda. *PYROELEKTRICKÝ A PIEZOELEKTRICKÝ JEV*. Techmania Science Center: EDUPORTÁL [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev>.
4. *Piezoelektrický jev*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11. 9. 2019 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrický_jev.
5. *Základy piezokeramické technologie: Piezoelektrický princip, perovskit a polarizace*. CeramTec: The Ceramic Experts [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>.
6. ŠKARABELOVÁ, L. *Piezoelktřina v technické praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně,.
7. *Noliac* [online]. 2017 [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.noliac.com/tutorials/piezo-basics/hard-doped-and-soft-doped-piezoceramic-material/>.
8. *NCE40* [online]. 2017 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <http://www.noliac.com/products/materials/nce40/>.
9. *NCE40* [online]. 2017 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <http://www.noliac.com/products/materials/nce51/>.
10. *Noliac* [online]. 2017 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.noliac.com/dictionary/>.
11. TRUNČKA, Jan. *Současný vývoj obráběcích nástrojů*. Praha, 2017. *Bakalářská práce*. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Mádl, CSc.
12. HAVEL, Ing. Milan, Ing. Petr VÁLEK a Lucie GAŽÁKOVÁ. *Olovo*. Arnika [online]. Dělnická 13, Praha 7, 2014 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://arnika.org/olovo>.
13. *Piezo-ceramic Manufacturing Process: Proven Expertise in Piezo-ceramic Manufacturing* [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/piezo-ceramics/manufacturing-process/>.
14. *Co je piezoelektrický aktuátor?* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.netinbag.com/cs/manufacturing/what-is-a-piezoelectric-actuator.html>.

15. , *Materials scientist. Passive infrared sensor*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia [online]*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 28 July 2020 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_infrared_sensor.
16. *Arduino lesson: PIR Motion Sensor [online]*. Richmond, 2017 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://osoyoo.com/2017/07/27/arduino-lesson-pir-motion-sensor/>.
17. *Pyroelectric hybridized long-wave infrared laser radiation detector assembly [online]*. 1992 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5311019A/en>.
18. *Multiple Integrated Laser Engagement System (MILES), Republic of Korea Army (19299925019)*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia [online]*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 18 June 2015 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia>.
19. *ملف:MILES 2000 Kit*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia [online]*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 18 March 2013 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://ar.m.wikipedia.org/wiki/ملف:MILES_2000_Kit.jpg.
20. WOODFORD, Chris. *How strain gauges work*. *Explainthatstuff! [online]*. 2000, Last updated: May 22, 2020. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/straingauge.html#types>.
21. *How Does an Optical Strain Gauge Work? [online]*. July 18, 2020 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://tacunasystems.com/knowledge-base/how-does-an-optical-strain-gauge-work/>.
22. *Optical Strain Gage | os3100 [online]*. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <http://www.micronoptics.com/product/optical-strain-gage-os3100/>.
23. *FL 200 Photoelastic experiments with a transmission polariscope [online]*. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/strength-of-materials/experimental-stress-and-strain-analysis/photoelasti>.
24. , *R3giCZ. Tenzometr*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia [online]*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 12. 1. 2019, 16:11 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr>.
25. , *CLCStudent. Strain gauge*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia [online]*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 27 June 2020, at 13:39 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge.
26. *FDS102 LOW PROFILE INSIGHT FDS SENSOR – ADHESIVELY MOUNTED - CLASS I DIV II RATED [online]*. 912 Smithfield Drive, Suite 4 Fort Collins, CO 80524 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://voyagerinstruments.com/collections/sensors/products/low-profile-insight>.
27. , *HypoBOT. Youngův modul pružnosti*. In: *Wikiskripta [online]*. 12. 4. 2019 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Youngův_modul_pružnosti.

28. *SCHMIDT® Pneumatic Press: Maximum Pressing Force from 1.6 kN to 60 kN / 350 lbs. to 13,490 lbs. [online]. Feldbergstraße 1 D-78112 St. Georgen Germany [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.schmidtpresses.com/products/download/catalog.htm>.*
29. *DRASTÍK, František. Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu. 2. dopl. vyd. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-85780-95-X.*
30. *PZT Materials: Complete Properties [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: https://www.ctscorp.com/wp-content/uploads/CTS_-PZT-Materials_Complete-Properties_20180829.pdf.*

Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1: Krystal Turmalínu (2)	- 9 -
Obrázek 2: Elektrometr používaný pro měření radioaktivity (2).	- 10 -
Obrázek 3: Přímí piezoelektrický jev- Makro (3).....	- 11 -
Obrázek 4: Přímí piezoelektrický jev- Mikro (4).	- 11 -
Obrázek 5: Nepřímí piezoelektrický jev (5)	- 12 -
Obrázek 6: Závislost d_{33} na teplotě u tvrdého materiálu NCE40 (8)	- 13 -
Obrázek 7: Závislost d_{33} na teplotě u měkkého materiálu NCE51 (9).....	- 14 -
Obrázek 8: Porovnání vlastností tvrdých a měkkých piezoelektrických keramik (7) -	14 -
Obrázek 9: Frekvenční křivka pro zjištění f_a a f_r . (2)	- 15 -
Obrázek 10: Průběh polarizace: (a)- přirozený stav; (b)- během polarizace; (c)-stav po polarizaci (1).....	- 17 -
Obrázek 11: Polarizační křivky (průběh polarizace) pro monokrystal $BaTiO_3(a)$ a keramiku $BaTiO_3(b)$ (1).....	- 17 -
Obrázek 12: Vysvětlení d_{33} (2).....	- 18 -
Obrázek 13: Ukázka vybití keramiky před manipulací.	- 19 -
Obrázek 14: Ukázka výrobního procesu piezoelektrické keramiky (11)	- 20 -
Obrázek 15: Ukázka principu pyroelektrické sensoriky při zvýšení teploty (2).	- 21 -
Obrázek 16: Technické řešení pyroelektrického senzoru pohybu (13).	- 22 -
Obrázek 17: Vysílací část systému MILES při použití Jihokorejskou armádou. (Červená koncovka není součástí systému, jedná se pouze o adaptér pro střelbu slepými náboji) (15).....	- 23 -
Obrázek 18: Sensorová část systému MILES (16).....	- 23 -
Obrázek 19: Ukázka mechanického tenzometru (12).....	- 24 -
Obrázek 20: Ukázka vnitřního měřítka optického tenzometru (13)	- 25 -
Obrázek 21: Moderní optický tenzometr (14)	- 25 -
Obrázek 22: Ukázka optického tenzometru– Polariskop (12)	- 25 -
Obrázek 23: ukázka funkce Polaroskopu/optického tenzometru. (15).....	- 26 -
Obrázek 24: Ukázka řešení odporového polovodičového tenzometru (NASA– Glenn Research Center) (12)	- 27 -
Obrázek 25: Princip funkce odporového tenzometru. (17).....	- 27 -
Obrázek 26: Princip funkce hydraulického tenzometru (12).....	- 28 -

Obrázek 27: Ukázka specifikace piezoelektrického senzoru firmy Voyager Instruments, vyráběného firmou CTS Ceramics (18).....	- 28 -
Obrázek 28: Ukázka kabelové průchodky	- 29 -
Obrázek 29: Ukázka koncepce měření prvních prototypu.....	- 30 -
Obrázek 30: Titanová základná, červený rámeček vyznačuje rámcovou oblast pro tlak ..	- 31 -
Obrázek 31: Ukázka principu funkce přípravku.....	- 32 -
Obrázek 32: okótovaný přesah základny vůči krytu. Viz příloha: R1225-3 V1A Assembly	- 33 -
Obrázek 33: Verze 1A, oboustranné řešení	- 34 -
Obrázek 34: Verze 1B.....	- 34 -
Obrázek 35: Verze 2A	- 35 -
Obrázek 36: Verze 2B s výsuvným přídržovačem.	- 36 -
Obrázek 37: Verze 2C, oproti 2C disponuje jiným řešením zarážek.....	- 36 -
Obrázek 38: Ukázka stavu senzoru bez krytu protestování (Tištěný spoj cenzurován)-	37 -
-	
Obrázek 39: Verze 3A pro senzor bez krytu.....	- 38 -
Obrázek 40: Verze 3B.....	- 38 -
Obrázek 41: Verze 4A, pevná základna pro uchycení.....	- 39 -
Obrázek 42: Verze 4B s Lisem Schmidt.....	- 39 -
Obrázek 43: Řez verzí 5A, ukázka řešení působení síly v ose	- 40 -
Obrázek 44: Verze 5A s působením síly v ose	- 40 -
Obrázek 45: Detail L výkresu R1225_01_Assembly (V5B) ukázka konstrukce pusheru -	41 -
Obrázek 46: Verze 5B.....	- 41 -
Obrázek 47: Detail K výkresu R1225_01_Assembly (V5C) pro ukázku konstrukce vyměnitelné základny pro uložení senzoru.....	- 42 -
Obrázek 48: Verze 5C s vyměnitelnou základnou pro senzor.....	- 42 -
Obrázek 49: Senzorová základna verze 5J	- 43 -
Obrázek 50: Ukázka vybraných lisů a graf jejich pracovního prostoru (20).....	- 44 -
Obrázek 51: Finální verze 1/2.....	- 45 -
Obrázek 52: Finální verze 2/2.....	- 46 -
Obrázek 53: Náčrt principu uložení vratné pružiny.....	- 47 -
Obrázek 54: Spodní pohled na impakter, ukázka montážní drážky.	- 47 -

Obrázek 55: Podoba senzoru pro první zkoušku	- 48 -
Obrázek 56: Zpracování přípravku	- 49 -
Obrázek 57: Zpracování prostoru pro uložení senzoru.....	- 49 -
Obrázek 58: Zkouška s titanovou základnou	- 50 -
Obrázek 59: Foto obou částí tlačného zařízení.	- 50 -
Obrázek 60: Senzor vložený do přípravku.	- 51 -
Obrázek 61: Výsledky prvního měření zobrazené osciloskopem.....	- 51 -
Obrázek 62: Nutné finální úpravy: Demontážní díry se závitem a Přidržovač senzoru....	- 52 -
Obrázek 63: Finální přípravek po nitridaci.....	- 55 -
Obrázek 64: Finální přípravek se zasazenou titanovou základnou.....	- 56 -

Přílohy

R1225_01_Assembly
R1225_01_01 Jig 1_Guidance
R1225_01_02 Jig 2_Impacter
R1225_01_03_Base
R1225_01_04 Guidance
R1225_01_06 Holder
R1225_01_07 Buffer
R1225_01_08 Inner Pusher
R1225_01_09 Outer Pusher
R1225-3 V1A Assembly
R1225- Sensitivity Jig- Test case planning 2020
R1225 Risk-Management-Matrix 2020