



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Kompozitní měřidla délky na bázi reaktoplastů - ověření chování materiálu

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: **Bc. Jan Viček**

Vedoucí práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Composite length meters based on reactoplasts - verification of material behavior

Master thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials
Author: **Bc. Jan Viček**
Supervisor: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Vlček**
Osobní číslo: **S15000674**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Kompozitní měřidla délky na bázi reaktoplastů - ověření chování materiálu**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou použití měřidel délky v praxi.
2. Na základě současných znalostí o využitelnosti plastových a kompozitních měřidel délky v průmyslové praxi zvolte vhodné materiálové složení a způsob laboratorní přípravy těchto měřidel.
3. Navrhněte způsob hodnocení připravených měřidel před jejich použitím a po něm.
4. Vyhodnoťte výsledky a diskutujte je.
5. Zformulujte závěry.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 40 - 50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

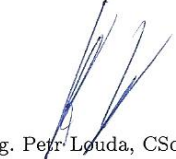
- [1] ČSN EN ISO 3650. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Etalony délek - koncové měrky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.24 s. Třídící znak 25 3308.
- [2] DORIN, T., BEERS, J. *The Gauge Block Handbook*. 2009.
- [3] MITUTOYO. *Základní informace ke koncovým měrkám*. Mitutoyo, 2015.
- [4] HULL, D., CLYNE, T. W. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge Solid State Science Series. 1996. Second Edition.
- [5] Patent 305686. *Epoxidová pryskyřice plnění organicko-anorganickým plnivem přírodního původu a způsob její přípravy*.
- [6] Odborné články vztahující se k dané tématice - viz www.sciencedirect.com

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
Katedra materiálu
Konzultant diplomové práce: Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže
Ostatní konzultanti: Ing. František Dvořáček
ČMI OI Liberec

Datum zadání diplomové práce: 12. října 2016
Termín odevzdání diplomové práce: 12. ledna 2018


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 12. října 2016

Prohlášení

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

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

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

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

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Poděkování patří vedoucí diplomové práce doc. Ing. Doře Kroisové za odborné vedení i obětavost, cenné rady a věcné připomínky při koncipování této práce. Stejně tak bych rád poděkoval Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a Ing. Miloslavu Ledvinovi za pomoc s přípravou vzorků. V neposlední řadě bych rád poděkoval všem těm, kteří mě v průběhu studia podporovali, a to především přítelkyni, rodině i přátelům.

Anotace

Cílem diplomové práce bylo připravit vzorky, které tvarově a funkčně odpovídají standardně používaným měřidlům délky a využívají níže citovaného patentu. Byla navržena metodika, jakým způsobem hodnotit vlastnosti připravených měrek, a to především z hlediska posouzení, jak se materiál chová při teplotních změnách, při opakovaném kontaktu s kovovou plochou, při pádu z výšky, při kontaktu s vodou a oleji. Výsledkem této práce je metodika hodnocení pro výběr kompozitního materiálu vhodného pro výrobu měřidel délky a výsledek, zda byl navržený materiálový systém použitelný pro danou aplikaci.

Klíčová slova:

kompozitní materiál, organicko-anorganické plnivo, rýžové slupky, epoxidová pryskyřice, teplotní roztažnost, koncová měrka, měřidlo délky, Johansonova měrka

Annotation

The aim of the diploma thesis was to prepare samples which formally and functionally correspond to standard length meters and use the patent cited below. Methodology has been proposed to evaluate the properties of prepared gauges, especially in terms of how the material behaves in temperature changes, repeated contact with the metal surface, dropping from a height, contact with water and oil. The result of this work is the evaluation methodology for selection of composite material suitable for the production of length meters and the result whether the designed material system was applicable to the application.

Keywords:

composite material, organic-inorganic filler, rice husks, epoxy resin, temperature expansion, final gauge, gauge block, Johanson gauge



Obsah

Úvod	8
1 Teoretická část	10
1.1 Měřidla délky a jejich použití	10
1.2 Koncová měřidla délky	10
1.3 Alternativní materiály pro měřidla délky	17
1.4 Kompozitní systémy s vyšší odolností vůči opotřebení.....	21
2 Experimentální část	25
2.1 Návrh typů a počtu měřidel pro experimentální hodnocení.....	25
2.2 Volba materiálového složení.....	25
2.3 Laboratorní příprava vzorků kompozitních měřidel	27
2.4 Kalibrace měřidel.....	30
2.5 Podmínky používání měřidel v praxi	30
2.5.1 Hodnocení teplotní roztažnosti vzorků.....	31
2.5.2 Hodnocení nasákavosti vzorků.....	36
2.5.3 Hodnocení odolnosti vzorků vůči olejům	39
2.5.4 Hodnocení odolnosti vzorků vůči otěru	42
2.5.5 Hodnocení odolnosti vzorků vůči nárazu/pádu	44
3 Diskuse výsledků	48
4 Závěr	52
5 Seznam použité literatury	55

Úvod

Koncová měřidla délky jsou považována za základ délkového měření při výrobě ve strojírenských odvětvích. Používají se pro nastavení měřicích přístrojů a přípravků, využívají se pro přímou kontrolu délkových rozměrů výrobků [2].

Tato měřidla jsou vyráběna zpravidla ve tvaru hranolu s průřezem 9x30 mm do jmenovitého rozměru 10 mm a 9x35 mm nad 10 mm délky. Měřicí plochy jsou opracovávány s vysokou rozměrovou přesností, rovnoběžností funkčních ploch a drsností povrchu [2].

Měřidla musí mít vysokou tvrdost, otěruvzdornost, korozivzdornost, rozměrovou stabilitu s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti, musí vykazovat dobré nasávací schopnosti, musí být dobře obrobitelná a odolná proti nárazu při spadnutí. Koncová měřidla délky jsou v současné době nejčastěji vyráběna z nástrojové ocele 19 422, tvrdokovu - karbidu wolframu, keramiky - oxidu zirkonu, méně často ze skla.

Splnění všech požadovaných parametrů současně je komplikované, zajištění parametru materiálu s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti odporuje současnému požadavku odolnosti vůči korozi a odolnosti vůči pádu. Cena měřidel je vysoká.

Zadání diplomové práce reaguje na požadavek z průmyslu, kterým je vytvoření měřidel, která budou současně v jistých mezích splňovat výše uvedené parametry a zároveň budou cenově dostupná.

Diplomová práce navazuje na aplikovaný výzkum, který byl realizován v rámci projektu Pre-Seed - Inovativní výrobky a environmentální technologie – ENVITECH a který byl řešen v Operačním programu Výzkum a vývoj pro inovace (OP VaVpI), respektive patent CZ 305686 Epoxidová pryskyřice plněná organicko-anorganickým plnivem přírodního původu a způsob její přípravy a UV 27491 Epoxidová pryskyřice plněná organicko-anorganickým plnivem přírodního původu. V průběhu projektu byl připravený a odzkoušený materiál vyhodnocen jako levný a dostupný materiálový systém s vysokou odolností vůči opotřebení.



Cílem diplomové práce bylo připravit podle patentu a užitného vzoru vzorky, které by byly tvarově a funkčně analogické měřidlům délky a navrhnout způsoby hodnocení, kterými by bylo možné posoudit chování materiálu z hlediska jeho použitelnosti jako materiálu pro kompozitní měřidla délky.

1 Teoretická část

1.1 Měřidla délky a jejich použití

Měření délky provází lidskou společnost po tisíciletí a její prvopočátek bychom mohli spatřit například v době staveb prvních pyramid. Využívání měření délky se rozšířilo zavedením směnného obchodu. Aby mohlo být měření prováděno, musely být zavedeny jednotky délky. Jednotky si mohl každý jedinec vybrat sám podle svého uvážení a přesně tímto způsobem se k měření délky přistupovalo v historii. Jako základní jednotka míry sloužila jakákoliv část lidského těla. Zpravidla pro učení míry délky sloužila paže, loket nebo palec. Díky tomuto způsobu určení délky se vyjadřovaly rozměry jednotlivých předmětů. Je zřejmé, že určování délky těmito primitivními způsoby nebylo přesné ani objektivní. Rozvoj vědy a techniky s sebou přinesl požadavek určení přesné jednotky délky založené na fyzikálních principech [1].

Navzdory vyvíjecí se moderní společnosti, rozvoji vědy a techniky a profesně vyškoleného personálu není možné určit skutečnou hodnotu měřené veličiny. Lze však určit interval, ve kterém se s danou pravděpodobností reálná hodnota nachází. Koncová měřidla délky jsou v zásadě hlavním etalonem, který se používá pro nastavení délkových rozměrů ve strojírenském průmyslu [1].

Etalon je zhmotněná míra či měřidlo, případně referenční materiál nebo měřicí systém, který je určen k definování, realizování nebo reprodukování jednotky jedné či více hodnot veličiny, které se využívají k referenčním účelům. Vědním a technickým oborem, který se zabývá všemi poznatky a aktivitami týkajícími se měření je metrologie. Jejím stěžejním principem je jednotné a přesného měření a s tím související potřeba kalibrace měřidel. Tento obor je nesmírně důležitý a je předpokladem dodržování přesnosti a jakosti ve strojírenských oblastech průmyslu [2].

1.2 Koncová měřidla délky

Koncová měřidla délky, v některých případech označovaná také jako Johansonovy měřky, jsou považována za základ délkového měření při výrobě ve strojírenských odvětvích. Jsou to etalony délky, které jsou specifickými díly délky metru, který patří do mezinárodního systému jednotek SI. Tato měřidla jsou vyráběna

zpravidla ve tvaru hranolu. Nejčastěji mají průřez 9x30 mm do jmenovitého rozměru 10 mm a 9x35 mm nad 10 mm délky. Měřicí plochy jsou opracovávány s vysokou rozměrovou přesností, rovnoběžností funkčních ploch a drsností povrchu [2].

Koncová měřidla se používají pro nastavení měřidel, měřicích přístrojů a přípravků. Využívají se rovněž k ověřování a kalibraci daných měřidel a fungují jako etalon délky. Používají se také pro přímou kontrolu délkových rozměrů výrobků [2].

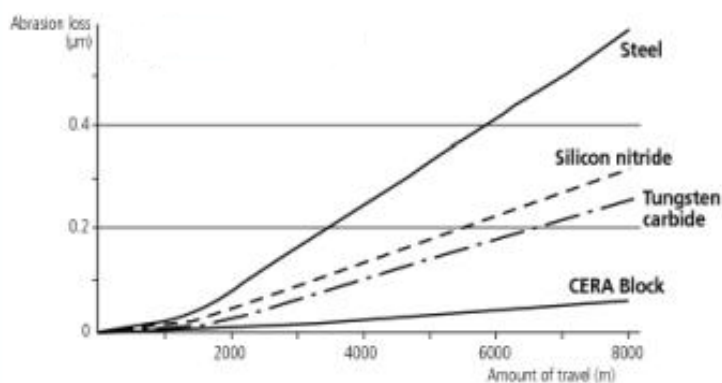
Měřidla musí splňovat následující požadavky: vysoká tvrdost, ošetrivost, korozivzdornost a rozměrová stálost s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti. V neposlední řadě musí vykazovat dobré nasávací schopnosti, být dobře obrobitelná a odolná proti nárazu při spadnutí. Splnění veškerých těchto požadavků je podstatné pro funkční chování měřidel [2] [3].

Koncová měřidla délky se nejčastěji vyrábějí z nástrojové ocele, tvrdokovu - karbidu wolframu a keramiky. Nejčastěji využívaná nástrojová ocel 19 422 má v tomto ohledu nevýhodu v tom, že má malou odolnost vůči korozi. Při práci s těmito měřidly je třeba používat při práci rukavice a po skončení používání měřidel je nutné provést konzervaci. Měrky vyrobené z karbidu wolframu vynikají vysokou tvrdostí a ošetrivostí. Z keramických materiálů se k výrobě měrek nejčastěji používá oxid zirkonu ZrO_2 . Oxid zirkonu vyniká svou korozivzdorností a vysokou rozměrovou stálostí [2].

Vlastnost \ Materiál	Keramická měrka (ZrO_2)	Ocel (Fe)	Tvrdokov (WC-Co)	Nitrid křemíku (Si_3N_4)
Tvrdost (HV)	1350	800	1650	1500
Koeficient tepelné roztažnosti ($10^{-6}/K$)	9,3±0,5	10,8±0,5	5,5±1,0	2
Pevnost v ohybu (MPa)	1270	1960	1960	580
Lomová houževnatost K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})	7	120	12	6,5
Modul pružnosti $\times 10^4$ (MPa)	20,6	20,6	61,8	28,4
Poissonova konstanta	0,3	0,3	0,2	0,3
Měrná hustota	6,0	7,8	14,8	3,2
Tepelná vodivost (W/m·K)	2,9	54,4	79,5	16,7



Obr. 1: Vybrané materiálové vlastnosti koncových měřidel [3].



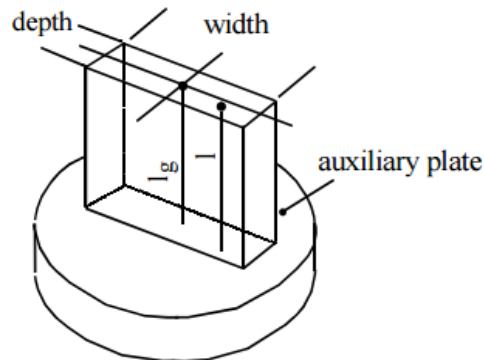
Obr. 2 Odolnost koncových měrek vůči abrazi [3].

Pro posouzení kvality koncových měřidel bylo zavedeno jednotné značení, které odpovídá normě ČSN EN 3650 (ČSN 25 3308). Měřidla musejí být trvale označena jmenovitou délkou v milimetrech, a pokud je měřidlo označeno třídou přesnosti, musí se používat ustálené označení:

- **Třída přesnosti 2:** Tato třída měřidel je předurčená pro pracovní a nastavovací měření nebo na kontrolu přesných úchylkoměrů, a zároveň jako náhrada pevných třmenových kalibrů.
- **Třída přesnosti 1:** Slouží na kontrolu koncových měřidel, kalibrů i na seřizování délkových měřidel, rovněž na přesné kontrolní práce v laboratoři.
- **Třída přesnosti 0:** Je etalonem pro kontrolu pracovních koncových měřidel a na seřizování měřících strojů s vysokou přesností.
- **Třída přesnosti K:** V této třídě se koncová měřidla používají jako mastery s certifikací oproti jiným koncovým měřidlům, která byla kalibrována porovnáním, a to za použití teplotně regulovaných místností a kalibračních laboratoří [4].

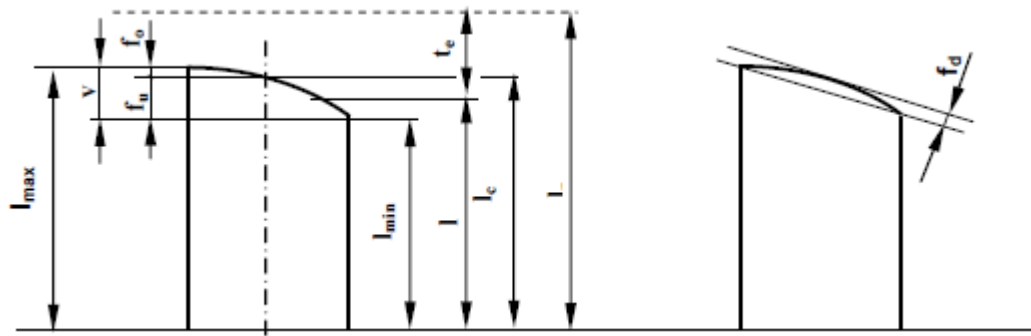
Potřebný rozměr měřidla vzniká spojením jednotlivých měřidel, která se spojují tzv. nasáváním. Nasátí měřidel musí být provedeno tak, aby nedošlo k poškození jejich funkčních ploch, které spolu drží vlivem molekulových vazebných sil. Při sestavování rozměrů z jednotlivých dílčích měřidel je třeba brát v úvahu možný výskyt chyb, které mohou celý rozměr ovlivnit. Takovými chybami mohou být vlastní chyby měřidel,

chyby, které vznikly nepřesnostmi ve styku dvou měrek (cca $0,1 \div 0,2 \mu\text{m}$) nebo chyby, ke kterým došlo při styku s plochou stolku komparátoru či při styku měřidla a funkční plochy snímače (cca $0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$) [4].



Obr. 3: Základní parametry koncových měrek. [5]

Mezi jeden ze základních parametrů koncových měřidel patří jeho délka v libovolném bodě (I). Jedná se o kolmou vzdálenost zvoleného bodu volné (nenasáté) plochy od roviny ploché desky, ke které je měřidlo přisáté. Dalším parametrem je středová délka koncového měřidla ($I_{c/g}$), což je délka kolmice středu volné měřicí plochy měřidla na plochu, k níž měřidlo přilehlo svou druhou plochou. Důležitým parametrem je odchylka délky v libovolném bodě od jmenovité délky (t_e), což je algebraický rozdíl mezi I a I_n . Dalším parametrem je odchylka rovinnosti (f_d), což je nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými plochami, mezi kterými leží veškeré body měřicí plochy. Rozpětí délky (v) je dalším parametrem, který je rozdílem mezi největší délkou koncové měřky (I_{max}) a nejmenší délkou (I_{min}), což je rozpětí délky, které je rovné součtu odchylek f_o a f_u od střední délky I_c . Dalším základním parametrem koncových měřidel je tvrdost měřicích ploch, které musí být minimálně 800 HV nebo 62 HRC. Nepostradatelným parametrem je přilnavost, tedy schopnost měřicích ploch měřidel přilnout působením molekulárních sil k jiným měřicím plochám nebo na plochy se stejnou povrchovou úpravou. Posledním stěžejním parametrem je koeficient délkové roztažnosti. U ocelových měřidel se jedná o teplotní interval $(10 \div 30)^\circ\text{C}$ a hodnoty musí být v rozmezí $(11,5 \pm 1)10^{-6}\text{K}^{-1}$. U jiných materiálů je třeba, aby výrobce hodnotu tohoto koeficientu uvedl v dokumentaci [1] [2].



Obr. 4: Schéma vybraných parametrů koncových měřidel [2].

Je zřejmé, že plochy daných měřidel nesmějí být nikterak poškozené. Jediné, co se připouští, jsou drobné nedokonalosti a rýhy, které nemají žádný vliv na přilnavost a které nikterak neovlivňují výsledky měření [2].

Kontrola koncových měřidel je komplikovanou operací, při které dochází ke kontrole všech jakostních parametrů měřidel, jako je koroze, mechanické poškození a drsnost. Každé měřidlo musí odpovídat požadavkům své třídy. Specifikace požadavků na třídu je zanesena v ČSN EN ISO 3650. Shoda specifikace je v souladu s ISO 14253-1. [4].

Kalibrace koncových měřidel je sérií jednotlivých přenosů délky, které vycházejí ze základní definice jednotky délky a následně postupují interferenčním navázáním vyšší třídy (přednostně třídy K) koncových měrek. Dále může následovat jeden či více přenosů porovnávacím měřením zbylých koncových měrek [4].

Kontrola přilnavosti určuje schopnost měřících ploch koncových měrek přilnout k definovanému podkladu. Tato kontrola se provádí použitím optické destičky, která musí mít odchylku rovinnosti $0,1\mu\text{m}$. Přilnutou měřicí plochu je třeba prohlédnout skrze optickou destičku. Při této kontrole nesmí měřicí plocha vykazovat žádné interferenční pruhy, barevné ani lesklé skvrny. U měřky, která patří do třídy přesnosti 1 a 2 mohou být v malém rozsahu skvrny a stíny povolené [2] [5].

Interferenční měření zohledňuje měřenou délku, korekci interferenčních měření a kalibrační list. Délka koncové měřky je měřena ve středu měřicí plochy interferenční metodou. Měření odchylek f_o a f_u od středové délky je prováděno v bodech největší délky l_{max} a nejmenší délky l_{min} koncové měřky. Pomocná destička, k níž je měřka přilnutá po celou dobu měření by měla být vyrobena ze stejného materiálu, jako je vyrobena

měřená měrka. Stejně tak by měla mít stejnou povrchovou úpravu dané plochy. Pokud by tomu tak nebylo, bylo by třeba provést korekce z důvodu rozdílných vlastností materiálů. Z hlediska korekce interferenčního měření se do výpočtu počítají korekce okolních vlivů, jako je teplota, atmosférický tlak, vlhkost, odchylka teplot měrky od 20 °C, vliv přilnavosti na délku koncové měrky, nastavení interferometru apod. Je nutno zaznamenat výsledky měření, především středovou délku I_c nebo odchylku středové délky od jmenovité délky $I_c - I_n$. Zaznamenány také musí být předpokládané nejistoty v měření a návaznost s odkazem na použití etalonu. V kalibračním listu je nutné uvést koeficient teplotní délkové roztažnosti, tedy přepočtení délky na teplotu 20°C. V kalibračním listu nesmí chybět informace o tom, jakou měřicí plochou byla koncová měrka při měření přilnuta, a zda byla měrka nasunuta na podpůrnou destičku ze dvou měřicích ploch [2].

Vyomezit délku koncové měrky porovnávací metodou znamená stanovit rozdíl mezi středovou délkou referenční koncové měrky a měrky, která byla měřena při algebraickém uplatnění referenční délky. Délkový rozdíl je měřen indikátorem délky s vysokou rozlišovací kapacitou. Při porovnávání měření je středová délka přenášena referenční koncovou měrkou na zkoušenou měrku. Měření rozdílu délky se provádí takovým způsobem, který stanovuje odlišnost mezi středem a čtyřmi rohy dané měřené plochy přibližně 1,5 mm od bočních ploch. Pokud dojde ke změně stanovení délky v jiných bodech než v rozích plochy, musí být umístění detailně popsáno. Korekce v porovnávacím měření musí být provedena na chybu správnosti měřicího aparátu, na vliv teploty rozdílné od 20°C a odlišného koeficientu teplotní délkové roztažnosti porovnávaných měrek a na vliv rozdílné deformace kontaktu snímače s měřicími plochami [2] [5].

Koncové měrky by měly být voleny v souladu s minimální požadovanou délkou kroku. Opatřované koncové měrky v sadě by v žádném případě neměly být používány. Ve většině případů je lze nahradit novými bez nutnosti koupě nové sady. Dále závisí na počtu koncových měrek v sadě, protože pro požadovaný rozměr a zároveň velký počtem koncových měrek, vzniká velký počet kombinací pro užití jednotlivé měrky a tím se snižuje opotřebení sady se zachováním přesnosti. Mezi nejpoužívanější patří základní sady měrek od výrobce Mitutoyo Česko s.r.o. Cena se odvíjí především od třídy přesnosti a použitého materiálu a také jakým certifikátem jsou koncové měrky ověřeny.

U výrobce Mitutoyo s.r.o. jsou sady dodávány s kontrolním certifikátem anebo JCSS certifikátem kalibrace. [3]

Pro ilustraci je uvedena základní sada koncových měrek s kontrolním certifikátem, vyrobená z oceli s přesností dle EN ISO 3650. Série 516 v konfiguraci 112 ks. od 1mm. Cena takové to sady koncových měrek je dle výrobce Mitutoyo s.ro. uvedená v Tab č. 1.

Tab. 1: Základní informace o sadě koncových měrek [3].

Třída přesnosti	Cena €	Jmenovitý rozměr	Stupňování	Počet kusů
0	3784 €	1,0005	-	1
1	3784 €	1,001 – 1,009	0,001	9
2	3784 €	1,01 – 1,49	0,01	49
		0,5 – 24,5	0,5	49
		25 – 100	25	4

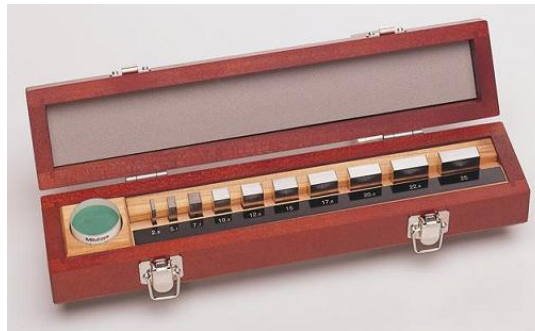


Obr. 5: Sada koncových měrek v konfiguraci 112 kusů. Výrobce Mitutoyo s.ro. [3]

Informace o sadě koncových měrek z oceli na kontrolu mikrometrů ze stejné série 516 s přesností dle EN ISO 3650 o počtu deseti kusů v sadě s cenou v eurech jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Základní informace o sadě koncových měrek. [3]

Třída přesnosti	Cena €	Použití	Obsah sady
0	612 €	Pro mikrometr se stoupáním vřetene 2 mm (QuantuMike)	2,2; 4,8; 7,8; 10,4; 12; 15,2;
1	525 €		17,4; 19,6; 22,6; 25 mm
2	436 €		

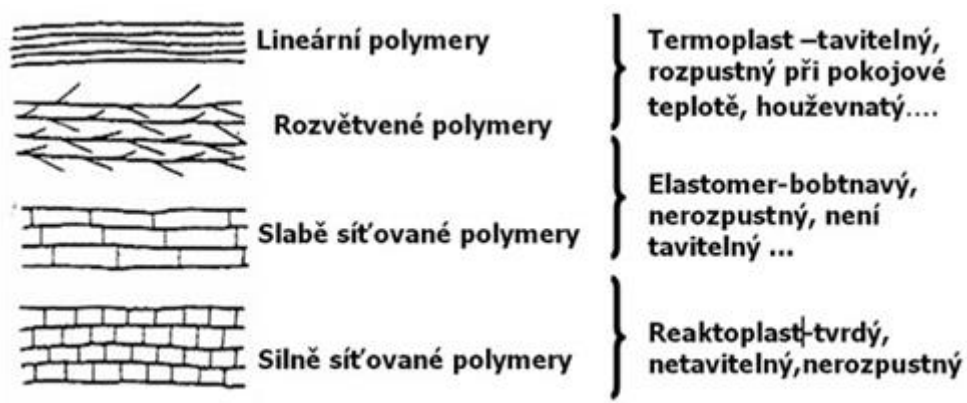


Obr. 6: Sada koncových měrek v konfiguraci 10 kusů. Výrobce Mitutoyo s.ro. [3]

1.3 Alternativní materiály pro měřidla délky

Měřidla délky se vyrábějí také jako keramická měřidla a měřidla z tvrdokovu. Oba typy vykazují nízký součinitel délkové teplotní roztažnosti, dobrou odolnost proti korozi a vysokou odolnost vůči opotřebení. Dalšími materiály, které se využívají pro výrobu méně přesných pomůcek pro měření délky přímo v dílnách a provozech jsou polymery. Nevýhodou polymerních materiálů je vysoký součinitel délkové teplotní roztažnosti a nižší odolnost vůči opotřebení. Přídavkem vhodných aditiv lze dosáhnout jak ovlivnění dilatace materiálů při teplotních změnách, tak zvýšení odolnosti vůči opotřebení.

Z hlediska materiálového výběru jsou vhodnější reaktoplasty, neboť se jedná o materiály tvrdé, netavitelné, nerozpustné, s nižším koeficientem délkové teplotní roztažnosti (50 až $60 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), než v případě termoplastů (100 až $200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Tyto vlastnosti jsou dány chemickým složením a vnitřní strukturou reaktoplastů. Struktura může být následně ovlivněna přídavkem vhodných aditiv. Další text se zabývá vysvětlením chemického složení a chování reaktoplastů, respektive epoxidových pryskyřic, které byly v experimentu používány.

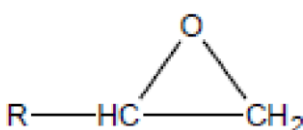


Obr. 7: Modelové znázornění tvaru makromolekul polymerů [6].

Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou polymerní syntetické sloučeniny obsahující oxiranové (epoxidové, ethylenoxidové) jednotky ve strukturní molekule [7] [8].

Epoxidová skupina, také nazývaná jako epoxid je cyklický ether se třemi atomy v kruhu - viz obr. 8. Díky tomu, že jsou atomy tvořeny téměř rovnostranným trojúhelníkem, je molekula epoxidu energeticky bohatá, z čehož vyplývá i její vysoká reaktivnost. Vysoká reaktivita pryskyřice, chemická odolnost, nízké smrštění při vytvrzování dosahující maximálně 4 %, a hlavně vysoká přilnavost k jiným materiálům byla příčinou velkého rozšíření při používání epoxidů v různých průmyslových aplikacích [9].



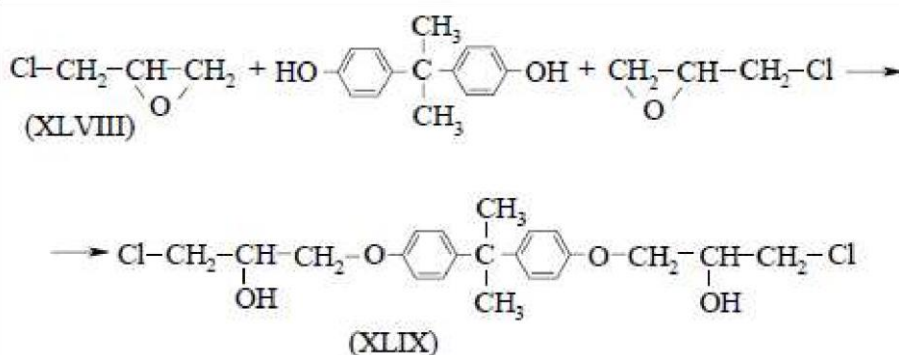
Obr. 8: Model epoxidové skupiny [7].

Epoxidové pryskyřice dělíme na dvě základní skupiny, kterými jsou ty, které obsahují glycidylové skupiny a ty, které obsahují alifatické nebo cykloalifatické epoxidové pryskyřice. Druhy obsahující glycidylové skupiny se dále dělí na glycidylethery, glycidylestery a glycidylaminy. Přípravované jsou prostřednictvím

kondenzačních reakcí vhodných surovin. Alifatické nebo cykloalifatické epoxidové pryskyřice jsou připravovány peroxidací olefinů [8].

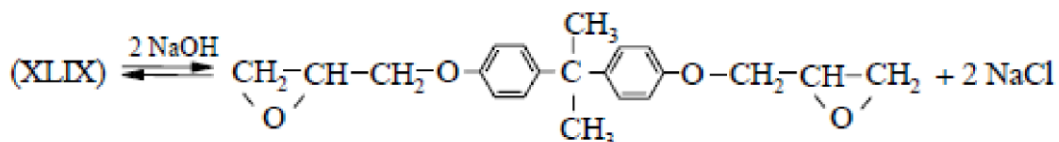
Největší část světové produkce epoxidových pryskyřic představují glycidylethery Bistofenolu A (dianu, 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propanu) [8].

Jejich výroba je založena na alkalické polykondenzaci bisfenolu A s epihalogenhydrinem (epichlorhydrin, příp. dichlorhydrin) [10].



Obr. 9: Schéma adice epichlorhydrinu na Bisfenol A [10].

Postup reakce je zobrazen na obr. 9 a 10: první reakce je adice oxiranové skupiny epichlorhydrinu (XLVIII) na hydroxyl fenolu dianu - viz obr. 9. Vzniká diandichlorhydrinether (XLIX), u kterého přidáním alkálie dochází k odštěpení chlorovodíku - obr. 10. Vedlejším produktem se stává sůl a voda. Tato reakce je rovnovážná, tudíž v prepolymeru setrvává jisté množství chlorhydrinových skupin. Epoxidové skupiny nízkomolekulární pryskyřice se mohou vázat na další molekuly dianu za vzniku vyšších oligomerů [10].



Obr. 10: Odštěpení chlorovodíku z diandichlorhydrinetheru [10].

Povaha pryskyřice je závislá na molární hmotnosti oligomerů a stupni polymerace. Molární hmotnost oligomerů je regulována vzájemným množstvím dianu a epichlorhydrinu. Obvykle se připravují pryskyřice o střední molární hmotnosti v rozsahu 400 a 4000 g.mol⁻¹. Nízkomolekulární pryskyřice jsou viskózní lepivé kapaliny. Oproti tomu, pryskyřice o vyšší molární hmotnosti jsou tuhé hmoty. Výroba vysokomolekulárních pryskyřic je prováděna dvěma postupy. Lze přímo kondenzovat se sníženým obsahem epichlorhydrinu nebo polyadice oligomeru s dalším dianem. V obou případech jsou používány katalyzátory, jako jsou např. N-ethylpiperidin, chorid lithný, uhličitan sodný a jiné [8] [10].

Nízkomolekulární monomery a oligomery (prepolymery) lze rozpustit a snadno je lze tavit, což nemá velké využití. Po vytvrzení ale dosahují tyto pryskyřice velkého množství zajímavých vlastností. Mezi přednosti patří dobrá pevnost, teplotní odolnost, nízká míra smrštitelnosti aj. Vytvrzení je chemický proces, při kterém epoxidové i hydroxylové skupiny prepolymeru reagují s tvrdidlem za vzniku vysoce zesíťované trojrozměrné struktury. Vytvrzovat se dá jak při pokojových teplotách, tak teplotách do 200 °C, teplota vytvrzování je závislá na volbě tvrdidla [9].

Tvrdidlem se rozumí látka, která je schopná reagovat s epoxidovými, případně hydroxylovými skupinami prepolymeru, z chemického hlediska se jedná se o polyadici. Reakce je založena na tom, že se tyto skupiny stanou součástí tvořené sítě. Náleží sem polyamidy, polykarboxylové kyseliny a anhydridy, aminoamidy, polysulfidy, ftalanhydrid a jiné [8]. Tvrdidlem může být i látka, která iniciuje polymeraci epoxidových skupin. Dochází k ní ke vzniku struktury, která je tvořena jen segmenty epoxidové pryskyřice, tvoří tzv. homopolymery. Do této skupiny patří komplexní katalyzátory, Lewisovy kyseliny a báze. Některá tvrdidla vytvářejí reakci, při které polyadice a polymerace probíhají současně. Výsledkem této reakce je síť, ve které jsou obě vzniklé struktury fungující vedle sebe [8]. Podle druhu a množství tvrdidla se odvíjí výsledné vlastnosti pryskyřic, teplota skelného přechodu, kinetika vytvrzování, hustota zesíťování i oblast použití. Správně vytvrzené epoxidové pryskyřice vykazují vlastnosti, které jsou žádané v řadě aplikací. Je to především chemická odolnost, teplotní odolnost, elektroizolační vlastnosti, malá smrštitivost při vytvrzení, adheze k většině materiálů a vysoká mechanická pevnost.

Výborná chemická odolnost je dána přítomností uhlíkových vazeb, pryskyřice jsou odolné vůči zásadám a zředěným roztokům kyselin. Odolnost stoupá s délkou řetězce a stupněm zesílení.

Teplotní odolnost do jisté míry souvisí s typem vybraného tvrdidla a stupněm zesílení. Použití tvrdidla s aromatickým jádrem zaručuje vyšší teplotní odolnost pryskyřice, než je u použitých alifatických tvrdidel [9]. V souvislosti s typem systému pryskyřice odolává teplotám v rozmezí 80 – 250 °C.

Elektroizolační vlastnosti jsou také závislé na druhu užitého tvrdidla. Elektroizolační vlastnosti se zvyšují u systému, ve kterých se používá jako tvrdidlo anhydrit kyseliny ftalové nebo anilínová pryskyřice.

Smrštitivost pryskyřic ovlivňuje druh vybraného tvrdidla ale i vytvrzovací podmínky. Na příklad, při teplotě 100 °C je smrštění na úrovni 0,7 %.

Pryskyřice vykazují dobrou adhezi k většině materiálů a vysokou mechanickou pevnost. Epoxidové pryskyřice mohou být připraveny od typů na bázi viskózních kapalin až po tuhé pryskyřice. [7]

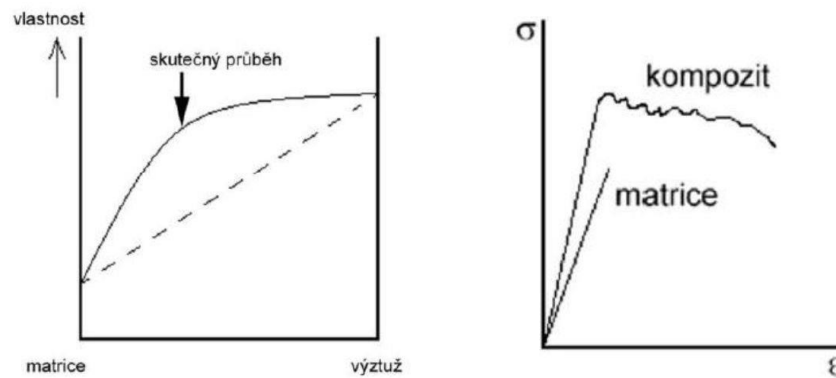
1.4 Kompozitní systémy s vyšší odolností vůči opotřebení

Kompozitní systémy se vyznačují specifickou kombinací dvou a více konstituentů (složka, fáze), z nichž je alespoň jeden v pevné fázi. Jednotlivé konstituenty se liší svými mechanickými, fyzikálními i chemickými vlastnostmi, ve své podstatě nehomogenní, ale jako výsledný technický materiál je považován za homogenní [11].

Pro výstižnější popsání je uvedena definice: „*Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišící se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní*“ [12].

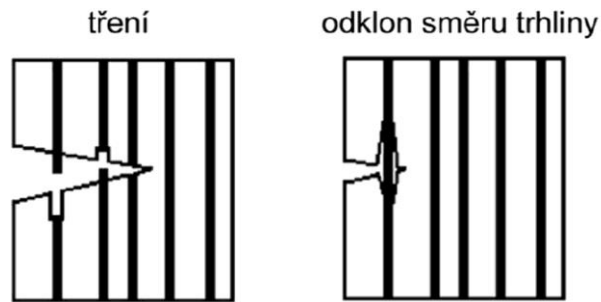
Kompozitní systémy se vyznačují synergickým chováním. Existence synergie je značně významná, jelikož je jedním z procesů vedoucích k získávání nových vlastností u materiálů [13].

Tento charakteristický jev lze demonstrovat na obr. 11, kde je možné vidět porovnání tahových diagramů křehké matrice a stejné matrice, která je vyztužená křehkými vlákny. Zmíněné chování kompozitu je zapříčiněno tím, že šířící se lomová trhlina je zpomalována na rozhraní matrice a vláken. V tento moment v daném místě dochází k odklonu směru šířené trhliny, k intenzivnímu tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny – viz obr. 12. kvalita rozhraní mezi matricí a výtuhou má specifický vliv na vlastnosti konečného systému [14] [15].



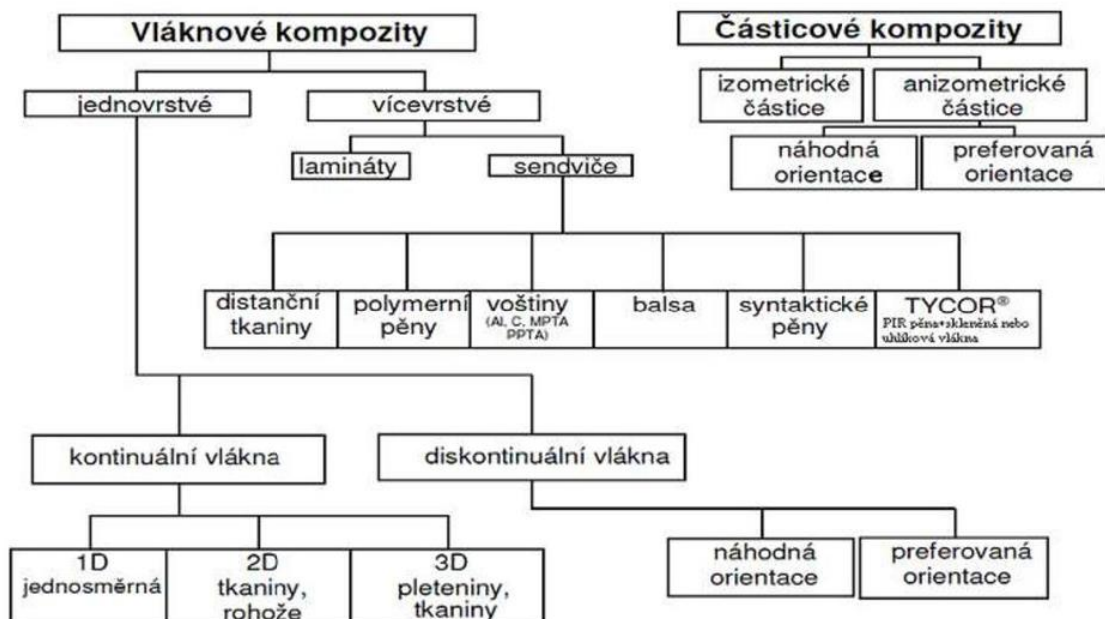
Obr. 11: Synergické chování složek polymeru. (vlevo) Vpravo porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice a křehkých keramických vláken [14].

Výše bylo uvedeno, že kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více fází. Zpravidla je jedna z fází v kompozitu spojitá. Tato fáze se nazývá matrice. Fáze, která není spojitá nese název výztuž. Budeme-li matrici z výztuží porovnávat, zjistíme, že výztuž má většinou zřejmě vyšší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost aj.) a nejdůležitějším úkolem vyztužení je zlepšení zmíněných vlastností [14].

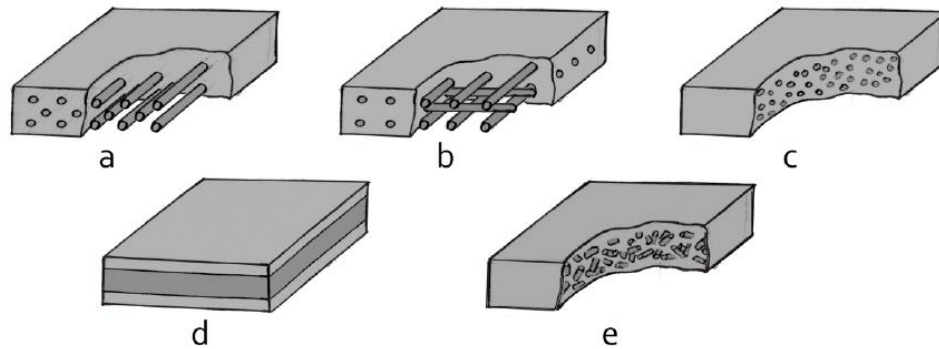


Obr. 12: Jevy na rozhraní matrice a výztuhy [14].

Kompozitní látky je možné hodnotit dle velkého množství parametrů. Pro účely této práce bude pracováno s rozdělením kompozitu podle geometrie a orientace výztuže [16].



Obr. 13: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [16, 17].



Obr. 14: a) Jednosměrně orientovaný dlouhovláknový kompozit, b) kompozit s dvousměrnou výztuží (tkanina), c) částicový kompozit, d) vrstvený (sendvičový) kompozit, e) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny. [16, 17].

Finální vlastnosti kompozitních systémů jsou ovlivněny především jejich výrobou a výběrem typu matrice a výztuže. Každé průmyslové pracoviště specializující se na výrobu kompozitních materiálů si připravuje daný kompozit dle specifických požadavků „na míru“. Proto je nutné brát v úvahu pozitivní i negativní vlastnosti kompozitu. Ale i přesto jsou k dispozici některá pravidla, která představují obecné výhody i nevýhody při využití kompozitu [18].

Hlavními výhodami kompozitních systémů je obecně jejich vysoká pevnost, tuhost, nízká hmotnost, odolnost proti korozi, dobré vlastnosti při statickém a dynamickém zatěžování, dobré tlumicí vlastnosti a možnost výroby složitých designových dílů, stejně jako výroba materiálů pro dané použití [18].

Nevýhodami kompozitních systémů je jejich specifická a složitá jak výroba, tak jejich zpracování. Vláknově vyztužené kompozity mají horší mechanické vlastnosti ve směru kolmo k orientaci uložení vláken daný jejich anizotropií. Další nevýhodou mohou být i vysoké náklady spojené s dimenzováním náročných konstrukcí, lokálním poškozením (např. náraz), jelikož se obtížně identifikují škody a následně se i obtížně opravují při porovnání s běžnými konvenčními materiály [18].

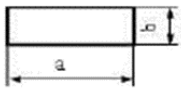
2 Experimentální část

Pro experimentální hodnocení byly připraveny hranoly simulující koncové měřky ve standardizovaných rozměrech, vyrobené z nekonvenčního kompozitního materiálu. Rozměry byly zvoleny tak, aby bylo možné charakterizovat vybrané vlivy pro běžné používání s ověřením materiálových vlastností pro koncové měřky.

2.1 Návrh typů a počtu měřidel pro experimentální hodnocení

Pro ověření vybraných materiálových vlastností byly připraveny „koncové měřky“ ve třech rozměrových provedeních v nominálních délkách $L_1=24,5$ mm, $L_2=5$ mm, $L_3=1$ mm s definovanými rozměry dle Tab. 3. V nominálním rozměru 24,5 mm bylo připraveno 10 sad po 5 vzorcích a pro rozměr 5 mm a 1 mm byly zhotoveny ve dvou sadách po 10 ks.

Tab. 3: Parametry koncových měrek.

	rozměr a		rozměr b	
	jmenovitá hodnota [mm]	mezní úchylka [mm]	jmenovitá hodnota [mm]	mezní úchylka [mm]
$0,5 \leq l_n \leq 10$	30	0	9	-0,05
$10 \leq l_n \leq 1000$	35	-0,3		-0,2

2.2 Volba materiálového složení

Pro kompozitní koncové měřky byl vybrán specificky plněný reaktoplast s organicko-anorganickým plnivem. Kompozitní systém s nosnou částí z reaktoplastu je ze skupiny epoxidových pryskyřic. Matrice je dvousložková, nízkomolekulární, epoxidová pryskyřice nesoucí název CHS-EPOXY 520 (EPOXY 15). Připravená je reakcí bisfenolu A s epichlorhydrinem bez modifikujících složek podle materiálového listu výrobce DCH - Sincolor. Materiál má následující vlastnosti: jedná se o nažloutlou viskózní kapalinu s hustotou $1,16-1,17$ g cm⁻³ při 20 °C, s viskozitou 12,0-14,5 Pa s

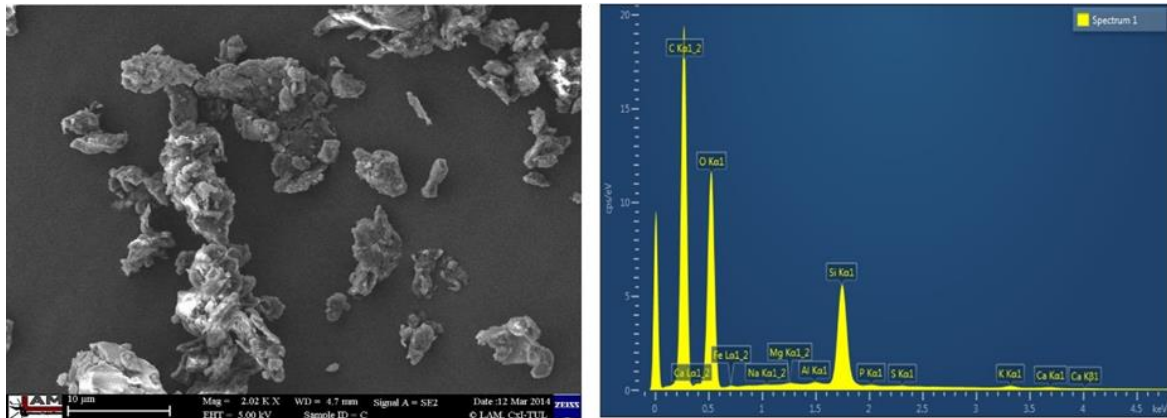
při 25 °C, s obsahem epoxidových skupin 5,2-5,5 mol.kg⁻¹, s epoxidovým hm. ekvivalentem 182-192 g.mol⁻¹ [19].

K vytvrzení bylo použito tvrdidla P11 v poměru k pryskyřici 100:11 při objemovém a 100:13,5 při hmotnostním poměru. Tvrdidlo P11 je rychlé tvrdilo s menší dobou zpracovatelnosti a příznačným dolepem, který se odstraňuje 3% roztokem kyseliny citronové či omytím vodou [19].

Definovaná epoxidová pryskyřice je matricí hodnoceného kompozitního systému. Využívá se nejčastěji k odlévání, impregnaci, zalévání a lepení v různých průmyslových odvětvích [19]. V této matrici bylo použito plnivo z namletých rýžových slupek s velikostí částic menší než 100 μm podle výše uvedeného patentu a užitého vzoru [20]. Vzorby byly připravovány odléváním epoxidové pryskyřice plněné organicko-anorganickým plnivem - namletými rýžovými slupkami, tak že do 100 g epoxidové pryskyřice byl přimíchán 1g namletých rýžových slupek. Množství plniva v matrici je označováno zkratkou dsk, tedy do 100 g pryskyřice se přimíchá 1g plniva. Dle provedených experimentů má takové plnivo do 12hm % oxidu křemičitého, velikost částic je menší než 100 mikrometrů a zajišťuje kompozitnímu systému prokazatelné snížení koeficientu tření o 10 % a zvýšení odolnosti vůči opotřebení o 75 %. Díky dobré adhezi částic plniva k použité epoxidové pryskyřici se nenacházejí volné prostory mezi částicemi a polymerem, materiál je homogenní a vlastnosti původní pryskyřice garantované jejím výrobcem se nezhoršují [19] [21].



Obr. 15: Slupky, organicko-anorganické plnivo v surovém stavu a jako namleté plnivo. [21]



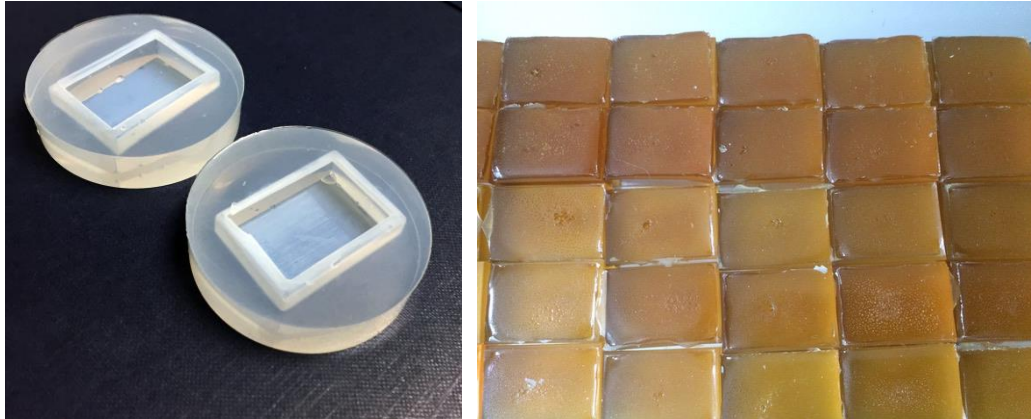
Obr. 16: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu dokumentující velikost částic plniva a chemické složení stanovené EDX analýzou [21].

Zvolené přírodní plnivo se specifickým chemickým složením a velikostí částic splňuje mimo již zmíněných předností také enviromentální hledisko, a to ve využívání jednoho z největších zemědělských odpadů, do kterého rýžové slupky patří [21].

2.3 Laboratorní příprava vzorků kompozitních měřidel

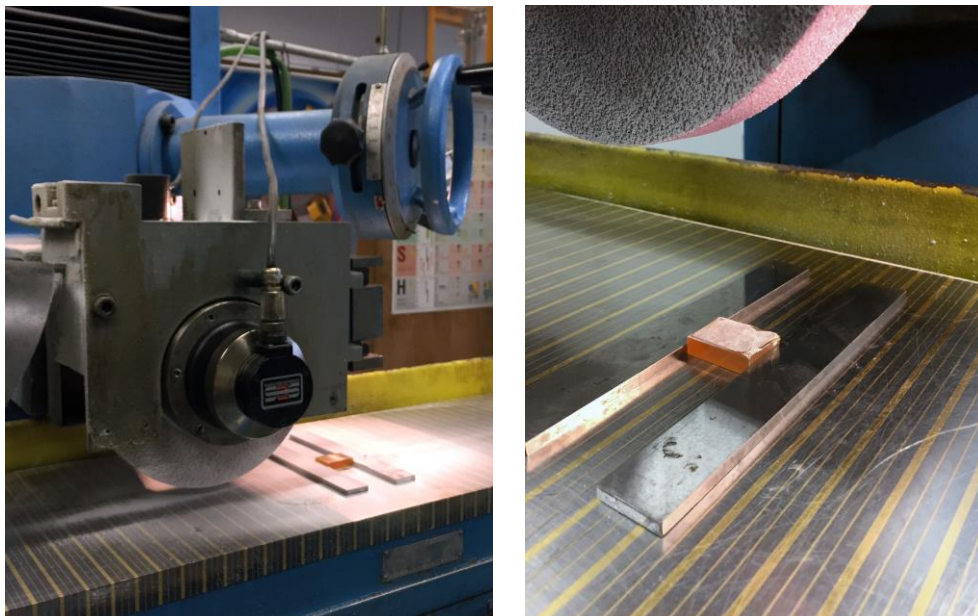
Pro výrobu vzorků byl zvolen přetržitý proces odlévání do forem vyrobených z dvousložkové silikonové pryže Silastic T1. Formy byly vyrobeny ve třech typech rozměrů dle standardizovaných měrek. Do epoxidové pryskyřice bylo přimícháno adekvátní množství plniva a dobře rozdispergováno mícháním. Míchání bylo prováděno ručně, po dobu cca 5 minut. Poté byla směs ponechána po dobu minimálně 24 hodin, aby unikly bubliny, které byly do směsi zaneseny mícháním. Následující operací bylo přidání tvrdidla P11 v množství doporučeného výrobcem epoxidové pryskyřice. Po přidání tvrdidla byla směs míchána po dobu cca 3 minut. Poté byla směs vлита do připravených silikonových forem a to tak, aby byla forma mírně přelitá přes svůj okraj a nedocházelo ke zmetkovitosti způsobeným nedolitím formy. Naplněné silikonové formy byly umístěny do přetlakové nádoby. Směsi byly ve formách vytvrzovány při přetlaku 0,7 MPa a teplotě 23 ± 2 °C po dobu 24 hodin. Použitím přetlaku byly eliminovány bubliny v objemu připravované kompozitní měrky a zároveň dosaženo precizního okopírování povrchu formy.

Takto odlité vzorky mohly být dále použity až po dokonalém dotvrzení, které probíhalo při stálé laboratorní teplotě 23 ± 2 °C po dobu minimálně 10 dní. Po této době získává materiál prakticky konečných hodnot materiálových vlastností.



Obr. 17: Forma pro výrobu koncových měrek ze silikonové pryže (vlevo). Koncové měrky po vyjmutí z formy (vpravo). Zdroj – vlastní fotografie.

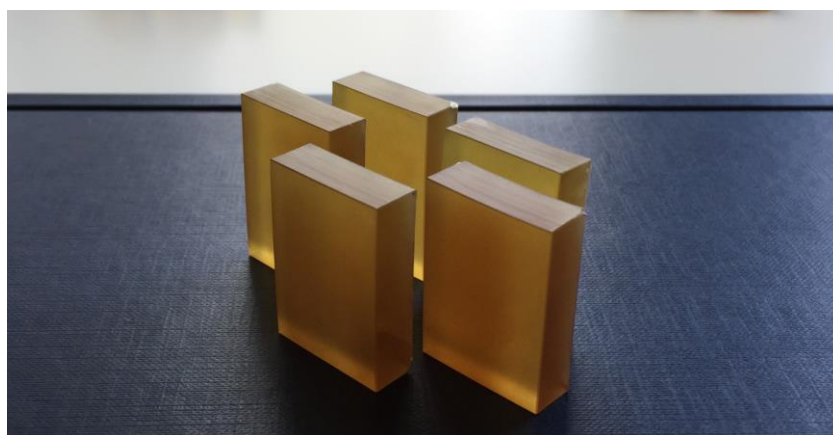
Na základě navrženého způsobu přípravy vzorků bylo nutné obrobít vrchní plochu s nálítkem tak, aby bylo dosaženo požadovaných rozměrů měrky. Obrábění ploch bylo provedeno na rovinné brusce BHP 329 s magnetickou upínací deskou. Pro obrábění byl zvolen brusný kotouč A9840K 9V 250x25x76. Kompozitní měrka byla upnuta mezi dva upínací prvky obdélníkového průřezu. Dále byla nastavena požadovaná koncová hodnota měrky, na kterou byl nálitek obrušován s přesností na tisícinu milimetru.



Obr. 18: Rovinná bruska BHP 329 s upnutým vzorkem pro obrobení povrchu po odlití vzorku.

Zdroj – vlastní fotografie.

Tento postup byl navržen a odzkoušen jako dostatečný postup k vytvoření požadovaného povrchu o daných rozměrech měřky. Další úpravy obráběné plochy nebyly nutné, protože obráběná plocha není funkční plochou koncové měřky. Takto byl připraven výsledný produkt k hodnocení materiálových vlastností a kalibraci.



Obr. 19: Vzorky koncových měrek z kompozitního materiálu určené pro následující hodnocení.

Zdroj – vlastní fotografie.

2.4 Kalibrace měřidel

Kalibrace měřidel byla prováděna v Českém metrologickém institutu – oblastním inspektorátu v Liberci na zařízení TESA – MODUL. Vlastní postup kalibrace spočívá v porovnání etalonu se vzorkem – v tomto případě kompozitním měřidlem. Kalibraci nebylo možné provést, neboť rozměry kompozitních měřidel se v porovnání s etalonem lišily o více než 20 μm . Tato diference mohla být způsobena při výrobě vzorků, neboť kompozitní směs byla odlévána do silikonové formy, která je pružná. Dalším příspěvkem ke zmenšení rozměru vzorku bylo smrštění při vytvrzování, které se u epoxidových pryskyřic běžně pohybuje v rozsahu do 4 %. Za předpokladu vytvoření vzorku adekvátního rozměru je jeho kalibrace možná.



Obr. 20: Sada ocelových etalonových měřidel a umístění kompozitního měřidla do měřicího přístroje.
Kalibrace měřidla. Zdroj – vlastní fotografie.

2.5 Podmínky používání měřidel v praxi

Pro hodnocení chování navrženého kompozitního materiálu je nutné specifikovat vlivy a podmínky, kterým jsou standardní měřidla v běžné strojírenské praxi vystavována. Ty lze rozdělit na vlivy způsobené člověkem - např. korozivní vliv potu z rukou, pád měrky na zem a vlivy prostředí, jako je prašnost, kontakt s vodou, kontakt s oleji či korozivními chemikáliemi, ořez materiálu měrky při kontaktu s povrchem

součástí, dilatace měrky při zvýšené teplotě v provozu. Pouze část vlivů a podmínek lze vyhodnotit s použitím normovaných zkoušek.

Pro každý experiment bylo vybráno pět „kompozitních měřidel“, které předtím nebyly využity k žádnému z výše navržených hodnocení.

2.5.1 Hodnocení teplotní roztažnosti vzorků

Nízký koeficient tepelné roztažnosti měřidel délky patří k nejdůležitějším parametrům, které jsou pro jejich praktické použití vyžadovány. Z tohoto důvodu bylo v rámci navrženého experimentu důležité seznámit se s dilatačním chováním zkoušených měrek na bázi kompozitního materiálu, protože na rozdíl od jiných konstrukčních materiálů, jakými jsou například kovy, obecně polymery vykazují velkou teplotní roztažnost. Ta se stanovuje jako změna lineárních anebo objemových rozměrů, které by mohly nastat za výrazné změny teplot při použití v praxi. Tím by mohlo dojít k ovlivnění funkčnosti a využitelnosti kompozitní koncové měrky, a proto bylo důležité stanovit koeficient délkové teplotní roztažnosti v souladu s normou ČSN 64-0528. Pro hodnocení byly vybrány dvě sady měrek po 5 kusech.

Koeficient délkové teplotní roztažnosti je materiálová vlastnost, u které se při změně teploty o 1 Kelvin změni jednotka délky tělesa. Koeficient délkové teplotní roztažnosti α je převrácenou hodnotou teploty.

V hodnocení byl využit střední koeficient délkové teplotní roztažnosti ve stanoveném teplotním rozmezí. To je střední přírůstek délky měřeného vzorku vyvolaný změnou teplot v daném rozmezí [22].

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{1}{K} \right]$$

Vztah 1

α střední koeficient délkové teplotní roztažnosti [10^{-6} K^{-1}]

T_1 nižší mezní teplota [K]

T_2 vyšší mezní teplota v [K]

ΔL přírůstek délky zkušební tělesa vyvolaný změnou teploty ($T_1 T_2$) [μm]

Přístrojové vybavení pro realizaci experimentu bylo zvoleno následovně. Pro stanovení referenčních teplot byly využity dva teploměry. Pro měření záporných hodnot teploty byl vybrán odolný Datalogger CEM DT-172 s měřicím rozsahem -40 až $+70$ °C při 0–100 % relativní vlhkosti. Druhým byl 2 - kanálový teploměr Testo 810 s infrateploměrem s laserovým označením měřeného místa a především integrovaným NTC čidlem pro měření teploty okolního vzduchu. Oba zmíněné teploměry jsou dodávány včetně kalibračního protokolu.



Obr. 21: Teploměr Datalogger CEM DT- 172 (vlevo) a teploměr Testo 810 (vpravo).

Zdroj – vlastní fotografie.

Pro měření absolutní délky před změnou teploty, byl použit digitální mikrometr značky Mitutoyo s válcovým pevným dotekem s rozsahem 0 - 25 mm s přesností 0,001 mm [3].



Obr. 22: Digitální mikrometr Mitutoyo s pevným válcovým dotekem.

Zdroj – vlastní fotografie.

Dále byl pro měření změny délky zkoumaného vzorku vybrán digitální úchylkoměr od stejného výrobce splňující požadavky normy ČSN 64-0528. Digitální úchylkoměr Mitutoyo 543 – 690 B je schopen měřit změny zkoumaného vzorku s přesností na 0,001 mm.



Obr. 23: Úchylkoměr Mitutoyo 543 – 690 B. Zdroj – vlastní fotografie.

V tabulce technických údajů jsou uvedeny další technické specifikace použitého úchylkoměru.

Tab. 4: Technické parametry Mitutoyo 543-690 B [3].

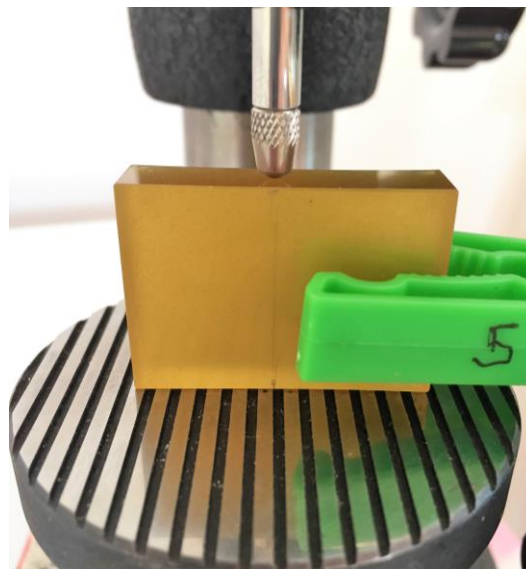
Technické parametry Mitutoyo 543-690 B
Číslicový krok: 0,001 mm
Měřicí rozsah: 12,7 mm
Mezní chyba: 0,003 mm
Měřicí síla: 2,0 N a méně
Hmotnost: 190 g
Display: LCD výška 8,5 mm
Měřicí dotek: Kulička z tvrdokovu se závitem M2,5x45

Před provedením hodnocení dilatace byla důležitá příprava vybraných vzorků kvůli zajištění co nejpřesnějšího místa pro měření jak absolutní délky, tak pro měření při zvolených referenčních teplotách. Bylo vybráno a označeno místo mezi protilehlými funkčními plochami měřky přibližně uprostřed vzorku a zároveň místo pro uložení měřeného vzorku na desce stojanu. To zajišťovalo opakovatelnost procesu měření. Na vzorky byly upevněny po celou dobu měření provizorní upínky, kvůli zamezení teplotního ovlivnění vzorku při manipulaci a měření. Samotné hodnocení probíhalo následujícím způsobem. Vzorky byly vystaveny změně teplot mezi 40 °C až 50 °C. Toho bylo dosaženo podchlazením vybraných vzorků v mrazícím zařízení na teploty v rozsahu $-21 \pm 2^\circ\text{C}$. Druhou referenční teplotou byla běžná laboratorní teplota $23 \pm 2^\circ\text{C}$.



Obr. 24: Zobrazení vzorků při referenčních teplotách. Zdroj – vlastní fotografie.

Metodika měření spočívala nejprve ve změření absolutního rozměru ploch mikrometrem a následně ustavení vzorku na stojan úchylkoměru do přesné pozice dle obr. 23. Následovalo odečtení teploty a naměřené úchyly sloužící pro výpočet výsledné odchylky Δl kompozitní měřky. Poté byly obě sady vzorků vloženy do mrazicího zařízení na 24 hodin při teplotě $-21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Po uplynutí navrženého času měření bylo důležité v co nejkratší manipulační době umístit vzorky na stojan a odečíst úchylku společně s druhou referenční teplotou prostředí. Dle stanoveného Vztahu 2 pro výpočet součinitele teplotní roztažnosti byl pro každou sadu o pěti zkoušených vzorcích vypočítán součinitel teplotní roztažnosti, viz Tab. 5.



Obr. 25: Detail ustavení vzorku.

Zdroj – vlastní fotografie.

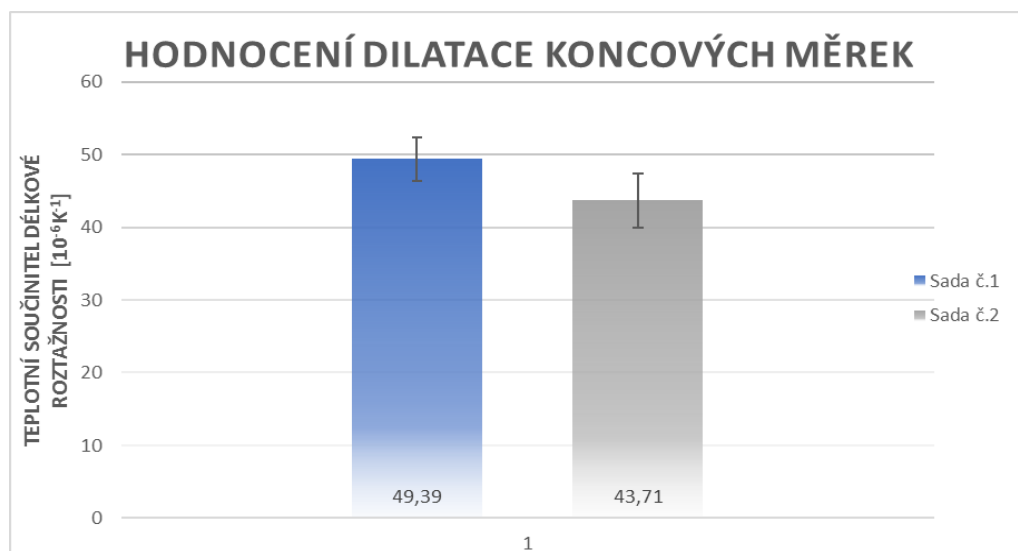
Tab. 5: Výpočet součinitele teplotní roztažnosti sady č. 1.

Sada č.1	Změna teploty	Délka KM před změnou teploty	Změna délky	Čas měření	Teplotní součinitel délkové roztažnosti
Vzorek č.	Δt	[mm]	Δl [μm]	t [hod]	α [10^{-6}K^{-1}]
1	45,7	24,103	60	24 hod.	54,471
2	44,9	24,460	56	24 hod.	50,990
3	45,0	24,151	52	24 hod.	47,847
4	43,7	24,201	49	24 hod.	46,332
5	44,9	24,001	51	24 hod.	47,325
					49,39 \pm 2,98

Tab. 6: Výpočet součinitele teplotní roztažnosti sady č. 2.

Sada č.2	Změna teploty	Délka KM před změnou teploty	Změna délky	Čas měření	Teplotní součinitel délkové roztažnosti
Vzorek č.	Δt	[mm]	Δl [μm]	t [hod]	α [10^{-6}K^{-1}]
1	44,7	24,365	52	24 hod.	47,745
2	43,8	24,262	45	24 hod.	42,346
3	45,9	24,170	53	24 hod.	47,773
4	45,0	24,397	47	24 hod.	42,810
5	43,5	24,277	40	24 hod.	37,877
					43,71 \pm 3,73

Z naměřených hodnot je patrné, že obě sady jsou z pohledu hodnocení koeficientu tepelné dilatace rozdílné. Součinitel délkové teplotní roztažnosti u sady č. 1 byl $49,39 \pm 2,98 [10^{-6}K^{-1}]$ a u sady č. 2 byl nižší $43,71 \pm 3,73 [10^{-6}K^{-1}]$.



Obr. 26: Grafické znázornění teplotní součinitele délkové roztažnosti pro koncové měrky.

Hodnota koeficientu teplotní délkové roztažnosti se v případě ocelových koncových měrek rovná $\alpha = (11 \pm 1) \times 10^{-6}K^{-1}$. Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti kompozitních měrek s organicko - anorganickým plnivem jsou oproti běžně používaným materiálům pro koncové měrky čtyřikrát vyšší a blíží se hodnotám, které jsou tabelovány pro epoxidové pryskyřice. Z hlediska využitelnosti tohoto systému v praxi, není tepelná dilatace výhodnější než u běžně používaných materiálů, což se předpokládalo, ale není ani zásadní překážkou pro využití kompozitních měrek s vhodně navrženým složením.

2.5.2 Hodnocení nasákavosti vzorků

Pro hodnocení nasákavosti bylo vybráno 5 ks vzorků koncových měrek o jmenovité délce 24,5 mm. Měření bylo provedeno za stálé laboratorní teploty $23 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu přibližně 60 % dle technické normy ČSN EN 62 [23].

Metodika měření spočívala ve stanovení hmotnosti v daném čase v ponořené kapalině a následným výpočtem procentuální změny hmotnosti $c(t)$ vzhledem k počáteční hmotnosti vzorku. Druhým parametrem hodnocení byla absolutní změna rozměrů vlivem nasákavosti po stanoveném čase 24 hodin. Stanovena byla mezi funkčními plochami pro rozměr 24,5 mm pomocí úchylkoměru Mitutoyo 543-690 B.

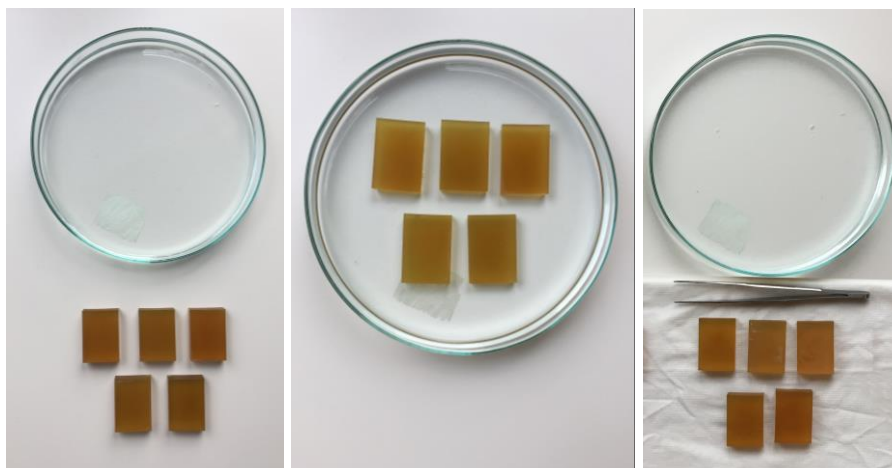


Obr. 27: Laboratorní váha KERN® KB 120-3N. Zdroj – vlastní fotografie.

Každý vzorek byl zvážen na laboratorní váze KERN & Sohn GmbH s rozlišovací schopností tisíciny gramu a s linearitou $\pm 0,003$ g. Poté byl vzorek vložen do Petriho misky s destilovanou vodou tak, aby byla kompozitní měrka obklopena ze všech stran kapalinou.

Časové intervaly měření byly stanoveny tak, aby byl zohledněn jak krátký styk kapaliny se vzorkem, tak i dlouhodobější působení kapaliny na vzorek. Celkový čas pro stanovení nasákavosti byl 24 hodin, rozdělený na osm intervalů – čas do 1. minuty, do 2. minuty, do 5. minut, do 10. minut, do 30. minut, do 1. hodiny, do 12. hodin a do 24. hodin.

V každém v těchto stanovených časech, byly vzorky vyjmuty z kapaliny, osušeny filtračním papírem a následně zváženy na laboratorní váze a poté byly opět vloženy zpět do kapaliny.



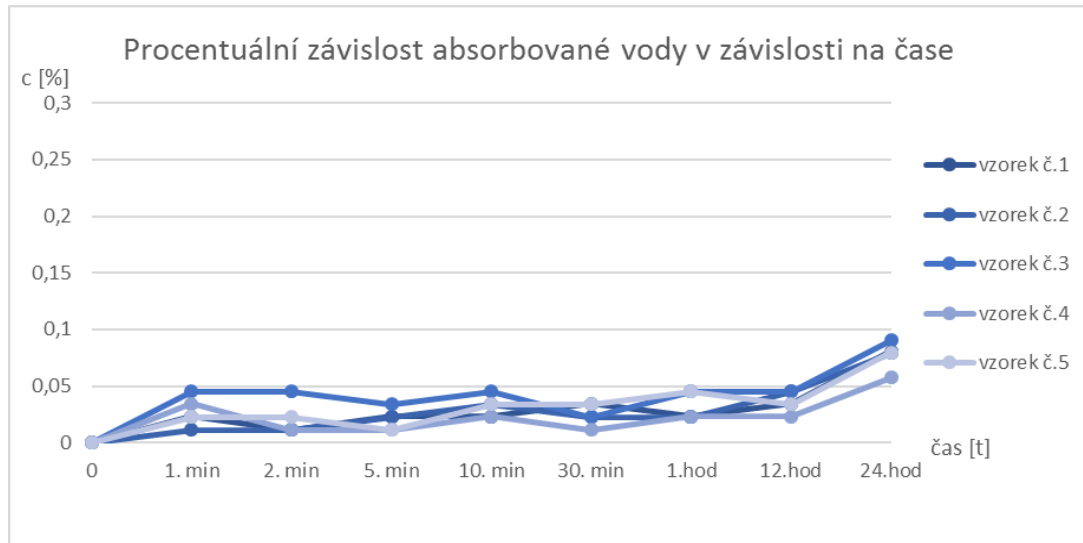
Obr. 28: Kompozitní měrky při měření nasákavosti v destilované vodě. Zdroj – vlastní fotografie.

Pro každý zkušební vzorek byl v určitém čase ponořeném ve vodě, stanoven procentuální hmotnostní přírůstek pro nasáknutí kapalinou s využitím vztahu č. 2 v souladu s technickou normou [23].

$$c_{(t)} = \frac{m_{vz}(t) - m_0}{m_0} \cdot 100$$

Vztah 2

Kde $c_{(t)}$ značí procentuální změnu hmotnosti v daném čase. $m_{vz(t)}$ je naměřená hmotnost vzorku po osušení před dalším ponořením do kapaliny a m_0 je počáteční hmotnost vzorku před vlastním měřením nasákavosti [23]. Výsledné hodnocení nasákavosti vzorků v destilované vodě je graficky shrnuto na obr. 29.



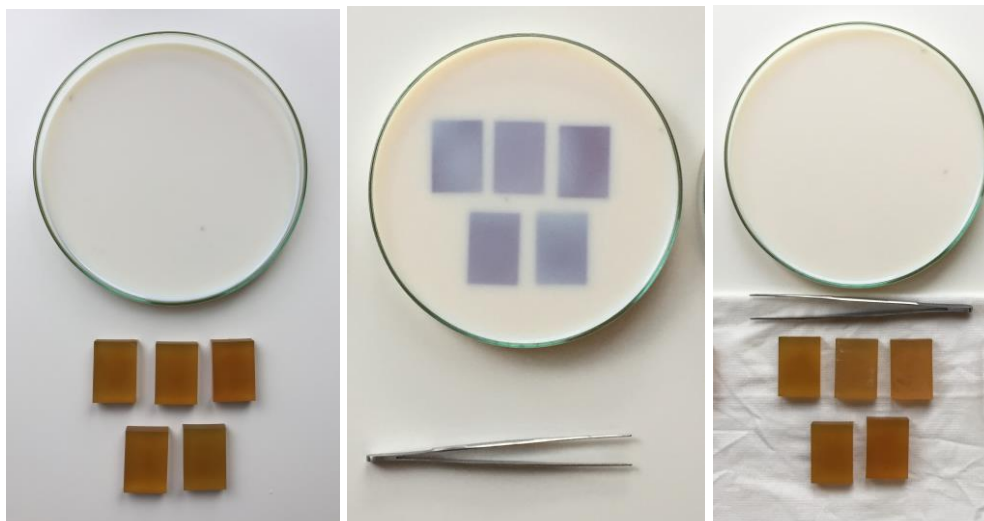
Obr. 29: Grafická závislost procentuální změny hmotnosti vzorků ponořených ve vodě v závislosti na čase.

Z grafu je patrné, že vzorky kompozitních měrek ponořené 24 hodin ve vodě absorbovaly maximálně devět desetin procenta své hmotnosti, což odpovídá přírůstku hmotnosti v průměru devíti tisícin gramu. Při zohlednění okolních vlivů, jako je odchylka laboratorní váhy a možné nepřesnosti při osušení vzorku před vážením, tak můžeme říci, že vzorky ponořené v této kapalině po takto stanovenou dobu 24 hodin jsou jen minimálně nasákavé. Toto tvrzení dokládá druhý měřený parametr, kterým bylo zvětšení rozměru. Průměrná odchylka před a po 24 hodinovém vystavení působení vodě byla na vybraných pěti vzorcích $\Delta l = 0,004 \pm 0,001$ [mm]. To odpovídá změně rozměru mezi funkčními plochami o $0,018 \pm 0,004$ %.

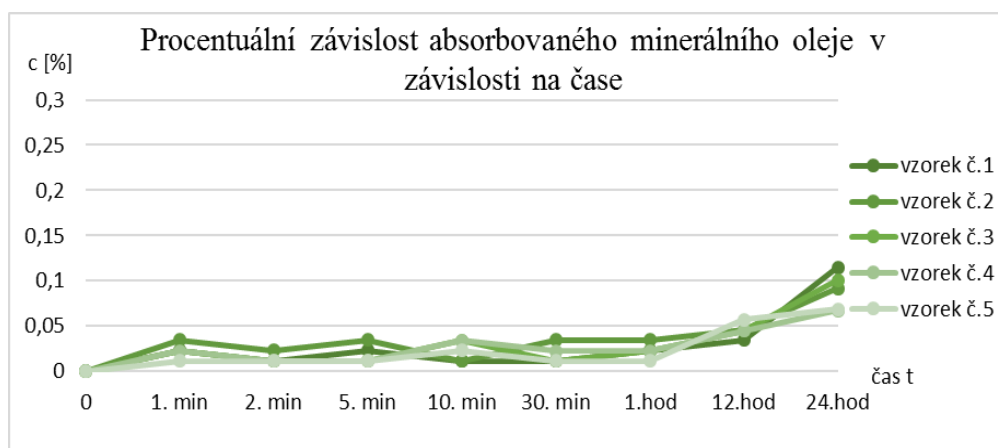
2.5.3 Hodnocení odolnosti vzorků vůči olejům

Zejména pro používání měřidel v praxi bylo žádoucí podrobit vzorky zkouškám nasákavosti vůči rezným kapalinám. Hodnocení bylo provedeno stejnou metodikou jako při měření nasákavosti vzorků ve vodě dle technické normy ČSN EN 62. Dále byla stanovena také délková odchylka po 24 hodinách v kapalině. Pro hodnocení bylo vybráno dalších pět nových vzorků kompozitních měrek a ponořeno do kapaliny, kterou

byl pěti procentní roztok řezného minerálního oleje. Vodou ředitelný minerální olej s obchodním označením Hocut® 795 B [24]. Měření opět probíhalo v osmi intervalech a v každém určeném čase byl vzorek vyjmut osušen a zvážen na laboratorních vahách.



Obr. 30: Kompozitní měřky při měření nasákavosti v řezném minerálním oleji. Zdroj – vlastní fotografie.

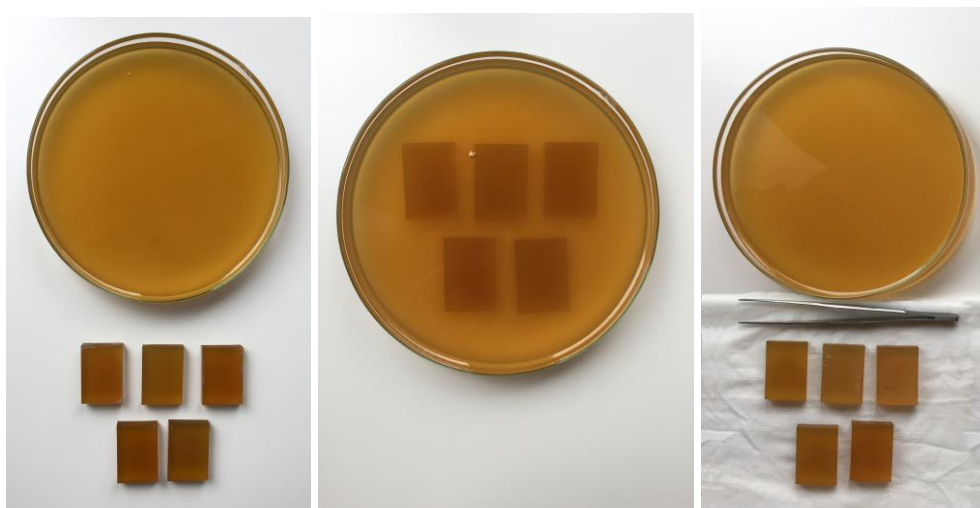


Obr. 31: Grafická závislost procentuální změny hmotnosti vzorků ponořených v minerálním řezném oleji v závislosti na čase.

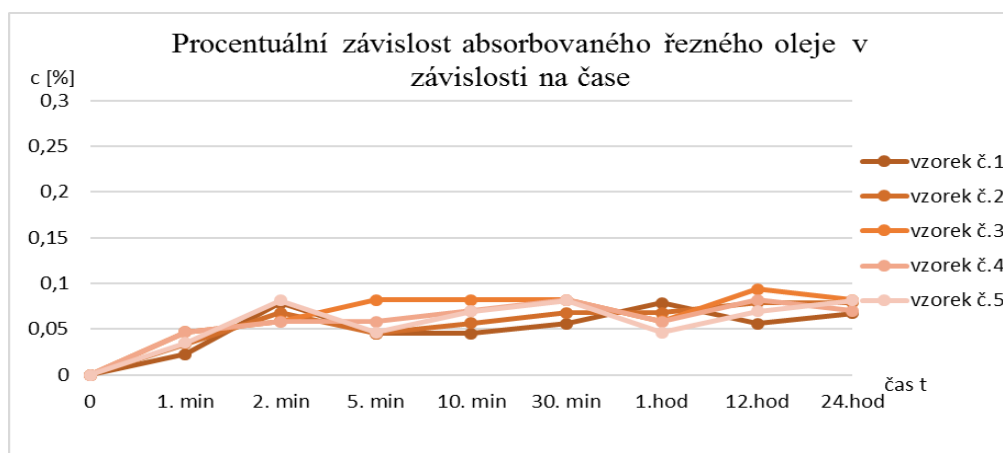
Z grafu je patrné, že ke změně hmotnosti dochází až po 24 hodinách vystavení vzorku vybranému minerálnímu oleji. Změny hmotnosti kompozitních měrek dosahují jedenácti desetin procenta hmotnosti vzorku. I v tomto případě lze konstatovat dle

výsledků měření to samé jako v případě destilované vody, že koncové měrky jsou v tomto minerálním řezném oleji jen minimálně nasákavé. Důkazem tohoto měření byla průměrná odchylka rozměru měřidla s hodnotou $0,003 \pm 0,001$ [mm], v procentuálním vyjádření změny rozměrů o $0,012 \pm 0,003$ %.

Druhou kapalinou odlišného složení než minerální olej byl řezný olej pod obchodním označením Multicut Ultra 10 [25]. Pro hodnocení byl použit identický postup stanovení nasákavosti na dalších pěti vzorcích kompozitních měrek ve stejných časových intervalech.



Obr. 32: Kompozitní měrky při měření nasákavosti v řezném oleji. Zdroj – vlastní fotografie.



Obr. 33: Grafická závislost procentuální změny hmotnosti vzorků ponořených v řezném oleji v závislosti na čase.

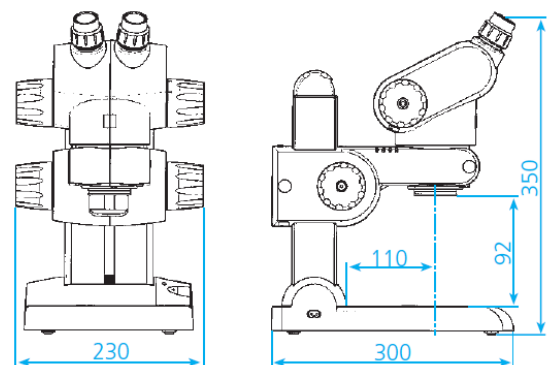
Dle grafického znázornění změny hmotnosti lze říci, že koncové měrky vůči tomuto řeznému oleji mění hmotnost do osmi desetin procenta své hmotnosti, ale na rozdíl od ostatních dvou měřených kapalin se hodnoty mění již od druhé minuty styku oleje se vzorkem. Tato odlišnost od předchozích dvou kapalin byla pravděpodobně způsobena rozdílnou viskozitou oleje a jeho lepší schopností ulpívat na povrchu měrky. To se projevilo dřívějším nárůstem hmotnosti, avšak nepřesáhlo hodnotu, při které by bylo možné říci, že je vzorek v tomto oleji nasákový. Pro tento řezný olej byla stanovena rozměrová odchylka $0,002 \pm 0,001$ [mm], která v procentuálním vyjádření nárůstu rozměrů po 24 hodinách odpovídá změně o $0,010 \pm 0,006$ %.

Z uvedených výsledků vyplývá, že ani tento typ řezného oleje nebude mít zásadní vliv na výsledné vlastnosti měrky stejně jako minerální olej a voda.

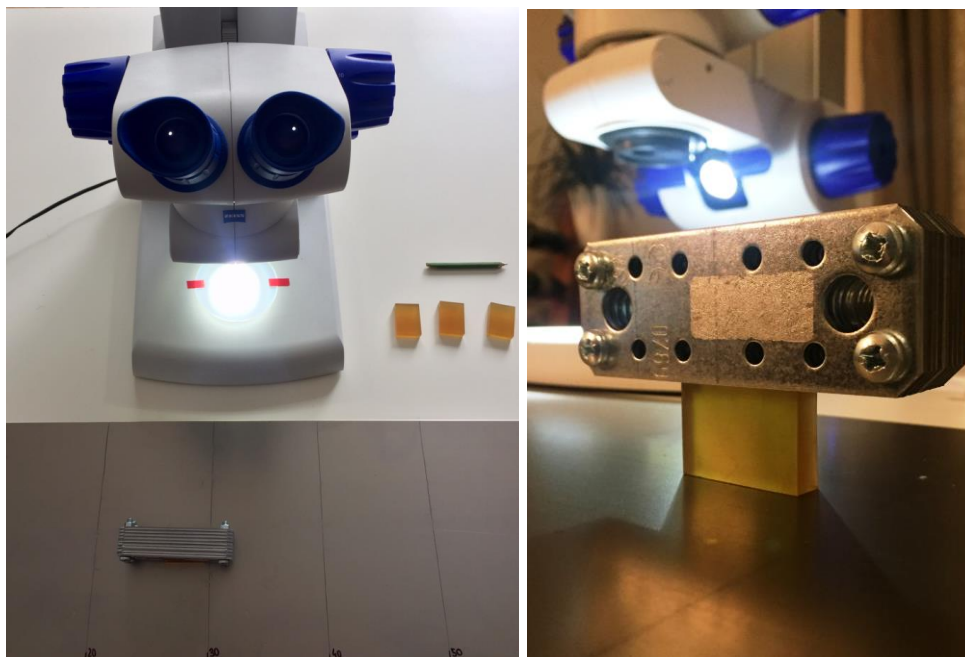
2.5.4 Hodnocení odolnosti vzorků vůči otěru

Hodnocení kompozitních vzorků vůči otěru na ocelové desce bylo navrženo jako hodnocení optických změn povrchu po cyklickém styku vzorku s běžnou ocelí. Pro zatížení vzorku bylo použito 500 g závaží. Povrch byl hodnocen na stereomikroskopu Stemi DV4 CARL ZEISS s polohovacím stativem [26].

Technické parametry stereomikroskopu CARL ZEISS Stemi DV4	
Okulár mikroskopu	W 10x/20 Br. Foc (high-eyepoint, focusing)
Pracovní vzdálenost (mm)	95 mm až 230 mm
Zvětšení	8 až 32x
Hmotnost	5 kg

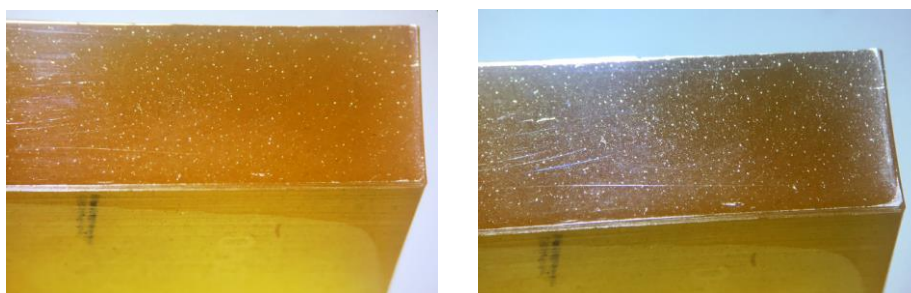


Obr. 34: Schéma stereomikroskopu Carl Zeiss Stemi DV4. [26]



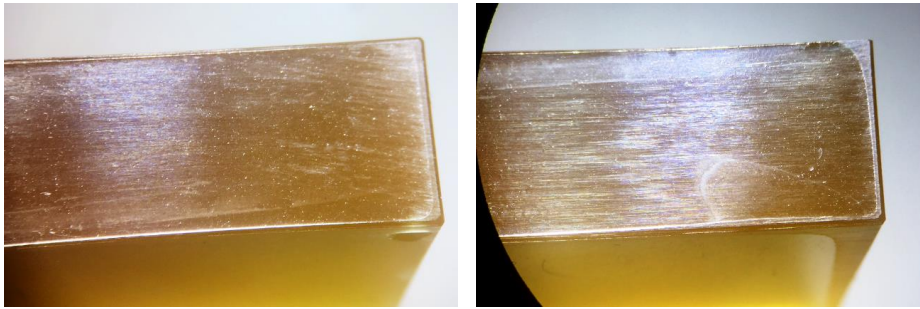
Obr. 35: Koncová měrka se závažím 500 g při zkoušce otěru. Zdroj – vlastní fotografie.

Hodnocení bylo rozděleno do šesti intervalů o celkovém počtu 100 cyklů, přičemž jeden cyklus měl délku 1 metr. Vzorky byly hodnoceny po 1 cyklu, 5, 10, 20, 50 a 100 cyklech.



Obr. 36: Stav povrchu před hodnocením. Zvětšení 10x (vlevo), vpravo po 5 cyklech se zvětšením 10x.

Zdroj – vlastní fotografie.



Obr. 37: Vzorek po 50 cyklech (vlevo), vpravo po- 100. cyklech. Zdroj – vlastní fotografie.

Z uvedených snímků při desetinásobném zvětšení je patrné, že s rostoucím počtem cyklů dochází k poškozování povrchu kompozitního měřidla. Po 50 cyklech je poškození dobře patrné – viz obr. 35 a 36. Poškození vzorku primárně souvisí s jeho nižšími materiálovými parametry v porovnání s parametry ocelových či keramických měřidel. Životnost z hlediska odolnosti vůči otěru je nižší, poškození kompozitního měřidla začíná na jeho okrajích a postupuje směrem dovnitř. Zde je zřejmá analogie s poškozováním všech typů standardně používaných měřidel.

2.5.5 Hodnocení odolnosti vzorků vůči nárazu/pádu

Pro úplné hodnocení podmínek v praxi byly vzorky koncových měrek vystaveny pádovým zkouškám. Jelikož není dostupná přesná metodika pro takovýto druh měření, bylo stanoveno, že vzorek bude umístěn ve výšce 1 metr nad plochou dopadu a bude spuštěn bez vložení počáteční rychlosti volným pádem za působení gravitačního zrychlení. Volný pád je vlastně rovnoměrně zrychlený pohyb s nulovou počáteční rychlostí, kde zrychlení je tzv. tíhové zrychlení $a = g \doteq 9,81 \text{ ms}^{-2}$

Dané zrychlení je podle definice derivací rychlosti podle času

$$a = -g = \frac{dv}{dt}.$$

$$dv = -gdt,$$

$$\int_{v_0}^{v(t)} dv = -g \int_0^t dt.$$

Výsledek integrace pro rychlost

$$\begin{aligned}v(t) - v_0 &= -gt, \\v(t) &= v_0 - gt.\end{aligned}$$

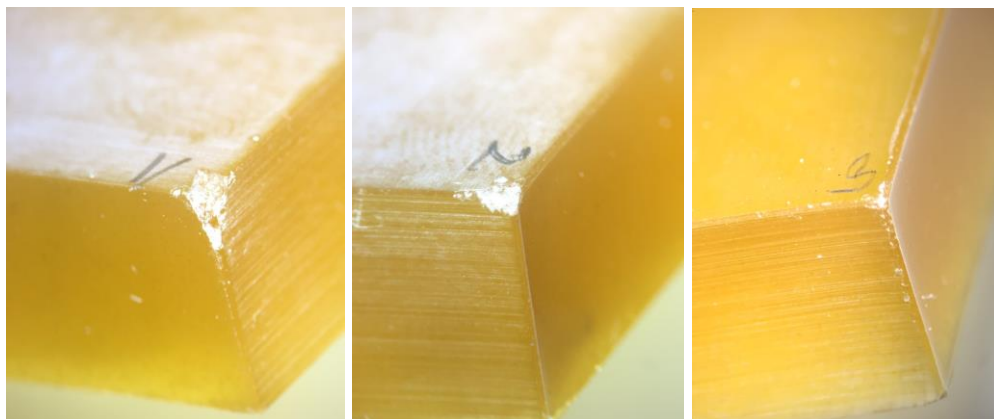
Z předem stanovené výšky bylo možné napsat vztah pro dobu pádu tělesa na zem.

$$h = \frac{1}{2} \cdot gt^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Do vztahu pro rychlost je dosazen čas t a z počáteční podmínky výchozí rychlosti ve výšce h , která byla rovna $v_0 = 0 \text{ ms}^{-1}$ je výsledná rychlost dopadu hodnocených vzorků se zanedbáním odporu prostředí rovna

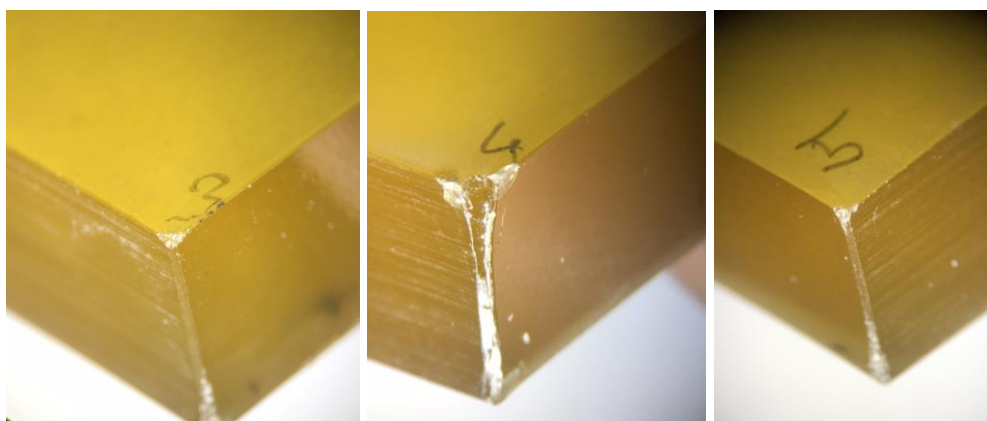
$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = 4,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 15,95 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

Vzorek dopadl na podložku, která byla ze standardního cementového betonu vyskytující se na běžných pracovních podlahových plochách s rychlostí téměř $4,5 \text{ ms}^{-1}$. Po každém pádu byl vzorek podroben analýze poškození, ke kterému po pádu došlo. Jelikož trajektorie volného pádu nebyla blíže specifikována, protože při každém opakování pádu vzorek dopadal náhodně, bylo hodnocení prováděno do té doby, než vzorek ztratil svoji funkci, tj. do porušení funkčních ploch, nebo do pěti pádů. Výstupem analýzy poškození jsou fotografie pořízené stereomikroskopem CARL ZEISS Stemi DV4, kde bylo pro každý vzorek zdokumentováno postupné poškození. Toto poškození je patrné převážně na rozích. Po pádu by žádné měřidlo délky nemělo být dále používáno.



Obr. 38: Vzorek č. 3 a vzniklé poškození při styku s cementovou podložkou. Zvětšení 12x.

Zdroj – vlastní fotografie

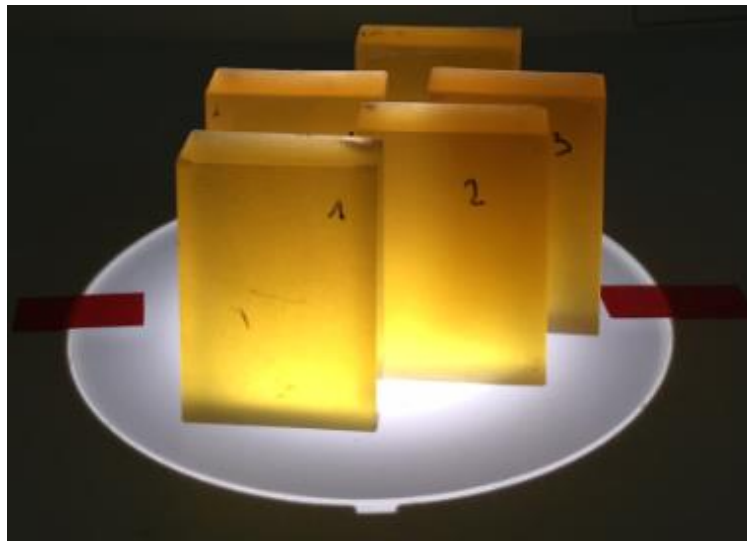


Obr. 39: Rozsah poškození při styku s cementovou podložkou u vzorku č.4. Zvětšení 12x.

Zdroj – vlastní fotografie

Všechny vzorky byly fotografovány při dvanáctinásobném zvětšení a z fotografií je zřejmé, že k největšímu poškození docházelo na hranách měrek. Rozsah poškození byl závislý na trajektorii dopadu a charakteru kontaktu styčné plochy vzorku s podkladem (betonem). Poškození vychází z izotropního chování tohoto kompozitního systému.

Z provedeného experimentu vyplývá, že díky nedefinované trajektorii pádu nešlo zaručit stejné místo dopadu vzorku, a tedy jeho porušení. Lze však říci, že u všech pěti vzorků došlo vždy k porušení funkčnosti do pěti pádů/kontaktů s podlahou. Tudiž lze konstatovat, že koncové měrky z tohoto kompozitního materiálu nejsou odolné vůči pádu a ve většině případů dojde k znehodnocení měrky po prvním či druhém pádu na podlahu, která by měla tvrdost srovnatelnou s tvrdostí cementového betonu.



Obr. 40: Kompozitní koncové měrky po hodnocení odolnosti vůči pádu. Zdroj – vlastní fotografie.

3 Diskuse výsledků

Veškeré vzorky, které byly hodnoceny, byly vyrobeny z epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520 plněné organicko-anorganickým plnivem v množství 1 dsk. Velikost částic plniva byly menší než 100 mikrometrů. Pro každý navržený experiment bylo připraveno 5 vzorků o velikosti od 24,00 mm do 24,46 mm. Materiál, který byl použit pro přípravu vzorků, byl připraven podle patentu CZ 305686 Epoxidová pryskyřice plněná organicko-anorganickým plnivem přírodního původu a způsob její přípravy, vzorky byly upraveny do podoby analogické standardním měřidlům délky – byly obrobena tak, aby byly odstraněny nálitky vznikající v procesu jejich výroby.

Ke zlepšení opakovatelnosti a efektivnosti výroby by bylo vhodné zlepšit postup odlévání epoxidové pryskyřice, tak i zefektivnit proces obrábění. Pro tuto unikátní sérii kompozitních koncových měrek mělo být plně dostačující použití silikonových forem. Vzhledem k tomu, že díky objemovým změnám obou polymerních materiálů (silikonu i epoxidu) byly získány vzorky menší, než jsou etalony, bylo by vhodné navrhnout efektivnější způsob přípravy i následného opracování.

Vybraný materiál byl použit jako první kompozitní systém, na kterém byla rozpracována metodika, jak postupovat při hodnocení kompozitních měřidel délky na bázi plněných reaktoplastů. Vhodnost navrženého materiálu byla posuzována z hledisek, která jsou pro použití měřidel délky nejdůležitější, a to koeficient teplotní roztažnosti materiálu, nasákavost materiálu ve vodě a ve vybraných olejích, odolnost vůči otěru, odolnost vůči pádu a samozřejmě možnost kalibrace měřidla z daného materiálu. Pro hodnocení chování navrženého materiálu byly simulovány takové podmínky a takové způsoby zatěžování, které se nejvíce blížily reálnému používání měřidel délky ve strojírenských provozech.

Možnost kalibrace kompozitního měřidla

Připravené vzorky nebylo možné kalibrovat, neboť jejich rozměry byly menší než etalony, a to o více než 20 mikrometrů.

Hodnocení nasákavosti materiálu ve vodě a ve vybraných olejích

Hodnocení nasákavosti bylo zvoleno cíleně, neboť polymerní materiály obecně vykazují větší nebo menší stupeň polarit, který je v souladu s jejich chemickým složením i charakterem vnitřní struktury. Nasákavost kompozitního materiálu, ze kterého byly vyrobeny hodnocené kompozitní měřky je nízká navzdory tomu, že je polymer – reaktoplast – plněn organicko-anorganickým plnivem přírodního původu. Pro destilovanou vodu je hodnota nasákavosti po 24 hodinách vyjádřena procentuální změnou hmotnosti $0,077 \pm 0,011$ [%] své hmotnosti, pro minerální olej $0,082 \pm 0,028$ [%] a pro řeznou kapalinu $0,062 \pm 0,006$ [%] po témže časovém intervalu. Nízké hodnoty nárůstu hmotnosti vzorků nicméně nebyly z hlediska rozměrové stability kompozitní měřky zcela vypovídající, a proto bylo chování materiálu doplněno o hodnocení změny rozměru vzorku po jeho vystavení ve stejných typech kapalin, jaké byly použity pro hodnocení nasákavosti. Na základě měření byly zjištěny následující hodnoty. Po 24 hodinách se rozměry vzorků změnil v destilované vodě o $\Delta l = 0,004 \pm 0,001$ [mm], což odpovídá změně rozměru mezi funkčními plochami o $0,018 \pm 0,004$ %, v minerálním oleji $0,003 \pm 0,001$ [mm], v procentuálním vyjádření změny rozměrů o $0,012 \pm 0,003$ % a v řezné kapalině byla rozměrová odchylka $0,002 \pm 0,001$ [mm], která v procentuálním vyjádření nárůstu rozměrů po 24 hodinách odpovídá změně o $0,010 \pm 0,006$ %.

Na základě provedených měření lze konstatovat, že navržený kompozitní systém by bylo možné v případě tohoto složení využít jako materiál pro kompozitní měřidla.

Hodnocení koeficientu teplotní roztažnosti

Nízký koeficient teplotní roztažnosti měřidel délky patří k nejdůležitějším parametrům, které jsou pro jejich praktické použití vyžadovány. Polymery obecně vykazují velkou teplotní roztažnost, která je opět dána jejich chemickým složením a nadmolekulární strukturou. Zde jsou patrné zejména rozdíly mezi zesíťnými reaktoplasty a amorfními nebo semikrystalickými termoplasty. Kompozitní materiál, který byl hodnocen, reprezentoval systém s nízkým obsahem plniva, který byl v rámci dříve provedených měření vyhodnocen jako materiál s vyšší odolností vůči opotřebení.

Z naměřených hodnot je patrné, že z pohledu hodnocení koeficientu teplotní roztažnosti není tento materiál dostačující v porovnání s ocelí, která se pro výrobu měřidel délky nejčastěji používá. Součinitel délkové teplotní roztažnosti u obou hodnocených sad se liší, u sady č. 1 byl $49,39 \pm 2,98 [10^{-6}K^{-1}]$ a u sady č.2 byl nižší $43,71 \pm 3,73 [10^{-6}K^{-1}]$. Hodnoty, který jsou zde uváděny, jsou průměrnou hodnotou získanou měřením na pěti odlišných vzorcích, které tvořily sadu kompozitních měřidel. Rozdíly v hodnotách lze vysvětlit nehomogenitou materiálu, která může být dána rozmístěním částicového plniva, ale také procesem vlastního síťování reaktoplastové matrice nebo vlivem procesu obrábění.

Na základě provedených měření lze konstatovat, že navržený kompozitní systém by nebylo možné v případě tohoto složení využít jako materiál pro kompozitní měřidla.

Hodnocení odolnosti vůči otěru

Odolnost standardních ocelových měřidel vůči opotřebení je dalším faktorem, který je pro jejich použití zásadní. Je-li měřidlo používáno, dochází k jeho opotřebení, které je nežádoucí a snižuje jeho kvalitu a použitelnost. Použitý kompozitní materiál byl vybrán záměrně, jako materiál, který při tribologickém hodnocení vykázal oproti neplněné epoxidové pryskyřici vyšší odolnost vůči opotřebení o 75 %. Podle tohoto hodnocení bylo zvažováno jeho použití jako potenciálního kompozitního materiálu s vysokou odolností vůči otěru. Proces hodnocení kompozitního materiálu byl navržen tak, aby se co nejvíce přiblížil používání měřidel délky v praxi. Na základě těchto skutečností bylo provedeno cyklické zatěžování vzorků na rovné ocelové desce. Pro zatížení vzorku bylo použito 500 g závaží, celková délka, po které se vzorek pohyboval byla 100 metrů, 1 cyklus byl adekvátní 1metru. Změny, které byly pozorovatelné na povrchu hodnocených ploch byly sledovány mikroskopicky.

Na základě provedených měření lze konstatovat, že navržený kompozitní systém by nebylo možné v případě tohoto složení využít jako materiál pro kompozitní měřidla navzdory tomu, že byl materiál hodnocen tribologicky a byl označen jako materiál s vyšší odolností vůči opotřebení oproti neplněné epoxidové pryskyřici.



Hodnocení odolnosti vůči pádu

Ocelová měřidla délky, stejně jako měřidla z jiných materiálů, jsou velmi náročná na zacházení. Práce v rukavicích, vhodné ošetření a uložení měřidla jsou bezpodmínečně nutné. Zcela nepřijatelnou situací je pád měřidla na zem. Nedojde k jeho rozbití, pokud se nejedná o měřidlo keramické nebo skleněné, ale dochází k jeho poškození způsobeného nárazem a takové měřidlo by nemělo být dále používáno. Pro doplnění informace o chování kompozitních měřidel byly vzorky vystaveny pádovým zkouškám. Vzhledem k tomu, že se jednalo o materiálový systém, kde byla matricí křehká epoxidová pryskyřice došlo ve všech případech k nevratnému poškození vzorků.

Na základě provedených měření lze konstatovat, že navržený kompozitní systém by nebylo možné v případě tohoto složení využít jako materiál pro kompozitní měřidla.

Z provedených měření vyplývá, že hodnocený kompozitní materiál nedosahuje parametrů, které je nutné zajistit při používání měřidel délky.

4 Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s problematikou standardních měřidel délky, navrhnout způsob výroby kompozitních vzorků na bázi epoxidové pryskyřice plněné organicko-anorganickým plnivem, navrhnout metodiku hodnocení chování materiálu, provést navržené experimenty, vyhodnotit a diskutovat výsledky a zformulovat závěry.

Pro hodnocení chování navrženého materiálu byly vybrány takové podmínky a takové způsoby zatěžování, které se nejvíce blížily reálnému používání měřidel délky ve strojírenských provozech, a to hodnocení nasákavosti vody a vybraných olejů, hodnocení teplotní roztažnosti, hodnocení odolnosti vůči otěru a vůči pádu. Součástí měření bylo posouzení kalibrovatelnosti daného materiálu.

Na základě provedených experimentů a vyhodnocených měření byly zformulovány následující závěry týkající se charakterizace vybraného kompozitního systému:

- 1) Vzorky byly připravovány odléváním kompozitní směsi na bázi epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520 vytvrzované tvrdidlem P11 plněné organicko-anorganickým plnivem v množství 1 dsk do silikonové formy z materiálu Silastic T1 připravené podle standardní ocelové měřky.
- 2) Při přípravě vzorku dochází ke změnám rozměrů jak silikonové formy (zvětšení), tak kompozitního odlitku (zmenšení – smrštění odlitku při vytvrzování). V důsledku toho dochází ke zvětšení rozdílu mezi standardní ocelovou měrkou – etalonem a rozměrem vzorku kompozitního měřidla, který je větší než 20 mikrometrů. Z tohoto důvodu pak není možné vzorky kalibrovat.
- 3) Vzorky byly hodnoceny z hlediska nasákavosti v destilované vodě a dvou vybraných olejích. Nasákavost vzorků v destilované vodě je na úrovni

0,077±0,011 [%] přírůstku své hmotnosti, pro minerální olej 0,082±0,028 [%] a pro řeznou kapalinu 0,062±0,006 [%] po 24 hodinách, V souvislosti s nasákavostí byly naměřeny rozměrové rozdíly, které jsou pro destilovanou vodu $\Delta l = 0,004 \pm 0,001$ [mm], v minerálním oleji 0,003±0,001[mm], a v řezné kapalině byla rozměrová odchylka 0,002±0,001 [mm].

- 4) Vzorky byly hodnoceny z hlediska teplotní roztažnosti. Na základě měření bylo zjištěno, že koeficient teplotní roztažnosti se pohybuje v rozmezí od 37,88±4,41 [10^{-6}K^{-1}] do 54,47±4,41 [10^{-6}K^{-1}]. Průměrná hodnota koeficientu teplotní roztažnost je 46,55±4,41 [10^{-6}K^{-1}]. Rozdíly v naměřených hodnotách jsou vysvětlovány díky nehomogenitě reaktoplastové matrice v důsledku procesu jejího vytvrzování a následnému opracování obráběním.
- 5) Vzorky byly hodnoceny z hlediska odolnosti vůči otěru. Proces hodnocení kompozitního materiálu byl navržen tak, aby se co nejvíce přiblížil používání měřidel délky v praxi. Na základě těchto skutečností bylo provedeno cyklické zatěžování vzorků na rovné ocelové desce. Pro zatížení vzorku bylo použito 500 g závaží, celková délka, po které se vzorek pohyboval, byla 100 metrů, 1 cyklus byl adekvátní 1 metru. Na povrchu hodnocených ploch byly sledovány mikroskopické i makroskopické změny.
- 6) Pro doplnění informace o chování kompozitních měřidel byly vzorky vystaveny pádovým zkouškám. Vzhledem k tomu, že se jednalo o materiálový systém, kde byla matricí křehká epoxidová pryskyřice s nízkým stupněm plnění, došlo ve všech případech k nevratnému poškození vzorků.

Na základě provedených měření lze konstatovat, že hodnocený kompozitní systém by nebylo možné v případě tohoto složení využít jako materiál pro kompozitní měřidla.



Přínos práce:

Materiál výše uvedeného složení byl použit jako první kompozitní systém, na kterém byla rozpracována metodika, jak postupovat při přípravě vzorků a návrhu materiálového složení pro hodnocení kompozitních měřidel délky na bázi plněných reaktoplastů. Vhodnost navrženého materiálu byla posuzována z takových hledisek, která jsou pro používání měřidel zásadní. Na základě dosažených výsledků je zřejmé, že další směr výzkumu se musí ubírat cestou optimalizace materiálového složení k zajištění stability materiálu z hlediska teplotní roztažnosti, zvýšení odolnosti vůči otěru a odolnosti vůči pádu.

5 Seznam použité literatury

- [1] DOBEŠ, Jan. *Management jakosti pro kalibraci délkových měřidel* [online]. Brno, 2014. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32456>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jiří Pernikář.
- [2] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: Část I* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>. Studijní podklady. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [3] *Mitutoyo katalog – Základní informace ke koncovým měrkám* [online]. Praha, 2015. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/cz_cz/index.html?page=363.
- [4] ČSN EN ISO 3650. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) Etalony délek – koncové měrky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004. Třídící znak 25 3308.
- [5] DORIN, T., BEERS, J. *The Gauge Block Handbook* [online]. 2009. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/mono180.pdf>.
- [6] LENFELD, P. *Technologie II – 2. část (Zpracování plastů)* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-037-X. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
- [7] PODMANICKÁ, Stanislava. *Syntéza a charakterizace Epoxy - Geo hybridních kompozitních systémů* [online]. Plzeň, 2015, Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Vedoucí práce Tomáš Kovařík.

- [8] LIDAŘÍK, Miloslav. *Epoxidové pryskyřice*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1983, 729 s.
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. přepracované vyd., Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [10] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. 2. přepracované vyd., Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-807-0806-623.
- [11] HULL, D., CLYNE, T. W. *An Introduction to Composite materials*. Cambridge Solid State Science Series, 1996, second edition.
- [12] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. 1. vyd., Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80.7372-279-1.
- [13] STRONG, A. B. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*. USA: Society of Manufacturing Engineers, 2008. 625 s. ISBN 0-87263-854-5.
- [14] NELEŠOVSKÝ, Tomáš. *Výzkum a hodnocení hořlavosti plněných kompozitních systémů*: [Online]. Zlín, 2014: Universita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014. 113 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/30858>.
- [15] BAREŠ, Antonín. *Kompozitní materiály*. 1. vyd., Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s.
- [16] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Definice a historie kompozitu* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>.
- [17] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Fakulta chemická: VUT v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [18] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1 vyd., Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.



- [19] *DATASHEET CHS-EPOXY, 520*, [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z:
http://www.sincolor.cz/out/media/TAL13_EPOXY_520_15.pdf.
- [20] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Epoxidová pryskyřice plnění organicko-anorganickým plnivem přírodního původu a způsob její přípravy*. Česká republika. Patentový spis CZ 305686 B 32 B 9/02. 02.09.2014.
- [21] MATERIÁLOVÝ LIST, *CHS-EPOXY 520 PLNĚNÁ ORGANICKO-ANORGANICKÝM PLN* [online]. [cit. 2017-02-20]. Dostupné z:
https://www.hf.tul.cz/upload/vyrzpravy/01_materialovy_list.pdf.
- [22] ČSN 64 0528. *Plasty. Stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [23] ČSN EN ISO 62. *Plasty – Stanovení nasákavosti ve vodě*. Praha: Český normalizační institut. 2008.
- [24] HOUGHTON Inc, *Hocut[®] 795 B Vodou ředitelná kapalina na opracování kovů* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z:
https://www.houghtonintl.com/sites/default/files/data-sheets/hocut_795_b_1312_us.pdf
- [25] ZELLER + GMELIN GMBH & CO. KG, *Multicut Ultra 10* [online]. [cit. 2017-04-20].
Dostupné z: http://nugentek.cafe24.com/bizdemo16915/img/pdf/Multicut_en.pdf.
- [26] *Microscopy from Carl Zeiss. Stemi DV4* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.astrotech.hu/letoltesek/40-010_e_DV4.pdf.