

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH KONSTRUKCE VÝUKOVÉ POMŮCKY PRO MĚŘENÍ
SMYKOVÉHO TŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

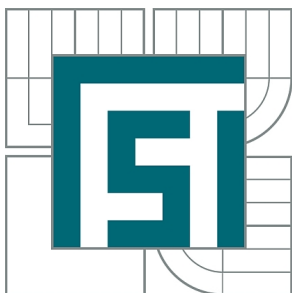
JAKUB HAZDA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH KONSTRUKCE VÝUKOVÉ POMŮCKY PRO MĚŘENÍ SMYKOVÉHO TŘENÍ

DESIGN OF NEW DEMONSTRATION RIG FOR FRICTION FORCE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB HAZDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN ZIMMERMAN, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Hazda

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Návrh konstrukce výukové pomůcky pro měření smykového tření

v anglickém jazyce:

Design of new demonstration rig for friction force measurement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh výukové pomůcky vhodné pro měření součinitele smykového tření s těmito parametry: možnost měření a záznamu součinitele statického smykového tření, možnost měření a záznamu součinitele dynamického smykového tření, možnost změny materiálů v kontaktu, možnost softwarového řízení.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Varianty konstrukčního řešení
5. Optimální konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Bibliografie

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, 3D digitální data (model), 2D digitální data (výkresy)

Typ práce: konstrukční

Účel práce: vzdělávání

Seznam odborné literatury:

- SHIGLEY, J. E, MISCHKE, Ch. R, BUDYNAS, R. G. Konstruování strojních součástí. VUTIUM, 2008. 1300 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- MORI, KATO a Ryoukou AKASAKA. A study on the friction characteristics and durability of band brakes. JSAE Review. 1995, roč. 16, č. 3, s. 245-249. ISSN 0389-4304.
- ČSN EN 1554. Dopravní pásy: Zkoušení třením bubnu. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- ČSN EN ISO 21182. Lehké dopravní pásy: Stanovení součinitele tření. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- ČSN EN 14882. Textilie povrstvené pryží nebo plasty: Zjišťování koeficientu statického a dynamického tření. Praha: Český normalizační institut, 2006.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Zimmerman, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 5.2.2013

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem výukové pomůcky pro měření a záznam třecí síly a součinitelů smykového tření. Úvodní část práce je věnována souhrnu základních informací týkajících se problematiky tření a jeho měření. Souhrn slouží jako podklad pro následující druhou část práce obsahující návrh samotného konstrukčního řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Smykové tření, součinitel tření

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with design of a new demonstration rig for friction force measurement. First part of the thesis is dedicated to summary of fundamental information related to matters of friction and friction measurement. The summary is used as a base for the following part of the thesis containing demanded structural design.

KEYWORDS

Sliding friction, coefficient of friction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAZDA, J. *Návrh konstrukce výukové pomůcky pro měření smykového tření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Zimmerman, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za pomoci uvedených zdrojů, pod vedením Ing. Martina Zimmermana, Ph.D..

V Brně dne 17.5. 2013

.....
Jakub Hazda

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou chci poděkovat Ing. Martinu Zimmermanovi, Ph.D. za rady, trpělivost a věnovaný čas při tvorbě této práce.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 11 |
| ÚVOD | 12 |
| 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ | 13 |
| 1.1 Základní metody měření tření | 13 |
| 1.1.1 Metoda poměru hmotností | 13 |
| 1.1.2 Metoda nakloněné roviny | 13 |
| 1.1.3 Metoda sevření | 14 |
| 1.1.4 Metoda siloměru | 15 |
| 1.3 Vybrané normy týkající se stanovení součinitelů tření | 15 |
| 1.3.1 ČSN EN ISO 21182 | 15 |
| 1.3.2 ČSN EN ISO 8295 | 17 |
| 1.3.3 ČSN EN 14882 | 18 |
| 1.3.4 ČSN 77 0240 | 19 |
| 1.4 Peeling test | 19 |
| 2 FORMULACI ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA | 20 |
| 3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE | 21 |
| 4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ | 22 |
| 5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY | 23 |
| 5.1 Varianta A | 23 |
| 5.2 Varianta B | 24 |
| 5.3 Varianta C | 25 |
| 6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ | 26 |
| 6.1 Nosná kostra | 26 |
| 6.2 Upínací plocha | 27 |
| 6.3 Uchycení kladky | 28 |
| 6.4 Lineární vedení | 29 |
| 6.5 Pohon lineárního vedení | 31 |
| 6.6 Volba snímače a jeho upevnění | 32 |
| 6.7 Zátěžná tělesa | 32 |
| 6.8 Modul pro peeling test | 33 |
| 6.9 Kompletní konstrukce | 34 |
| 6.9.1 Varianta 1 | 34 |
| 6.9.2 Varianta 2 | 35 |
| 7 ZÁVĚR - KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ | 36 |
| 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 37 |
| 9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN | 39 |
| 10 SEZNAM OBRÁZKŮ | 40 |
| 11 SEZNAM PŘÍLOH | 41 |

ÚVOD

Se třením a jeho důsledky se v praxi setkáváme neustále každý den. Tento fyzikální jev, přítomný ve všech mechanicky pracujících zařízeních, strojích a jejich součástech, může být z funkčního hlediska potřebný, jako je tomu např. u protiskluzových materiálů, brzdových kotoučů apod., ale také nežádoucí a omezující. Analýza třecích procesů ovlivňuje konstrukční vývoj v drtivé většině odvětví průmyslu. Správná aplikace technologických postupů stanovených pro zvyšování či snižování intenzity tření vychází zejména ze znalostí experimentálně zjištěných třecích vlastností použitých kontaktních materiálů.

Smykové tření je možno definovat jako odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů. Tento odpor je především důsledkem vzájemného působení nerovností obou styčných povrchů [1]. Tyto povrchy tedy nemají charakter teoretických ideálních rovinných ploch, k dotyku dochází na vrcholcích nerovností, které se navzájem deformují a obrušují. [2] Vzniklá třecí síla má vždy směr opačný ke směru rychlosti relativního pohybu vztažného tělesa a její působíště leží v pomyslné rovině dotyku. Třecí síla je označována písmenem F s indexem t . Její velikost nezávisí na rozměrech stykové plochy. S platností pro malé rychlosti lze také říci, že F_t není závislá na rychlosti vzájemného pohybu kontaktních těles. Pokud navíc platí, že mezi styčnými plochami není přítomna kapalná nebo plynná mezivrstva, hovoříme pak o tzv. suchém tření [3]. Třecí síla naopak závisí na typech materiálů a drsnostech povrchů těles a je přímo úměrná normálové přitlačné síle označované F_n . Fyzikální veličina, se značkou f případně μ , udávající poměr mezi touto třecí a normálovou silou, se pak nazývá součinitel smykového tření.

Smykové tření lze dále rozdělit na statické (klidové) a dynamické (za pohybu). Součinitel statického smykového tření, označovaný μ_s , nabývá zpravidla větších hodnot než součinitel dynamického smykového tření μ_D [4]. Tento fakt je způsoben tím, že síla potřebná k uvedení tělesa z klidového stavu do pohybu je větší než síla udržující těleso v již rovnoměrném pohybu. Proto se také pro určité dva stejné nebo různé materiály obvykle udávají obě hodnoty jak statického, tak i dynamického součinitele smykového tření.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

1.1 Základní metody měření tření

1.1

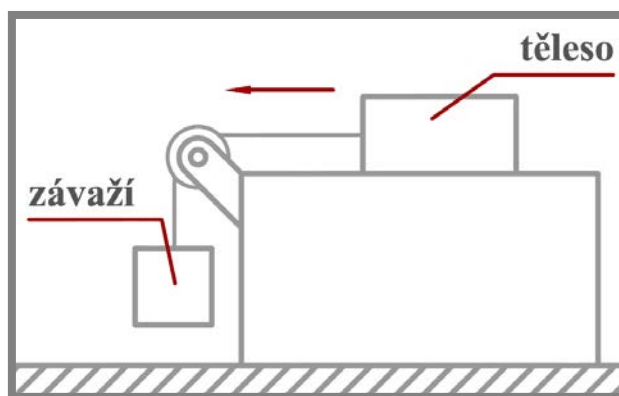
Měření smykového tření mezi povrchy dvou těles, které vůči sobě vykonávají přímočarý pohyb, lze z hlediska fyzikálního principu rozdělit na následující čtyři základní typy zkušebních metod [5].

1.1.1 Metoda poměru hmotností

1.1.1

Přes pět století stará metoda, jejíž autorem je Leonardo da Vinci, pracuje s poměrem hmotnosti vodorovně taženého tělesa a tzv. mrtvé váhy (dead weight) závaží. Hmotnost tohoto závaží, které je volně zavěšeno přes kladku a lankem spojeno s tělesem (obr. 1), je navyšována do okamžiku iniciace pohybu tělesa po podložce. Hodnota součinitele statického smykového tření se následně vypočítá pomocí podílu této aktuální mrtvé váhy a hmotnosti tělesa, jak je patrné z rovnice (1). Součinitel dynamického smykového tření však touto metodou není vhodné měřit.

$$\mu_s = \frac{F_t}{F_n} = \frac{m_{\text{tělesa}} \cdot g}{m_{\text{závaží}} \cdot g} = \frac{m_{\text{tělesa}}}{m_{\text{závaží}}} \quad (1)$$



Obr. 1 Metoda poměru hmotností

1.1.2 Metoda nakloněné roviny

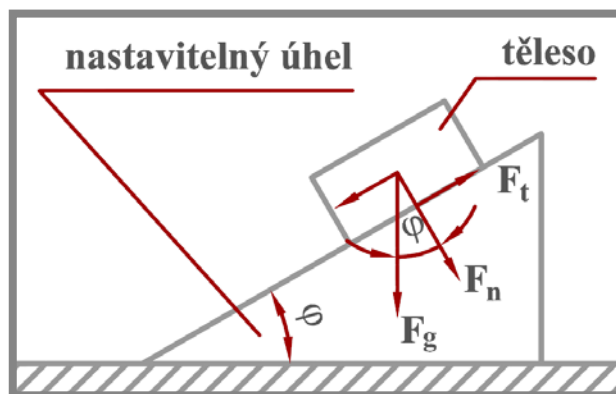
1.1.2

Tato metoda využívá tělesa spočívajícího na nakloněné rovině s možností nastavení změnitelné strmosti stoupání. Úhel naklonění pracovní roviny se zvyšuje právě do chvíle, kdy se těleso začne pohybovat směrem dolů. Změřený úhel je pak označován jako tzv. třecí úhel, který je charakteristický pro metodu nakloněné roviny (obr. 2). Vztah mezi součinitelem statického smykového tření a tímto úhlem je popsán rovnicemi (2), (3) a (4). Stanovovat součinitel dynamického smykového tření metodou nakloněné roviny však opět není vhodné.

$$F_t = F_g \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

$$F_n = F_g \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

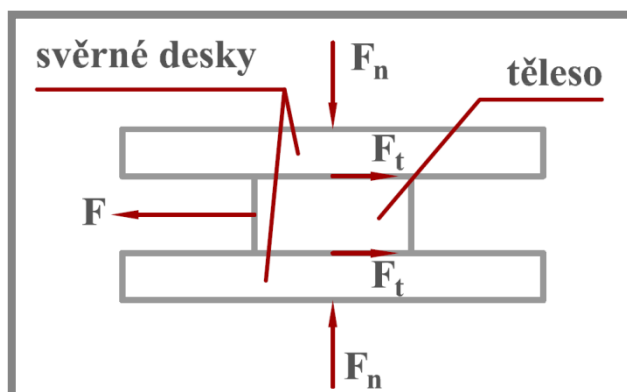
$$\mu_s = \frac{F_t}{F_n} = \frac{F_g \cdot \sin \varphi}{F_g \cdot \cos \varphi} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \tan \varphi \quad (4)$$



Obr. 2 Metoda nakloněné roviny

1.1.3 Metoda svěrných desek

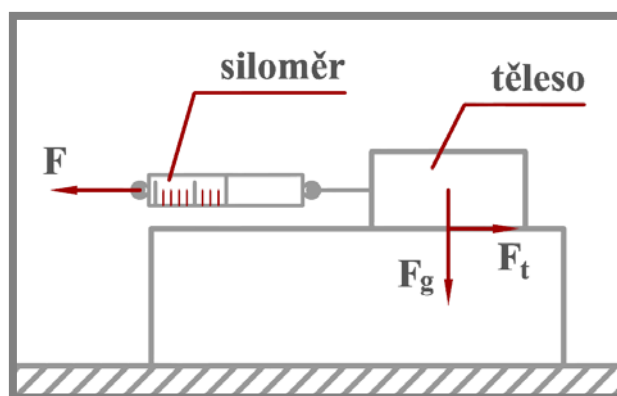
Pro měření součinitele smykového tření v podmínkách vysokého kontaktního tlaku může být použita metoda sevření tělesa mezi dva stejné povrchy (obr. 3). Síla potřebná k uvedení takto sevřeného tělesa do pohybu má pak dvojnásobnou hodnotu třecí síly. Důvodem je kontakt tělesa s dvojicí povrchů svěrných desek. Tato metoda je vhodná spíše k měření součinitele statického smykového tření, který se určí z poměru přítláčné a třecí síly.



Obr. 3 Metoda svěrných desek

1.1.4 Metoda siloměru

Na siloměr připojený k tělesu umístěném na podložce je vyvinuta tažná síla potřebná k uvedení tělesa do pohybu (obr. 4). Tato tažná síla musí působit rovnoběžně s povrchem podložky. Odečtením hodnoty ze stupnice siloměru v okamžiku počátku pohybu měříme třecí sílu statického smykového tření. Průměrná hodnota naměřená při následujícím rovnoměrném pohybu tělesa se poté rovná třecí síle dynamického smykového tření. Touto testovací metodou je tedy vhodné určovat součinitele statického i dynamického smykového tření. Oba součinitele se opět vypočítají z poměru odečtených hodnot síl a tíhy zkušebního tělesa, která odpovídá přítláčivé normálové síle.



Obr. 4 Metoda siloměru

1.3 Vybrané normy týkající se stanovování součinitelů tření

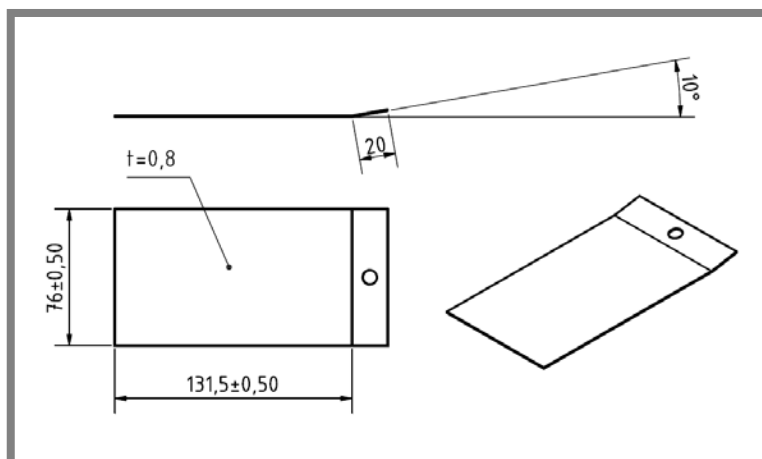
V následující podkapitole jsou popsány principy měření součinitelů smykového tření pro několik druhů materiálů v souladu s vybranými normami ČSN. Nejsou však uvedeny požadované podmínky testů ani detailněji definovány postupy odebrání vzorků materiálů. Tyto musí být pro správné provedení příslušné zkoušky případně nastudovány. Veškeré odlišnosti parametrů zkoušek je také nutno případně zaznamenat do protokolu.

1.3.1 ČSN EN ISO 21182 - Lehké dopravní pásy - Stanovení součinitele tření [6]

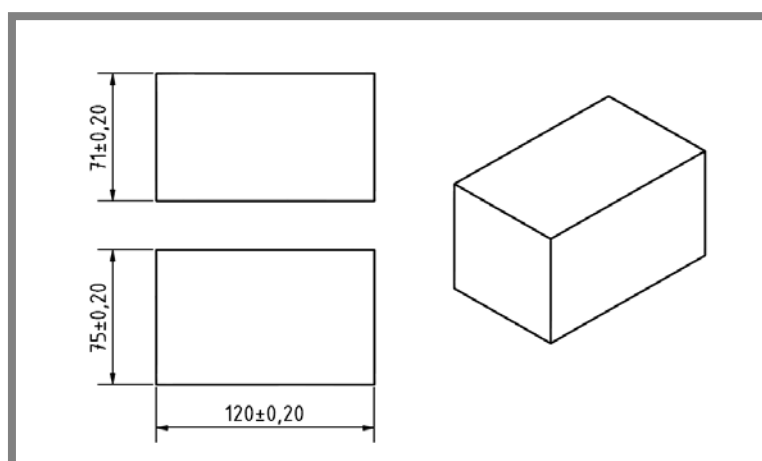
Norma popisuje metodu stanovení statických a dynamických součinitelů smykového tření u materiálů používaných na výrobu lehkých dopravních pásů. Aplikace normalizovaných kovových testovacích panelů a závaží umožňuje srovnání výsledků pro různé typy pásů.

Ze zkoumaného materiálu pásového dopravníku je vyřezán vzorek o rozměrech (600 x 100) mm a upnut ke zkušební desce. Na vzorek je umístěn testovací panel vyrobený z ocelového plechu o rozměrech dle obr. 5 a normou předepsané tvrdosti. Povrch panelu, který přijde do styku s materiálem vzorku, je obroben na požadovanou hodnotu drsnosti. Panel je zatížen tělesem s normalizovanými rozměry (obr. 6), vyrobeným z oceli o stanovené hustotě 7850 kg·m⁻³. Testovací oblast, neboli styčná plocha mezi panelem a pásem, má

danou velikost $(100 \pm 1) \text{ cm}^2$. Celková přitlačná síla vytvořená zatíženým panelem má hodnotu $(50 \pm 1) \text{ N}$. Pro smýkání tohoto bloku zátěžné sestavy po zkušebním vzorku pásu je doporučeno ocelové lanko o průměru 1 mm, případně jiné podobné s nízkou elasticitou. Tažné zařízení by mělo být schopno vyvinout sílu až 100 N.

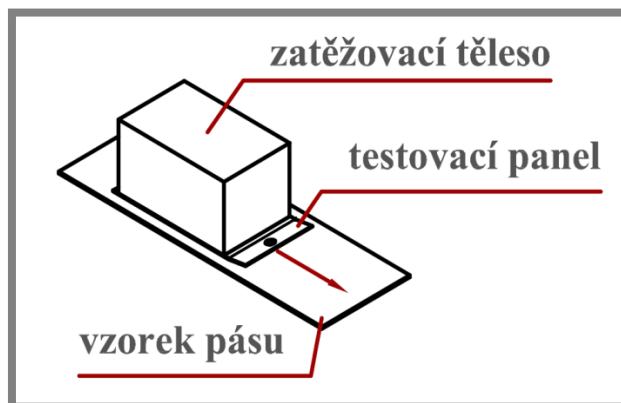


Obr. 5 Testovací panel normy ČSN EN ISO 21182



Obr. 6 Zatěžující těleso normy ČSN EN ISO 21182

Limitní hodnoty zjišťovaných součinitelů jsou stanoveny na 1,5 v případě statického a 1 v případě dynamického smykového tření. Překročení těchto hodnot značí ve většině případů nedostatečně obroběný a tudíž nevhodný styčný povrch testovacího panelu. Stanovení statického součinitele tření se provádí tažnou rychlostí $(100 \pm 20) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Dynamický součinitel je určován na minimální požadované dráze 300 mm tažením rychlostí $(1000 \pm 20) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, alternativně rychlostí $(500 \pm 20) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 7 Metoda normy ČSN EN ISO 21182

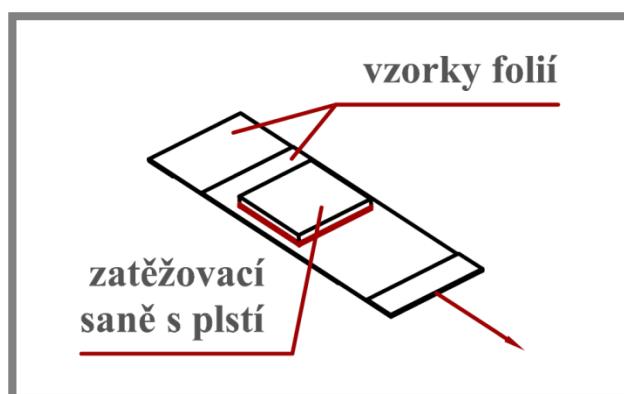
1.3.2 ČSN EN ISO 8295 - Plasty - Folie a tenké desky - Stanovení koeficientu tření [7]

1.3.2

Norma je určena především pro testování nelepkačých plastových fólií a tenkých desek do maximální tloušťky 0,5 mm. Účelově se jedná spíše o kontrolu kvality, než o posouzení zpracovatelnosti na obaly. Provádí se dva typy zkoušek, a to vzájemné smýkání fólií či desek nebo smýkání po látce.

Jeden ze dvou zkušebních vzorků o rozměrech (200 x 80) mm je upevněn oboustrannou lepicí páskou na rovnou, hladkou plochu z neferomagnetického kovu. Na takto zajištěný vzorek se umístí vzorek druhý. Na jednom z konců je tento druhý vzorek uchycen k tažnému lanku vhodnou svorkou nebo opět s využitím lepicí pásky a pomocné destičky, jejíž hmotnost nepřesahuje 5 g. Zatížení je realizováno tzv. saněmi (obr. 8). Saně sestávají z tělesa čtvercového půdorysu (délka hrany 63 mm) a zespodu přichycenou vrstvou technické plstě pro rovnoměrné rozložení tlaku. Velikost kontaktní plochy je tímto určena na 40 cm². Hmotnost saní je stanovena na (200 ± 2) g, což odpovídá hodnotě normálové síly (1,96 ± 0,02) N. Výška saní není specifikována, záleží tedy na použitém výrobním materiálu.

Hodnoty zjištěných součinitelů smykového tření se pohybují v rozmezí (0,2 - 1). Tažná rychlost pro stanovování obou typů součinitelů je (100 ± 10) mm·min⁻¹. Při měření statického součinitele je vhodné k lanku připojit tlumící pružinu, poté však nelze měřit dynamický součinitel z důvodu zkreslení výsledků kmitáním po překonání statické třecí síly. Tato síla s kontaktní dobou materiálů roste, je nutno časový interval upřesnit. Pohyb se tedy spouští po 15 sekundách od umístění vzorků.

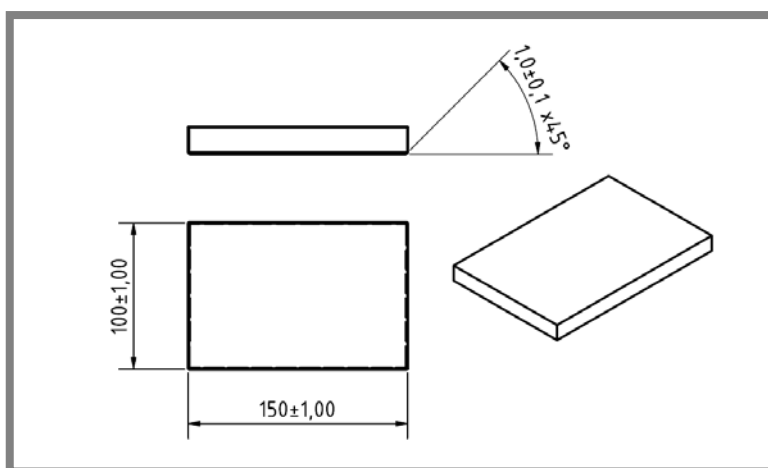


Obr. 8 Metoda normy ČSN EN ISO 8295

1.3.3 ČSN EN 14882 - Textilie povrstvené pryží nebo plasty - Zjišťování koeficientu statického a dynamického tření [8]

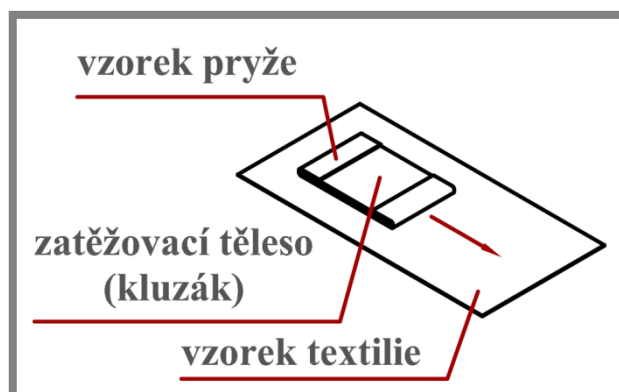
Tato norma specifikuje metodu vyhodnocení třecích vlastností povrstvených textilií. Zkouška spočívá v měření síly nutné k uvedení tzv. kluzáku, normalizovaného zatěžujícího tělesa (obr. 9), do pohybu po povrchu zkušební vzorku povrstvené textilie.

Norma popisuje dvojí provedení testů s výše zmíněným kluzákem. U prvního typu zkoušky je po vzorku textilie o rozměrech (600 x 200) mm smýkáno samotné těleso kluzáku s danou hmotností (700 ± 15) g a drsností dotykové plochy $0,2 \mu\text{m}$. Druhý typ zkoušky probíhá za stejných podmínek, navíc je však kluzák obalen vzorkem polyuretanové lehčené pryže (obr. 10) o délce (230 ± 5) mm, šířce (100 ± 1) mm a tloušťce (3 ± 1) mm.



Obr. 9 Zatěžující těleso (kluzák) normy ČSN EN 14882

Měření součinitelů statického i dynamického smykového tření probíhá na minimální dráze 400 mm tažnou rychlostí (500 ± 50) $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



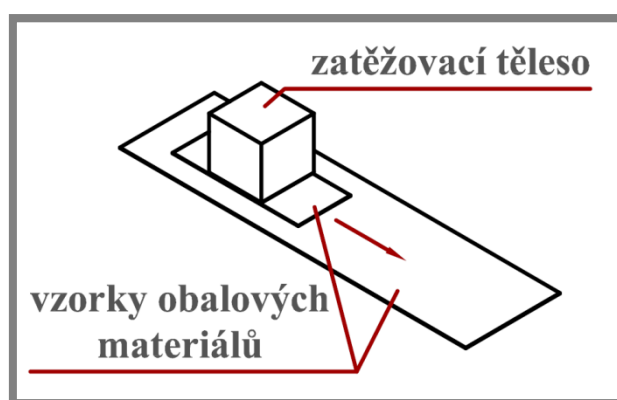
Obr. 10 Metoda normy ČSN EN 14882

1.3.4 ČSN 77 0240 - Stanovení součinitele smykového tření obalových materiálů.

Metoda smýkání po vodorovné rovině [9]

Určování součinitelů smykového tření měkkých obalových materiálů je v rámci této normy popsáno následujícími třemi typy testů. Vzájemné smýkání (obr. 11), slouží pro všeobecné posuzování vlastností. Smýkání oceli po obalovém materiálu, vyskytuje se např. u balících strojů. Smýkání jiných hmot po zkušebním vzorku materiálu.

Odebírané vzorky jsou rozměrově dvojího druhu, $(330 \pm 5 \times 90 \pm 5)$ mm a $(120 \pm 5 \times 50 \pm 5)$ mm. Jako zátěž je použito těleso se čtvercovou základnou délky 50 mm a dané hmotnosti $(1000 \pm 0,5)$ g. Hrany spodní podstavy jsou zaobleny poloměrem 2 mm. Pro toto těleso, je-li vyrobeno z oceli 11 370, norma udává drsnost povrchu v kontaktu s testovaným materiálem $(0,25 \pm 25\%)$ μm . Normalizované prvky této normy jsou specificky aplikovány pro každý jednotlivý typ testu. Tažná rychlost má pro všechna měření jednotnou hodnotu (150 ± 30) $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 11 Metoda zkoušky normy ČSN 77 0240

1.4 Peeling test [10]

Peeling test, neboli odlupovací zkouška, se provádí za účelem stanovení síly potřebné k porušení lepeného spoje a oddělení dvou vzorků materiálů. Testují se různé typy pásek, štítků, plastových folií, textilií apod. Zkouška se provádí pod různými odlupovacími úhly, nejčastěji však 90° a 180° . Úhel 45° nebo 135° se v praxi aplikuje např. při simulaci odlepování víček jogurtů, plechovek, potravinových obalů apod.

Podobně jako je tomu u zkoušek stanovujících součinitele smykového tření tažením tělesa po povrchu, síla zaznamenávaná při peeling testu má také proměnný charakter na přechodu mezi počátečním porušením adhezivních (přilnavých) vazeb ve funkční vrstvě lepeného spoje a následujícím průběhem odlepování. Pro stanovení pevnosti daného spoje (peel strength) a odporu proti odlepování se tedy opět zpracovávají oba typy měřené síly.

2 FORMULACI ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

Řešeným problémem této práce je provedení návrhu konstrukce výukové pomůcky, s jejíž pomocí bude možné měřit a zaznamenávat třecí sílu a stanovit statického a dynamického součinitele smykového tření.

Jde o konstrukční typ bakalářské práce. Úloha byla zpracována se zaměřením na následující požadované parametry:

- variabilita z hlediska jednoduché výměny a upnutí různých druhů testovaných materiálů
- možnost softwarového řízení pohonné jednotky
- digitální datový výstup a zobrazení hodnot snímané veličiny
- možnost provedení tzv. peeling testu modulární výměnou části zařízení
- stanovení součinitelů smykového tření pomocí měřících postupů, které vyhovují vybraným normám

Mezi parametry výsledné konstrukce se také řadí charakteristické aspekty výukové pomůcky jako jsou přenositelnost, skladnost, snadná montáž a odpovídající náklady na výrobu.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je konstrukční návrh výukové pomůcky vhodné pro měření součinitele smykového tření.

Hlavní požadované parametry dle zadání jsou:

- možnost měření a záznamu součinitele statického smykového tření
- možnost měření a záznamu součinitele dynamického smykového tření
- možnost změny materiálů v kontaktu
- možnost softwarového řízení

K výstupu řešeného úkolu patří 2D a 3D data výkresové dokumentace.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Byl stanoven harmonogram práce s následujícími chronologicky sestavenými body:

- shromáždění podkladů
- průzkum současného stavu poznání
- volba typu měřicí metody
- návrhy několika variant konstrukcí
- volba optimální varianty
- řešení konstrukčních uzlů
- výběr komponentů
- zhotovení modelu v programu Autodesk Inventor
- výkresová dokumentace v programu AutoCAD Mechanical

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

5

Na trhu dostupná zařízení (např. produkty firem Labthink Instruments, Andilog Technologies, Lloyd Instruments, Mecmesin, Presto Stantest) uzpůsobená pro měření třecí síly a součinitelů smykového tření lze obecně rozdělit do skupin podle několika následujících specifických konstrukčních parametrů, z nichž vycházejí návrhy variant A, B a C. U každé varianty jsou uvedeny hlavní výhody a nevýhody daného typu konstrukce.

Konstrukční parametry:

Hlavní relativní pohyb vykonává:

- zátěžné těleso,
- podložka s testovaným materiálem

Typ pohonu:

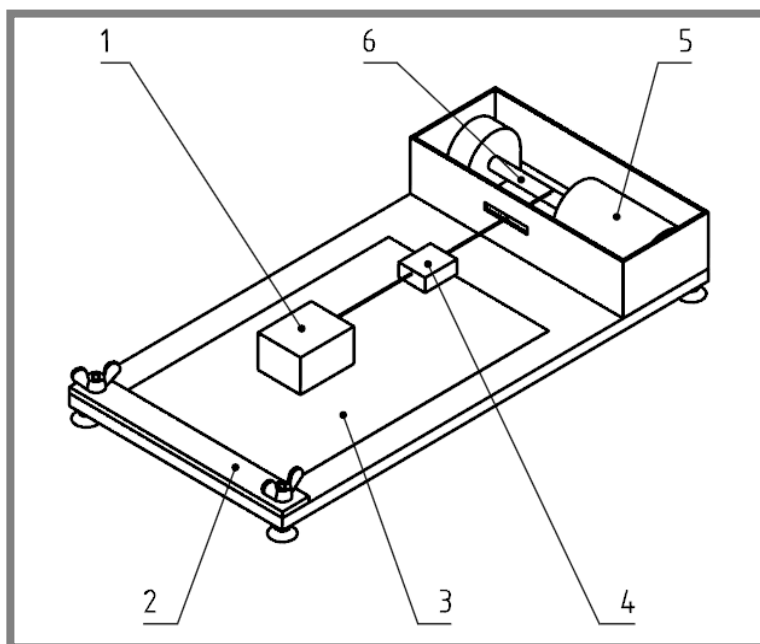
- mechanický ruční,
- s využitím motoru

Typ pohonného mechanismu:

- horizontální navíjení,
- horizontální lineární vedení,
- vertikální lineární vedení,
- vertikální výsuvná pístnice

5.1 Varianta A

5.1



Obr. 12 Varianta A: 1-těleso, 2-upínací lišta, 3-testovaný materiál, 4-snímací jednotka, 5-motor, 6-navíjecí hřídel

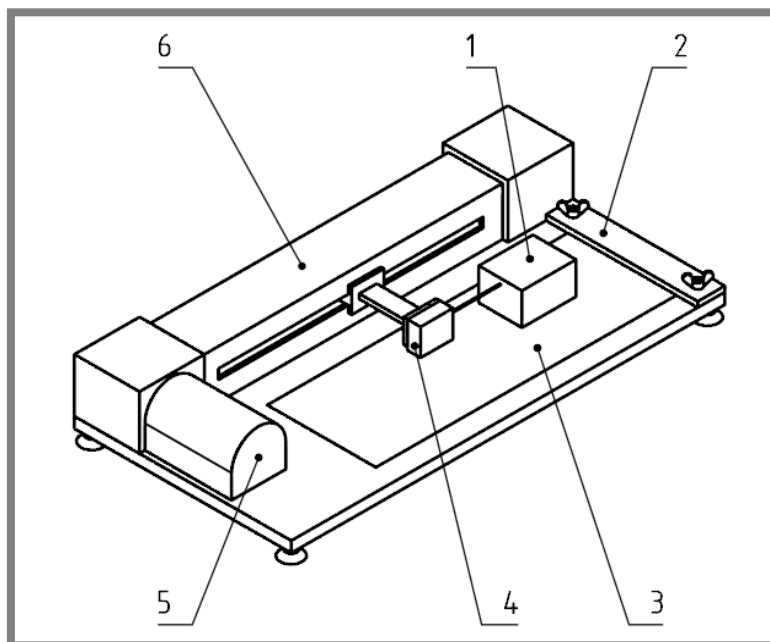
Výhody:

- jednoduchá konstrukce
- nízké náklady na výrobu
- skladnost

Nevýhody:

- nízká variabilita zkoušek
- problematické uchycení snímací jednotky tak, aby v průběhu testu neovlivňovala měřené veličiny

5.2 Varianta B



Obr. 13 Varianta B: 1-těleso, 2-upínací lišta, 3-testovaný materiál, 4-snímací jednotka, 5-motor, 6-lineární vedení

Výhody:

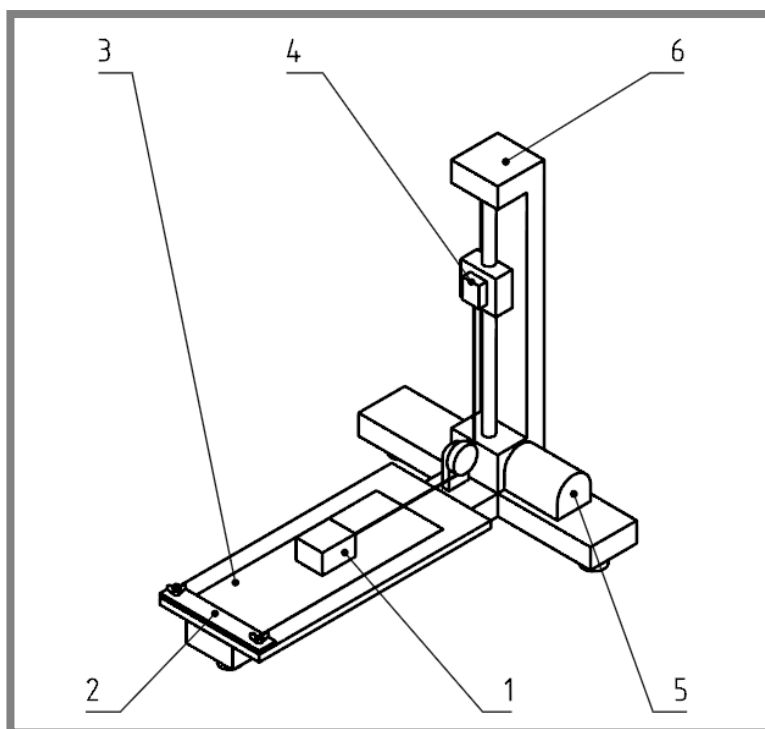
- jednoduchá konstrukce
- skladnost

Nevýhody:

- obtížné řešení výměny prvků umožňující provedení více typů zkoušek
- omezená možnost upnutí vzorků testovaných materiálů

5.3 Varianta C

5.3



Obr. 14 Varianta C: 1-těleso, 2-upínací lišta, 3-testovaný materiál, 4-měřicí jednotka, 5-motor, 6-lineární vedení

Výhody:

- snadná aplikace modulárních elementů pro více druhů testů
- vyměnitelnost samostatné upínací plochy

Nevýhody:

- výrobní náklady vyšší než u předchozích variant
- méně praktická výška přístroje

Po zvážení možností uvedených variant a všech požadavků na výslednou konstrukci byla jako výchozí zvolena varianta s tělesem taženým přes kladku a horizontálním vedením (C). Nejlépe splňuje podmínku univerzality výukové pomůcky. Nejvíce podstatná je použitelnost výměnných modulů a dosažení tak většího rozsahu z hlediska různých typů zkoušek.

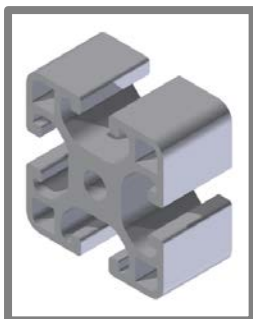
6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V průběhu navrhování veškerých prvků konstrukce byl mimo výše poznamenaného aspektu univerzality výukové pomůcky brán ohled také na celkovou hmotnost zařízení. Primárně voleným výrobním materiálem součástí je tedy hliník. Při tvorbě 3D modelu v programu Inventor byla využita možnost generování 3D CAD dat z webových stránek některých výrobců zakomponovaných součástí.

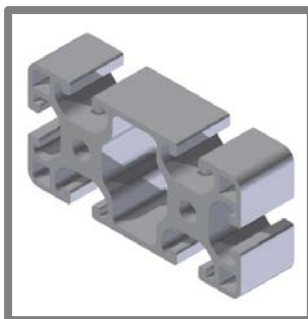
Dále jsou v této kapitole charakterizovány nejprve jednotlivé hlavní prvky konstrukce a na závěr zobrazena kompletní sestava celé měřicí stanice ve dvou provedeních s vyměnitelnými moduly. Detailní rozměry dílů jsou k dispozici v příložené výkresové dokumentaci.

6.1 Nosná kostra

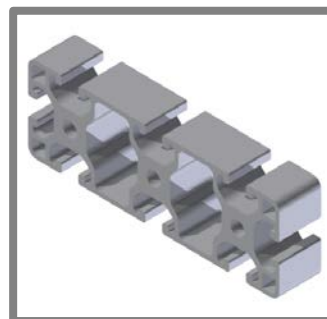
Pro konstrukci nosné kostry měřicího zařízení (obr. 21) byl jako výchozí zvolen systém hliníkových profilů a sady montážního příslušenství, vše dodávané německou firmou Item [11]. Použity jsou tři typy profilů, a to s rozměry průřezů (120 x 40) mm (obr. 15), (80 x 40) mm (obr. 16) a (40 x 40) mm (obr. 17). Pravoúhlá propojení



Obr. 15 Hliníkový profil 40x40 mm

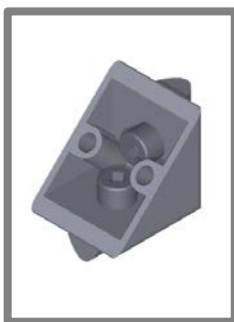


Obr. 16 Hliníkový profil 80x40 mm



Obr. 17 Hliníkový profil 120x40 mm

vybraných profilů jsou realizována příslušnými univerzálními spojkami (obr. 18). Veškeré přídavné díly a bloky, které takto sestavená kostra nese, jsou připevněny pomocí šroubových spojů, přičemž funkce klasických matic je nahrazena tzv. ořechy (obr. 19), speciálně určenými pro kompletaci daných hliníkových profilových sestav (vnitřní závity ořechů M8, M6, M5). Stojné prvky jsou řešeny třemi výškově



Obr. 18 Pravoúhlá spojka profilů

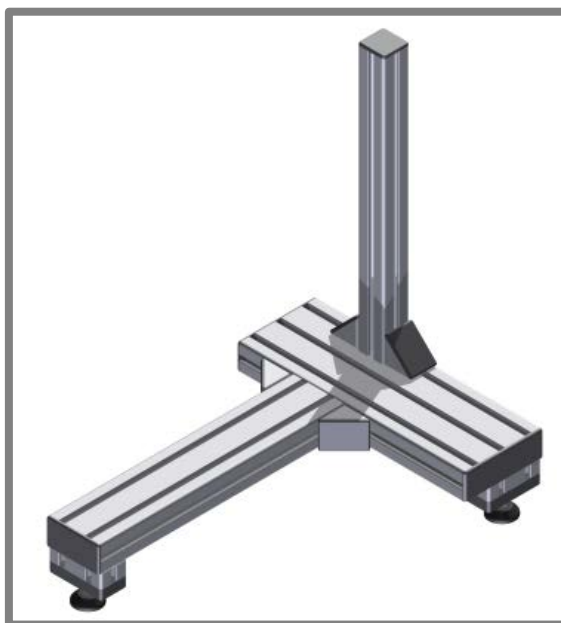


Obr. 19 Ořech



Obr. 20 Stojná nožka

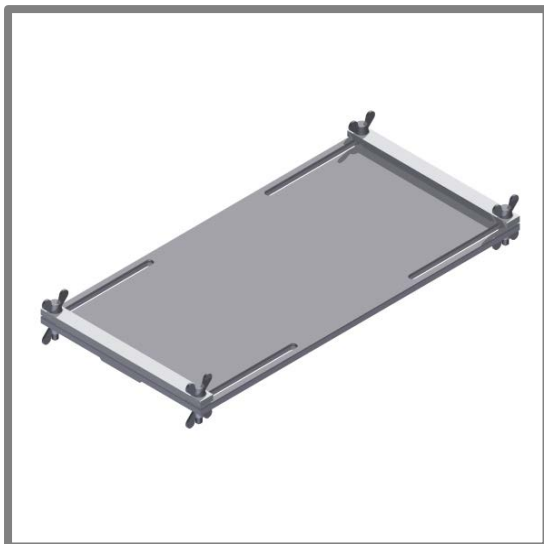
nastavitelnými nožkami (obr. 20). Před zahájením samotného měření je vhodné pomocí vodováhy seřadit funkční třecí plochu do vodorovné polohy. Otevřené konce profilů jsou v konečné fázi montáže zakryty příslušnými plastovými záslepkami.



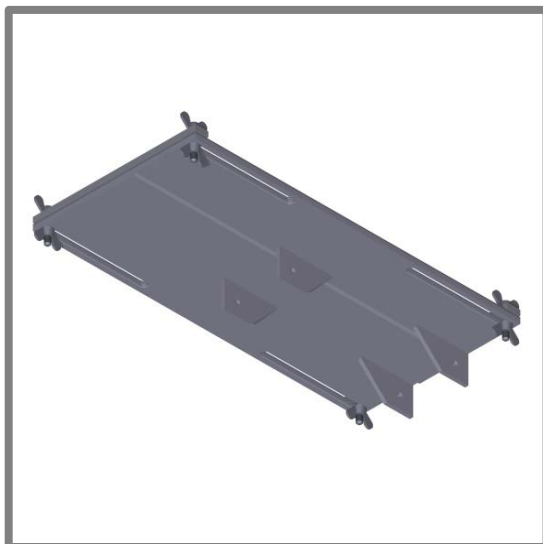
Obr. 21 Nosná kostra

6.2 Upínací plocha

Plocha pro upínání zkoumaných vzorků materiálů byla navržena s ohledem na požadovanou variabilitu a jednoduchou vyměnitelnost kontaktních povrchů. Základní těleso tohoto bloku je vyrobeno z hliníku a svařeno z hlavního plošného prvku a čtyř plechových přichytných dílů pro snadné upevnění na nosný profil (obr. 22, 23). Hliník, jakožto neferomagnetický kov, splňuje podmínky pro měření součinitele smykového tření dle jedné z vybraných norem ČSN EN ISO 8295 - Plasty - Folie a tenké desky - Stanovení koeficientu tření. Zakomponován byl však také i odjímatelný ocelový povrch tloušťky 2 mm pro ostatní typy testů. Použití oceli pouze na takto tenký prvek výrazně snižuje hmotnost modulu. Samotné upevnění vzorků materiálů je provedeno pomocí dvou upínacích lišt, zajištěných čtveřicí křídlových šroubů a křídlových matic pro snadnou ruční manipulaci. Lišty jsou umístěny po obou stranách upínací plochy, toto umožňuje přichytit a napnout i nerovné kroutivé materiály. Vodicí drážky upínacích prvků plní funkci nastavitelnosti rozteče lišt. Lze tedy případně upevnit vzorky různých délek o maximální šířce 200 mm.



Obr. 22 Modul 1 (pohled shora)



Obr. 23 Modul 1 (pohled zdola)

6.3 Uchycení kladky

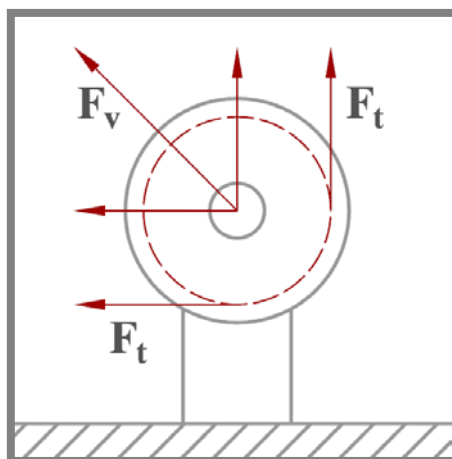
Tažné lanko spojené se zátěžným prvkem je v průběhu testu vedeno přes kladku a uchyceno k unašeči vertikálního lineárního vedení. Držák kladky, opět hliníkový svarek sestavený z podstavy a vedení kladky, je upevněn k nosnému profilu dvěma šrouby. Tento držák s kladkou (obr. 25) lze využít v obou typech testů (měření součinitelů smykového tření, peeling test). Prvek je konstruován tak, aby jej bylo možné pootočením o 90° nastavit do polohy funkční pro oba navržené měřicí moduly. Použitá plastová profilovaná kladka o průměru 45 mm s již vlisovaným kuličkovým ložiskem (SKF, označení 6000) od firmy Zabi [12] je uložena na vyrobeném čepu. Nastavení výšky tohoto čepu v drážce prvku vedení kladky umožňuje zajistit rovnoběžnost lanka s třecím povrchem při uchycení na různých tělesech. Použití ložiska bude v malé míře ovlivňovat nasnímané hodnoty třecích sil v závislosti na hmotnosti tažených těles. Dle katalogových informací firmy SKF [13] dosahuje součinitel tření v daném kuličkovém ložisku hodnoty 0,0015 a odhad vzniklé třecí síly se určí pomocí rovnice (5). V rovnicích (6), (7) a (8) byl proveden výpočet této ložiskové třecí síly pro normalizované měření se zátěžným tělesem o největší hmotnosti 5 kg (norma ČSN EN ISO 21182), přičemž nejvyšší předpokládaný součinitel tření mezi smýkaným tělesem a vzorkem povrchu nabývá stanovené hodnoty 1,5. Vliv na měření bude tedy zaznamatelný ale minimální (0,078N při největším uvažovaném zatížení).

$$F_{tL} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \quad (5)$$

kde: μ - konstantní součinitel tření ložiska
 P - zatížení ložiska

$$F_t = \mu \cdot F_n = \mu \cdot m_{\text{tělesa}} \cdot g = 1,5 \cdot 5 \cdot 9,81 = 73,575 \text{ N} \quad (6)$$

$$F_v = P = \sqrt{2} \cdot F_t = \sqrt{2} \cdot 73,575 = 104,05 \text{ N} \quad (7)$$



Obr. 24 Silové působení na ložisko kladky

$$F_{tL} = 0,5 \cdot \mu \cdot P = 0,5 \cdot 0,0015 \cdot 104,05 = 0,078 \text{ N} \quad (8)$$



Obr. 25 Prvek kladky

6.4 Lineární vedení

Posun tělesa po třecí ploše je realizován pomocí vertikálně orientovaného lineárního vedení OSP-E32B (obr. 28) od firmy Parker Origa [14]. Volba typu vedení vychází z největší očekávané síly působící na unašeč. Z výše zmíněné rovnice (6) byla vypočítána maximální třecí síla o velikosti přibližně 74N. Tato byla porovnána s tabulkovými hodnotami (obr. 26) pro lineární vedení série OSP-E a následně zvolen odpovídající typ OSP-E32B s velikostí maximální efektivní akční síly 150N při rychlosti menší než $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (veškeré testy se provádí výrazně nižší tažnou

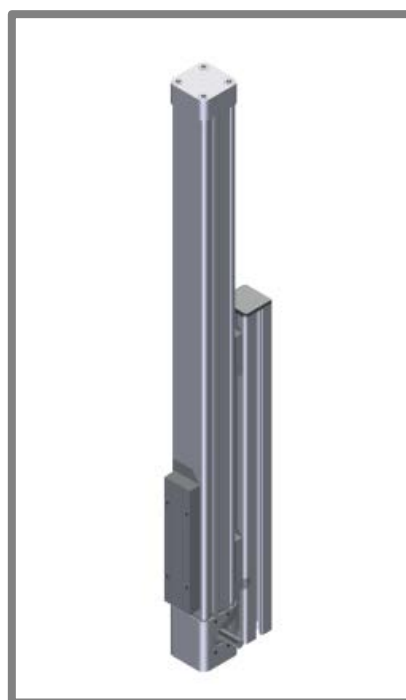
rychlostí). Vedení je uchyceno k vertikálně instalovanému nosnému profilu kostry o průřezu (40 x 40) mm dvěma upevňovacími lištami (opět od firmy Parker Origa) určenými k tomuto účelu (obr. 27). Délka zdvihu je nastavena na 400 mm, a to hodnotu nejdelší třecí dráhy, kterou dané zátěžné těleso vykoná v průběhu výše popsaných vybraných normalizovaných měření.

| Hodnoty zatížení | | | | |
|--|----------------------|----------|----------|----------|
| Veličiny | Jednotka | Poznámka | | |
| Velikost | | OSP-E25B | OSP-E32B | OSP-E50B |
| Max. rychlost | [m/s] | 2 | 3 | 5 |
| Lineární dráha na jednu otáčku hnací osy | [mm] | 60 | 60 | 100 |
| Max. počet otáček hnací hřídele | [min ⁻¹] | 2000 | 3000 | 3000 |
| Max. efektivní akční síla | [N] | 50 | 150 | 425 |
| | < 1 m/s: | | | |
| | 1-2 m/s: | 50 | 120 | 375 |
| F _A při rychlosti | [N] | — | 100 | 300 |
| | > 2 m/s: | | | |
| Krouticí moment v chodu na prázdko | [Nm] | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| Max. zrychlení/zpoždění | [m/s ²] | 10 | 10 | 10 |
| Opakovaná přesnost | [mm/m] | ±0,05 | ±0,05 | ±0,05 |
| Max. stand. délka zdvihu | [m] | 3,0 | 5,0 | 5,0 |

Obr. 26 Tabulka hodnot zatížení lineárních vedení série OSP-E



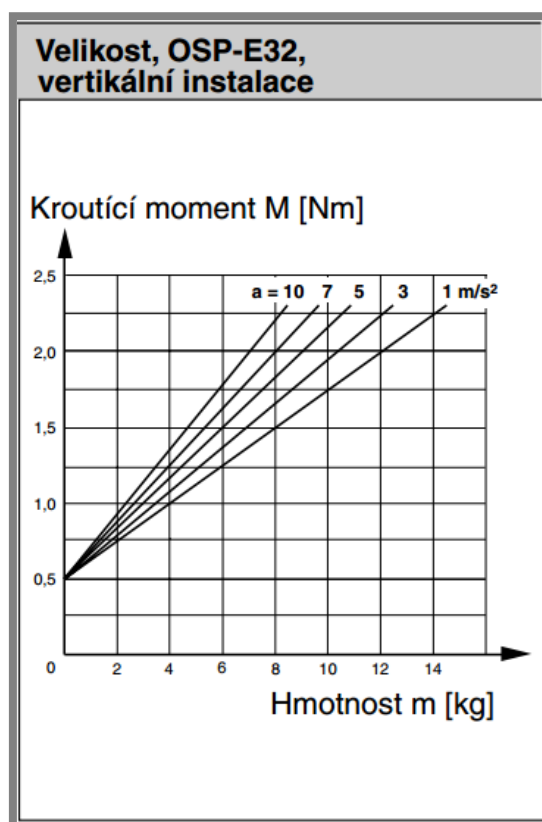
Obr. 27 Upevňovací lišta vedení



Obr. 28 Lineární vedení upnuté na nosný profil

6.5 Pohon lineárního vedení

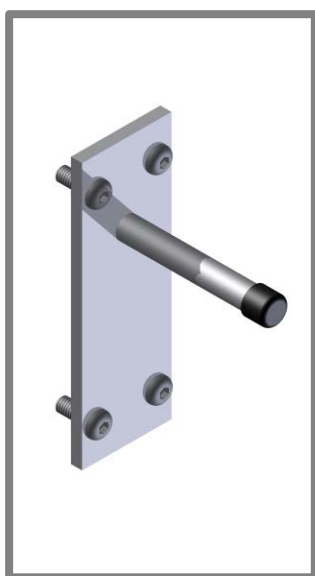
Nastavení potřebné konstantní rychlosti pohybu unašeče spojeného se zátěží zajišťuje AC servomotor ACM604/60V, který poskytuje firma Leadshine Technology [15]. Potřebný jmenovitý kroutící moment byl z katalogového grafu (obr. 29), zobrazujícího závislost požadovaného kroutícího momentu na hmotnosti připojené k unašeči použitého vertikálně instalovaného lineárního vedení OSP-E32B, stanoven na přibližnou hodnotu 1 N·m. Motor ACM604/60V vyhovuje s hodnotou jmenovitého kroutícího momentu 1,27 N·m. Další parametry tohoto motoru jsou jmenovité napětí 60V a jmenovitý výkon 400W. AC motor je ovládán plně digitálním driverem ACS806 AC Servo driver se vstupním napětím 18-60V. Po napojení na osobní počítač lze pomocí volně dostupného softwaru SW ProTuner (také od firmy Leadshine Technology) kontrolovat vstupní hodnoty jako např. směr a otáčky motoru prostřednictvím jednoduchého rozhraní v systému Windows. Tato funkce umožňuje přizpůsobit tažnou rychlost na normami požadované hodnoty. Základem pro připojení motoru k lineárnímu vedení je příslušné těleso spojky a odpovídající příruba motoru. Oba prvky jsou dodávány firmou Parker Origa a upravitelné podle specifických požadavků zákazníka.



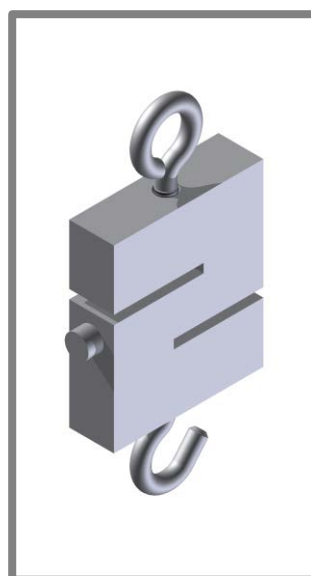
Obr. 29 Závislost kroutícího momentu na hmotnosti unášené lineárním vedením typu OSP-E32

6.6 Volba snímače a jeho upevnění

Snímací jednotka třecí síly je umístěna na kolíku konzole držáku připevněného k tělesu unašče lineárního vedení pomocí šroubových spojů. Držák je svařen ze dvou ocelových dílů, plechu opatřeného otvory pro šrouby a nosného kolíku (obr. 30). Na volný konec kolíku je nasunuta plastová čepička [16] zamezující neúmyslnému sklouznutí zavěšeného prvku. Rozsah snímače síly je vztažen k předpokládané maximální působící třecí síle 74 N, vypočítané dle rovnice (6). Vyhovující je např. tenzometrický snímač síly firmy Natis [17] s označením NAT:UU-100N typu S-článek (obr. 31) s rozsahem (± 100) N, rozlišovací schopností 0,02 N a výstupem dat zpracovatelných velkým množstvím vyhodnocovacích softwarových programů. Do závitových otvorů vyřezaných v obou větvích snímače jsou zakomponovány zavěšovací prvky, a to jednoduchý háček a oko (obr. 31), dodávané kupříkladu firmou ET Produkt [18], umožňující instalaci na kolík a propojení s tažným lankem či provázkem.



Obr. 30 Držák snímače



Obr. 31 Snímací jednotka se zavěšovacími prvky

6.7 Zátěžná tělesa

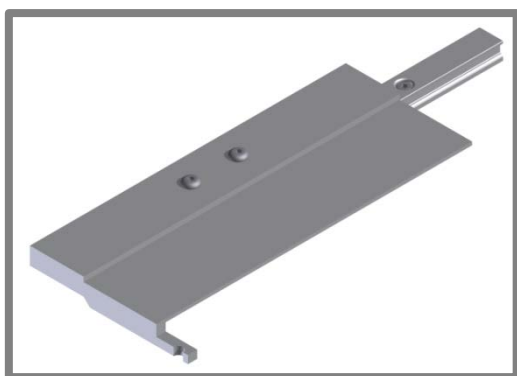
Vybrané normy popisující stanovení součinitelů smykového tření obsahují různá testovací tělesa s rozměrově odlišnými třecími plochami. Bylo by tedy nepraktické vybavit měřící stanici pouze těmito specifickými normalizovanými tělesy s neměnnou hmotností. Došlo by tím k omezení variability zkoušek z hlediska nastavitelnosti zátěže taženého tělesa. Byl proto navržen systém podstav s rozměry a úpravou kontaktních ploch odpovídající normám a jednotným kolíkovitým prvkem pro kladení závaží o hmotnostech 100 g a 500 g. Jednotlivé podstavy jsou konstruovány tím způsobem, aby bylo možné prostřednictvím přídavných závaží dosáhnout přesné hodnoty požadované přítláčné síly dané určitou normou. Toto

umožňuje provedení normalizovaného testu a zároveň případně stanovit vlastní zkušební parametry zátěže.

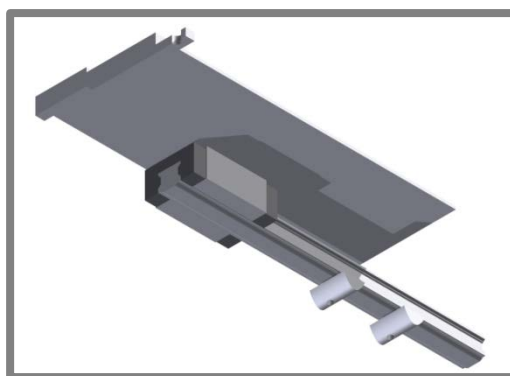
6.8 Modul pro peeling test

6.8

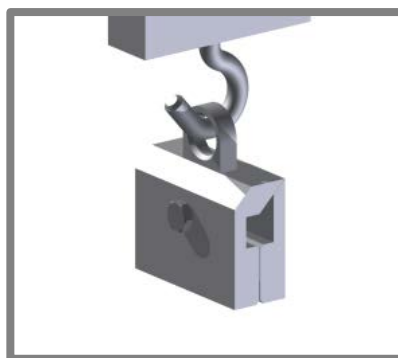
Provedení odlupovací zkoušky neboli peeling testu je podmíněno demontáží modulu 1 určeného k měření třecích vlastností styčných povrchů tažením tělesa (kompletní blok upínací plochy) a zakomponování soustavy pro peeling test (obr 32, 33). Tento druhý modul je sestaven z pojezdové plochy a jezdce pohyblivého po vodicí kolejnici. Jednoduché přeorientování držáku kladky umožní změnu směru vedení lanka, které je jedním koncem uchyceno za uzpůsobený prvek pojezdové plochy a druhým koncem (přemístěným z háčku snímače) zavěšeno přímo na kolík konzoly upevněné k unašeči lineárního vedení. Díky pevnému spojení unašeče s volně pohyblivou pojezdovou plochou nedojde v průběhu odlupování ke změně testovacího úhlu nastaveného na počátku měření a celá zkouška tak probíhá za stejných podmínek. Upnutí testovaného vzorku pásky je realizováno pomocí svorky zajištěné šroubovým spojením (obr. 34). Hmotnost této svorky však ovlivní nasnímané hodnoty sil. Aby se předešlo zkreslení výsledků, je tedy nutné odečíst od konečných hodnot měření tíhovou sílu nezátíženou, volně zavěšenou svorku. Lze případně využít funkce některých vyhodnocovacích softwarů, kdy se tato nežádoucí zátěž nastaví jako nulová hodnota snímané síly.



Obr. 32 Modul 2 (pohled shora)



Obr. 33 Modul 2 (pohled zdola)

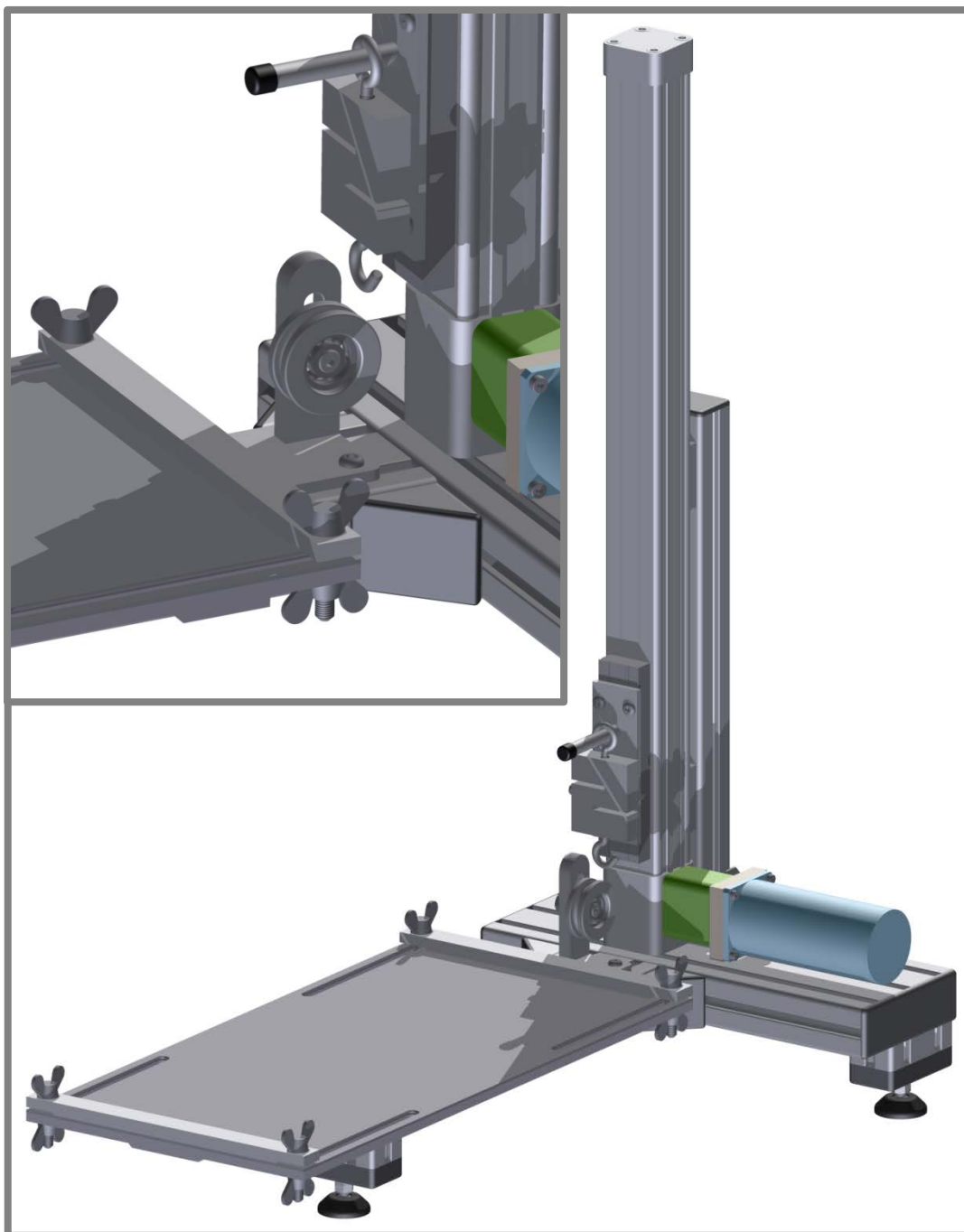


Obr. 34 Svorka

6.9 Kompletní konstrukce

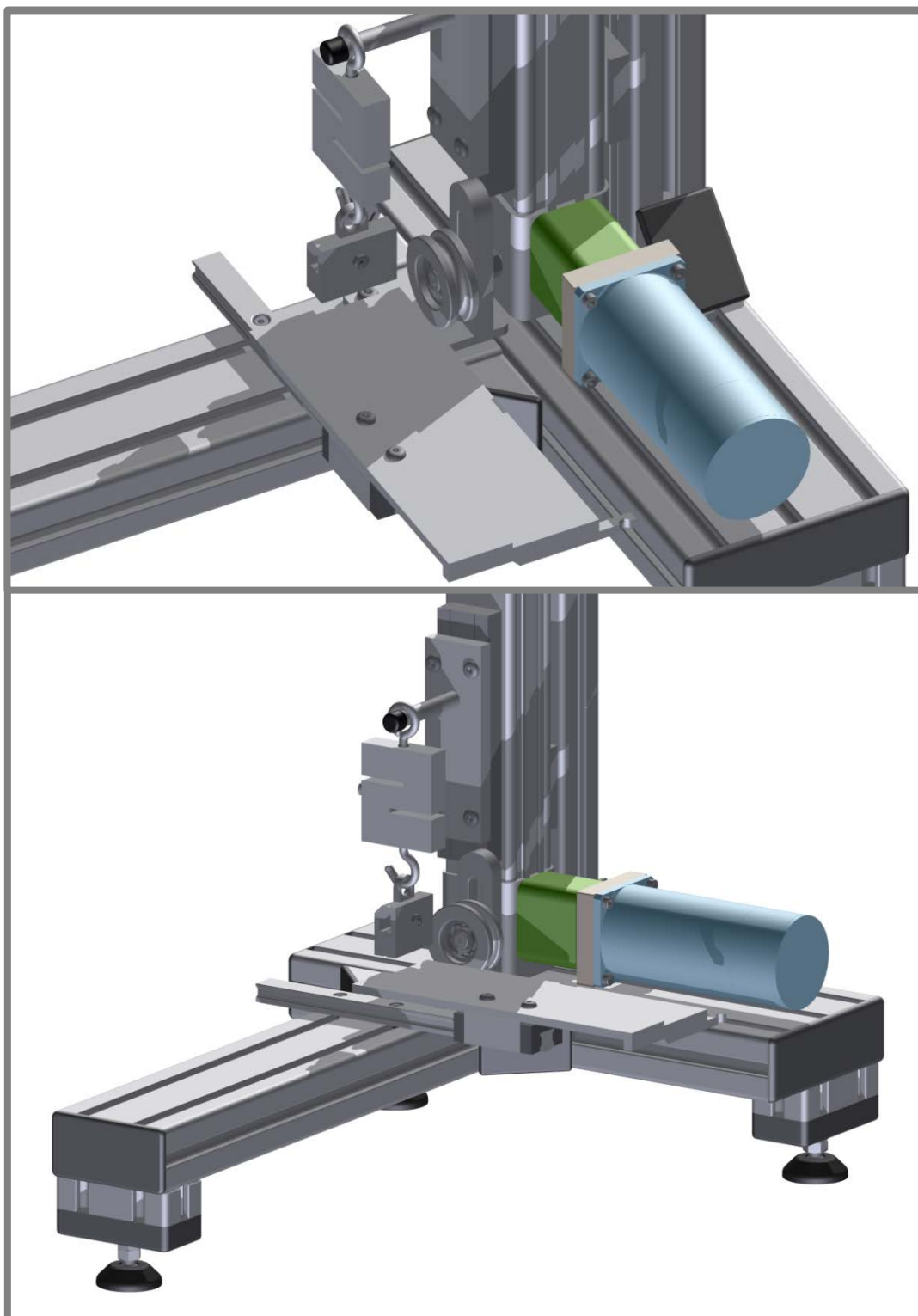
Konstrukce zařízení byla navržena pro dva typy zkoušek. Základní blok stanice, tj. kostra z hliníkových profilů a lineární pohon, zůstává totožný pro oba typy. Výměnnými částmi jsou pak modul měření součinitelů smykového tření a modul peeling testu, přičemž každá varianta vyžaduje navíc vlastní polohu držáku kladky.

6.9.1 Varianta 1



Obr. 35 Konstrukce zařízení s měřícím modulem 1

6.9.2 Varianta 2



Obr. 36 Konstrukce zařízení s měřicím modulem 2

7 ZÁVĚR - KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ

Úkolem této bakalářské práce bylo provést návrh konstrukce výukové pomůcky vhodné pro měření součinitele smykového tření s několika zadanými parametry. Požadována byla možnost měření a záznamu součinitelů statického i dynamického smykového tření. Byla tedy zvolena metoda stanovování hledaných veličin založená na motorizovaném smýkání těles nastavitelné hmotnosti po zkoumaných vzorcích materiálů. Záznam hodnot třecích sil, ze kterých se vychází při provádění výpočtu, byl realizován pomocí snímače s datovým výstupem. Dalším zadaným cílovým parametrem byla možnost výměny materiálů v třecím kontaktu. Pro tento účel byla navržena variabilní upínací plocha s prvky pro snadnou manipulaci. Požadavek na softwarové řízení byl vyřešen ovládním provozních veličin motoru prostřednictvím jednoduchého softwaru, který je volně k dispozici na webových stránkách dodavatele použitého servomotoru.

Zařízení je přizpůsobeno k provádění jak normalizovaných měření tak i zkoušek s vlastními parametry, např. otestování nezávislosti hodnoty součinitele smykového tření na velikosti kontaktní plochy. Variabilita zatěžovacích hmotností, a tedy volby přítláčné normálové síly, je dosažena pomocí popsaného systému podstav a přídavných závaží. Pomůcka je tedy vhodná pro demonstraci různých podmínek třecího procesu. Byl navržen také snadno aplikovatelný modul pro realizaci peeling testu. Tuto tzv. odlupovací zkoušku je možno provádět díky kolejnicovému pojezdu při konstantním charakteristickém testovacím úhlu. Jako konstrukční materiál byl použit převážně hliník, ve snaze snížit hmotnost zařízení. Jednoduchá montáž je docílena použitím soustavy hliníkových profilů. Výsledné konstrukční řešení úlohy bylo navrhováno s co největším ohledem na víceúčelové využití v rámci měření součinitelů tření.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Tribologie. *Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci* [online]. poslední revize 26.10.2008 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf
- [2] Měření tření. *Katedra fyziky Technické univerzity v Liberci* [online]. 2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: https://moodle.fp.tul.cz/nano/pluginfile.php/168/mod_page/content/50/Smykove_treni.pdf
- [3] JANÍK, Josef. *Fyzika tření* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/199446/pdf_b/Fyzika_treni.txt. Bakalářská práce. Masarikova Univerzita, Katedra fyziky. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
- [4] Friction. *HyperPhysics* [online]. poslední revize 3.3.2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/frict.html>
- [5] How to measure friction?. *Tribology-Abc* [online]. poslední revize 9.8.2008 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.tribology-abc.com/abc/friction.htm>
- [6] ČSN EN ISO 21182. *Lehké dopravní pásy: Stanovení součinitele tření*. ÚNMZ, 1.6.2007.
- [7] ČSN EN ISO 8295. *Plasty - Folie a tenké desky: Stanovení součinitele tření*. ÚNMZ, 1.3.2005.
- [8] ČSN EN 14882. *Textilie povrstvené pryží nebo plasty: Zjišťování koeficientu statického a dynamického tření*. ÚNMZ, 1.4.2006.
- [9] ČSN 77 0240. *Stanovení součinitele smykového tření obalových materiálů: Metoda smýkání po vodorovné rovině*. ÚNMZ, 1984.
- [10] Peeling test: Define peel strength. *ANDILOG Technologies* [online]. poslední revize 14.3.2011 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.andilog.com/define-peel-strength.html>
- [11] MB Building Kit for Mechanical Engineering. *Item* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.item24.de/en/products/product-catalogue/products/mb-building-kit-for-mechanical-engineering.html>
- [12] Pojezdová kola, kladky a rolny. *Zabi* [online]. © 2012-2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.zabi.cz/pojezdova-kola-kladky-a-rolny>
- [13] Hlavní katalog SKF: 6000_CS_00_04 Tření. *Exvalos* [online]. 1989 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_00_04_Treni.pdf

- [14] ORIGA System Plus: OSP-E B. *Parker Origa* [online]. © 2008 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.parker-origa.com/OSP-E-B.912.0.html>
- [15] Katalog produktů: Leadshine Technology Co., Ltd. *CNCShop* [online]. © 2010 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/leadshine-technology-co-ltd_m
- [16] Chráničky a příslušenství. *Opticord* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.opticord.cz/eshop/chraničky-a-prislusenství_c129.html
- [17] Snímač síly model UU. *Natis* [online]. © 2009 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.natis.cz/snimace-sily/snimac-sily-model-uu.htm>
- [18] Katalog produktů. *ET Produkt* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.etprodukt.cz/produkty>

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

| | | |
|---------------------|----------------------|--|
| F_t | [N] | - třecí síla |
| F_n | [N] | - normálová síla |
| f, μ | [-] | - součinitel smykového tření |
| μ_S | [-] | - součinitel statického smykového tření |
| μ_D | [-] | - součinitel dynamického smykového tření |
| $m_{\text{tělesa}}$ | [kg] | - hmotnost tělesa |
| $m_{\text{závaží}}$ | [kg] | - hmotnost závaží |
| g | [m.s ⁻²] | - gravitační zrychlení |
| F_g | [N] | - tíhová síla |
| φ | [°] | - třecí úhel |
| F | [N] | - tažná síla |
| F_{tL} | [N] | - třecí síla v ložisku |
| P | [N] | - zatěžující síla působící na ložisko |
| F_v | [N] | - výsledná síla |

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 1 | Metoda poměru hmotností | 13 |
| Obr. 2 | Metoda nakloněné roviny | 14 |
| Obr. 3 | Metoda sevření | 14 |
| Obr. 4 | Metoda siloměru | 15 |
| Obr. 5 | Testovací panel normy ČSN EN ISO 21182 | 16 |
| Obr. 6 | Zatěžující těleso normy ČSN EN ISO 21182 | 16 |
| Obr. 7 | Metoda normy ČSN EN ISO 21182 | 17 |
| Obr. 8 | Metoda normy ČSN EN ISO 8295 | 17 |
| Obr. 9 | Zatěžující těleso (kluzák) normy ČSN EN 14882 | 18 |
| Obr. 10 | Metoda normy ČSN EN 14882 | 18 |
| Obr. 11 | Metoda zkoušky normy ČSN 77 0240 | 19 |
| Obr. 12 | Varianta A | 23 |
| Obr. 13 | Varianta B | 24 |
| Obr. 14 | Varianta C | 25 |
| Obr. 15 | Hliníkový profil 40x40 mm | 26 |
| Obr. 16 | Hliníkový profil 80x40 mm | 26 |
| Obr. 17 | Hliníkový profil 120x40 mm | 26 |
| Obr. 18 | Pravoúhlá spojka profilů | 26 |
| Obr. 19 | Ořech | 26 |
| Obr. 20 | Stojná nožka | 26 |
| Obr. 21 | Nosná kostra | 27 |
| Obr. 22 | Modul 1 (pohled shora) | 28 |
| Obr. 23 | Modul 1 (pohled zdola) | 28 |
| Obr. 24 | Silové působení na ložisko kladky | 29 |
| Obr. 25 | Prvek kladky | 29 |
| Obr. 26 | Tabulka hodnot zatížení lineárních vedení série OSP-E | 30 |
| Obr. 27 | Upevňovací lišta vedení | 30 |
| Obr. 28 | Lineární vedení upnuté na nosný profil | 30 |
| Obr. 29 | Závislost kroutícího momentu na hmotnosti unášené lineárním vedením typu OSP-E32 | 31 |
| Obr. 30 | Držák snímače | 32 |
| Obr. 31 | Snímací jednotka se zavěšovacími prvky | 32 |
| Obr. 32 | Modul 2 (pohled shora) | 33 |
| Obr. 33 | Modul 2 (pohled zdola) | 33 |
| Obr. 34 | Svorka | 33 |
| Obr. 35 | Konstrukce zařízení s měřícím modulem 1 | 34 |
| Obr. 36 | Konstrukce zařízení s měřícím modulem 2 | 35 |

11 SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|----------|------------------------------------|
| 01-BP-1 | ZAŘÍZENÍ - MĚŘENÍ TŘENÍ |
| 01-BP-01 | KUSOVNÍK (ZAŘÍZENÍ - MĚŘENÍ TŘENÍ) |
| 01-BP-02 | KUSOVNÍK (ZAŘÍZENÍ - MĚŘENÍ TŘENÍ) |
| 01-BP-03 | KUSOVNÍK (ZAŘÍZENÍ - MĚŘENÍ TŘENÍ) |
| 02-BP-3 | MODUL 2 |
| 02-BP-01 | KUSOVNÍK (MODUL 2) |
| 03-BP-3 | UPÍNACÍ PLOCHA-SVAREK |
| 04-BP-4 | UPÍNACÍ PLOCHA |
| 05-BP-4 | DRŽÁK UP. PLOCHY |
| 06-BP-4 | ODEJÍMATELNÁ PLOCHA |
| 07-BP-4 | UPÍNACÍ LIŠTA |
| 08-BP-4 | DRŽÁK KLADKY-SVAREK |
| 09-BP-4 | VEDENÍ KLADKY |
| 10-BP-4 | PODSTAVA DŽÁKU |
| 11-BP-4 | ČEP KLADKY |
| 12-BP-4 | DRŽÁK SNÍMAČE-SVAREK |
| 13-BP-3 | POJEZDOVÁ PLOCHA-SVAREK |
| 14-BP-4 | PLOCHA POJEZDU |
| 15-BP-4 | SOUČÁST POJEZDU |
| 16-BP-4 | ZÁVAŽÍ 100g |
| 17-BP-4 | ZÁVAŽÍ 500g |
| 18-BP-4 | HLINÍKOVÝ PROFIL-20 |
| 19-BP-4 | KOLEJNICE |
| 20-BP-4 | PODSTAVA 1-SVAREK |
| 21-BP-4 | KOLÍK 1-72 |
| 22-BP-4 | POUTKO |
| 23-BP-4 | PODSTAVA 2-SVAREK |
| 24-BP-4 | KOLÍK 2-31 |
| 25-BP-4 | PODSTAVA 3-SVAREK |
| 26-BP-4 | KOLÍK 3-24 |
| 27-BP-4 | PODSTAVA 4-SVAREK |
| 28-BP-4 | KOLÍK 4-27 |
| 29-BP-4 | SVORKA |
| 30-BP-4 | SVORKA 1 |
| 31-BP-4 | SVORKA 2 |