

# **Zařízení pro testování abrazivního opotřebení**

*Bc. Milan Janoušek*

Vedoucí práce: Ing. Pavel Malý

## **Abstrakt**

*Rozvoj techniky se vyznačuje růstem absolutních i měrných výkonů strojů a zařízení. Dochází k nárůstu otáček, provozních rychlostí, tlaků a teplot. Se stupňováním výkonů rostou těžké problémy se třením a opotřebením. Volba vhodného materiálu, která je podmíněna funkčností a ekonomičností daného produktu, se stává nelehkým úkolem. Při hodnocení odolnosti materiálu proti opotřebení se neobejdeme bez laboratorních nebo provozních zkoušek. Tato práce se zabývá návrhem zařízení pro testování abrazivního opotřebení.*

## **Klíčová slova**

*Abraze, odolnost proti opotřebení, opotřebení, testování opotřebení*

## **1. Úvod**

Opotřebení je nežádoucí trvalá změna povrchu (rozměrů), která je způsobena vzájemným působením funkčních povrchů nebo působením okolního média na funkční povrch součásti. Měřítkem opotřebení je nejen úbytek materiálu, ale i změna jakosti případně tvaru funkčního povrchu tělesa. Opotřebení znamená ve většině případů zhoršování funkce součásti a vede k jejímu předčasnému vyřazení. Opotřebení, stejně jako koroze kovů, představuje v globálním měřítku obrovské hospodářské ztráty, což je jednou z příčin soustavného studia této problematiky. Tribologickým procesům, které za běžných podmínek nevedou k bezprostřední havárii zařízení, není v praxi obvykle věnována taková pozornost jako procesům únavy nebo tečení. Průzkumy však ukazují, že právě opotřebení způsobuje až 80 % všech poruchových prostojů strojů[1].

## **2. Cíl práce**

Cílem práce je návrh zařízení pro testování abrazivního opotřebení, které umožňuje zkoušení vzorků za zvýšené teploty. Zařízení slouží k testování abrazivního opotřebení volnými abrazivními částicemi, které jsou složkou abrazivní suspenze. Zařízení lze využít ke stanovení odolnosti materiálu proti opotřebení nebo ke stanovení abrazivity zvolené suspenze.

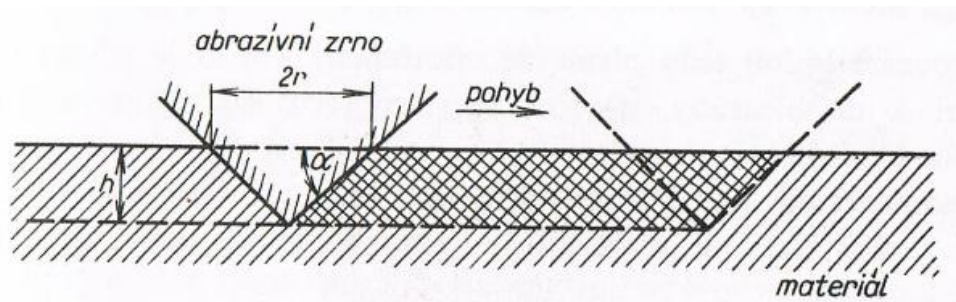
## **3. Abrazivní opotřebení**

Nežádoucí změna povrchu součásti je v případě abrazivního opotřebení způsobena vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a media. Abrazivní opotřebení se projevuje především rýhováním a odřezáváním částic exponovaného dílce. Mezi typické součásti, které jsou vystaveny tomuto druhu opotřebení, můžeme zařadit například zuby lopat rypadel nebo mlecí elementy mlýnů tvrdých surovin.

Při mikrořezání jsou tvrdými částicemi s příznivou orientací odebírány z povrchu tělesa drobné třísky. Tento proces je ovlivněn materiálem tělesa, tvarem a druhem abrazivních částic a změnami na povrchu opotřebovaného tělesa. Dle odhadů se mikrořezání zúčastňuje asi jen 10 % částic. Většina zrn vytváří na povrchu rýhy. Na jejich okrajích se vytváří val deformačně zpevněného materiálu. Kontaktem s dalšími částicemi je val opětovně plasticky deformován až do vyčerpání plasticity. V těchto mikroobjemech mohou vzniknout podpovrchové únavové trhliny[1].

### 3.1 Teorie abrazivního opotřebení

K vysvětlení abrazivního opotřebení se ve velmi zjednodušeném modelu užívá abrazivního zrna ve tvaru kužele, které rýhuje povrch tělesa.



**Obr.1.** Zjednodušený model rýhování povrchu materiálu abrazivním zrnem[1]

K tomu aby kužel vnikl svým vrcholem do hloubky  $h$  je zapotřebí vyvinout určitou sílu, která je dána vztahem:

$$\Delta F = p_m \cdot \pi \cdot r^2 \quad (1)$$

kde  $p_m$  představuje vnikací tvrdost a  $r$  je poloměr vtisku v úrovni původního povrchu. Pokud takto zarytý kužel vykoná určitý posuv  $dx$ , dojde přitom k odstranění objemu  $dV$ .

$$dV = r \cdot h \cdot dx = r \cdot r \cdot \tan \alpha \cdot dx = r^2 \cdot \tan \alpha \cdot dx = \frac{\Delta F \cdot \tan \alpha \cdot dx}{\pi \cdot p_m} \quad (2)$$

Reálné těleso přichází do kontaktu nikoliv s jednou, ale několika abrazivními částicemi. Celkový odstraněný objem můžeme vyjádřit takto:

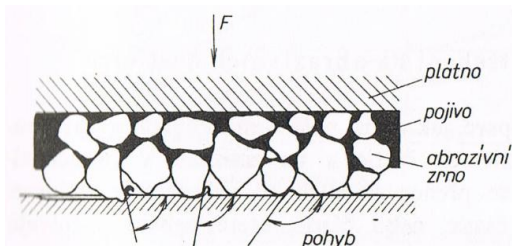
$$V = \frac{F \cdot \overline{\tan \alpha} \cdot x}{\pi \cdot p_m} \quad (3)$$

$\overline{\tan \alpha}$  zde představuje průměrnou hodnotu  $\tan \alpha$  všech kuželů, které se účastní rýhování povrchu. Určení této střední hodnoty je velice problematické. Povrchové nerovnosti a volné abrazivní částice se svým tvarem velmi odchyľují od předpokládaného kuželového tvaru. Výše uvedený vztah se obvykle zjednodušuje do tvaru:

$$V = K_{abr} \cdot \frac{F \cdot x}{\pi \cdot p_m} \quad (4)$$

Rabinowitz zjistil, že v případě působení částice mezi dvěma funkčními povrchy se hodnoty  $K_{abr}$  pohybují v mezích  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$ . Tyto hodnoty jsou nižší než hodnoty, které odpovídají tření dvou pevných povrchů, což je způsobeno tím, že část abrazivních částic se odvaluje a jenom malý podíl z nich (asi 10 %) rýhuje povrch součásti [1].

Při odvození vztahů byl uvažován kuželový výstupek jako dokonale tuhý. Tento předpoklad však nemůže být reálně splněn. V místě styku totiž dochází k pružným, pružně plastickým či plastickým deformacím. Bylo prokázáno, že deformace povrchu součásti závisí především na poměru  $\frac{h}{R}$ ,  $h$  je hloubka vniku výstupku částice a  $R$  je jeho poloměr. Pokud  $\frac{h}{R} < 0$ , tak dochází k plastické deformaci, při nesplnění této nerovnice dochází k mikrořezání.



**Obr. 2.** Oddělování částic z povrchu opotřebované součásti[1]

Velmi důležitou roli hraje při poškození součásti úhel, který svírá hrana částice s povrchem součásti. Dle úhlu natočení zrna, bude zrno povrch rýhovat a vytvářet podél své dráhy val, nebo bude utvářet třísku. Z toho vyplývá, že pouze vhodně orientovaná zrna mohou oddělovat z povrchu částice a tím ho opotřebovávat. V případě volných abrazivních částic je umožněno částicím se odvalovat nebo pootáčet. Tím se zhoršují podmínky pro tvorbu třísek[1].

#### 4 Otěruvzdorné povrchové úpravy

Při řešení problémů opotřebení a prodloužení životnosti strojních součástí nabývá stále větší důležitosti povrchové inženýrství. Povrchové úpravy umožňují vytvořit povrchovou vrstvu nebo povlak s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení na měkčí a houževnatější oceli. Požadovanou životnost lze docílit např. těmito způsoby [2]:

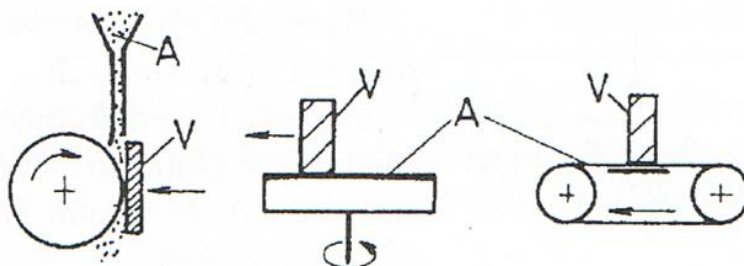
- Vytvořením povrchové vrstvy s fázovou transformací bez změny chemického složení (povrchové kalení ocelí).
- Vytvořením povrchové vrstvy se změněným chemickým složením a mikrostrukturou (chemicko-tepelné procesy).
- Vytvořením povlaků s odlišným chemickým složením a mikrostrukturou (chemické a elektrochemické povlaky, návary, nástřiky apod.).

#### 5 Zkoušky abrazivního opotřebení

Pro zjištění odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení se užívá zkoušek laboratorních nebo provozních. Zkoušky můžeme dále rozdělit na:

- zkoušky s volným abrazivem
- zkoušky s vázaným abrazivem

U zkoušek s volným abrazivem mohou být abrazivní částice vsypávány mezi vzorek a rotující pryžový kotouč. Abrazivními částicemi může být rovněž naplněn buben či nádoba, která se vůči vzorkům pohybuje (Bondův přístroj, brusná nádoba). U zkoušek s vázaným abrazivem je brusivo připojeno prostřednictvím pojiva k brusnému povrchu. Brusný povrch koná pohyb, čímž způsobuje opotřebovávání zkušební vzorku. Mezi tento typ zkoušek lze zařadit zkoušku na brusném plátně či pásu.



**Obr. 3.** Princip některých zkoušek abrazivního opotřebení[1]

## 5.1 Hodnocení opotřebení

Velikost opotřebení se vyjadřuje délkovým  $W_l$ , hmotnostním  $W_h$  nebo objemovým otěrem  $W_o$ . Tyto hodnoty se obvykle vztahují na jednotku dráhy  $x$ .

*Tabulka 1. Veličiny používané pro hodnocení opotřebení*

Otěr	Označení	Jednotka	Rychlost opotřebení	Otěr na jednotku dráhy L
délkový	$W_l$	$\mu\text{m}$	$w_l=W_l/t$	$W_l/x$
hmotnostní	$W_h$	mg	$w_h=W_h/t$	$W_h/x$
objemový	$W_o$	$\text{mm}^3$	$w_o=W_o/t$	$W_o/x$

Opotřebení v délkových jednotkách  $W_l$  představuje úbytek tloušťky součásti, který nastal po uplynutí doby  $t$  anebo po dráze pohybu  $x$  při otěru. Kromě výše uvedených přímo měřených veličin se k hodnocení opotřebení užívá i poměrná odolnost proti opotřebení  $\Psi$  [3].

$$\Psi_i = \frac{W_i \text{ etalonu}}{W_i \text{ vzorku}}, i = l, h, o \quad (5)$$

## 6 Návrh zkušebního zařízení

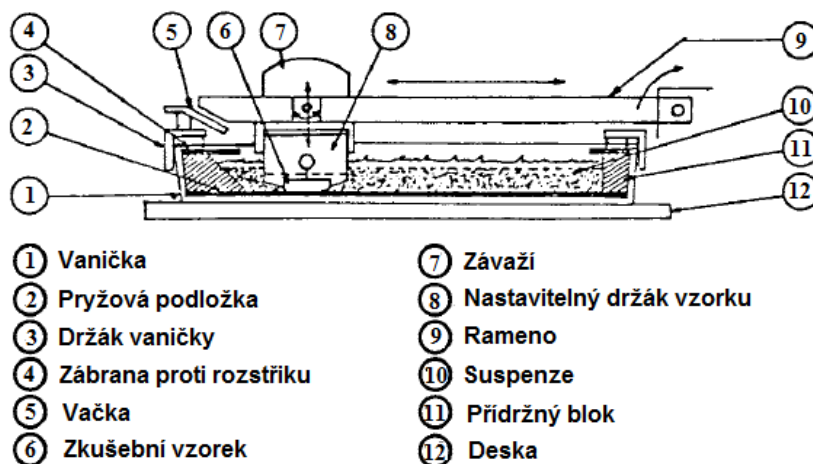
Při návrhu zkušebního zařízení je obecně vhodné vycházet z normalizovaných zkoušek. Dodržením předepsaných parametrů a postupu, které jsou do jisté míry výsledkem experimentální činnosti (a na základě zkušeností se mnohdy revidují), zajistíme věrohodnost získaných dat. Normalizované zkoušky si nekladou za cíl simulovat reálné provozní podmínky. Testováním jednotlivých vzorků určíme poměrnou odolnost materiálu proti opotřebení při podmínkách stanovených normou. Předpokládá se, že vzorky, které vykázaly nejvyšší odolnost při laboratorním testu, budou nejvhodnější i v reálných provozních podmínkách.

### 6.1 Norma ASTM G75

Norma ASTM G75 popisuje metodu pro určení abrazivity suspenze (Miller Number) a odolnosti materiálu proti opotřebení ve zvolené suspenzi (SAR Number). K určení Millerova čísla (Miller Number) jakožto ukazatele relativní abrazivity suspenze se užívá standardního referenčního materiálu, který v různých suspenzích vykáže různé hmotnostní úbytky. SAR číslo (SAR Number) představuje poměr opotřebení zkoumaného materiálu vůči materiálu referenčnímu. Test probíhá v libovolné suspenzi. Obě čísla se užívají především pro hodnocení vhodnosti materiálu čerpadel a potrubí, které přicházejí do styku s konkrétní suspenzí. Se stoupající hodnotou čísel roste i opotřebení [4].

### 6.2 Popis standardního zařízení

Ke dnu plastové nádoby, které je pokryto pásem pryže, je předepsanou silou přitlačován vzorek, který koná přímočarý vratný pohyb. Zkušební zařízení zahrnuje z důvodu vyhodnocení naměřených dat (zprůměrování a porovnání naměřených hodnot) minimálně dvě pracovní ramena. K ramenu je připevněn plastový držák vzorku. Ten musí být výškově nastavitelný, aby byla zajištěna rovnoběžnost povrchu vzorku s pryžovou podložkou. Vzorek je vsazen do obrobené drážky a sevřen pomocí nekovového šroubu. Vzorek je přitlačován předepsanou silou o velikosti 22,24 N. Požadované zatížení se nastaví pomocí připevněného závaží. Na konci ramena je umístěna vačka, která slouží k jeho nadzdvížení. Vlna, která se generuje pohybem vzorku suspenzí, zajistí obměnu abrazivních částic pod zkušebním vzorkem [4].



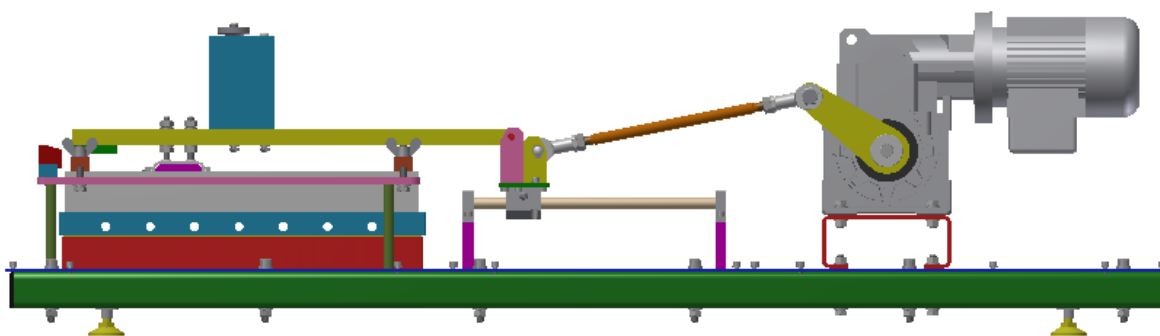
Obr. 4 Řez zařízením[4]

### 6.3 Návrh pohonu

Vzorek koná přímočarý vratný pohyb, který je vyvozen pomocí klikového mechanismu. Vnější silovým účinkem je v případě naší aplikace pouze krouticí moment, který je přiváděn na kliku. Krouticí moment musí překonávat pasivní odpory (tření) a setrvačné účinky. Setrvačné síly zatěžují všechny členy mechanismu a jejich velikost závisí na hmotnosti členů, jejich rozložení a na jejich zrychlení, které se mění s úhlem natočení kliky.

Tabulka 2. Parametry klikového mechanismu

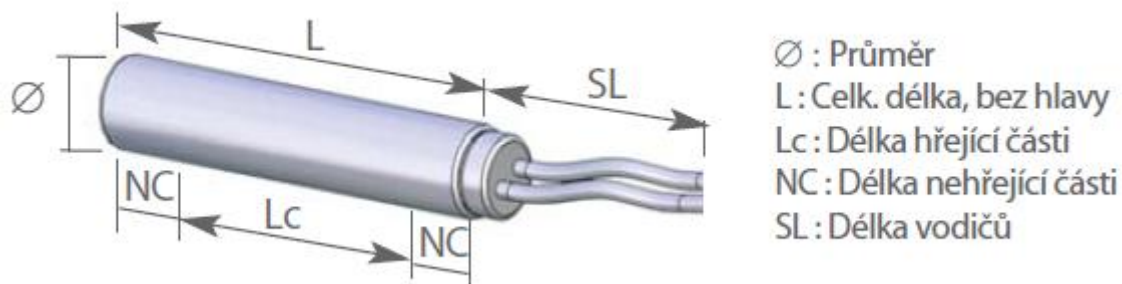
Zdvih $l$ [mm]	Poloměr kliky $r_k$ [mm]	Délka ojnice $l_o$ [mm]	Otáčky strojen [ot/min]	Střední pístová rychlost $c_s$ [m/min]
203,2	101,6	300	48	19,5



Obr. 5. Vlastní zařízení

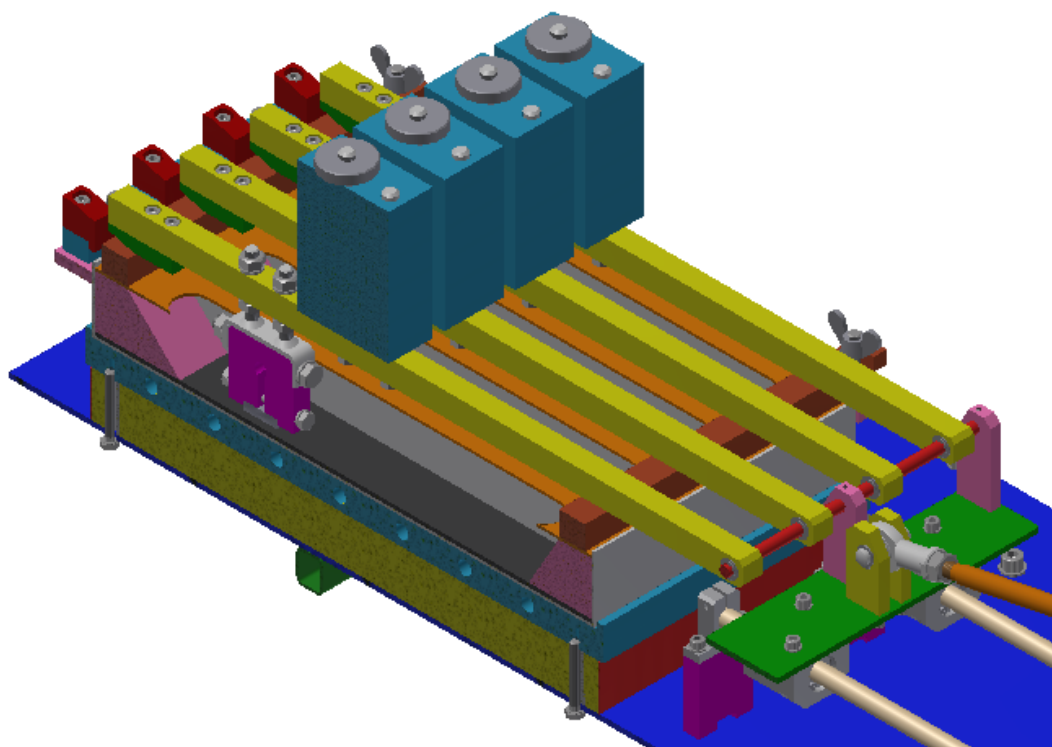
### 6.4 Ohřev

Dalším požadavkem na zařízení je možnost testování abrazivního opotřebení při teplotách do 170°C. Z tohoto důvodu byly plastové součásti nahrazeny součástmi z nerezové oceli. Ohřev bude realizován pomocí topných patron. Patrony se běžně užívají pro ohřev při zpracování plastů, tváření, u balících strojů, pro ohřev forem, vtokových soustav, svářecích lišt apod. Topné patrony pracují na principu tepelné kondukce. Nesmějí být proto používány bez kontaktu s ohřivanou plochou. Patrony se ukládají do vystružených otvorů s tolerancí H7. Pro snadnější montáž, demontáž a lepší převod tepla se užívají montážní teplosměnné pasty.



**Obr.6.** - Topná patrona [5]

Patrony budou vsunuty do otvorů ohřevného bloku (ocelové desky), na kterém jsou umístěny ocelové vaničky.

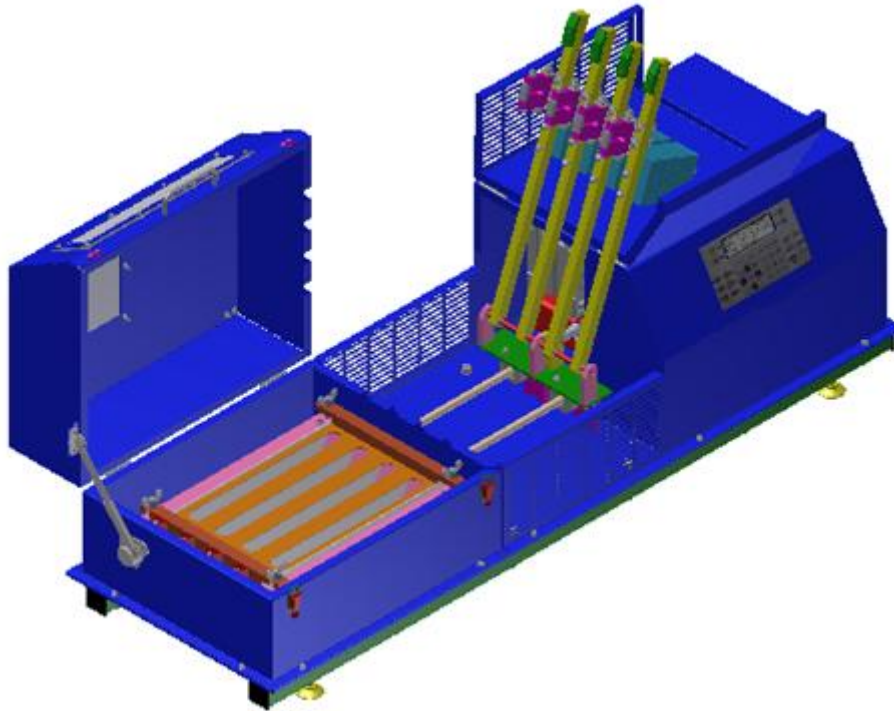


**Obr.7.** Řez pracovním bokem

Pro řízení teploty se v praxi užívají regulátory teploty a polovodičové spínače. Regulátory teploty jsou analogové nebo digitální. Provedení může být stolové nebo pro zabudování do panelu. Vstupem regulátorů bývá nejčastěji termočlánek nebo odporové čidlo Pt100. Teplotní čidla se obvykle umísťují v blízkosti patron. Výrobci však nabízí i patrony se zabudovaným termočlánekem, který snímá teplotu uprostřed topného jádra nebo u pláště. V případě testovacího zařízení je vhodné instalovat termočlánek na přídržný blok umístěný ve vaničce, aby bylo možné měřit přímo teplotu suspenze.

### 6.5 Krytování

Zařízení bude dále opatřeno krytováním. Kryt pracovní části slouží primárně ke snížení tepelných ztrát. Kryt pohonu a lineárního vedení zakrývá elektroinstalaci a pohyblivé části, čímž se zabrání případnému zranění obsluhy (např. zachycením volného rukávu apod.).



**Obr.8.** Testovací zařízení

## 7 Závěr

V rámci projektu byla zpracována problematika opotřebitelnosti materiálu, byl podán přehled způsobů pro zvýšení odolnosti proti opotřebení. Na základě přehledu metod pro testování abrazivního opotřebení byl proveden návrh zařízení, které splňuje dané požadavky.

Práce vznikla za podpory Technologické agentury České republiky, č. grantu TA04010992.

### *Seznam symbolů*

$c_s$	Střední pístová rychlost	(m/s)
$dV$	elementární objem	( $m^3$ )
$dx$	elementární posuv	(m)
$h$	hloubka	(m)
$l$	zdvih	(m)
$l_o$	Délka ojnice	(m)
$n$	otáčky	(1/s)
$p_m$	vnikací tvrdost	(Pa)
$r$	poloměr vtisku	(m)
$r_k$	Poloměr kliky	(m)
$t$	čas	(s)
$w_h$	hmotnostní rychlost opotřebení	(kg/s)
$w_l$	délková rychlost opotřebení	(m/s)
$w_o$	objemová rychlost opotřebení	( $m^3/s$ )

x	dráha	(m)
F	síla	(N)
$K_{abr}$	hodnota úměrnosti opotřebení	(-)
R	poloměr vnikajících výstupků	(m)
V	objem	(m <sup>3</sup> )
$W_h$	hmotnostní otěr	(kg)
$W_l$	délkový otěr	(m)
$W_o$	objemový otěr	(m <sup>3</sup> )
$\alpha$	úhel	(°)
$\Psi$	poměrná odolnost proti opotřebení	(-)
$\Delta F$	síla	(N)

### ***Seznam použité literatury***

- [1] VOCEL, Milan, Vladimír DUFEK. Tření a opotřebení strojních součástí. Praha: SNTL, 1976.
- [2] Otěruvzdorné povrchové úpravy. Tribologie.cz [online]. 2012 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: [http://www.tribologie.cz/dokumenty/oteruvzdorne\\_povrchy\\_2012/05\\_suchanek.pdf](http://www.tribologie.cz/dokumenty/oteruvzdorne_povrchy_2012/05_suchanek.pdf)
- [3] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [4] ASTM G75-07(2013). Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [5] Acim jouanin fabricant de resistances electriques chauffantes [online]. © 2015 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.acim-jouanin.fr/tcheque/acim%20jouanin%20accueil%20uvod.html>