

MECHANISMY TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ PODEŠVÍ LEZECKÉ OBUVI

Michal Žůrek, Ing.

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

Výzkumná skupina Biotribologie

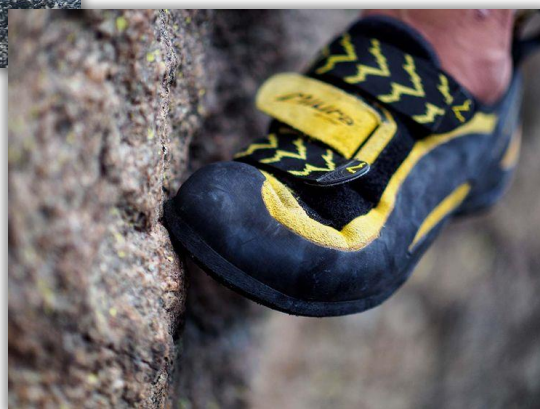
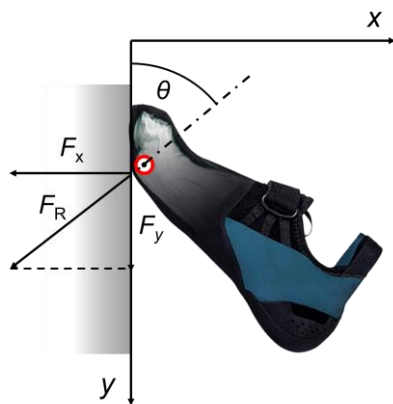
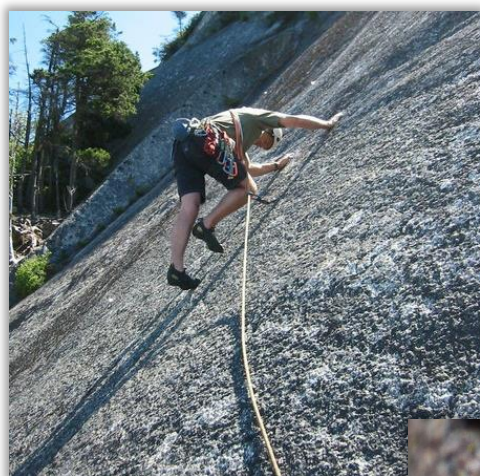
Školitel: prof. Ing. **Martin Vrbka**, Ph. D.

Školitel specialista: Ing. **David Rebenda**, Ph.D.

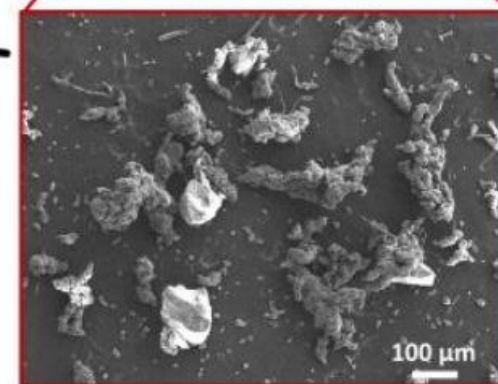
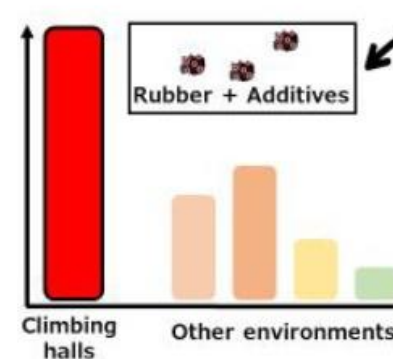
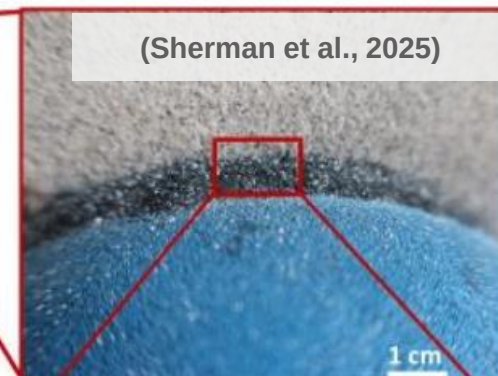
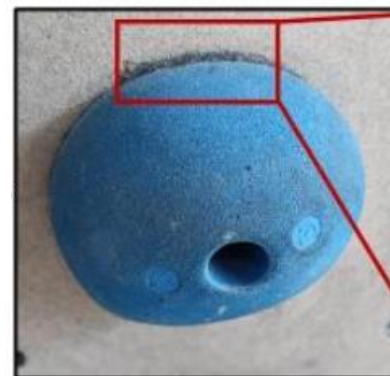


MOTIVACE

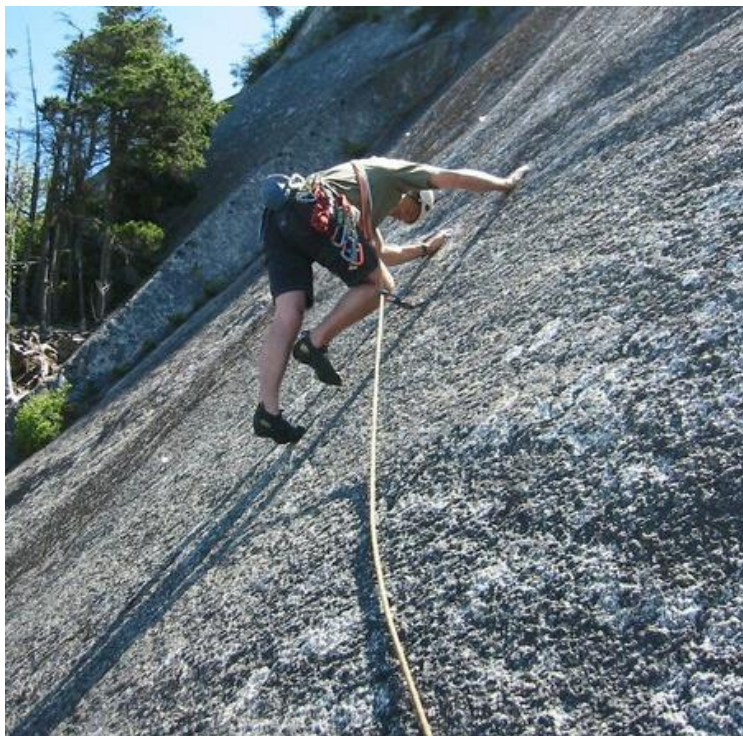
I. ZVÝŠENÍ VÝKONNOSTI



II. SNÍŽENÍ ZDRAVOTNÍCH RIZIK



Jaké parametry definují výkonnost?



Nakloněná rovina



Hrana stupu

Jak se vypořádat se škodlivými částicemi opotřebení?



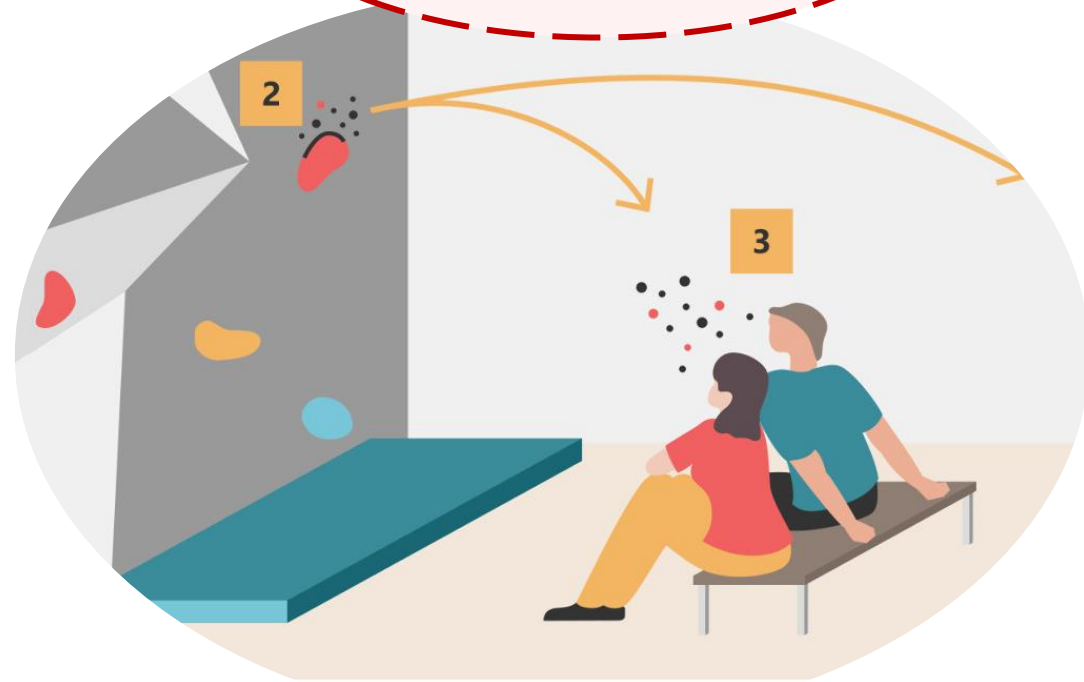
LITERÁRNÍ PŘEHLED

**A. STATICKÝ
SOUČINITEL TŘENÍ**



**B. OHYBOVÁ
TUHOST PODEŠVE**

**C. ODOLNOST VŮČI
OPOTŘEBENÍ**

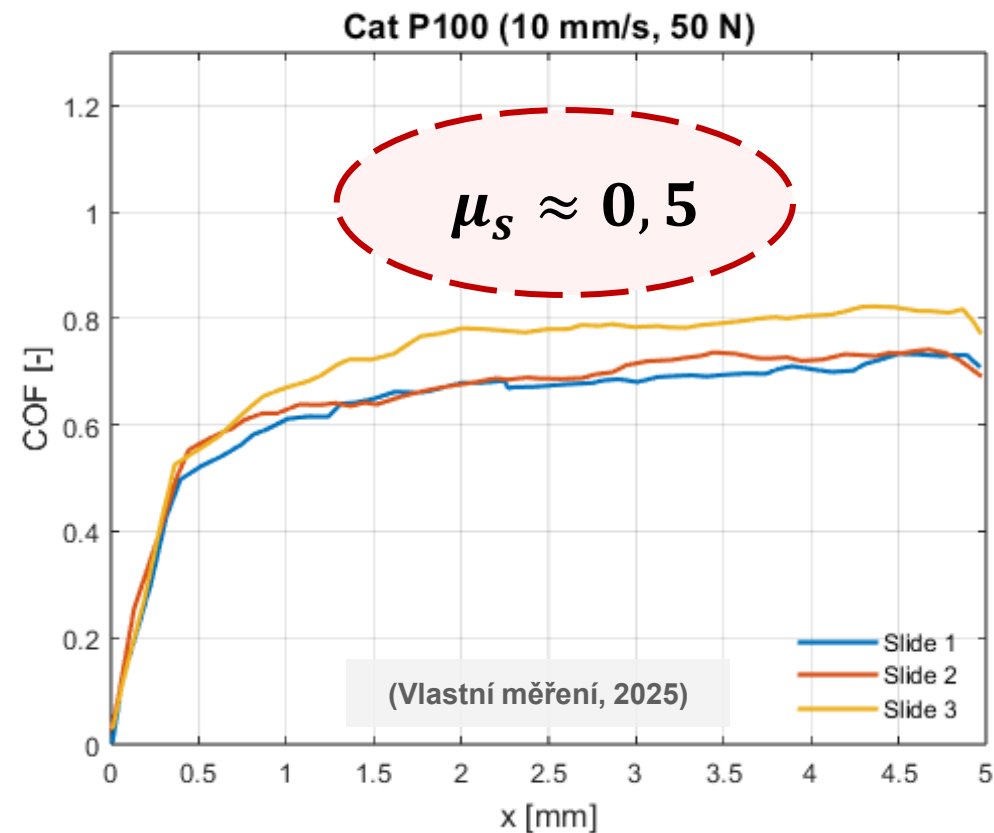
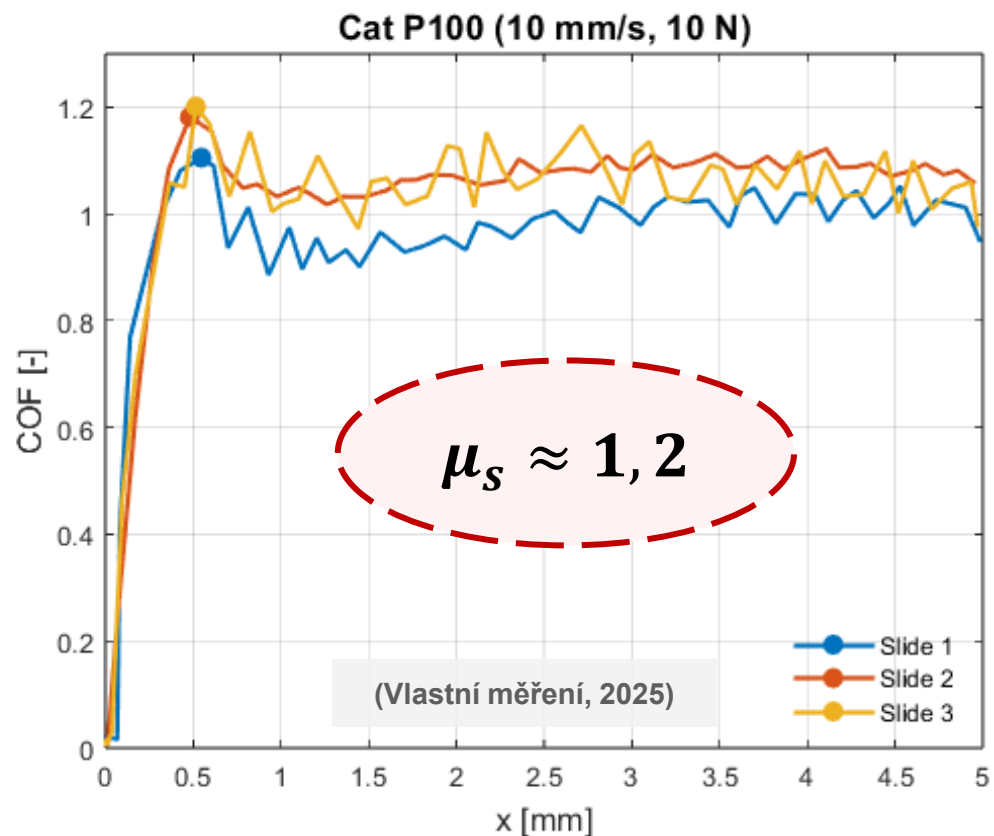


A. STATICKÝ SOUČINITEL TŘENÍ



- Poměr statické třecí síly F_s nutné k rozpohybování objektu a normálové síly F_N .

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_N}$$



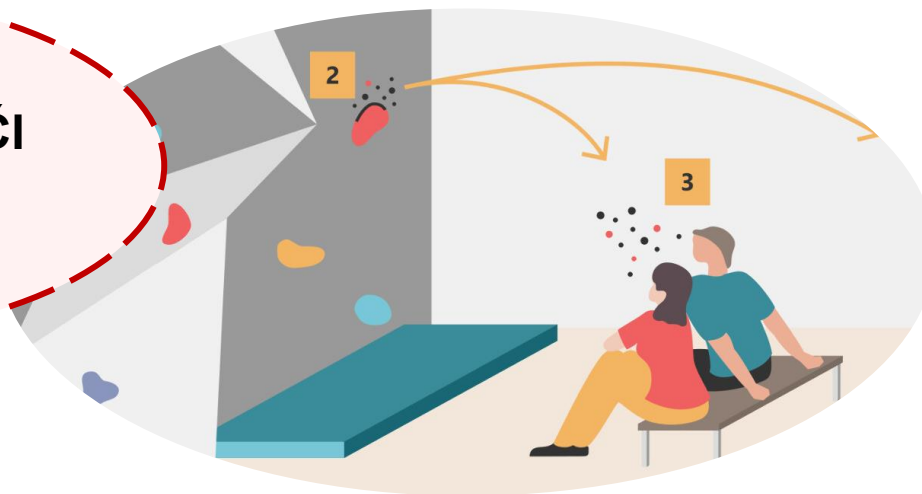
- Rozložení tlaku v kontaktní oblasti – způsob zatížení (Tuononen, 2016)
- Čas úvodního kontaktu (Bureau, 2002)

- Rychlost a zrychlení skluzu – kinetický efekt (Tada & Persson, 2025)

Není charakteristikou materiálového páru – významně závisí na podmínkách testování.

- Kontaktní plocha (Schallamach, 1952)
- Drsnost povrchu kontaktních těles (Fuller & Tabor 1975)
- Vliv kontaminace difúzí nízkomolekulárních aditiv pryže – složení směsi (Tiwari, 2021)

C. ODOLNOST VŮČI OPOTŘEBENÍ



- Úbytek materiálu vyjádřený na jednotku délky skluzu nebo počet cyklů.
- Relativní hodnota vztažená ke standardu. (ASTM D5963 – 22)

- Široce uznávaný způsob stanovení dle normy ISO 4649, ekvivalenty DIN, ASTM.



Zařízení pro stanovení odolnosti vůči oděru pryže (ISO 4649)

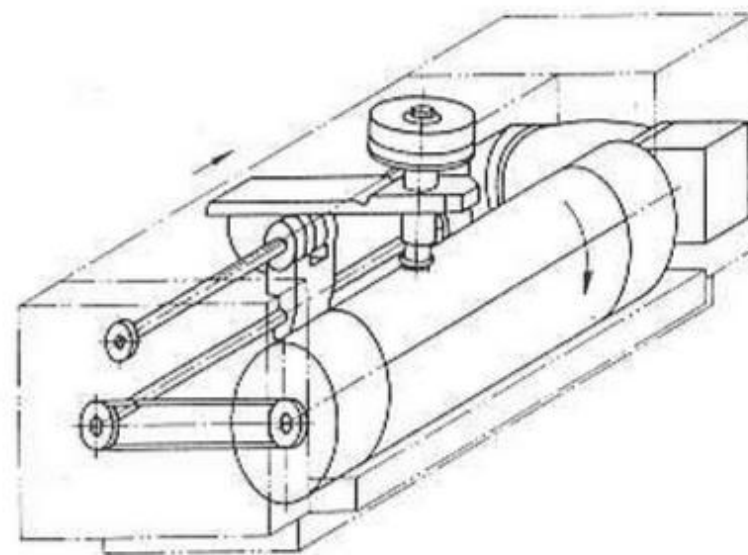
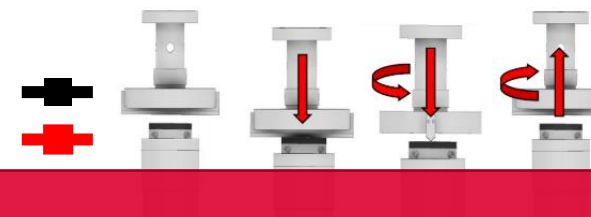
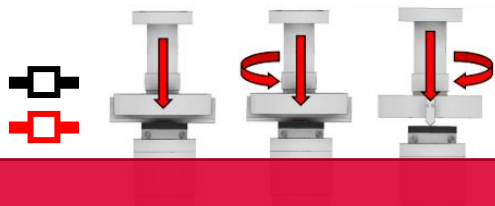


Diagram zařízení pro stanovení odolnosti vůči oděru pryže (ISO 4649)

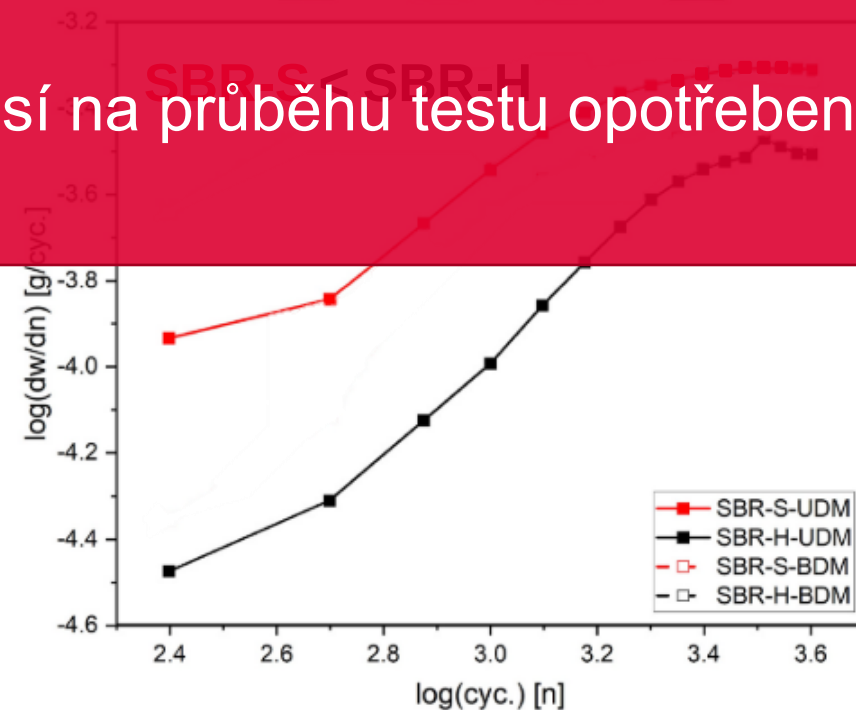
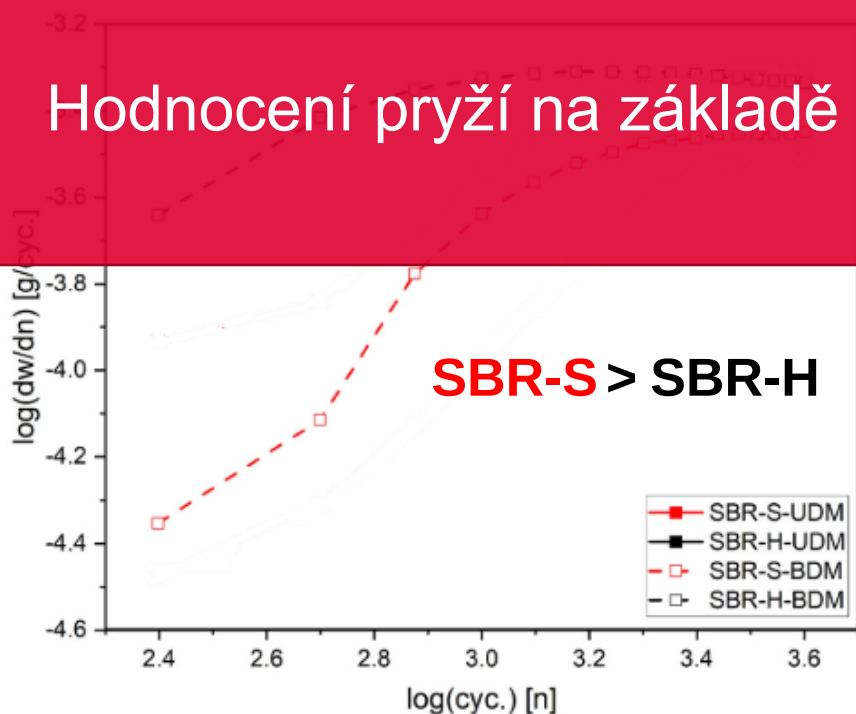
▪ obousměrný režim zatížení

(Plaschka et al., 2025)

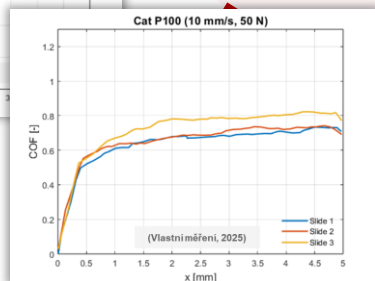
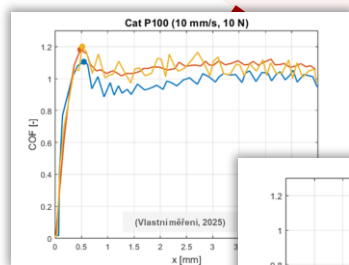
▪ jednosměrný režim zatížení



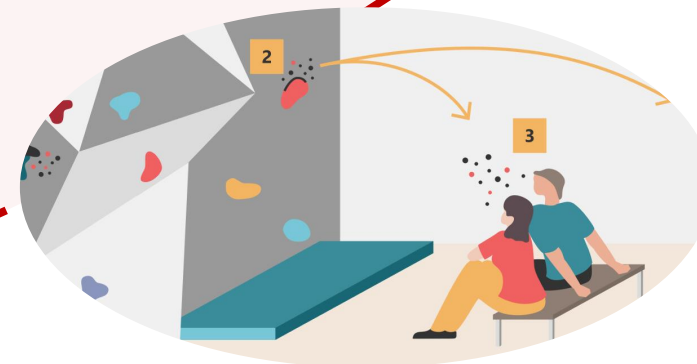
Hodnocení pryží na základě rychlosti opotřebení závisí na průběhu testu opotřebení.



Podmínky měření statického součinitele tření je nutné přiblížit reálné aplikaci.



Hodnocení pryží na základě rychlosti opotřebení závisí na průběhu testu opotřebení.



Zátěžové podmínky obuvi při sportovním lezení.



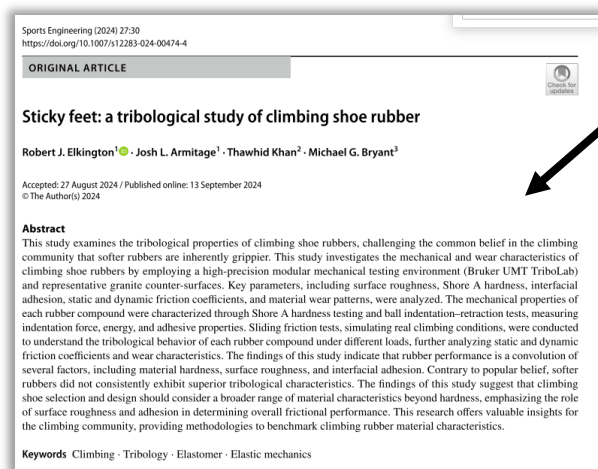
Podmínky měření statického
součinitele tření je nutné
přiblížit reálné aplikaci.

Hodnocení pryží na základě
rychlosti opotřebení závisí na
výběru testu opotřebení.

WOS Search

- friction AND climbing AND rubber
(23 results)
- wear AND climbing AND rubber
(7 results)

Elkington et al. (2024)

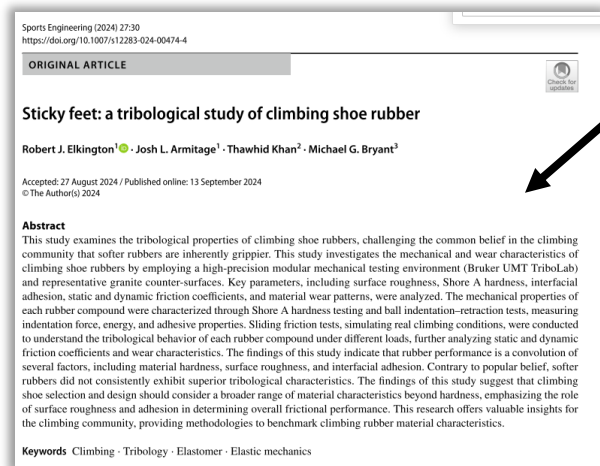


Zátěžové podmínky
obuvi při sportovním
lezení.

✗ Metodika charakterizace tření a opotřebení materiálů podešví lezecké obuvi

✗ Popis mechanismů tření a opotřebení podešví lezecké obuvi

Elkington et al. (2024)



WOS Search

- friction AND climbing AND rubber (23 results)
- wear AND climbing AND rubber (7 results)

✗ Popis vlivu kontaminace zejména pevnými částicemi

Popis mechanismů tření a opotřebení lezecké obuvi a vytvoření laboratorní metodiky pro predikci tření a opotřebení lezecké obuvi v reálných podmínkách.

A. VÝVOJ LABORATORNÍ METODIKY ZALOŽENÉ NA MODELOVÉM KONTAKTU

- Vystihuje režim tření a opotřebení materiálu v aplikačních podmínkách.

B. ROZŠÍŘENÍ LABORATORNÍ METODIKY NA MĚŘÍTKO CELÉ BOTY

- Ověření přenositelnosti poznatků získaných v modelovém kontaktu do reálných podmínek.

C. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA STATICKÉHO TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ PRYŽÍ

- Určení řídicích mechanismů tření a opotřebení.

D. VLIV KONTAMINACE PEVNÝMI ČÁSTICEMI

- Určení vlivu topografie a tvrdosti povrchu na tření v kontaktu kontaminovaném pevnými částicemi.

VĚDECKÉ OTÁZKY A HYPOTÉZY

O1: Jaké mechanismy řídí zahájení skluzu podešve na drsném a hladkém povrchu stupu a jakým způsobem je možné zvýšit statický součinitel tření při zachování ohybové tuhosti podešve?

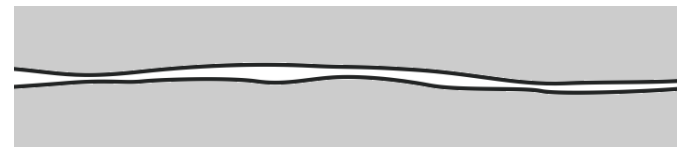
DRSNÝ POVRCH STUPU:

- Záchyt výstupků materiálu podešve a stupu.
- Méně závislé na kontaminaci.



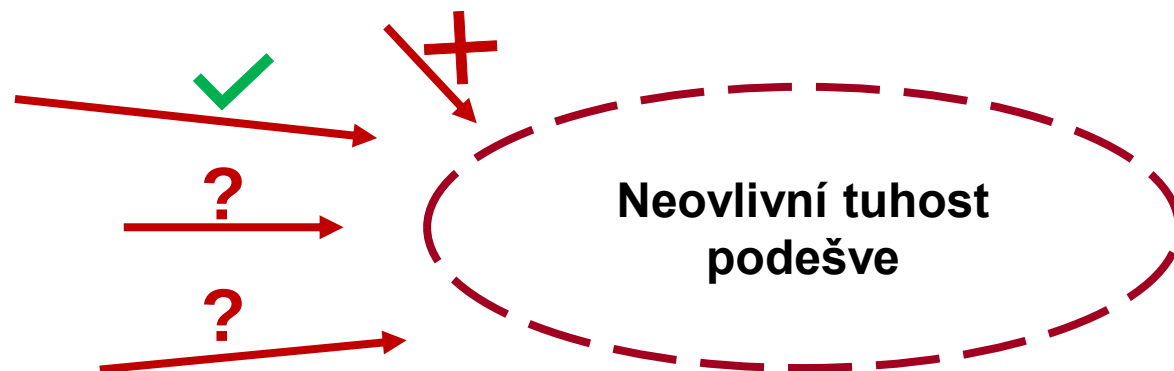
HLADKÝ POVRCH STUPU:

- Řízeno adhezí.
- Silně závislé na kontaminaci.



O1: Jaké mechanismy řídí zahájení skluzu podešve na drsném a hladkém povrchu stupu a jakým způsobem je možné zvýšit statický součinitel tření při zachování ohybové tuhosti podešve?

- Zvýšení reálné kontaktní plochy snížením tvrdosti materiálu.
- Přizpůsobení topografie povrchu pryže.
- Zvýšení hysteretické odezvy materiálu.
- Zvýšení adhezní interakce mezi povrchy.



O2: Jaké mechanismy opotřebení pryží převládají v kontaktu podešve lezecké obuvi s povrchem stupu a jakým způsobem lze zvýšit odolnost vůči opotřebení podešví při zachování vysokého součinitele statického tření?

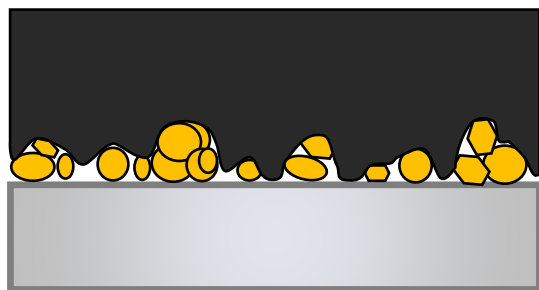
- Adhezní – hladké povrchy, nízká zatížení.
- Abrazivní – vysoká lokální napětí překračující mez pevnosti materiálu.
- Únavové – střední napětí způsobující postupný růst trhlin.
- Cut & Chip – vysoké lokální napětí na velké ploše.

O2: Jaké mechanismy opotřebení pryží převládají v kontaktu podešve lezecké obuvi s povrchem stupu a jakým způsobem lze zvýšit odolnost vůči opotřebení podešví při zachování vysokého součinitele statického tření?

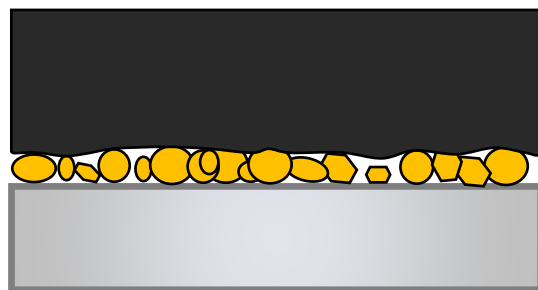
- **Soudržnost materiálu.** → **Složení směsi.**
(mez pevnosti, energie šíření trhliny)
- **Rozložení napětí v kontaktu.** → **Topografie povrchu.**

O3: Jaký vliv má drsnost povrchu a tvrdost materiálu podešve na součinitel tření v kontaktu podešve s povrchem kontaminovaným pevnými částicemi?

I. Vliv tvrdosti pryže

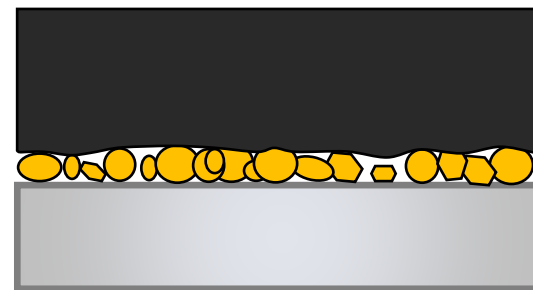


50 ShA

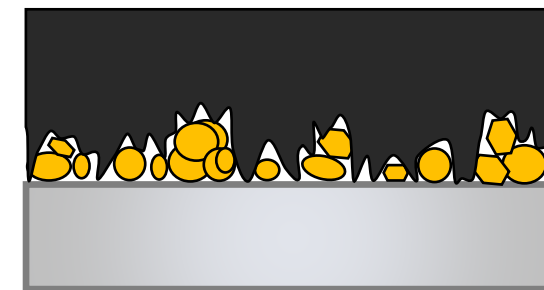


80 ShA

II. Vliv drsnosti povrchu pryže



Ra 0,6 μm

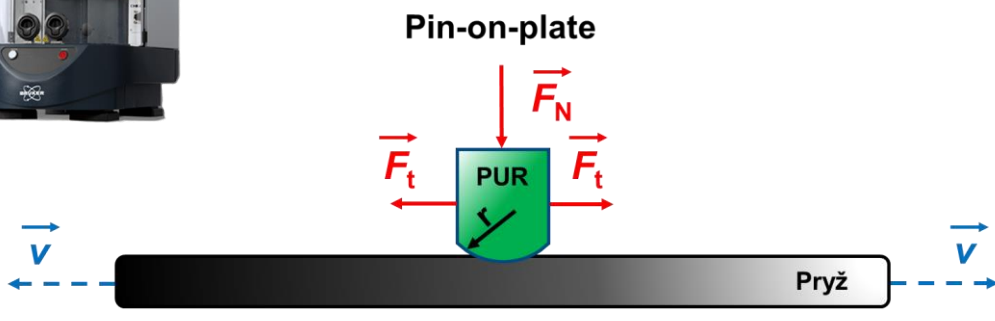


Ra 40 μm

ZPŮSOB ŘEŠENÍ

A. MODELOVÝ KONTAKT

- Modelový kontaktní pár
- Konfigurace pin-on-plate
- Reálné kontaktní povrchy

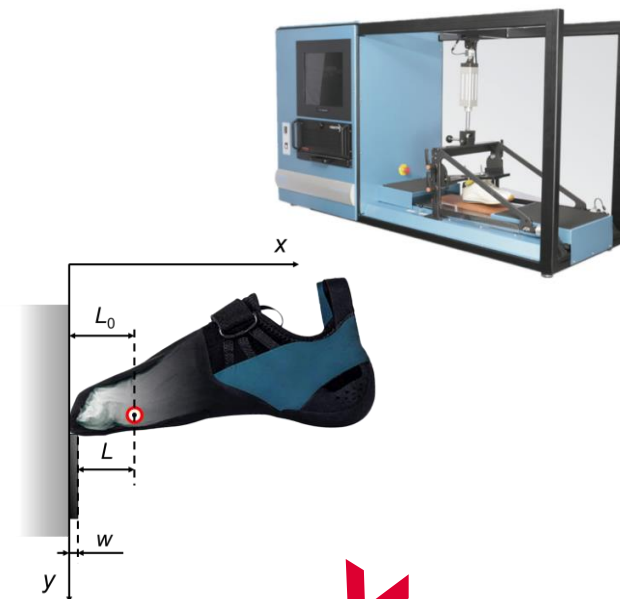
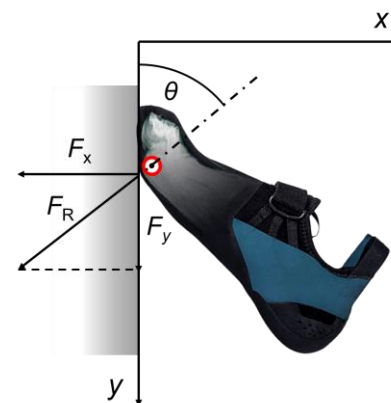


Podmínky simulující reálný kontakt

B. MĚŘÍTKO CELÉ BOTY

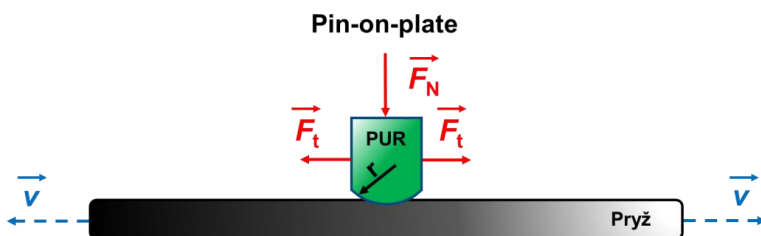


- Hrana stupu / nakloněná rovina
- Vliv materiálu / vliv konstrukce
- Reálné kontaktní povrchy



ZPŮSOB ŘEŠENÍ

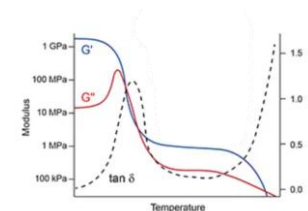
A. MODELOVÝ KONTAKT



- Součinitel tření v modelovém kontaktu
- Rychlost a mechanismus opotřebení
- Analýza částic opotřebení



- Složení směsi
- Topografie povrchu



- Materiálové vlastnosti

Srovnání výsledků

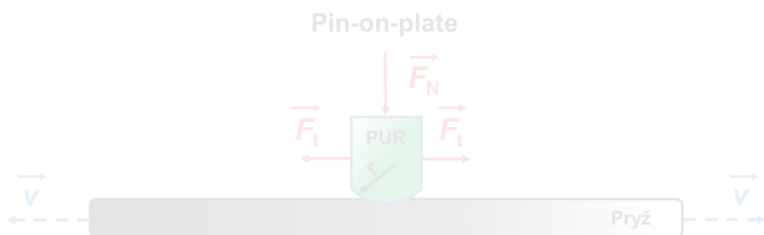
B. MĚŘÍTKO CELÉ BOTY



- Součinitel tření v reálném kontaktu
- Charakter opotřebení

ZPŮSOB ŘEŠENÍ

A. MODELOVÝ KONTAKT

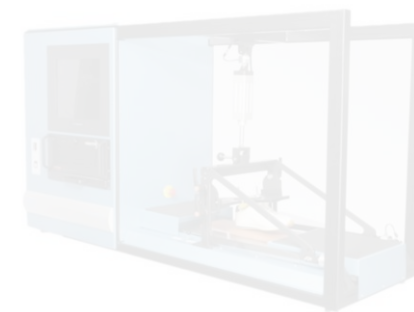


- Součinitel tření v modelovém kontaktu
- Rychlost a mechanismus opotřebení
- Analýza částic opotřebení

- Ověření predikční síly laboratorní metodiky v modelovém kontaktu.
- Oddělení vlivu materiálu podešve a konstrukčních parametrů boty.

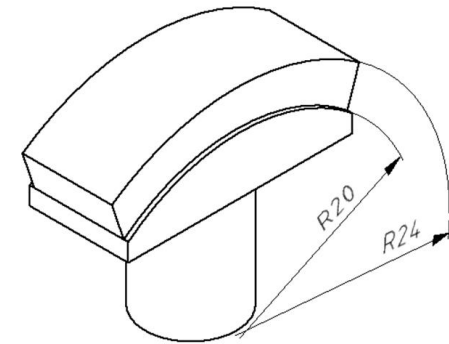
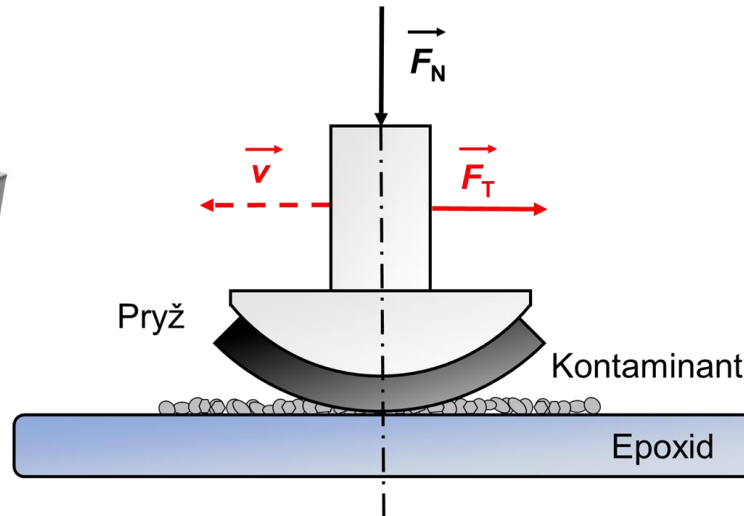
Srovnání výsledků

B. MĚŘÍTKO CELÉ BOTY



- Součinitel tření v reálném kontaktu
- Charakter opotřebení

- Projekt specifického výzkumu na VUT ve spolupráci s FCH (FCH/FSI-J-24-8561).
- Vliv materiálových vlastností pryže na tření v kontaktu kontaminovaném pevnými částicemi.

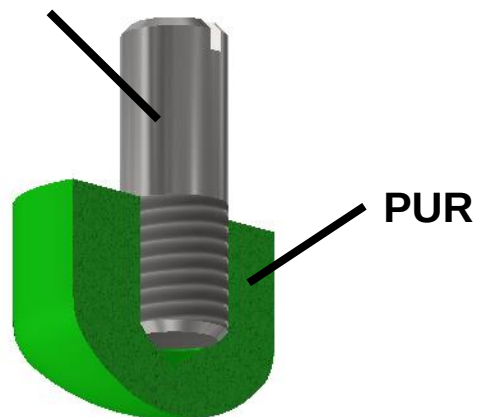


- Publikace výsledků o vlivu kontaminace pevnými částicemi. (Tribology Letters, Q2)
- Příspěvek na konferenci Leeds-Lyon Symposium on Tribology 2025



- Příprava projektu OP TAK (Inovační voucher) ve spolupráci s firmou Ocún.
- Sestavení laboratorní metodiky.
- Příprava kontaktních těles pro experimentální analýzu tření a opotřebení v modelovém kontaktu.

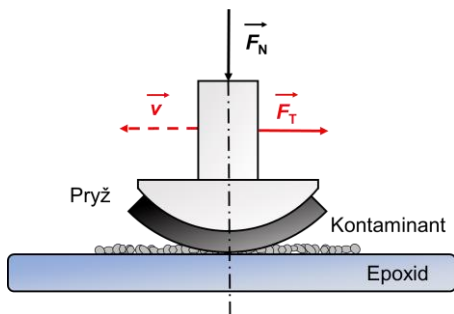
DIN 427 M10x30



aix

2024

- FCH/FSI-J-24-8561
- Pevné částice (O3)



- Dílčí cíl D ✓

2025

- Publikace (O3)
- Konference



- Modelový kontakt
- Dílčí cíl A ↻

2026

- Celá bota
- Analýza tření



- Publikace (O1)
- Dílčí cíl B, C ○

2027

- Analýza opotřebení
- Publikace (O2)



- Dílčí cíl C ○

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Michal Žůrek, Ing.

Michal.Zurek1@vut.cz



www.ustavkonstruovani.cz