



**Lesnická
a dřevařská
fakulta**

7. 3. 2018, Brno

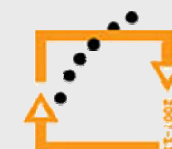
Připravil:

doc. Ing. Zdeněk Kopecký, CSc.

Mechanismy opotřebení strojů

Předmět: Komplexní péče o výrobní techniku

Mendelova
univerzita
v Brně



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Obsah přednášky

Úvod

1. Druhy tření
2. Mechanické opotřebení
3. Měření součástí strojů
dílenskými měřidly



1. Druhy tření

Podle druhu třecích dvojic:

- smykové (kluzné)
- valivé (vrtné)

Podle látky mezi stykovými plochami:

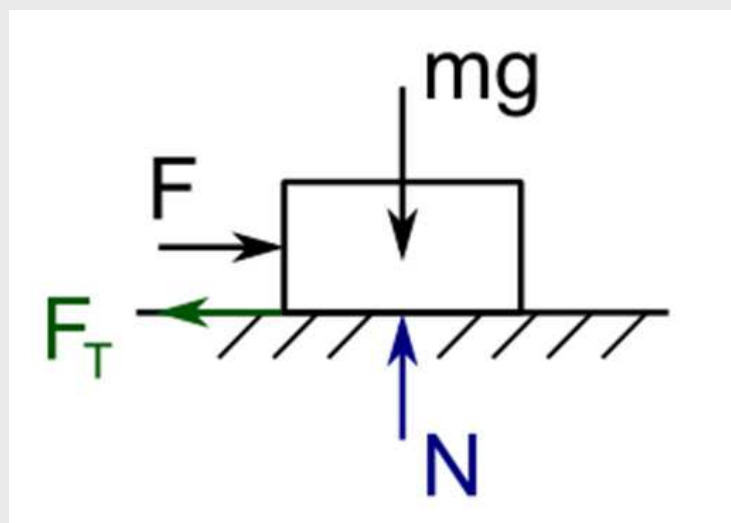
- bez maziva (suché tření)
- s plastickým mazivem
- s kapalným mazivem

Podle formy pohybu:

- za klidu
- za pohybu



Smykové tření



*Třecí tečná síla mezi
pevnými tělesy*

$$F_T = f_o \cdot N$$

f_o ... smykové tření za klidu

Součinitel smykového tření za pohybu:

ocel na oceli

$f = 0,15$ až $0,2$ pro suché tření za pohybu (při mazání $0,05$ až $0,1$)

pryž na oceli

$f = 0,8$ pro suché tření za pohybu (při mazání $0,5$)



Materiál styčných ploch		Stav styčných ploch					
		suché	mokré	mazané	suché	mokré	mazané
		f_0			f		
ocel	ocel	0,15		0,12-0,11	0,09		0,009
	litina, bronz	0,18		0,1	0,16		0,01
	fosfor. bronz	0,11		0,098	0,105		0,092
	hr. pískovec				0,29		
	leď	0,027	0,027- -0,014		0,014		
měkká ocel	dubové dřevo podél vláken		0,65	0,11	0,5-0,4	0,26	0,08
	měkká ocel	0,13		0,11			0,1-0,08
	litina, bronz	0,19			0,18-0,17		0,08-0,07
	pískovec				0,46-0,41		
	vápenec	0,49-0,42			0,29-0,24		
litina	dubové dřevo podél vláken		0,65		0,5-0,3	0,22	0,19
	litina			0,16		0,31	0,1-0,08
	hr. pískovec				0,24-0,21		
bronz	dubové dřevo	0,62			0,3		
	litina			0,11	0,2	0,1	0,06
dřevo	dřevo	0,65	0,7	0,2	0,4-0,2	0,25	0,16-0,04
kůže	dubové dřevo	0,6-0,5			0,5-0,3		
	litina	0,5-0,3	0,6-0,4	0,12	0,56	0,36	0,15
konopné lano	hrubé dřevo	0,8-0,5			0,5		
	hlazené dřevo	0,33					
kámen	kámen	0,75-0,40					
	cihla	0,75-0,60					

f_0 – za klidu

f – za pohybu

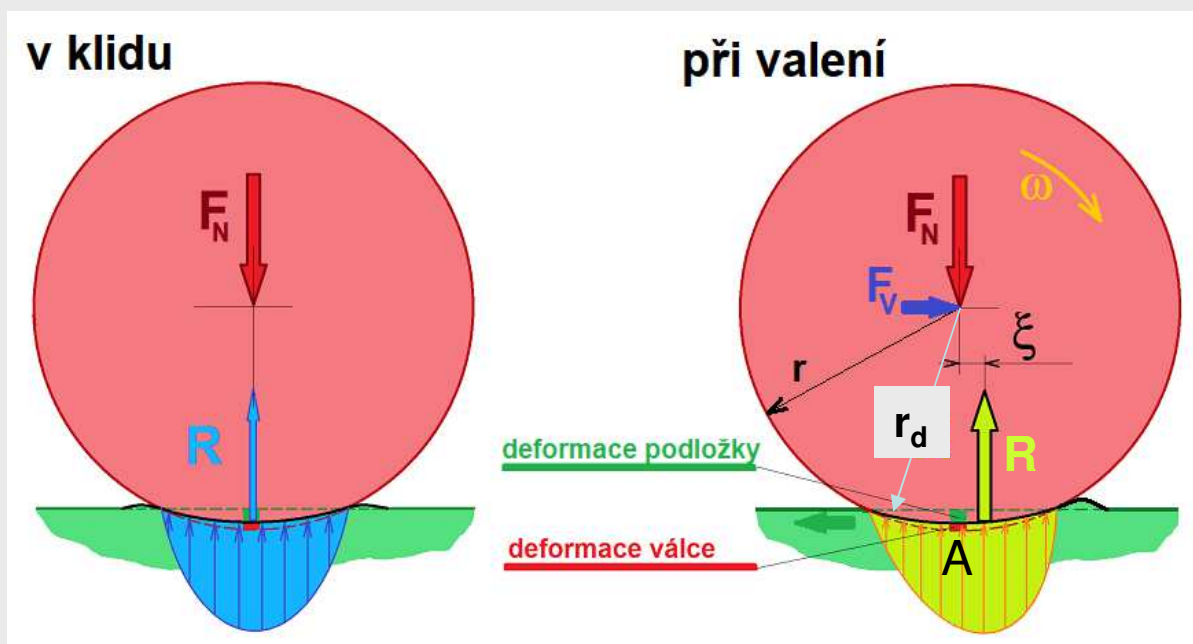


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

J. Kunz: Technická mechanika, skripta FJFI ČVUT, 1993

Valivý odpor

Nastává například při valení válce po podložce.



Z momentové podmínky rovnováhy k bodu A platí:

$$F_v \cdot r_d = R \cdot \xi$$

Odtud síla nutná k překonání valivého odporu F_v :

$$F_v = \xi \cdot \frac{F_N}{r_d} = c_R \cdot F_N$$

$$c_R = \frac{\xi}{r_d}$$

Součinitel valivého odporu (nepřesně valivé tření) je výrazně menší než smykové tření

Rameno valivého odporu

Materiály	ξ [m]
Ocel na oceli	0,0005
Ocelové kolo na kolejnici	0,0004-0,0005
Nekalená ocel na nekalené oceli	0,00005-0,00006
Kalená ocel na kalené oceli (valivá ložiska)	0,000001-0,000005
Dřevo na oceli	0,0012
Dřevo na dřevě	0,0015
Litina na litině	0,00051
Litina na žule	0,0021
Litina na dřevě	0,0056
Polymer na oceli	0,002
Tvrdá pryž na oceli	0,0077
Tvrdá pryž na betonu	0,01-0,02
Pneumatika na asfaltu	0,0025-0,0045
Guma na betonu	0,015-0,035

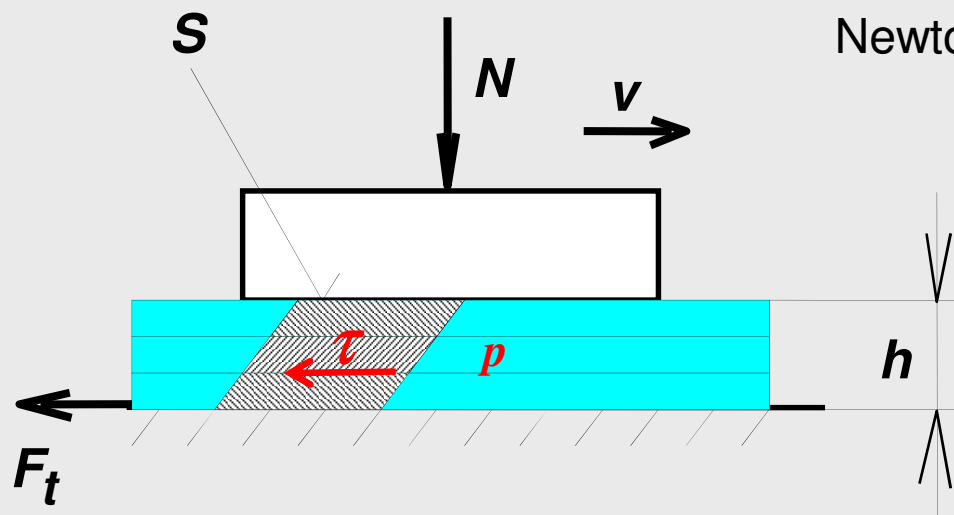


Kapalinné tření

Smykové napětí mezi posouvajícími se vrstvami kapaliny je dáno podle Newtona

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh}$$

η ...součinitel dynamické viskozity



Tečná třecí síla u kapalinného tření

$$F_t = \tau \cdot S = \eta \cdot \frac{v}{h} \cdot S = \frac{\eta \cdot v}{h \cdot p} \cdot N = \mu \cdot N$$

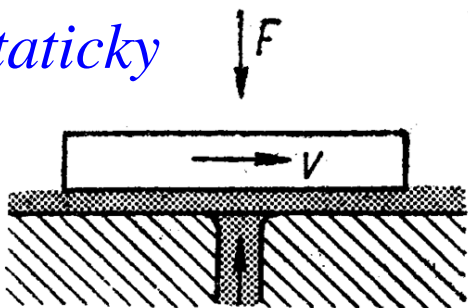
kde $\mu = \eta \cdot v / p \cdot h$... součinitel smykového tření v kapalině (0,001 až 0,005)



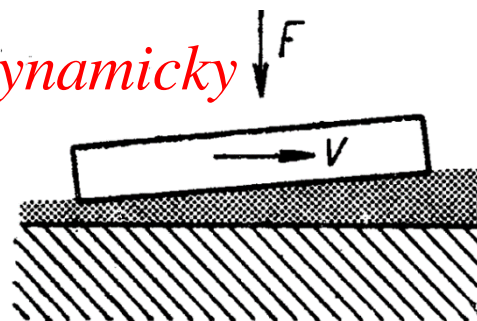
Vliv mazání na tření

- Nejmenší třecí ztráty a min. opotřebení je dosahováno u kapalinného tření. Pro udržení kapalinného tření musí být v kluzném prostoru přítomno určité množství maziva, povrchy musí být odděleny nosným mazacím filmem s nezbytným tlakem.
- Tlak ve vrstvě kapaliny je možné vyvodit dvěma způsoby:

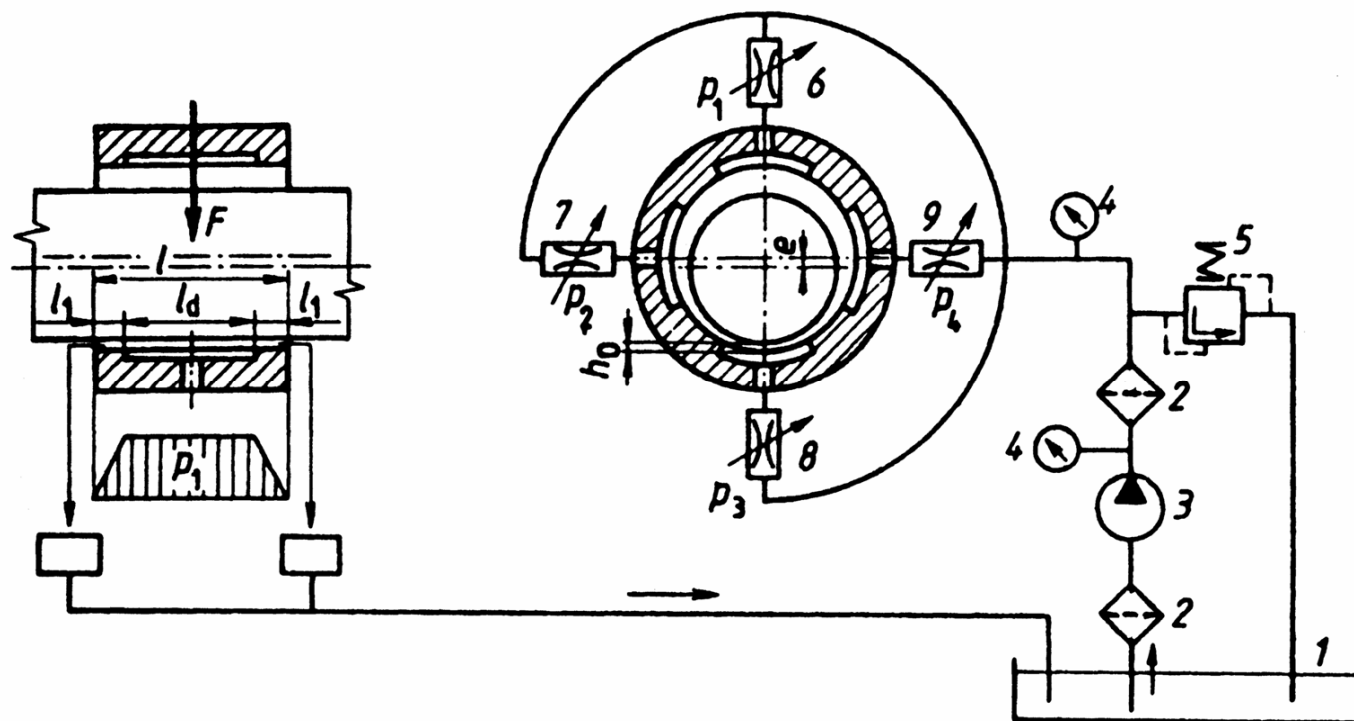
hydrostaticky



hydrodynamicky



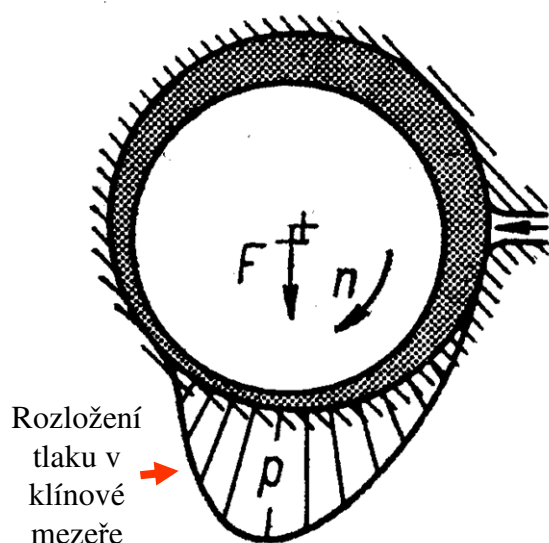
Hydrostatické mazání



- Používá se pouze ve speciálních a odůvodněných případech
- Požadavkem je zabezpečení co nejmenšího tření a opotřebení i při rozběhu (např. turbíny spouštěné pod zatížením)



Hydrodynamické mazání

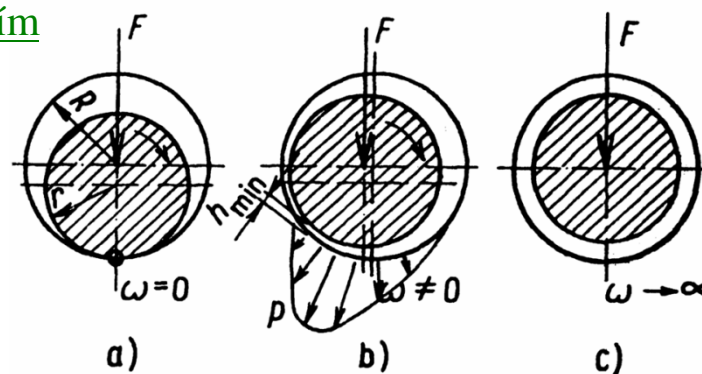


Při činnosti kluzného ložiska musí být splněny tyto předpoklady:

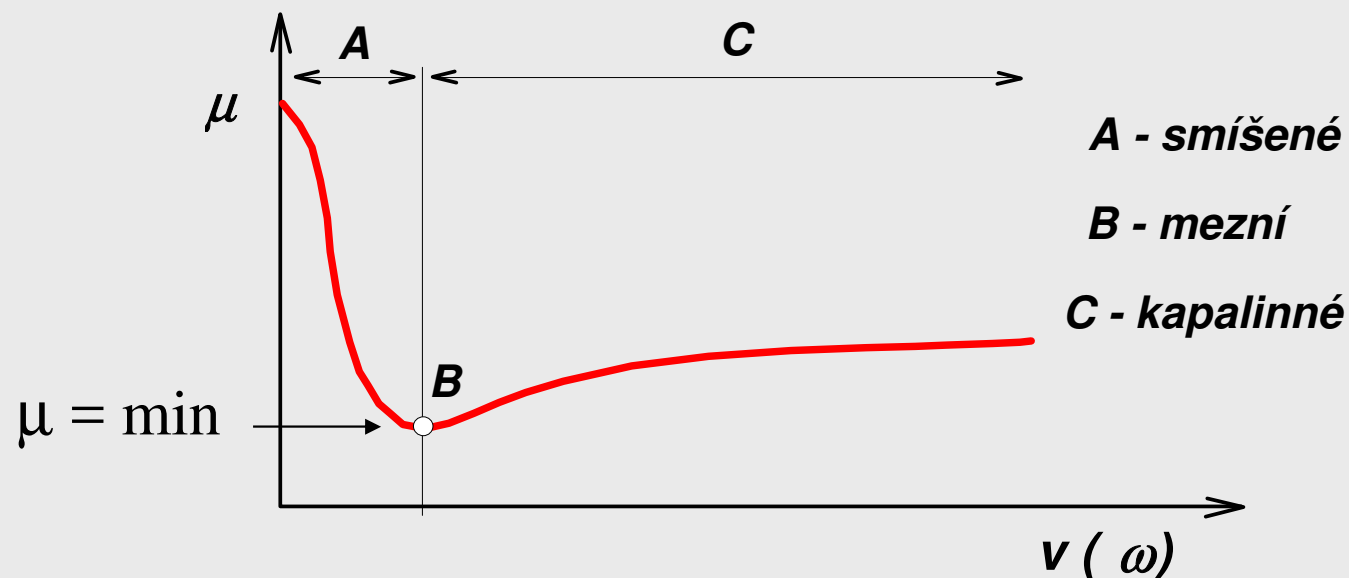
- přilnutí maziva k povrchům tvořících mezeru kluzné dvojice,
- relativní pohyb mezi zatížením a prouděním maziva - vedoucí ke vzniku vztlaku,
- zúžení mazací mezery ve směru relativního pohybu.

Velikost hydrodynamického tlaku v radiálním kluzném ložisku je funkcí tří základních parametrů:

- **ložiskové vůle** ($p \sim 1/h^2$)
- **viskozity maziva** ($p \sim \eta$)
- **úhlové rychlosti hřídele** ($p \sim \omega$)



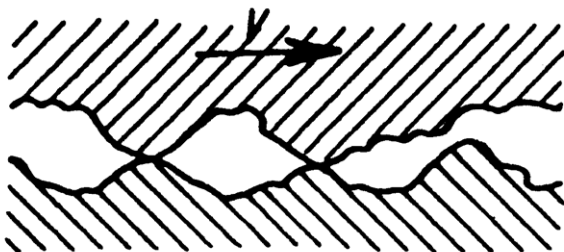
Stribeckův diagram



Třecí síla je závislá na součiniteli tření, který má ovšem rozdílné hodnoty za klidu a za pohybu. Stribeckův diagram ukazuje, jaká je při daném zatížení ložiska tzv. mezní úhlová rychlost, při které je dosahováno smíšeného tření. Vyjadřuje názorně poznatek, že každé kluzné ložisko hydrodynamicky mazané, prochází při rozběhu a doběhu oblastí smíšeného tření, kdy se snižuje velikost třecích ztrát a především narůstá rychlost opotřebení.



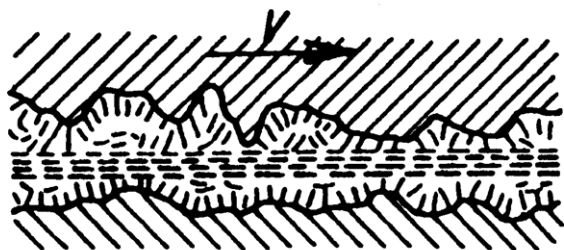
Možné stavy tření v ložisku



Suché $\mu = \max.$



Smíšené



Kapalinné (mezní
 $\mu = \min.$)



2. Mechanické opotřebení

Definice: Je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů součástí, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení způsobuje.

Patří do množiny **poškození** součástí
strojů, kam lze dále zařadit:

- Korozi
- Otláčení a deformace
- Trhliny a lomy
- Ostatní



- **Koroze** je nežádoucí trvalá změna materiálu součásti, zejména povrchu, způsobená elektrochemickými (galvanické články) a chemickými vlivy okolního prostředí (vzdušný kyslík a vlhkost).
- **Otlačení a deformace** jsou nežádoucí trvalé změny povrchu a geometrického tvaru součásti, způsobené vnějšími silami nebo tepelnými vlivy.
- **Trhliny a lomy** jsou porušení homogenity materiálu v části nebo v celém průřezu součásti.
- **Ostatní poškození** jsou jiná než výše uvedená, například:
 - *stárnutí materiálu*
 - *tepelná degradace materiálu*
 - *fotooxidace laků apod.*



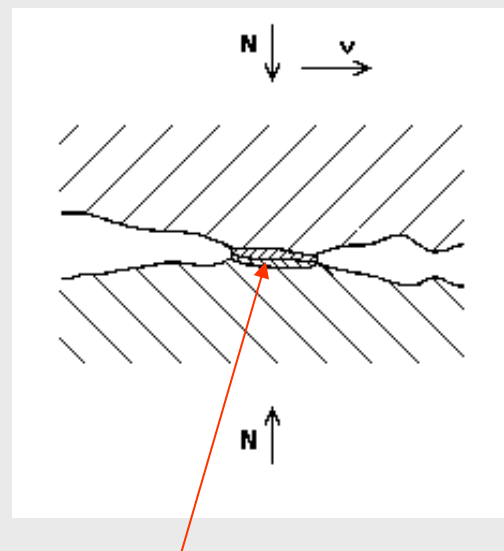
2.1 Druhy mechanického opotřebení

- *Adhezivní*
- *Abrazivní*
- *Vibrační*
- *Únavové*
- *Erozivní*
- *Kavitační*



Adhezivní opotřebení

Charakteristika	Opatření ke snížení účinků
Vzniká při vzájemné interakci povrchových mikronerovností, začnou se uplatňovat molekulární síly, dochází k lokálnímu ulpívání až k studeným mikrosvarům jednotlivých výstupků a k jejich následnému vytržení. Intenzivnější průběh je u hladších povrchů.	➤ Zmenšení jmenovitého tlaku ➤ Vhodná kombinace materiálů ➤ Přidání vysokotlakého aditiva do maziva



V místě dotyku nerovností vznikají několikanásobně vyšší síly než jsou přítláčné síly N

Poznámka:

- Styková plocha je někdy menší než 0,001 obrysové plochy.
- Vzniká nebezpečí zadíráání povrchů (mikrosvary) za vzniku vysoké teploty.



Adhezivní opotřebení pánve kluzného ložiska



Drsnost povrchů přispívá i k adhezivnímu opotřebení. U tohoto druhu opotřebení je důležitá kompatibilita materiálů. Kompatibilitou se tu nemyslí, že materiály dobře fungují dohromady, ale vzájemná „přilnavost“ materiálů, vedoucí ke vzniku adhezních spojů. Kvůli této kompatibilitě vzniká vazba, která může vyvolat zadření, a dokonce i svaření dílů za studena.



Adhezivního opotřebení ložiskového čepu

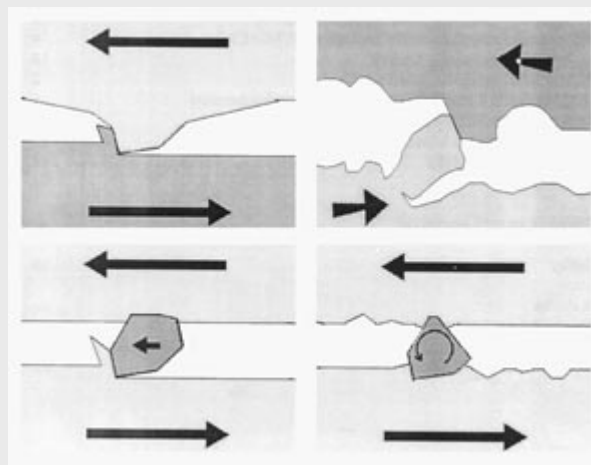
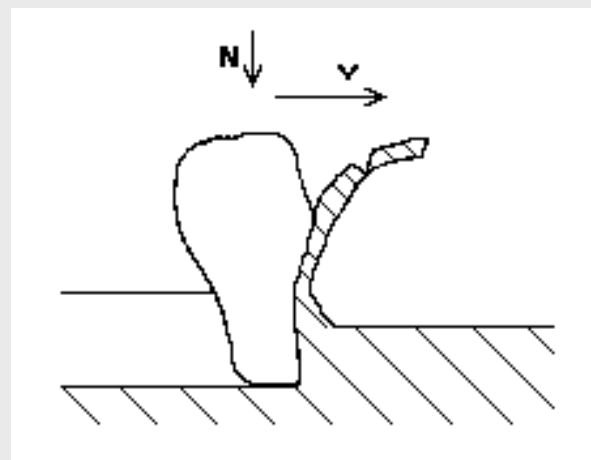


**„Navaření“ ložiskového kovu na
kalený povrch čepu.
Nevhodná volba třecího ložiskového
materiálu nebo nedostatečné množství
maziva.**



Abrazivní opotřebení

Charakteristika	Opatření ke snížení účinků
Je charakterizováno oddělováním částic z funkčního povrchu účinkem tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa, případně i tvrdými částicemi, které se dostanou mezi stykové povrchy těles.	➤ Snížení drsnosti tvrdého tělesa ➤ Zvýšení tvrdosti opotřebovávané součásti ➤ Zmenšení jmenovitého tlaku ➤ Zamezení přístupu tvrdých volných částic

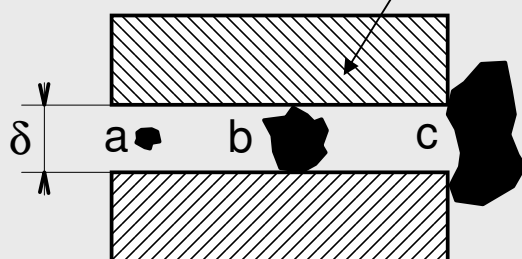


Nejčastější výskyt u
zemních a zemědělských
strojů, např. ostří pluhů,
pleček a kultivátorů, zuby a
lžíce bagrů, radlice
buldozerů apod.



**Abrazivní opotřebení
se vyskytuje i u**

hydraulických prvků



δ - kritická vůle

a - částice $< \delta$

b - částice $= \delta$

c - částice $> \delta$

Může dojít také k tomu,
že tvrdé volné částice se
zamačkají do měkčího z
povrchů a potom rýhují
tvrdší povrch. To se
stává např. u hřídelových
těsnění, ucpávek a
prachovek.



Abrzivní opotřebení pístu spalovacího motoru

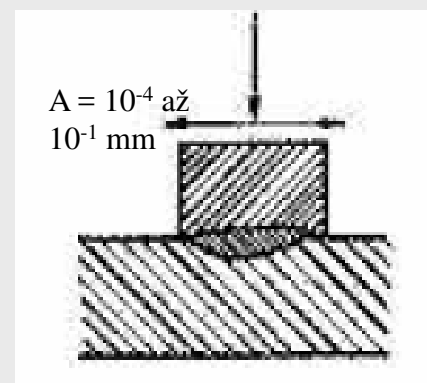


Stopy abrazivního opotřebení na brzdovém kotouči



Vibrační opotřebení

Charakteristika	Opatření ke snížení účinků
Je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu součásti vlivem vzájemných kmitavých tečných posuvů funkčních povrchů těles při působení normálového zatížení	➤ Těsnější lícování ➤ Zvětšení drsnosti povrchů ➤ Kalení, nitridování, chromování ➤ Mazání třecích ploch grafitem



- Vzniká při přímočarém vratném pohybu (amplitudy jsou velmi malé do 0,1 mm), přenesenými vibracemi v uložení mechanicky namáhaných součástí (např. čep v závěsu).
- Při tak malých pohybech je znemožněno odstraňování otěrových částic, které jsou dále namáhány normálovými i tangenciálními silami, oxidují a dodávají opotřebovaným místům na ocelových a litinových součástech typické hnědočervené až hnědočerné zbarvení. Jde o tzv. "krvácení materiálu".

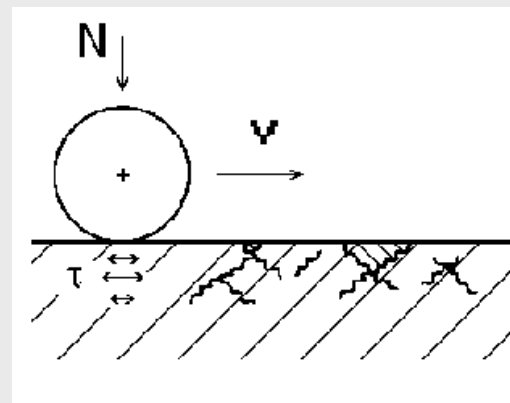


Vibrační opotřebení drážkovaného hřídele



Únavové opotřebení

Charakteristika	Opatření ke snížení účinků
Opotřebení únavou podpovrchových vrstev následkem plastických nebo elastických deformací, tzv PITTINGS	➤ Použití materiálů s odolností proti vzniku mikrotrhlin ➤ Tlumení vibrací a rázových normálových namáhání ➤ Vyloučení složek maziva a ovzduší, které urychlují rozvoj mikrotrhlin



Kontaktní povrchová únava vzniká při silovém, cyklicky opakovaném styku dvou těles, při kterém se vyskytují vysoké lokální tlaky. K tomu dochází zejména při styku těles se zakřivenými styčnými plochami, typicky na bocích zubů ozubených kol, valivých ložisek.



Pittings boků zubů



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

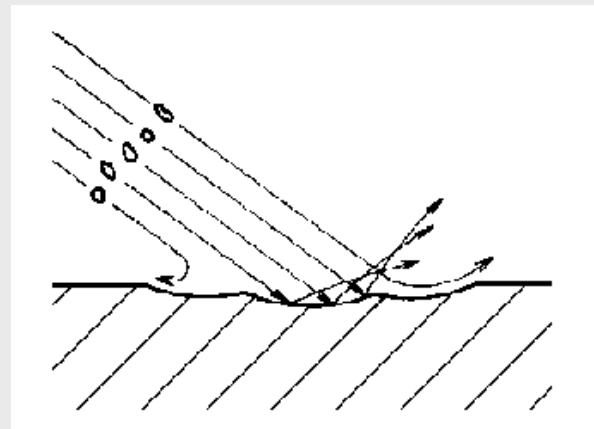
Povrchová únava částí valivých ložisek



Erozivní opotřebení

Charakteristika:

- částice, nesené velkou rychlostí proudem kapaliny nebo plynu rýhují povrch součásti (vyskytuje se např. u čerpadel na znečištěné kapaliny, ventilátorů, cyklonů, tryskačů, potrubí pneumatické, hydraulické či spádové dopravy aj.)
- při zvlášť velkých rychlostech mohou erozivní opotřebení způsobovat samotné částice kapaliny, páry nebo plynu (vyskytuje se např. u parních armatur, plynových turbín, náběžných hran křídel a ostatních ploch letadel, ventilů spalovacích motorů aj.).



Podobný mechanismus jako u abrazivního opotřebení, tj. dochází k rýhování a seřezávání materiálu. Typické pro erozivní opotřebení je nerovnoměrné porušení povrchu – vzniká zvlněný nebo zvrásněný povrch.



Erozivní opotřebení kulového uzávěru ventilu



- Z praxe je známo, že kalené – tvrdé povrchy dobře odolávají dopadu částic pod malým úhlem.
- Naopak materiál s relativně měkkým povrchem je odolnější při dopadu částice pod velkým úhlem (kolmo k povrchu).

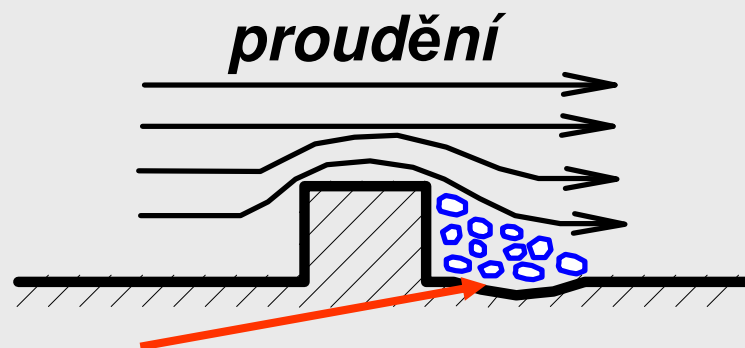
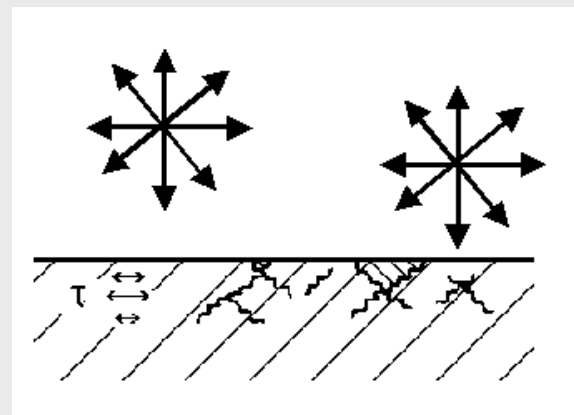


Kavitační opotřebení

Charakteristika: narážení částic kapaliny na povrch součásti v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině.

Hlavní faktory, které ovlivňují intenzitu kavitačního opotřebení jsou:

- obsah plynů v kapalině,
- teplota a tlakové poměry,
- viskozita kapaliny.



Při proudění ve zúženém průřezu se sníží tlak pod hodnotu tlaku nasycených par kapaliny při dané teplotě. V tomto případě se v kapalině začnou tvořit dutiny (z latiny *cavitas* - dutina), vyplněné parami kapaliny. Objem, který zaujímá kavitační dutina, může kolísat ve velkém rozsahu, řádově od krychlových milimetrů do krychlových metrů.



Kavitační opotřebení kola odstředivého čerpadle a lopatek lodního šroubu



Typický kavitačně poškozený povrch je drsný, jakoby vytrhaný. Někdy se toto opotřebení mylně přisuzuje korozi.



2.2 Dílenské hodnocení opotřebení součástí

- **Mezní stav** určuje max. přípustný rozměr funkční plochy součásti, který byl podle vhodného kritéria (technického, ekonomického, bezpečnostního) uznán za závazný.
- Znalost časového průběhu opotřebení se uplatňuje při určování frekvence a rozsahu jednotlivých opatření údržby.



Příklad - mezní stavy u nožového hřídele srovnávací frézky

- Velikost pružných deformací překročila přípustnou hodnotu vyplývající z požadavků na přesnost frézování.
- Nožový hřídel je trvale deformován.
- Opotřebení ložisek dosáhlo takové velikosti, že vzniklé vůle nedovolily dosažení požadované přesnosti stroje.
- Zadřelo se ložisko.



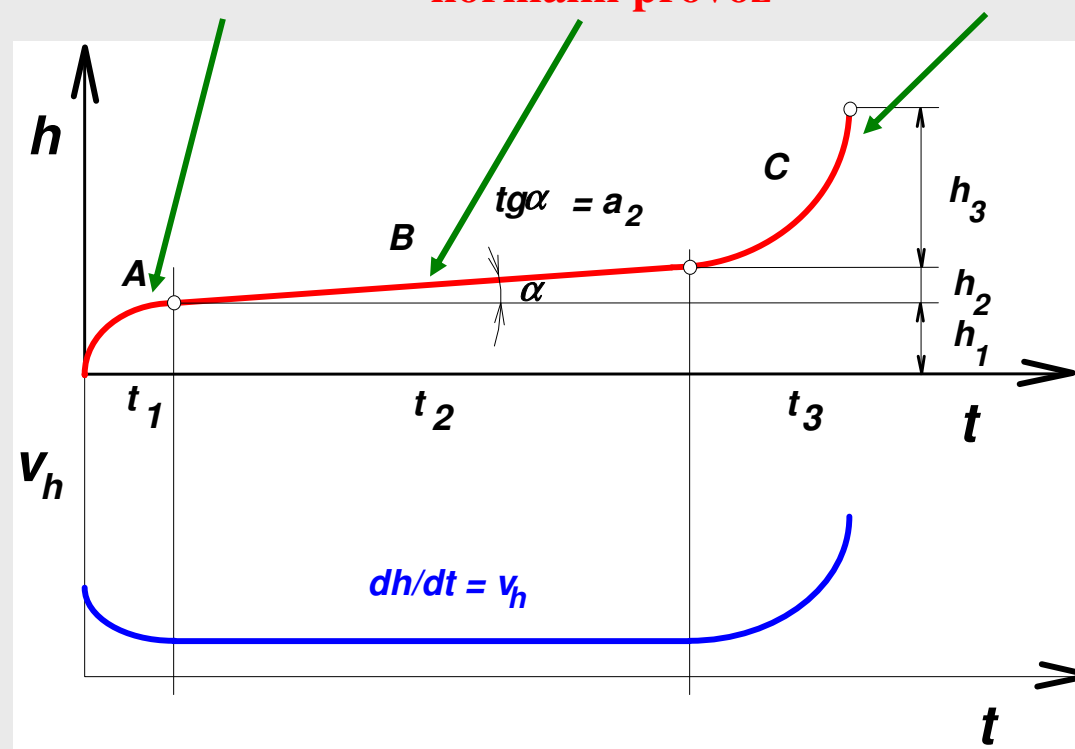
Průběh opotřebení

Degresivní nárůst

Ustálené poměry tření
a opotřebení v období

Progresivní nárůst
opotřebení - **konec**
technického života

Charakteristický
průběh
opotřebení
strojních
součástí
vyjadřuje
obecná křivka
opotřebení.

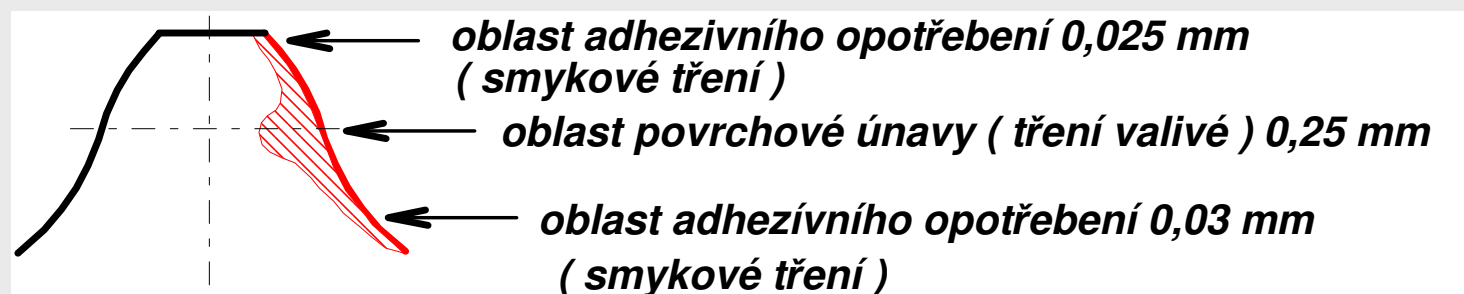


$$h = h_1 + h_2 + h_3 = a_1 \cdot t_1^n + a_2 \cdot t_2 + a_3 \cdot t_3^m$$



Rovnoměrné a nerovnoměrné opotřebení

Nerovnoměrné opotřebení



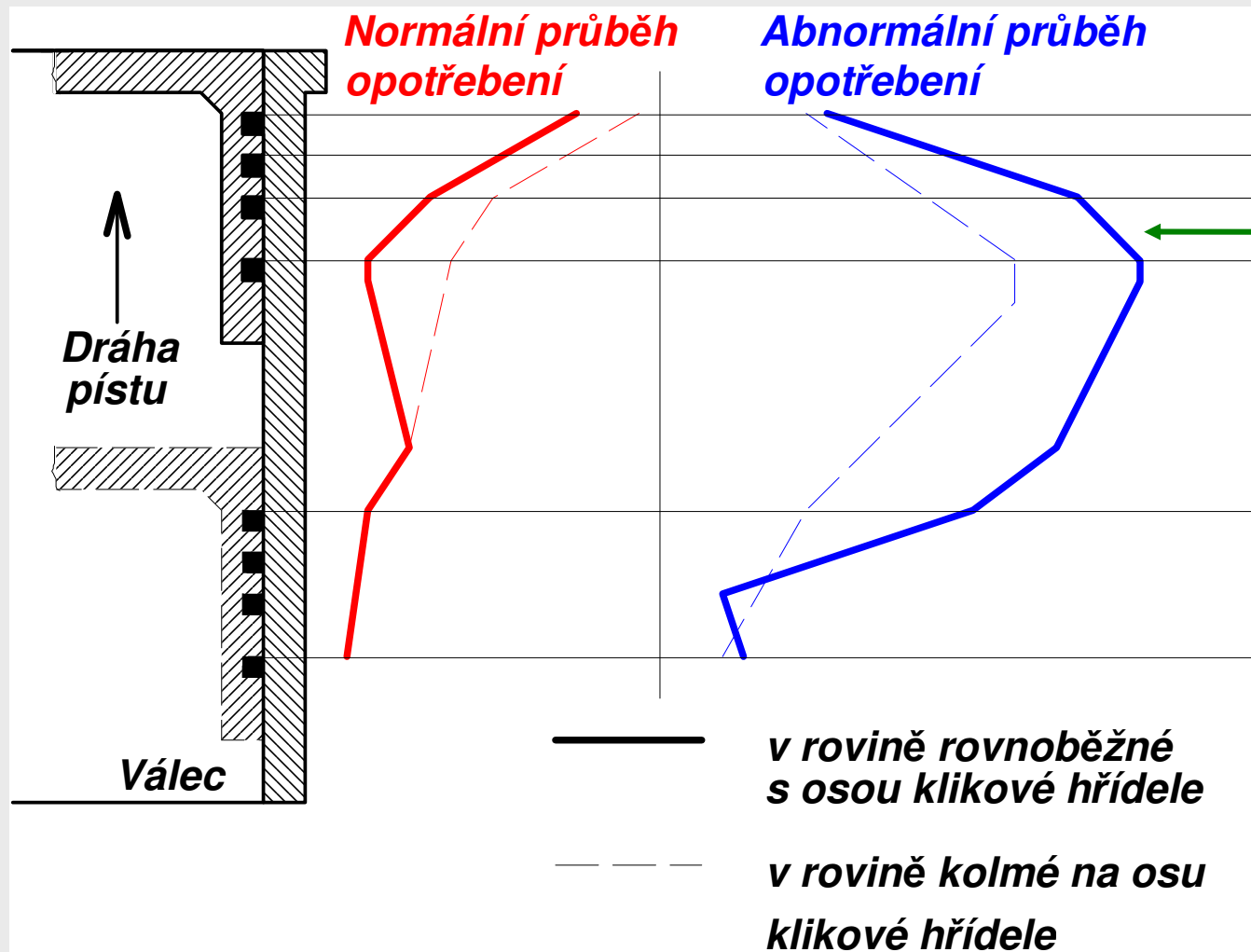
Rovnoměrné opotřebení se v praxi vyskytuje zřídka, např. u rotačních součástí s tzv. obvodovým zatížením, při kterém síla přibližně stejné velikosti směřuje stále do jiného obvodu ložiska nebo hřídele. Je to např. náboj kola, hřídel ložiska zatížený silou stálého směru a velikosti, osy vagónů apod.



Normální a abnormální průběh opotřebení

- **Normální (přirozené) opotřebení**, které vzniká zákonitě při používání stroje, má pro danou sdruženou dvojici součásti určitý typický průběh a intenzitu. To znamená, že konstrukční řešení, tribologické vztahy a podmínky provozu jsou v souladu.
- **Abnormální průběh opotřebení** vzniká tehdy, jsou-li výše uvedené vztahy narušeny jakýmkoliv způsobem. Průběh opotřebení je jiný a jeho forma zpravidla naznačuje příčinu, kterou je nutné odstranit.

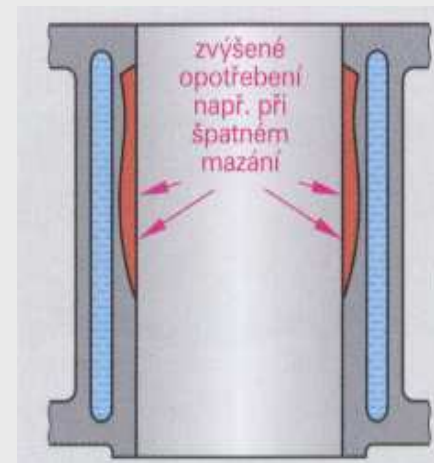
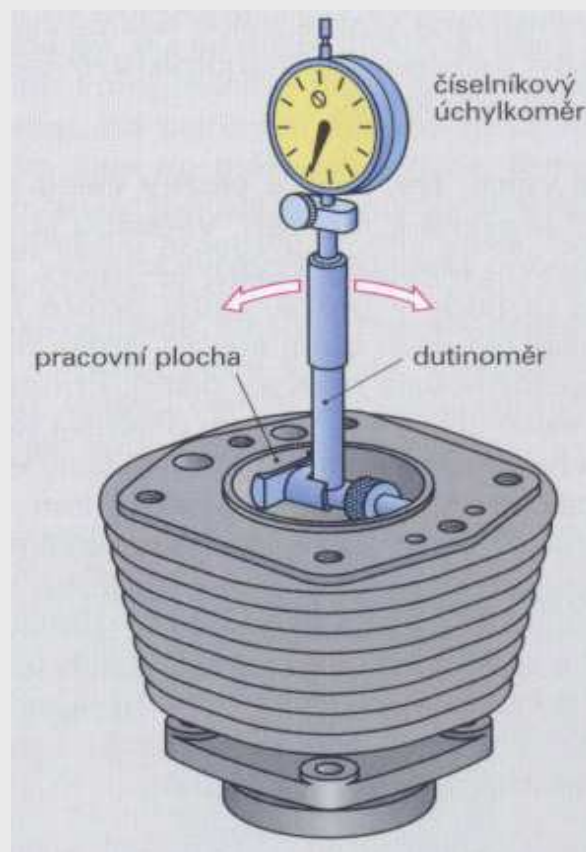
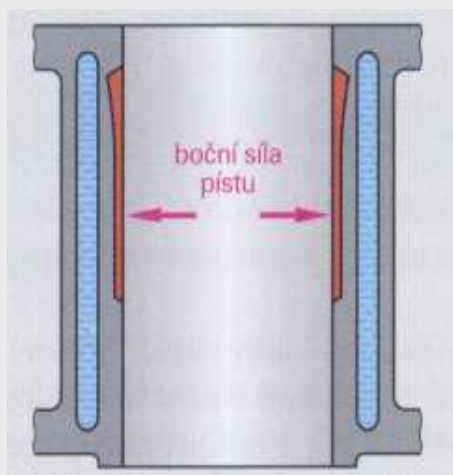




U dvoudobého motoru je tento průběh obvykle normální – příčinou je vstup směsi se znečištěným vzduchem kanálovým rozvodem.



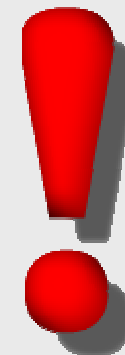
Měření opotřebení válce spalovacího motoru



3. Měření rozměrů strojních součástí dílenskými měřidly

*Autorem materiálu je Ing. Petra Burešová.
Dostupné z Metodického portálu www.rvp.cz; ISSN 1802-4785.
Provozuje Národní ústav pro vzdělávání, školské poradenské
zařízení a zařízení pro další vzdělávání pedagogických
pracovníků (NÚV).
Upravil: Doc. Ing. Zdeněk Kopecký CSc.*

- ✓ Ve strojírenství jsou rozměry udávány v **mm**, (v anglicky mluvených zemích v palcích (**$1'' = 25,4 \text{ mm}$**))



Druhy měření:

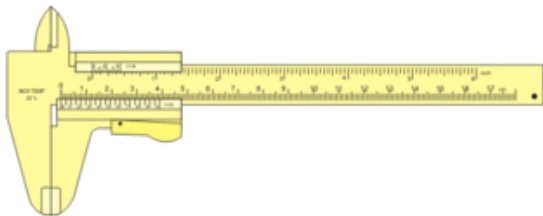
- 1) **Přímé** – přímo z měřidla odečteme naměřené hodnoty (např. ocelové měřítko, mikrometr, posuvné měřítko, ...)
- 2) **Nepřímé** – zjišťujeme zda součást leží v mezní hodnotě (např. kalibry, číselníkové úchylkoměry)



Druhy měřidel

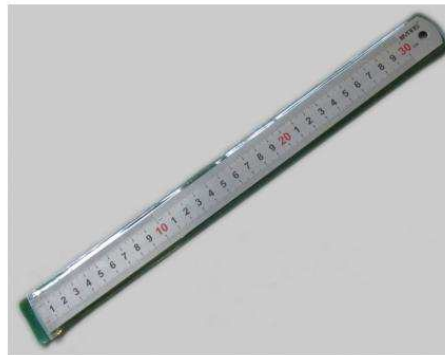
Nastavitelná měřidla

ke zjištění naměřené hodnoty délky pomocí nastavitelné stupnice (posuvné měřidlo (přesnost 0,1 mm), mikrometr přesnost 0,01 mm)



Pevná měřidla

Ocelové pravítko
pevná rozteč rysek
(přesnost 0,5 mm)



Šablony a kalibry

pro měření
porovnáváním



Hmatadla (k přenášení rozměrů z obrobku na měřidlo)



Obkročné hmatadlo



Dutinové hmatadlo

Druhy posuvných měřítek

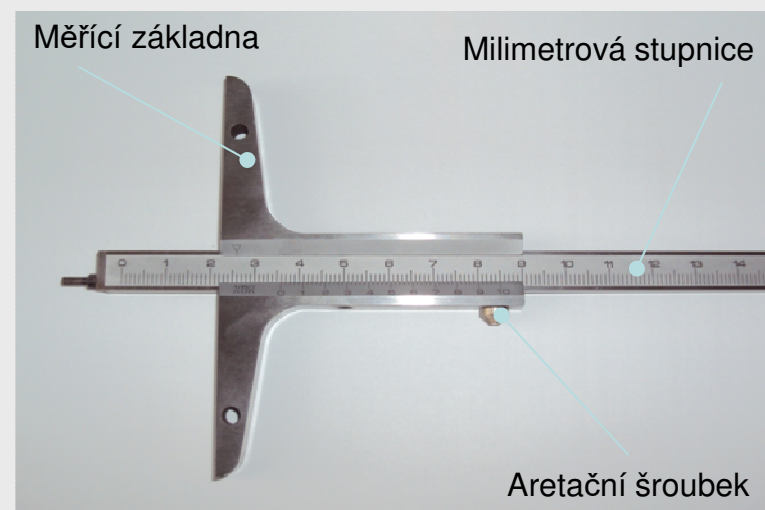
a) Mechanické posuvné měřítko univerzální



b) Digitální posuvné měřítko



c) Hloubkoměr - posuvné měřítko pro měření hloubek



Univerzální posuvkou můžeme měřit:

✓ Vnější rozměry



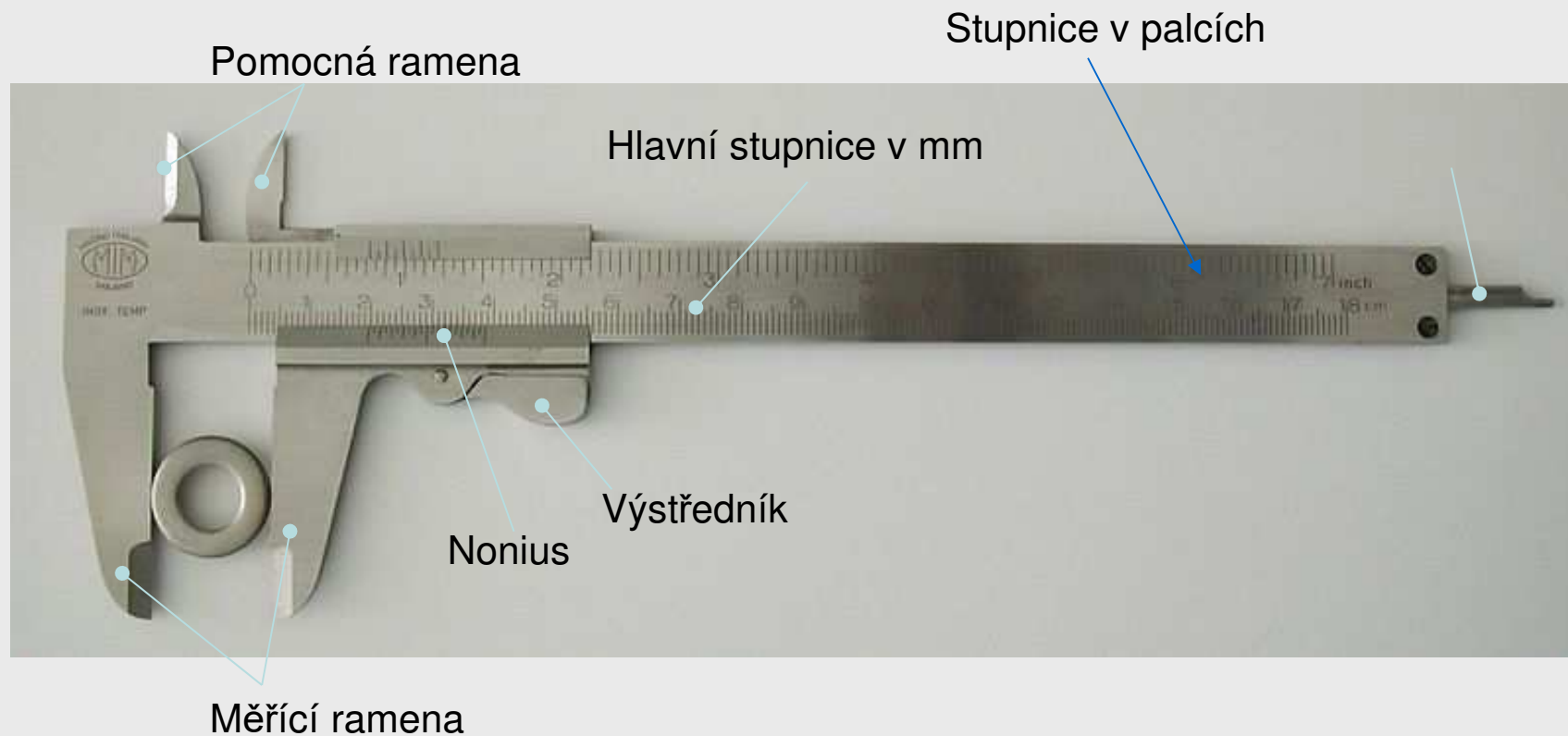
✓ Vnitřní rozměry



✓ Hloubky

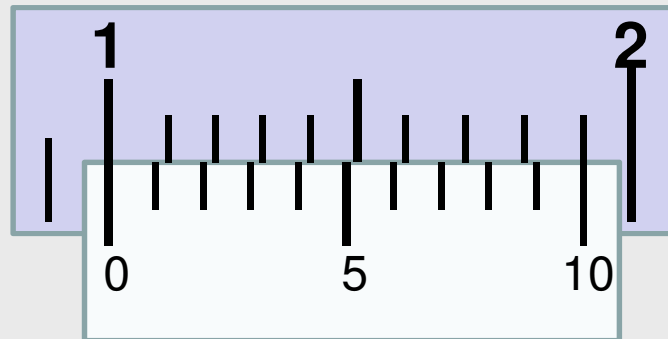


Základní části posuvného měřítka:



Přesnost posuvného měřítka:

- ✓ Desetinový nonius: 9 mm hlavní stupnice je rozděleno na 10 dílků nonia ND (noniusová difference) = $1/10 = 0,1$ mm



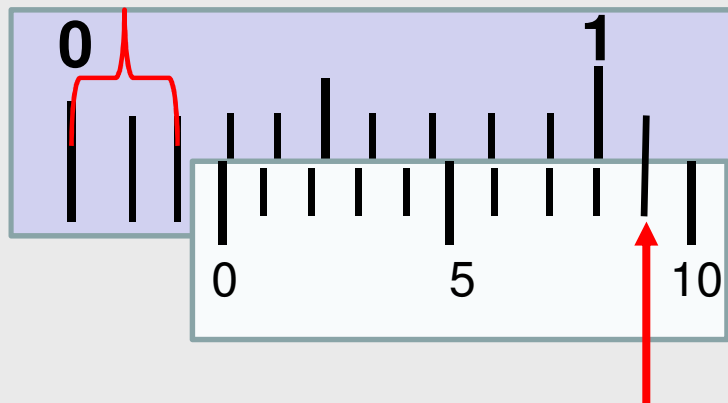
- ✓ Dvacetinový nonius: 19 mm hlavní stupnice je rozděleno na 20 dílků nonia ND = $1/20 = 0,05$ mm – jeden dílek nonia měří 0,95 mm (u některých měřítek je nonius prodloužen na 39 mm, přičemž jeden dílek nonia měří 1,95mm)
- ✓ Padesátinový nonius: 49 mm hlavní stupnice je rozděleno na 50 dílků nonia ND = $1/50 = 0,02$ mm

Základní pravidla pro měření s posuvným měřítkem:

- ✓ Kontrola posuvného měřítka – obě měřící ramena musí v nulové poloze vzájemně doléhat bez průsvitu.
- ✓ Kontrola přesnosti pomocí základních dílenských měrek.
- ✓ Při měření se nastavená poloha zajistí stavěcím šroubem nebo spuštěním páky výstředníku.
- ✓ Měření je nutné provádět s citem.
- ✓ Po měření se posuvné měřítko očistí a nakonzervuje.

Čtení rozměru s měřítkem o přesnosti 0,1 mm

První krok

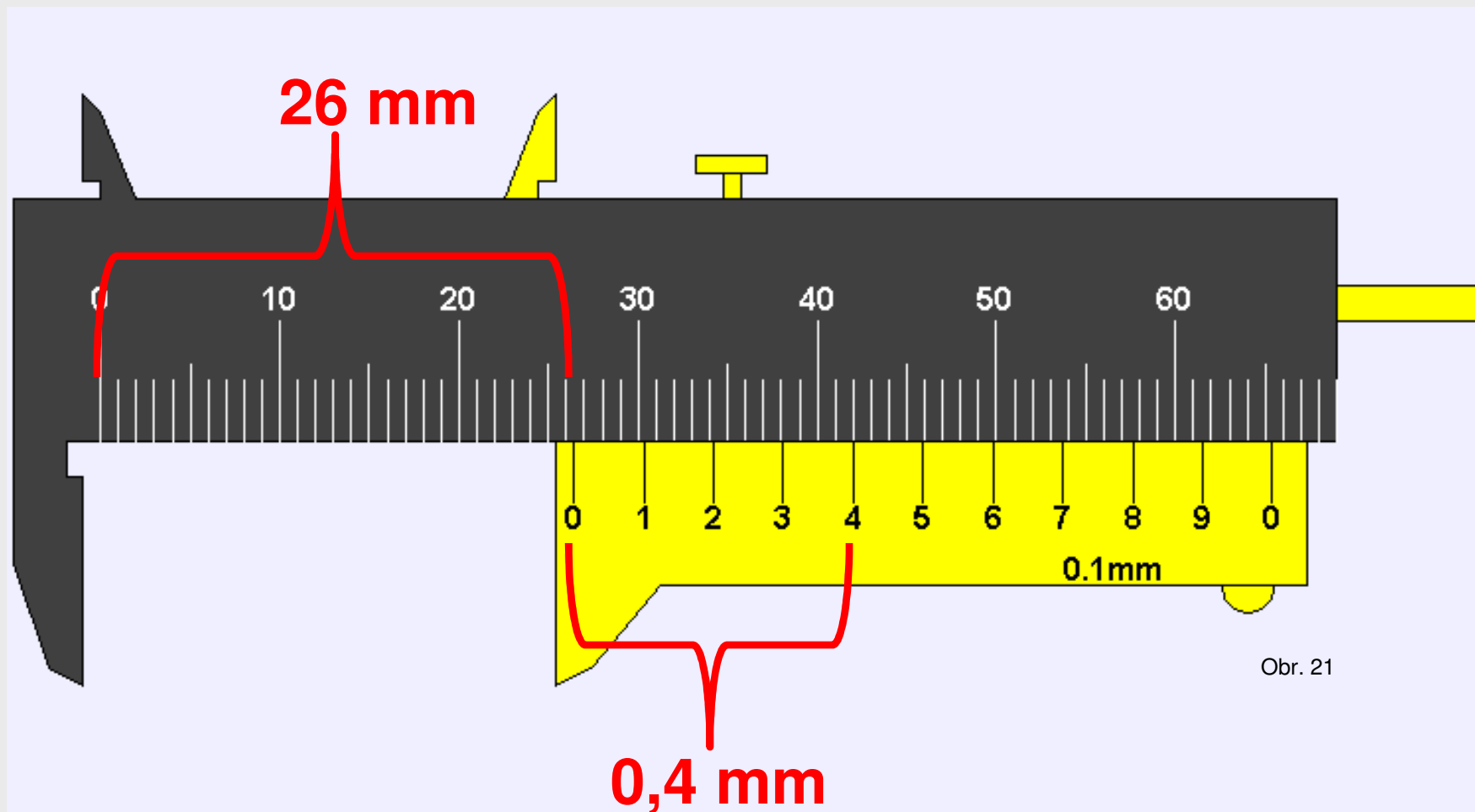


Druhý krok

- ✓ Na hlavní (mm) stupnici odečteme k „0“ nonia celé milimetry. Na obrázku jsou dva dílky, tedy = 2 mm.
- ✓ Na stupnici nonia zjišťujeme, která ryska se kryje s ryskou hlavní (mm) stupnice. V našem případě se kryje devátý dílek, tedy k rozměru 2mm přičteme 0,9 mm. Jak bylo řečeno dříve, každý dílek nonia je kratší o 0,1 mm, takže v součtu 9-ti dílků se jedná o rozměr 0,9 mm na hlavní stupnici.

Zápis naměřené hodnoty = 2,9 mm

Přečtěte hodnotu:



Zápis naměřené hodnoty = 26,4 mm

Čtení naměřených hodnot s přesností 0,05 mm



Čtení naměřených hodnot s odhadem 0,02 mm

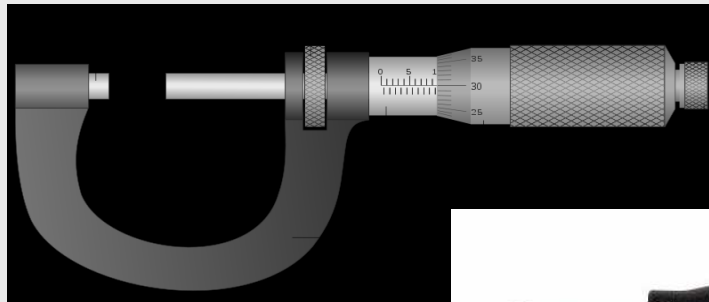


Zápis naměřené hodnoty = 19,36 mm

Mikrometry

Druhy:

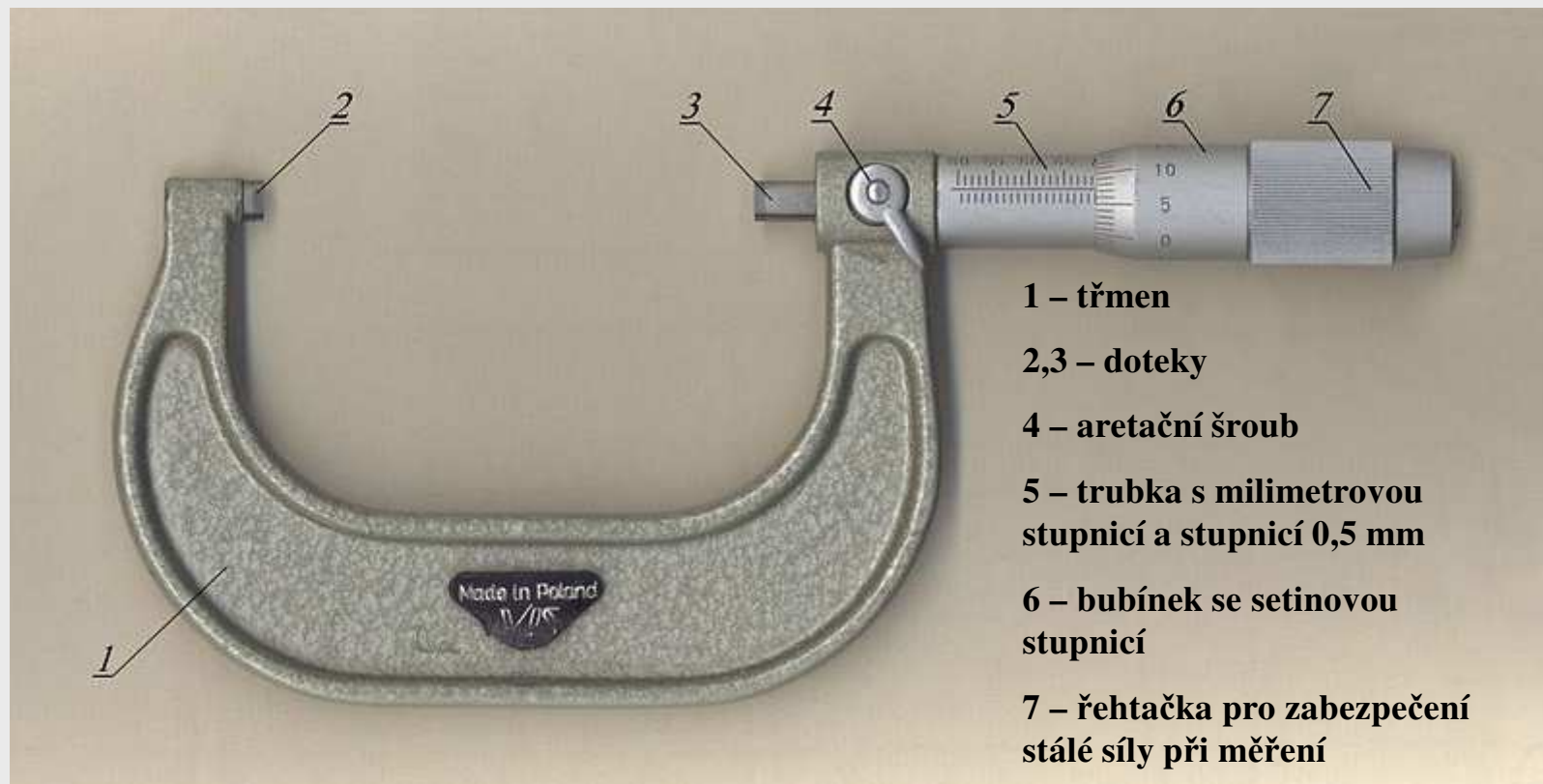
1. Třmenový mikrometr
2. Mikrometrický hloubkoměr
3. Mikrometrický odpich



Třmenový mikrometr

Základní části

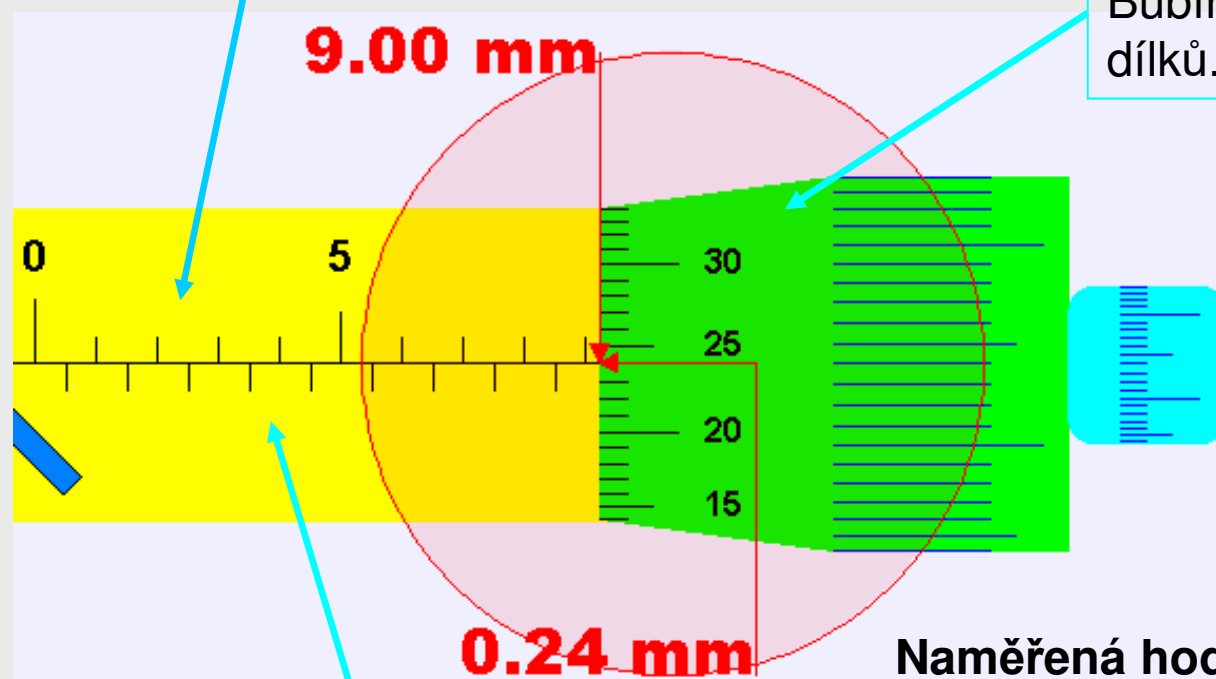
- ✓ Přesnost měřidla 0,01 mm.
- ✓ Mikrometrický šroub má stoupání 0,5 mm.
- ✓ Rozsah měřidel 0–25 mm, 25–50 mm, 50–75 mm, 75–100 mm, 100–125 mm, ...



Měření třmenovým mikrometrem s přesností 0,01 mm

Horní stupnice – odečítáme celé milimetry

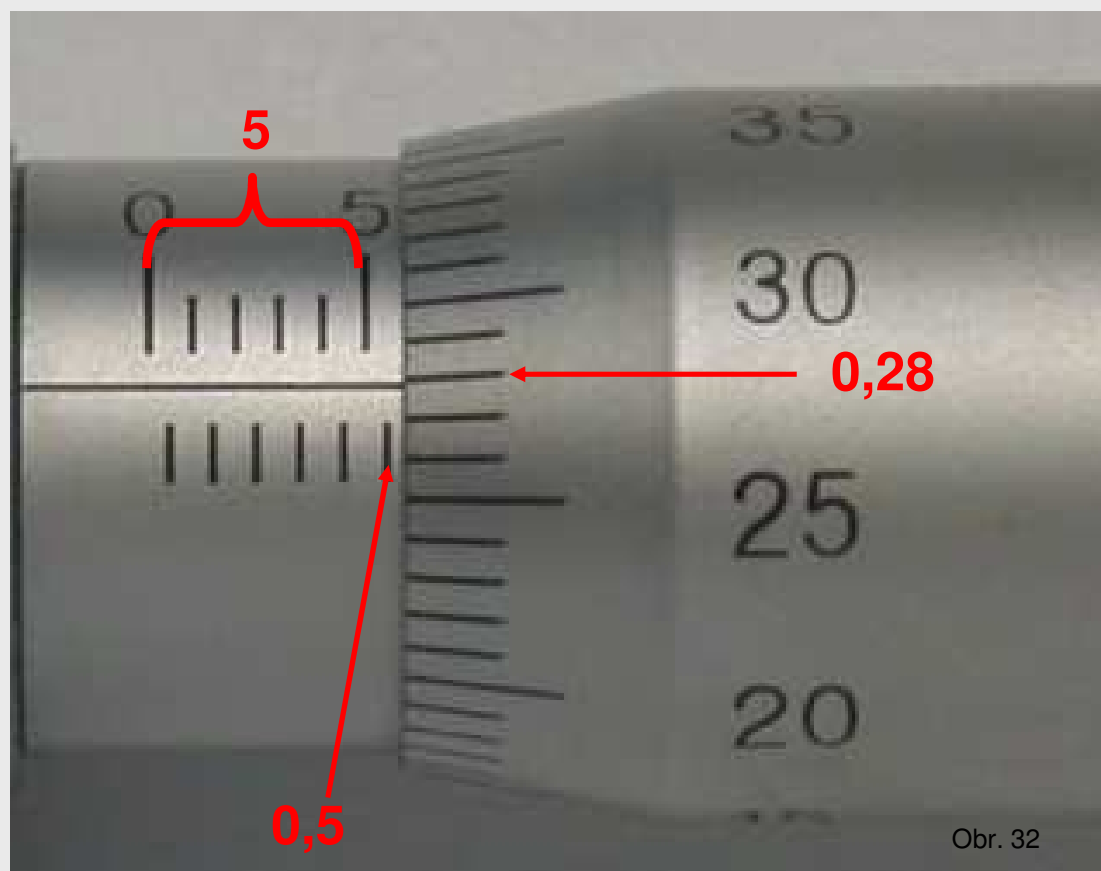
Otočná stupnice – odečítáme setiny milimetry. Bubínek je rozdělen na 50 dílků.



Naměřená hodnota: $9 + 0,24 = 9,24 \text{ mm}$

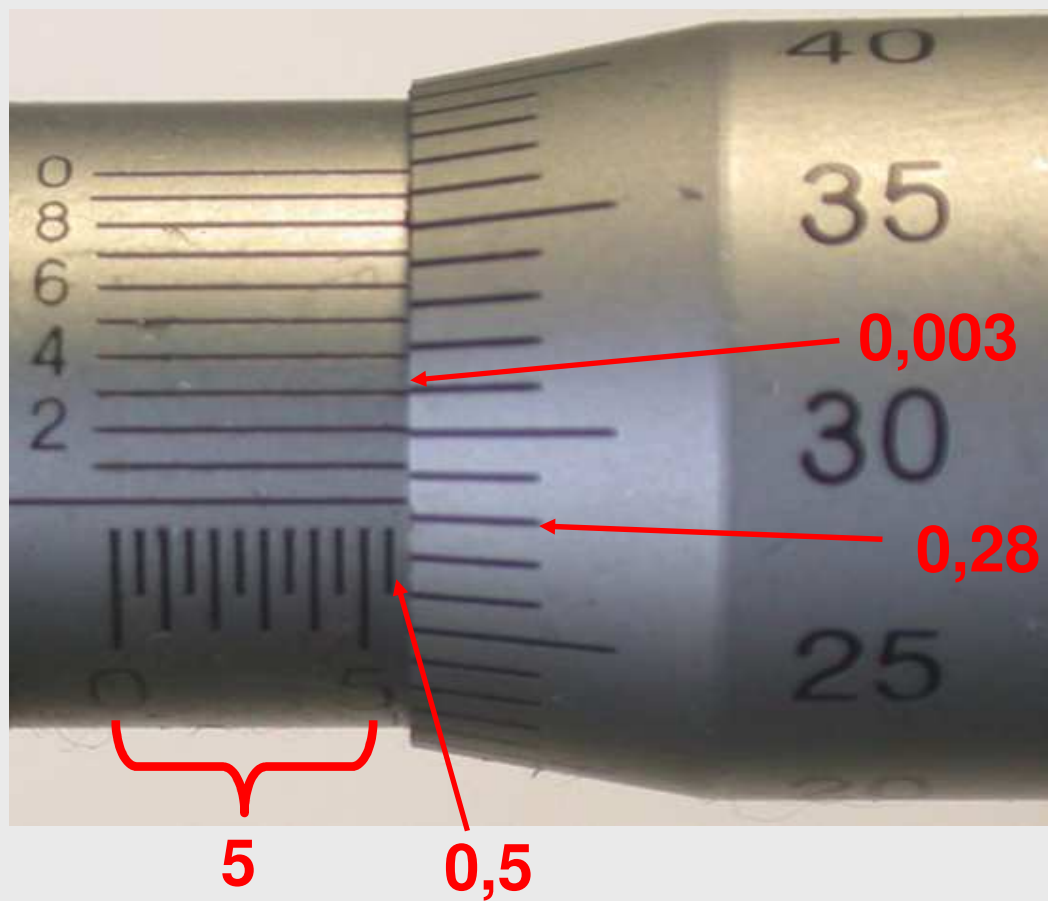
Dolní stupnice – odečítáme polovinu milimetru. Každý dílek stupnice odpovídá 0,5 mm

Přečtěte hodnotu:



Zápis naměřené hodnoty = 5,78 mm

Měření třmenovým mikrometrem s odhadem 0,001 mm



Naměřená hodnota: $5 + 0,5 + 0,28 + 0,003 = 5,783 \text{ mm}$

Děkuji za pozornost

