



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



Ústav konstruování a částí strojů

Návrh zařízení pro testování opotřebitelnosti materiálu

Design of Device for Wear Testing of Materials

Diplomová práce

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí práce: Ing. Pavel Malý

Bc. Milan Janoušek

Praha 2015

Vysoká škola: **České vysoké učení technické v Praze**
Fakulta: **strojní**
Ústav: **12113, Ústav konstruování a částí strojů**
Akademický rok: **2014/2015**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Milan Janoušek**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

Název práce: **Návrh zařízení pro testování
opotřebitelnosti materiálu**

Název práce anglicky: **Design of Device for Wear Testing of Materials**

Zadání práce:

Hlavním cílem práce je analyzovat problematiku opotřebitelnosti konstrukčních materiálů a zkoušení abrazivního opotřebení. Na základě této analýzy bude proveden návrh zařízení a metodiky pro zkoušení vzorků v abrazivním prostředí s možností testování za zvýšené teploty.



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh zařízení pro testování opotřebitelnosti materiálu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Malého s použitím literatury, uvedené na konci diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

Podpis:

Anotační list

Jméno autora: **Milan Janoušek**
Název DP: Návrh zařízení pro testování opotřebitelnosti materiálu
Anglický název: Design of Device for Wear Testing of Materials

Rok: 2015
Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Obor studia: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav: *Ústav konstruování a částí strojů*
Vedoucí DP: *Ing. Pavel Malý*

Bibliografické údaje: počet stran 78
počet obrázků 56
počet tabulek 13
počet příloh 12

Klíčová slova: koroze, opotřebení, otěr, povrchové úpravy, provozní degradace, zkoušky otěruvzdornosti
Keywords: abrasion, abrasion resistance test methods, corrosion, operational degradation, surface finishing, wear

Anotace:

Cílem diplomové práce je analýza problematiky opotřebitelnosti konstrukčních materiálů a zařízení pro testování abrazivního opotřebení. Po provedení analýzy a diskuzi se zadavatelem byl proveden návrh zařízení dle specifikovaných požadavků.

Abstract:

The aim of this diploma thesis is to analyze the issue of wear of construction materials and test methods for determination of abrasion response of materials. After the analysis and the discussion with the project owner the design of the test device according to specified requirements was made.

Poděkování

Za cenné rady a připomínky při vypracování této práce děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Malému. Zároveň bych velice rád poděkoval své rodině za veškerou podporu.

Obsah

1 ÚVOD.....	8
1.1 Cíl práce	8
2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY V OBLASTI OPOTŘEBENÍ.....	10
2.1 Tření	10
2.2 Styk reálných těles.....	10
2.3 Rozdělení opotřebení	11
2.3.1 Adhezivní opotřebení.....	12
2.3.2 Abrazivní opotřebení.....	12
2.3.3 Erozivní opotřebení.....	13
2.3.4 Kavitační opotřebení.....	13
2.3.5 Únavové opotřebení	14
2.3.6 Vibrační opotřebení	14
2.4 Analýza opotřebení strojních součástí.....	14
2.5 Způsoby zvyšování životnosti strojních součástí.....	15
2.6 Třecí mezivrstva	15
2.7 Styk povrchů součástí v podmínkách tření.....	16
2.8 Tvrdost povrchu	16
3 OPOTŘEBENÍ.....	17
3.1 Časový průběh opotřebení	17
3.2 Hodnocení opotřebení	17
3.3 Abrazivní opotřebení.....	18
3.3.1 Základní teorie abrazivního opotřebení	18
3.3.2 Tvar abrazivních částic	19
3.3.3 Pevnost abrazivních částic	20
3.3.4 Vliv kluzné rychlosti na abrazivní opotřebení.....	20
3.3.5 Vliv tvrdosti abraziva na opotřebení.....	20
3.3.6 Vliv vlhkosti na abrazivní opotřebení	21
4 ZKOUŠKY ABRAZIVNÍHO OPOTŘEBENÍ.....	22
4.1 Zkouška opotřebení na brusném plátně	22
4.2 Zkouška opotřebení v Bondově bubnovém přístroji	23
4.3 Zkouška opotřebení v brusné nádobě	23
4.4 Zkouška opotřebení s pryžovým kotoučem dle ASTM G65	24
4.5 Zkouška opotřebení s pryžovým kotoučem dle ASTM G105	26
4.6 Zkouška opotřebení dle ASTM G75	27
5 OTĚRUVDORNÉ POVRCHOVÉ ÚPRAVY.....	28
5.1 Povrchové kalení	28
5.2 Chemicko-tepelné procesy	28
5.2.1 Cementace	28
5.2.2 Nitridace	29
5.2.3 Bórování	29
5.2.4 Další postupy chemicko-tepelného zpracování	29
5.3 Termické nástřiky.....	30

5.3.1 Nástřík plamenem.....	31
5.3.2 Detonační nástříky.....	31
5.3.3 HVOF metoda.....	31
5.3.4 Plazmatický nástřík.....	31
5.4 Otěruvzdorné návary.....	32
5.5 Povlaky vytvořené z plynné fáze.....	34
5.5.1 Metoda PVD.....	34
5.5.2 Metoda CVD.....	35
6 KOROZE.....	36
6.1 Chemická koroze.....	37
6.2 Elektrochemická koroze.....	37
6.3 Formy korozního napadení.....	38
6.4 Korozivzdornost.....	38
7 HYGIENICKÉ POŽADAVKY.....	40
8 NÁVRH ZAŘÍZENÍ.....	41
8.1 Popis typického provedení.....	41
8.2 Vlastní návrh.....	42
8.2.1 Klikový mechanismus obecně.....	42
8.2.2 Kinematika klikového ústrojí.....	42
8.2.3 Silové poměry v klikovém mechanismu.....	45
8.2.4 Výpočet klikového mechanismu a návrh pohonu.....	45
8.2.5 Popis vlastní konstrukce.....	52
9 OHŘEV.....	62
9.1 Způsob ohřevu.....	62
9.2. Výpočet doby ohřevu.....	63
9.3 Regulace teploty.....	66
9.4 Testování za zvýšené teploty.....	67
10 METODIKA TESTOVÁNÍ.....	68
10.1 Referenční materiál.....	68
10.2 Příprava vzorků.....	68
10.3 Příprava vaniček.....	69
10.4 Montáž vzorku.....	69
10.5 Finální kontrola upnutí vzorku.....	70
10.6 Příprava suspenze.....	70
10.7 Průběh testování.....	70
10.8 Zpracování naměřených hodnot.....	70
11 ZÁVĚR.....	72
ZDROJE.....	73
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75
SEZNAM TABULEK.....	77
SEZNAM PŘÍLOH.....	78

1 Úvod

Strojní součásti jsou během svého provozu často vystaveny superpozičnímu účinku napěťové, tepelné, chemické aj. expozice. Synergickým působením výše zmíněných provozních činitelů dochází k tzv. provozní degradaci. Při degradaci se mohou uplatnit rozdílné degradační mechanismy. Mezi nejčastější z nich patří zkřehnutí materiálu, únavové a creepové poškození, nadměrné opotřebení a koroze. Mnohdy však dochází ke kombinovanému působení několika mechanismů.

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 také problémy se třením a opotřebením.

Opotřebení se obvykle definuje jako nežádoucí trvalá změna povrchu (rozměrů), která je způsobena vzájemným působením funkčních povrchů nebo působením okolního media na funkční povrch součástí. 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 (v krajním případě i porušení).

Opotřebení, stejně jako koroze kovů, představuje v globálním měřítku obrovské hospodářské ztráty, což je příčinou soustavného studia této problematiky. Podstata opotřebení je velmi složitá. Ačkoliv k opotřebení dochází účinkem mechanických sil, nemůžeme opomenout i další činitele, které se na tomto ději výraznou měrou podílejí. Na pracovních površích probíhají různé fyzikální a chemické pochody, jejichž intenzita závisí na pracovních podmínkách a na vlastnostech povrchu.

V konstrukci a provozu strojů je třeba uplatňovat tribologické zákonitosti, aby byly sníženy energetické ztráty, otěr a provozní náklady při užívání výrobků. 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.

1.1 Cíl práce

Diplomová práce je určena divizi technologických dodávek na zpracování olejnatých semen a olejů firmy Farnet a.s. Cílem práce je vytvořit text, který

pracovníky seznámí se základními principy abrazivního opotřebení, se způsoby zvyšování odolnosti povrchu proti abrazivnímu opotřebení a s testovacími metodami.

Praktická část práce bude věnována návrhu testovacího zařízení pro stanovení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení dle požadavků specifikovaných zadavatelem. Výsledky zkoušek napomohou konstruktérům při volbě materiálu a vhodné otěruvzdorné povrchové úpravy pro pracovní orgány lisů a extrudérů.

2 Základní principy v oblasti opotřebení

Pro pochopení problematiky opotřebení je důležité se seznámit se základními pojmy a principy.

2.1 Tření

Tření lze definovat jako odpor proti pohybu, vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů, v tečném směru k nim. Vědecký popis tohoto jevu lze nalézt již u Leonarda da Vinciho. Koncem 17. století byl použit pro třecí sílu a normálovou přitlačnou sílu poměr, který se označuje jako součinitel tření. Později byla platnost tohoto vztahu doložena Coulombem, který provedl řadu experimentů.

$$\mu = \frac{F_t}{F} \quad (1)$$

Symbol μ je součinitel tření, F_t je třecí síla a F označuje normálovou sílu. V minulosti byla přijímána poučka, že třecí síla nezávisí na velikosti styčné plochy těles, což platí pouze pro ideální tělesa bez opotřebení a deformací [1,2,3].

Pro klasifikaci tření je důležitý relativní pohyb funkčních povrchů těles. Dle relativního pohybu dělíme tření na [4]:

- *tření kluzné*
- *tření valivé*
- *tření vrtné*

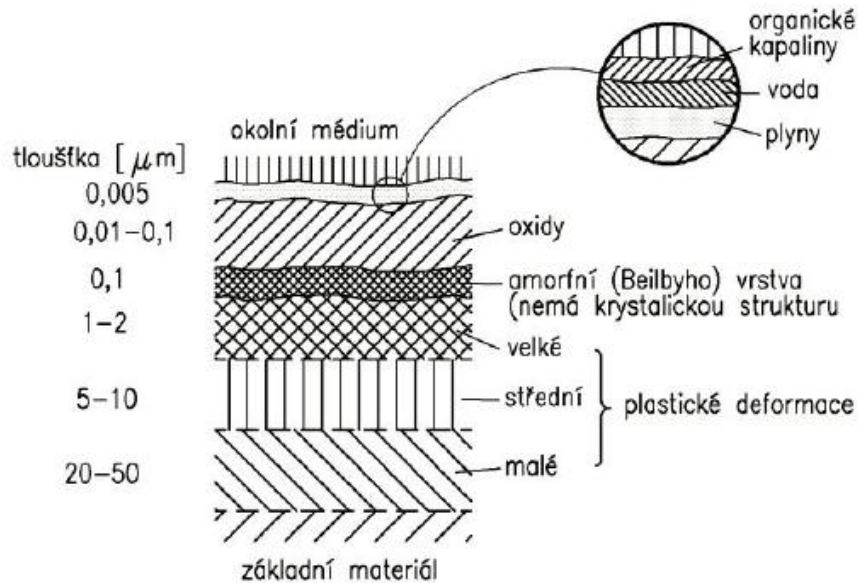
Podle toho, zda je mezi funkčními povrchy mazivo či jiná látka, nebo zdali se jedná o styk bez jakékoliv mezivrstvy, se tření rozděluje na [4]:

- *tření bez maziva*
- *tření s tuhým mazivem*
- *tření s kapalným nebo plastickým mazivem*
- *tření s mezivrstvou plynu*

2.2 Styk reálných těles

K prvnímu dotyku mezi dvěma součástmi, které se k sobě přibližují, dojde teoreticky ve třech bodech. Tyto body jsou nejvyšší výčnělky nerovných povrchů. V ostatních místech jsou od sebe povrchy odděleny. Měrný tlak ve výčnělcích je tak velký, že u nich dochází k pružné i plastické deformaci. Do kontaktu přicházejí další

místa a to tak dlouho, než vznikne dostatečně velká plocha s potřebnou únosností [3].



Obrázek 1 - Řez povrchovými vrstvami obrobené stykové plochy [4]

Jak je patrné z obrázku 1, v běžných provozních podmínkách nejsou stykové plochy těles dokonale čisté. V povrchové vrstvě tělesa jsou zpravidla obsaženy adsorbované plyny, vlhkost a v případě kovů i oxidy. Povrchové plochy jsou též zasaženy plastickou deformací a to v důsledku působení řezných sil při obrábění [4].

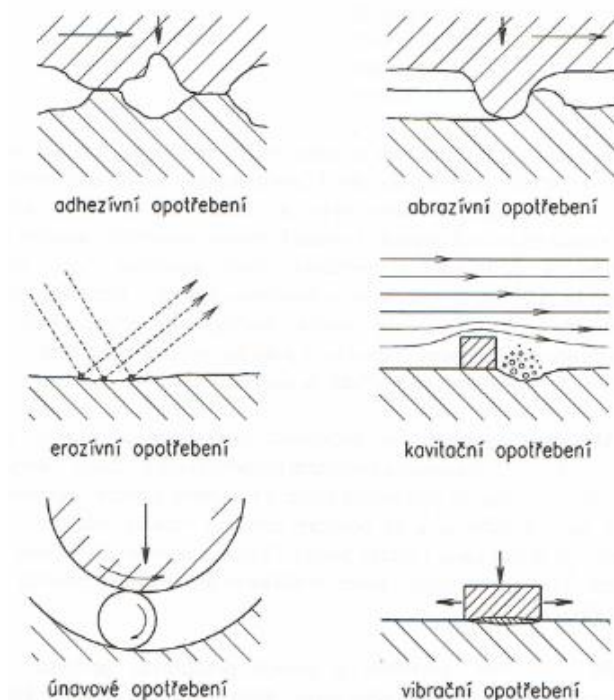
Při plastické deformaci povrchových nerovností (výčnělků) může dojít k porušení adsorpční a oxidické vrstvy, čímž dojde ke styku základního materiálu s materiálem druhého tělesa. Při relativním pohybu dochází vlivem vzájemného působení k jejich opotřebení [3].

2.3 Rozdělení opotřebení

Základní typy opotřebení se rozlišují podle toho, zda je opotřebení vyvoláno vzájemným působením dvou funkčních povrchů, anebo funkčního povrchu a media, a dále pak podle mechanismu opotřebení. Rozeznáváme tak [4]:

- adhezivní opotřebení
- abrazivní opotřebení
- erozivní opotřebení
- kavitační opotřebení
- únavové opotřebení
- vibrační opotřebení

V praxi se obvykle jednotlivé druhy opotřebení kombinují a vzniká tak řada variant [2].



Obrázek 2 - Schéma základních mechanismů opotřebení [4]

2.3.1 Adhezivní opotřebení

Charakteristickým rysem adhezivního opotřebení je přemísťování částic kovu mezi dvěma stykovými plochami. K oddělování nebo přemísťování částic dochází v těch místech dotyku funkčních povrchů, ve kterých došlo při relativním pohybu k porušení povrchových vrstev a ke kovovému styku obou materiálů. V místech s porušenou povrchovou vrstvou a čistým kovovým stykem dochází k tvorbě mikrosvarů, které se následně usmýknou. Na vznik adhezivního opotřebení mají vliv především faktory, jako jsou hloubka vniku a poloměr zakřivení mikronerovností, zatížení a rychlost relativního pohybu nebo schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje. Adhezivní opotřebení se může projevit mírnou nebo intenzivní formou, která se nazývá zadírání. Při zadírání vzrůstá velmi silně odpor proti pohybu, což může vést až k úplnému zablokování součástí, které měli vůči sobě konat relativní pohyb. Na adhezivní opotřebení má zásadní vliv přítomnost maziva mezi povrchy. Pokud je jeho tloušťka větší než součet největších výšek nerovností, proces opotřebení zaniká [3,4].

2.3.2 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 pracovní orgány zemědělských strojů pro zpracování půdy, zuby lopat rypadel nebo mlecí elementy mlýnů tvrdých surovin [2].

Tvrdé částice mohou narušovat povrch těmito způsoby [3]:

- *mikrořezáním*
- *rýhováním*
- *podpovrchovými trhlinkami*

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 opotřebovávaného 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 [2,4,5].

2.3.3 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je charakterizováno poškozováním funkčního povrchu částicemi dopadajícími na povrch tělesa, které jsou nesené proudem kapaliny nebo plynu (povrch může být poškozován i samotným proudem tekutiny). Intenzita erozivního opotřebení je ovlivněna několika faktory, které lze vztáhnout k působícímu mediu a částicím nebo k samotnému povrchu, jenž je opotřeben vystaven. Jedná se především o relativní rychlost, teplotu, chemické působení media, druh, velikost, tvar a tvrdost částic. Pro erozivní účinek je rozhodující kinetická energie částice a úhel dopadu. Pro erozivní opotřebení je typické nerovnoměrně rozložené porušení povrchu a často i velmi patrné zvlnění. Tento typ opotřebení se vyskytuje u průtočných částí hydraulických strojů, potrubí atd. [2,3,6].

2.3.4 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je způsobeno oddělováním částic z povrchu součásti jako následek zanikání bublin v kapalině. V místech proudění, kde tlak poklesne pod tlak nasycených par, vznikají kavitační dutinky, které jsou naplněny parami kapaliny. V oblasti vyššího tlaku se tyto dutinky zmenšují, až dojde k jejich úplnému zániku. Jejich zánik je doprovázen hydraulickými rázy, kterými je namáhán povrch součásti. Kromě tlakových účinků se na rozrušení materiálů mohou podílet například chemické

faktory. Intenzita kavitace je proměnlivá s časem. V první fázi dochází ke kumulaci poruch v povrchových vrstvách, aniž by docházelo k oddělování částic z povrchu. Projevem je pouze zmatnění povrchu. Po určitém období dochází ke vzniku povrchových a podpovrchových trhlinek a k vytrhávání částic z povrchu [3,4].

2.3.5 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení nastává při cyklickém kontaktním namáhání. Dochází při něm ke vzniku a šíření mikrotrhlin. Spojování a šíření mikrotrhlin způsobí uvolnění částic z povrchu. Tento jev se označuje též jako pitting nebo dolíčkovité opotřebení. Zmíněný způsob opotřebení se vyskytuje např. na valivých tělískách a drahách ložisek a na bocích ozubených kol. Únavové opotřebení, jako děj, který je vázán na povrchové vrstvy může iniciovat i únavové lomy, které následně mohou zasáhnout i celý průřez. Únavové poškození povrchu vede ke zhoršení funkce stroje, zvýšení vibrací a hlučnosti [2,3,4].

2.3.6 Vibrační opotřebení

K porušování funkčních povrchů dochází v tomto případě vlivem vzájemných kmitavých tečných posuvů při působení normálního zatížení. Amplitudy vibrací jsou velmi malé. Dosahují hodnot řádově v desetinách až desítkách μm . Díky takto malým relativním pohybům je ztíženo odstraňování vzniklých částic. Částice působí abrazivně a mohou zapříčinit porušení i velmi tvrdých povrchových vrstev. Opotřebením vzniklé částice připomínají svým vzhledem produkty koroze. Opotřebení se může vyskytovat u součástí s hybným uložením, ale i u zdánlivě nehybných uložení jako jsou například lisované spoje [2,3,7].

2.4 Analýza opotřebení strojních součástí

Zkoumání příčin opotřebení je velmi složité, protože je ovlivňováno řadou rozmanitých faktorů a vlivů. Je důležité, aby se již při první analýze určily dominantní faktory. Pokud se tyto faktory určí nesprávně, potýká se další práce s podstatnými komplikacemi. Zkoumaný případ musí být proto systematicky a komplexně hodnocen [3].

Při analýze by se dle publikace [3] měla věnovat pozornost následujícím faktorům:

- *vnější podmínky*
 - pracovní prostředí (teplota, vlhkost, chemické působení, prašnost)

- pracovní medium (rychlost proudění, obsah částic, jejich tvrdost, tvar, počet, hmotnost podmínky dopadu)
- dynamické zatížení funkčního povrchu
- *vnitřní podmínky*
 - vhodnost stroje k požadované funkci
 - vhodnost použitého materiálu
 - správnost volby výrobní technologie
 - výskyt vad, které narušují správnou funkci součástí
- *provozní podmínky*
 - porovnání skutečných podmínek s podmínkami předepsanými
 - soustavné nebo občasné překročení provozních podmínek
 - chyby obsluhy

2.5 Způsoby zvyšování životnosti strojních součástí

V literatuře svou pozornost autoři věnují především kluzným dvojicím, u kterých je možné zajistit snížení tření použitím vhodných maziv a různých režimů mazání. V menší míře se pak zmiňují o důležitosti geometrické přesnosti součástí, kvalitě obrobení, povrchové drsnosti a o negativním vlivu nečistot.

Pokud jsou vyčerpány konstrukční a provozní možnosti, kterými lze působit proti nepříznivým účinkům tření a opotřebením, musíme se zabývat volbou materiálu, který by při daných provozních podmínkách vedl k větší životnosti součástí. Volba není opět jednoduchou záležitostí. Existuje řada možností, mezi nimiž se musí konstruktér rozhodnout. Při záměně materiálu jiným vhodnějším typem je třeba brát v potaz jeho cenu, dostupnost a změny, které by si vyžádala změna výroby [3]. Otěruvzdorným povrchovým úpravám bude věnována samostatná kapitola.

2.6 Třecí mezivrstva

Stále častěji se vyskytují případy, kdy zajištění požadované funkce použitím maziv není žádoucí. Může se jednat o zařízení, kde je výskyt olejů nebo mazacích tuků nebezpečný (zpracování hořlavin), nebo nevhodný (např. potravinářství). Zárukou vyhovující funkce třecích uzlů je vytvoření tuhé vrstvy odlišného složení, která odděluje funkční povrchy [3].

Z fyzikálního hlediska rozeznáváme tření zcela čistých povrchů (k němu dochází pouze ve vysokém vakuu), technické suché tření, při němž se vyskytují

vrstvy vzniklé adsorpcí nebo chemickou reakcí, smíšené tření, které se vyznačuje přítomností maziva, jehož vrstva však není dostatečná k oddělení obou povrchů a nakonec tření s mezivrstvou. Mezivrstvou může být plyn, kapalina, ale i pevná látka. Předmětem našeho zájmu bude tuhá vrstva [3,4].

Studiem mezivrstvy se jako první zabýval ve své práci Beibly, po němž je nazývána pseudoamorfní vrstva kovů, která vzniká při jejich leštění. K její tvorbě dochází rozmělnováním částic kovu účinkem brusiva při současné oxidaci. Vytváření třecí mezivrstvy bylo studováno zejména u kovokeramických třecích materiálů. Ty jsou ve dvojici s různými litinami i ocelmi používány při tak náročných podmínkách tření, že teploty v povrchových vrstvách způsobují vznik kapalné mezivrstvy. Při vhodném složení obou členů třecí dvojice lze udržet dlouhodobě požadovanou výši součinitele tření a nízké hodnoty opotřebení [3].

2.7 Styk povrchů součástí v podmínkách tření

Z konstruktérského hlediska můžeme rozdělit případy styku na dva základní případy [3]:

- *dvojice s pravidelně se opakujícím nebo stálým stykem*
- *strojní součásti, jejichž povrch přichází do styku se stále novým povrchem druhého členu (druhým členem třecí dvojice může být například substrát nebo tekutina)*

2.8 Tvrdost povrchu

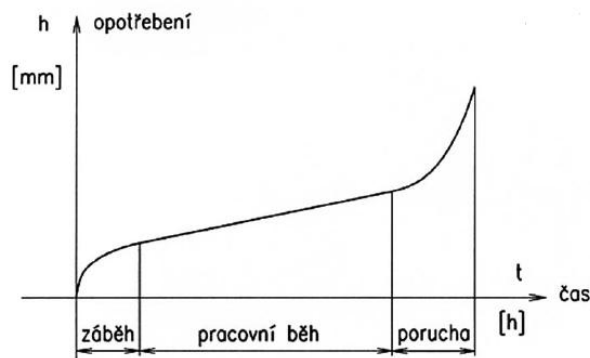
Tvrdost povrchu je jedna z mechanických vlastností, která má u kovových materiálů mimořádnou důležitost. To je způsobeno zejména tím, že ze všech materiálových vlastností ji lze zjistit nejrychleji, nejlevněji a to i na velmi malých předmětech. Z tvrdosti lze usuzovat dokonce na některé další materiálové vlastnosti. Rovněž z hlediska opotřebení má hodnota tvrdosti povrchu velký význam. Vztahy mezi tvrdostí, jakožto pomocného kritéria, a opotřebením ale nemají všeobecnou platnost. Nadměrná tvrdost je též obvykle spojena se sníženou houževnatostí materiálu a tedy s rizikem křehkého popraskání povrchu [5].

3 Opotřebení

V předešlé kapitole byl podán stručný přehled druhů opotřebení. Pro řešení problému se však neobejdeme bez hlubšího poznání.

3.1 Časový průběh opotřebení

Jelikož je opotřebení velmi složitý proces ovlivněný mnoha faktory, je nutné při analýze tohoto děje k němu přistupovat jako k ději náhodnému, který je nutné hodnotit statistickými metodami. Cílem je vytvoření modelu opotřebení, pomocí nějž by bylo možné hodnotit dosažené výsledky a predikovat opotřebení součástí. Zjednodušených modelů existuje celá řada [3].



Obrázek 3 - Časový průběh opotřebení [4]

3.2 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 [2,3].

Tabulka 1 - Veličiny používané pro hodnocení opotřebení

Otěr	Označení	Jednotka	Rychlost opotřebení	Otěr na jednotku dráhy L
délkový	W_l	μm	$w_l = W_l/t$	W_l/x
hmotnostní	W_h	mg	$w_h = W_h/t$	W_h/x
objemový	W_o	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 , nebo absolvování dráhy x . Kromě výše uvedených přímo měřených veličin se k hodnocení opotřebení užívá i poměrná odolnost proti opotřebení Ψ [1,2].

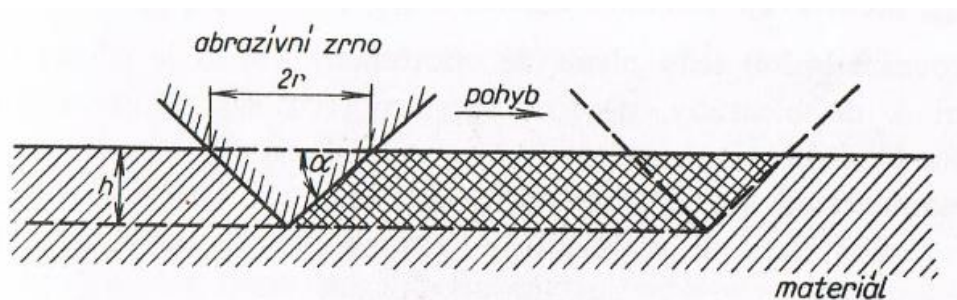
$$\Psi_i = \frac{W_i \text{ etalonu}}{W_i \text{ vzorku}}, \quad i = l, h, o \quad (2)$$

3.3 Abrazivní opotřebení

V následujícím textu se budeme zabývat výhradně abrazivním opotřebením, protože právě tento druh opotřebení je v případě extrudérů krmiv a lisů olejnatých semen dominantní.

3.3.1 Základní teorie abrazivního opotřebení

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



Obrázek 4 - Zjednodušený model rýhování povrchu materiálu abrazivním zrnem [3]

K tomu aby kužel vnikl svým vrcholem do hloubky h , je zapotřebí vyvinout určitou sílu, která je dána vztahem [3]:

$$\Delta F = \rho_m \cdot \pi \cdot r^2 \quad (3)$$

kde ρ_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 elementárního objemu dV .

$$dV = r \cdot h \cdot dx = r \cdot r \cdot \tan \alpha \cdot dx = r^2 \cdot \tan \alpha \cdot dx = \frac{\Delta F \cdot \tan \alpha \cdot dx}{\pi \cdot \rho_m} \quad (4)$$

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

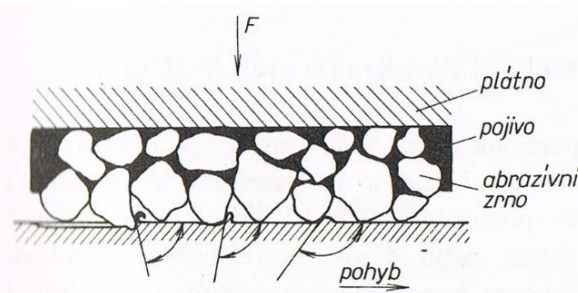
$$V = \frac{F \cdot \overline{\tan \alpha} \cdot x}{\pi \cdot \rho_m} \quad (5)$$

$\overline{\tan \alpha}$ 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:

$$V = K_{abr} \frac{F \cdot x}{\pi \cdot \rho_m} \quad (6)$$

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 [3].

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 $\frac{h}{R}$, kde 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 [3].



Obrázek 5 - Oddělování částic z povrchu opotřebované součásti [3]

Velmi důležitou roli hraje při poškození součásti úhel, který svírá hrana částice s povrchem součásti. Dle úhlu natočení zrna, bude zrna 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 [3].

3.3.2 Tvar abrazivních částic

Z hlediska abrazivních účinků lze zrna charakterizovat [3]:

- množstvím hran nebo výstupků (makrogeometrie)
- hladkostí povrchu hran nebo výstupků (mikrogeometrie)
- poloměrem výstupků

Hodnocení a měření částic je velmi obtížné. Částice se navíc vyznačují mnohotvárností vlastností i chemického složení. Z těchto důvodů různí autoři přiřkládají jednotlivým faktorům různou vážnost [3].

3.3.3 Pevnost abrazivních částic

Vlivem vzájemného pohybu, při kterém dochází k porušování materiálů, dochází současně i k otupování hran abrazivních zrn. Bylo prokázáno, že při malém silovém působení se průměrná velikost zrn příliš nemění, ale mění se jejich mikrogeometrie, čímž dojde ke snížení abrazivního účinku. Při větším silovém působení dochází obvykle k fragmentaci zrn, která kompenzuje větší otupování a tak se pokles abrazivity příliš neliší od případu s malým silovým působením [3].

3.3.4 Vliv kluzné rychlosti na abrazivní opotřebení

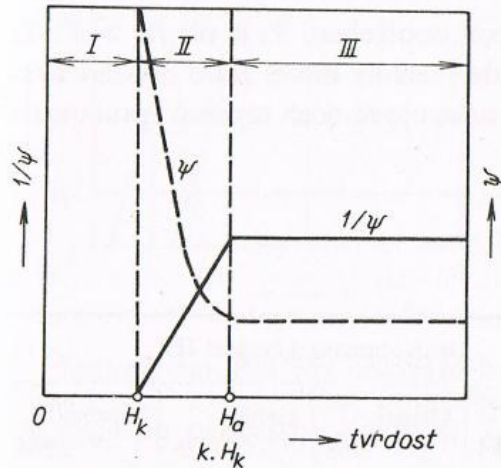
Na základě měření několika autorů se prokázalo, že se zvětšující se kluznou rychlostí abrazivní opotřebení mírně stoupá. V řadě aplikací je tento vliv málo významný. Stroje na zpracování nerostných surovin, zemin atd. obvykle pracují s nízkými kluznými rychlostmi [3].

Při větších kluzných rychlostech však dochází k nárůstu teploty, což se projevuje změnami vlastností povrchové vrstvy. Růst teploty se projeví především snížením tvrdosti povrchové vrstvy, čímž dochází i ke snižování její odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Z těchto důvodů je vhodné užívat při velkých kluzných rychlostech nebo zvýšených teplotách oceli s velkou odolností proti popouštěcím teplotám [3].

3.3.5 Vliv tvrdosti abraziva na opotřebení

Abrazivní opotřebení je velmi složitý děj a to i v případě působení dvou materiálů se známými vlastnostmi.

Pro vzájemné porovnání různých materiálů byla zavedena tzv. poměrná odolnost proti opotřebení ψ . Ta závisí především na poměru tvrdosti abrazivních částic a tvrdosti funkčního opotřebovávaného materiálu. Převrácená hodnota $\frac{1}{\psi}$ představuje poměrné opotřebení vzorku vzhledem k etalonu [3].



Obrázek 6 - Závislost poměrného opotřebení a poměrné odolnosti proti opotřebení zkoušeného kovu na tvrdosti abraziva [3]

Na obrázku 6 vidíme, že pokud je tvrdost abraziva H_a menší než tvrdost materiálu H_k , nedochází ve větší míře k opotřebení. V oblasti III, kde je tvrdost abrazivních částic značně větší, než tvrdost materiálu je opotřebení téměř konstantní a nezáleží na poměru tvrdostí abraziva a materiálu opotřebované součásti. V přechodové části II dochází k růstu opotřebení z minimální hodnoty do hodnoty maximální, které se dosáhne při

$$H_a = k \cdot H_k, k \in \langle 1,3;2 \rangle \quad (7)$$

3.3.6 Vliv vlhkosti na abrazivní opotřebení

Vliv vlhkosti není zcela jednoznačný. V některých případech lze pozorovat snížení intenzity opotřebení, jindy však může dojít k výraznému nárůstu opotřebení a to vlivem korozních účinků. Rabinowitz vyzpozoval, že rychlost otěru roste s rostoucím podílem vodní páry ve vzduchu. Vliv atmosférické vlhkosti se projeví především tehdy, dojde-li ke kondenzaci vodních par na povrchu abrazivních zrn [3].

4 Zkoušky abrazivního opotřebení

Pro zjištění odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení se užívá zkoušek laboratorních nebo provozních. Experimentální zařízení můžeme rozdělit na [3]:

- *přístroje s vázanými částicemi*
- *přístroje s volnými částicemi*
- *přístroje s volnými částicemi mezi dvěma stykovými povrchy*

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 opotřebení zkušební vzorku. Mezi tento typ zkoušek lze zařadit zkoušku na brusném plátně či pásu [8].

4.1 Zkouška opotřebení na brusném plátně

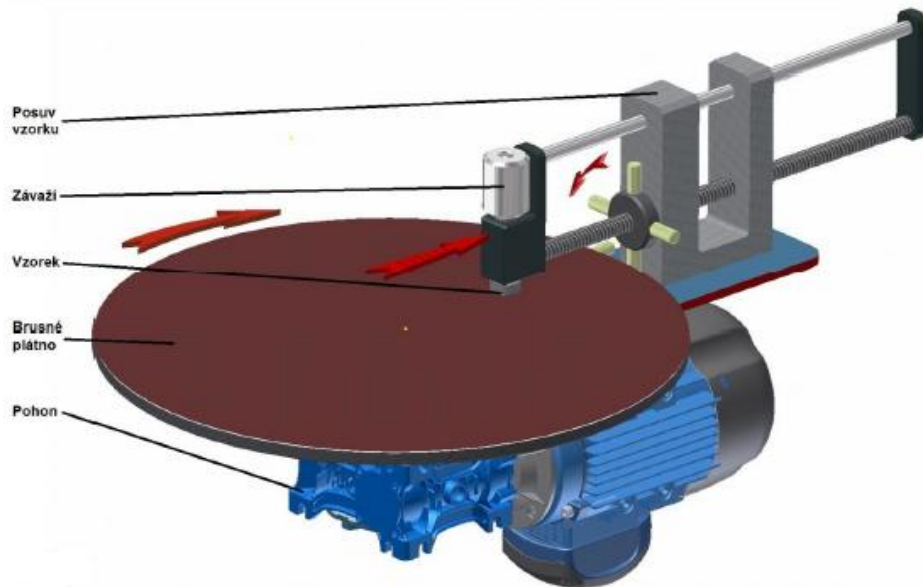
Jedná se o zkoušku, která je popsána v normě ČSN 01 5084. Účelem zkoušky je stanovení poměrné odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení. Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení je základním kriteriem pro hodnocení materiálů v laboratorních podmínkách.

Zkušební stroj je tvořen rotující vodorovnou deskou, na kterou se upevňuje brusné plátno. Zkušební vzorek je držen upínací hlavicí a je přitlačován pomocí závaží k brusnému plátnu. Přístroj sestává dále ze zařízení, které umožňuje radiální posuv zkušební tělesa a koncového vypínače. Radiální posuv zajišťuje, aby vzorek částí svého povrchu přicházel neustále do styku s nepoužitým brusným plátnem.

Etalonem při zkoušce na brusném plátně je ocel 12014.20 s vymezeným rozmezím tvrdosti HV = 95 až 105. Jako brusného plátna se užívá korundového kepru. Technická data přístroje jsou uvedena v následující tabulce [9].

Tabulka 2 - Technická data přístroje [9]

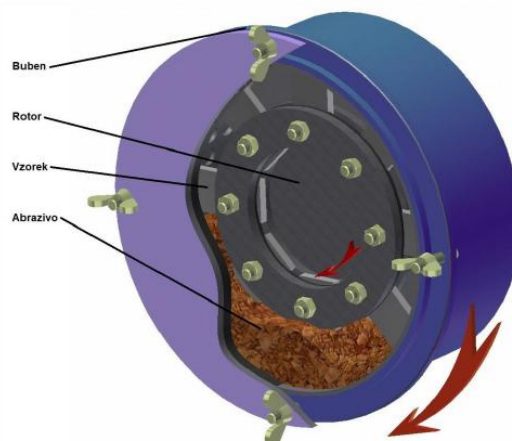
Délka třecí dráhy	50 m
Průměr otáčející se desky	480 mm
Maximální kluzná rychlost zkušební tělesa	0,5 m/s
Rozsah měrných tlaků pro zkušební těleso o Ø 10 mm	0,02 až 0,50 N/mm ²
Rozsah měrných tlaků pro zkušební těleso o Ø 6 mm	0,06 až 1,50 N/mm ²
Radiální posuv zkušební tělesa	3 mm/ot



Obrázek 7 - Zkouška opotřebení na brusném plátně [8]

4.2 Zkouška opotřebení v Bondově bubnovém přístroji

K otáčejícímu se rotoru je upevněno několik vzorků. Ve stejném směru se s nižší frekvencí otáčí i buben, který je z části naplněn abrazivem. Relativním pohybem vzorků v abrazivu dochází k opotřebení. Po stanovených intervalech jsou vzorky z přístroje demontovány a měřením se stanoví hmotnostní úbytek. Výhodou zkoušek v bubnovém přístroji je možnost použití různých druhů abraziva (půda, písek, kamenná drť atd.) [8]. Výsledky zkoušek prováděných v bubnovém přístroji nacházejí uplatnění především při hodnocení odolnosti materiálů proti opotřebení v podmínkách mletí [3].

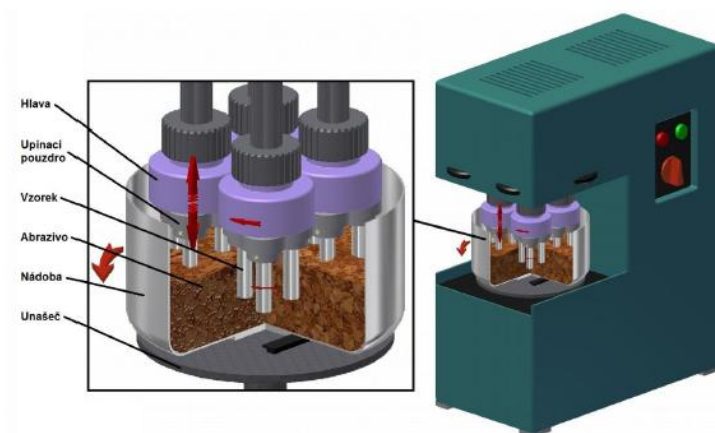


Obrázek 8 - Zkouška opotřebení v Bondově přístroji [8]

4.3 Zkouška opotřebení v brusné nádobě

Vzorky válcového tvaru jsou upnuty v upínacích pouzdrech. Pouzdra jsou součástí rotační hlavy, která koná s rotujícími vzorky ve stejném smyslu další rotaci.

Proti směru rotace hlav a vzorků rotuje nádoba naplněná abrazivem. Stejně jako v případě Bondova přístroje lze toto zařízení použít jak pro zkoušení materiálů vzorků, tak i pro testování abrazivních materiálů. Pro tuto zkoušku je charakteristická velmi malá intenzita opotřebení. Zkouška je proto vhodná pro testování vrstev povlaků a nekovových materiálů [8].



Obrázek 9 - Zkouška opotřebení v brusné nádobě [8]

4.4 Zkouška opotřebení s pryžovým kotoučem dle ASTM G65

Při zkoušce je mezi povrch rotujícího kotouče a vzorku přiváděn suchý písek. Vzorek je ke kotouči přitlačován pomocí páky, na které je zavěšeno závaží. Směr otáčení pryžového kola je takový, že kontaktní plochy se pohybují ve směru toku abraziva. Osa čepu, na kterém je otočně uložena páka, leží v rovině, která je přibližně tangenciální ke gumovému povrchu kotouče a normální k horizontálnímu průměru na kterém je pak aplikována přitlačná síla [10]. Tímto způsobem se modelují podmínky, které jsou blízké provozu zařízení, která pracují v zemině [3].



Obrázek 10 - Testovací zařízení dle ASTM G65 [11]

V normě jsou popsány 4 postupy A-D, které jsou vhodné pro specifické stupně odolnosti proti opotřebení nebo tloušťky testovaného materiálu.

- *Postup A představuje relativně náročný test, který je vhodný především pro materiály, které vykazují střední nebo vysokou odolnost proti opotřebení.*
- *Postup B je krátkodobou variantou postupu A, která je zejména užitečná pro hodnocení materiálů s nízkou a střední abrazivní odolností (je možné ji však využít i pro materiály s vyšší odolností proti opotřebení). Tento postup by měl být aplikován u vzorků, které při zkoušce dle postupu A dosáhly opotřebení $> 100 \text{ mm}^3$.*
- *Postup C je rovněž krátkodobou variantou, která se používá pro hodnocení tenkých povlaků.*
- *Postup D je vhodný pro hodnocení materiálů s nízkou odolností proti opotřebení. Při této variantě je vzorek k povrchu kotouče přitlačován menší silou než v případě postupu A.*

Pro vyhodnocení zkoušky je nutné vzorky zvážit před a po testování. Jednotlivé materiály mají rozdílné hustoty a proto je nutné k vzájemnému porovnání převést hmotnostní úbytek na úbytek objemový, který se udává v mm^3 . Ve zprávě se pak udává objemový úbytek a specifikace postupu [10].

Aby výsledky mezi jednotlivými laboratořemi, které provádí tuto zkoušku, byly porovnatelné, je nutno dodržet jistá doporučení. Záleží především na užití pryži, typu a tvaru abraziva, hubici pro přívod písku a její pozici a dále pak na vhodném systému pro aplikaci přitlačné síly. Kolo se skládá z ocelového disku, na jehož obvodě je pryž z chlorobutylu. Optimální tvrdost pryže je A60 podle Shorea. Jako abrazivum se užívá oblý křemičitý testovací písek AFS 50/70. Obsah vlhkosti písku by neměl překročit 0,5 %. Hubice musí zajišťovat dostatečný tok a její hrdlo má být umístěno co nejbližší styku vzorku s pryžovým kotoučem. Držák vzorku je umístěn na otočné páce, na kterou se zavěšuje závaží, čímž se vyvozuje přitlačná síla. Potřebná hmotnost závaží by neměla být vypočítávána, ale určena přímo měřením (měří se síla potřebná k odtlačení držáku od pryžového kola). Typický vzorek má obdélníkový tvar o délce stran 25 a 76 mm. Jeho tloušťka bývá od 3,2 do 12,7 mm [10].

Parametry testu jsou shrnuty v následující tabulce. Uvažovaný disk má průměr 228,6 mm. Průtok písku se nastavuje mezi 300 až 400 g/min. Minimální doporučená hodnota je 250 g/min. Rotace pryžového kola se spouští až po dosažení ustáleného,

požadovaného toku abraziva, přičemž vzorek není ke kotouči přitlačován. Mezi jednotlivými testy je třeba dělat přestávky, aby teplota pryže klesla na pokojovou teplotu. Tolerance velikosti přitlačné síly je 3 %. Provozem dochází samozřejmě i k opotřebení kotouče. Počet otáček se proto nastavuje takový, aby byla zajištěna potřebná vzdálenost. Testovací doba při postupu A, D se pohybuje kolem 30 minut, v případě postupu B test trvá 10 minut. Nejkratší dobu 30 sekund vyžaduje postup C [10].

Tabulka 3 - Parametry testu [10]

Postup	Přítlačná síla [N]	Počet otáček kola [-]	Vzdálenost [m]
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309

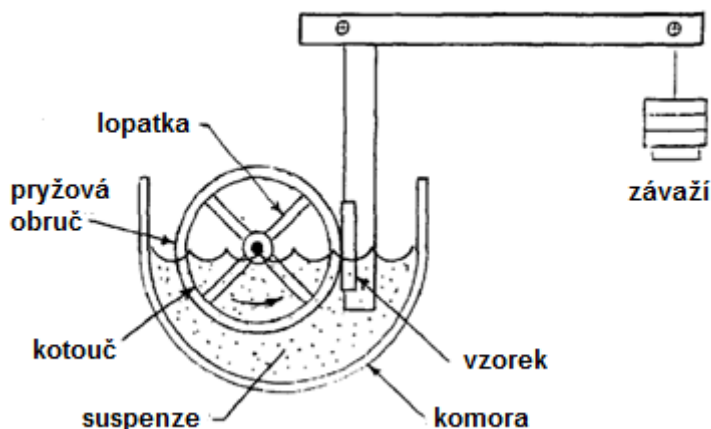
4.5 Zkouška opotřebení s pryžovým kotoučem dle ASTM G105

V anglosaské literatuře se dělí abrazivní opotřebení na 3 kategorie [12]:

- *gouging abrasion (rýhovací abraze)*
- *high-stress (or grinding) abrasion (vysokonapěťová abraze)*
- *low-stress (or scratching) abrasion (nízkonapěťová abraze)*

Účelem testů dle normy ASTM G105 je získání dat pro hodnocení odolnosti materiálů při nízkonapěťové abrazi. Při zkoušce je povrch vzorku obrušován suspenzí obsahující abrazivum určité velikosti a složení. Abrazivum je mezi testovaný vzorek a rotující kotouč přiváděno pomocí pryžové obruče. Stejně jako u testu dle ASTM G65, i zde je vzorek přitlačován k obruči pomocí páky, na které se zavěšuje závaží [13].

Abrazivní suspenze by se měla skládat z 0,94 kg deionizované vody a 1,5 kg písku AFS 50/70. Před samotným testem je třeba zkušební komoru vypláchnout, aby se eliminovaly zbytky suspenze po předchozí zkoušce. Průměr kotouče je 177,8 mm (7"). Tvrdost pryže je rovna 50A podle Shorea. Obvodová rychlost pryžového kotouče je 2,28 m/s. Po roztočení kotouče je ke kotouči přiložen vzorek, který je přitlačován silou 222 N. Zkouška končí po 1000 otáčkách, čemuž odpovídá dráha 558,6 metrů [13].



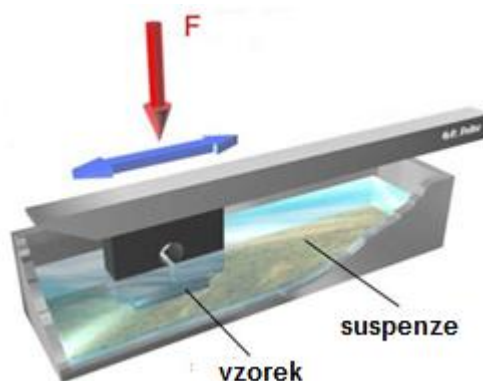
Obrázek 11-Testovací zařízení dle ASTM G105 [13]

4.6 Zkouška opotřebení dle ASTM G75

Norma ASTM G75 popisuje metodu pro určení abrazivity suspenze (Miller Number) a odolnosti materiálu proti opotřebení v dané suspenzi (SAR Number). K určení Millerova čísla (Miller Number) jakožto ukazatele relativní abrazivity suspenze se užívá standardního referenčního materiálu (27% chromová slitina), který v různých suspenzích vykáže různé hmotnostní úbytky [14]. SAR číslo (SAR Number) představuje poměr opotřebení zkoumaného materiálu vůči materiálu referenčnímu. Test probíhá v libovolné suspenzi [14].

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. Zkušenosti ukazují, že pokud hodnoty čísel jsou vyšší než 50, lze očekávat větší míru opotřebení [14].

Ke zkoušení se užívá žlab, který je naplněn zvolenou suspenzí. Ke dnu tohoto žlabu, které je pokryto pásem pryže, je předepsanou silou přitlačován vzorek, který koná přímočarý vratný pohyb. Více informací bude uvedeno v praktické části diplomové práce.



Obrázek 12 - Princip testu dle ASTM G75 [11]

5 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 těmito rozdílnými způsoby [16]:

- *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.)*

5.1 Povrchové kalení

Při povrchovém kalení, které je možno realizovat plamenem, indukci, laserem nebo svazkem elektronů nedochází v jádře materiálu ke strukturním změnám. Tloušťka zakalených vrstev bývá od 0,5 do 2 mm. Jako základní materiál se užívají uhlíkové oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,35 %, nízkolegované oceli a litiny. Při povrchovém kalení se běžně dosahuje tvrdosti povrchu kolem 650 HV. Zásadní omezení při tomto tepelném zpracování je špatné řízení procesu. V případě kalení plamenem je teplota odhadována pracovníkem podle barvy povrchu, což vede k nerovnoměrné tvrdosti a výraznému tepelnému ovlivnění součásti. Lidský faktor hraje určitou roli i při indukčním ohřevu. Z těchto důvodů je mnohem výhodnější kalení laserem, u kterého je celý proces monitorován a řízen [16,17].

5.2 Chemicko-tepelné procesy

Chemicko-tepelné procesy jsou charakterizovány difuzními procesy za vysokých teplot. Dochází tak k tvorbě povrchových vrstev s odlišným chemickým složením a mikrostrukturou.

5.2.1 Cementace

Cementací se nazývá proces, při kterém je povrch součásti syčen uhlíkem. Teploty cementace se běžně volí kolem 850 - 950 °C, protože vyšší teploty mohou vést k nežádoucímu zhrubnutí zrna nebo k přesycení povrchové vrstvy uhlíkem, což

vede ke křehkosti povrchové vrstvy. Tloušťka cementované vrstvy se volí do 2 mm. Po cementaci je nutné danou součást zakalit a následně popustit na nízkou teplotu. Cementací se dosahuje tvrdosti v rozmezí 800 - 900 HV. Cementovaný povrch dobře odolává abrazivnímu opotřebení měkčími částicemi. V případě opotřebení je nutné brát v potaz i gradient obsahu uhlíku v povrchové vrstvě, se kterým souvisí pokles tvrdosti a tím i odolnosti opotřebení při postupném odstraňování povrchových vrstev [16].

5.2.2 Nitridace

Nitridace, neboli difuzní sycení povrchu dusíkem, probíhá v solných lázních, nebo v plynném prostředí při teplotách 450 - 600 °C. Doba potřebná k nitridaci je delší než v případě cementace, ale dosažená tloušťka je menší (zpravidla do 0,65 mm). Tvrdosti nitridačních vrstev jsou sice v porovnání s cementačními vrstvy vyšší (u legovaných ocelí až 1 200 HV), ale bylo prokázáno, že v případě abrazivního opotřebení je jejich odolnost téměř totožná [9]. (V případě erozivního opotřebení vykazují dokonce nitridované vrstvy nižší odolnost proti opotřebení než vrstvy cementované, ačkoliv jejich tvrdosti jsou vyšší.)

5.2.3 Bórování

Při bórování je povrch oceli sycen bórem. Podle intenzity sycení se může vytvořit jednofázová nebo dvoufázová vrstva. Ačkoliv u dvoufázové vrstvy lze dosáhnout větší tvrdosti, je žádoucí vytvářet vrstvy jednofázové, které vykazují menší křehkost. Pro bórovou vrstvu je typická vysoká tvrdost a zubovité propojení této vrstvy se základním materiálem. Bórování se provádí v zásypu, v roztoku solí, nebo v plynech. Tloušťky vrstvy pro součásti vystavené abrazivnímu opotřebení se doporučují v rozmezí 0,025 až 0,140 mm protože větší tloušťky jsou náchylné na vydrolování a praskání. U uhlíkových ocelí lze dosáhnout tvrdosti povrchové vrstvy v rozmezí 1 600 - 2 000 HV. Tato tvrdost se udrží do teploty 650 °C. Bórované povrchy vykazují v abrazivních podmínkách větší otěruvzdornost než oceli cementované i nitridované [16].

5.2.4 Další postupy chemicko-tepelného zpracování

Kromě výše uvedených postupů existuje současné sycení povrchu uhlíkem a dusíkem (karbonitridace a nitrocementace). Tyto postupy však v porovnání s cementací nebo nitridací nezlepšují abrazivní odolnost a proto se jich nepoužívá.

Postupy jako je například difuzní chromování nebo vanadování rovněž nenašly v případě abrazivního opotřebení uplatnění, a to z důvodu velmi tenkých povrchových vrstev, u nichž hrozí při kontaktu s hranami abrazivní částice jejich porušení [16].

5.3 Termické nástřiky

Termické neboli žárové nástřiky vytvářejí na povrchu povlaky se specifickými vlastnostmi, mezi které řadíme i odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Přídavný materiál ve formě prášku, tyčinek nebo drátu je nataven a následně nanášen na povrch základního materiálu pomocí usměrněného proudu plynů o vysoké rychlosti. Vazba mezi nástřikem a základním materiálem je především mechanická. Je velmi důležité, aby základní materiál byl řádně očištěn, odmaštěn a zdrsňen tryskáním nebo obráběním. Tloušťky povlaků se běžně pohybují mezi 100 až 500 μm .

Mezi přednosti řadí autor [16]:

- *lze nanášet široký výběr materiálů (kovy, keramické materiály, cermety a karbidy)*
- *možnost vytvářet i relativně tlusté povlaky s vysokou rychlostí vytváření povlaku*
- *povlaky jsou zakotveny na povrchu mechanicky - lze je vytvářet z materiálů vzájemně nekompatibilních*
- *součásti obvykle není třeba tepelně zpracovávat před a po nanesení povlaku*
- *deformace součásti jsou minimální*
- *opotřebené součásti lze renovovat rychle a s nízkými náklady*
- *odolnost povlaků v různých degradačních podmínkách může být větší než odolnost základního materiálu*
- *povlaky lze vytvářet manuálně i na automatických zařízeních*

Termické nástřiky mimo to umožňují vytvářet vícevrstvé povlaky. Jednotlivé vrstvy mohou mít rozdílné jak chemické složení, tak i fyzikálně-mechanické vlastnosti [16].

Pro vytváření nástřiků existuje řada technologií [16]:

- *nástřik plamenem*
- *detonační nástřik*
- *HVOF (High Velocity Oxyfuel) nástřik práškem*

- *plazmatický nástřik (za normálního nebo sníženého tlaku)*
- *nástřik elektrickým obloukem*

5.3.1 Nástřik plamenem

Při této metodě je používán stlačený vzduch nebo kyslík společně s palivem např. acetylenem. Při hoření směsi je do plamene přiváděn nanášený materiál ve formě prášku nebo drátu. Dojde k jeho natavení a urychlení směrem k části, kterou povlakujeme. Vytvořené povlaky mají nižší kvalitu a užívá se jich u aplikací, které nevyžadují povlak s vysokou hustotou a přilnavostí [16].

5.3.2 Detonační nástřiky

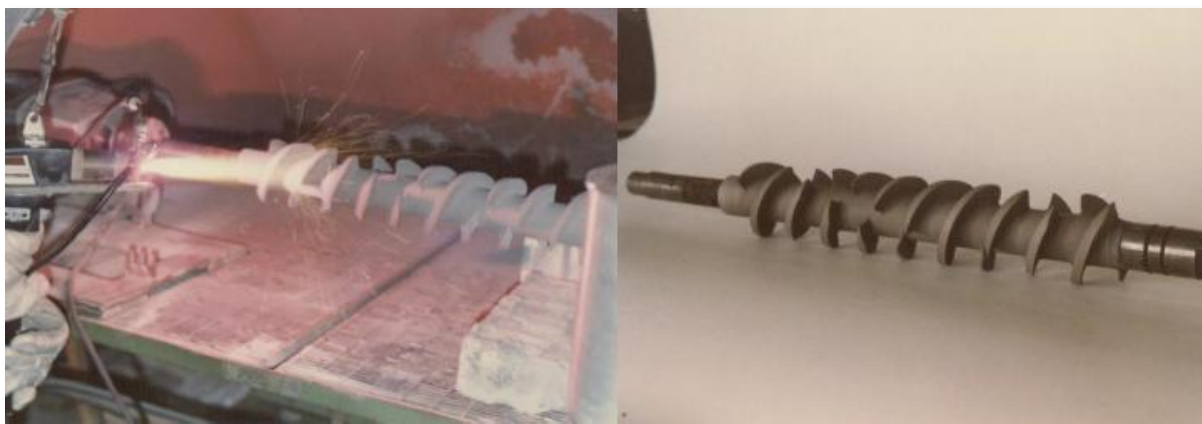
Při detonačním nástřiku se spalovací komora zaplní kyslíkem, acetylenem a práškovým materiálem. Směs je zapálena elektrickou jiskrou a nastává detonace. Ve spalovací komoře dojde k nárůstu teploty až na 3 000 °C. Částice přídavného materiálu získají rychlost až 800 m/s a dopadají na povrch součásti. Do komory je s určitým zpožděním přiveden dusík, který ukončí spalovací proces. Vysoká kinetická energie zajišťuje velmi dobrou přilnavost povlaku k základnímu materiálu o nízké porózitě (< 1%). Touto metodou je možné vytvářet i keramické povlaky, ale hlavně se používá směs WC-Co [16].

5.3.3 HVOF metoda

Metoda je podobná metodě detonačního nástřiku, ale plnění spalovací komory a hoření směsi probíhá kontinuálně díky speciální konstrukci hořáku. Produkty hoření jsou urychlovány v trysce až na supersonické hodnoty. V plameni dojde k natavení a urychlení práškového materiálu. Stejně jako u detonačních nástřiků, i zde je velká kinetická energie zárukou dobré přilnavosti a dokonalého rozprostření částic. V porovnání s plazmovým nástřikem je teplota u HVOF metody relativně nízká, čímž se zabraňuje fázovým přeměnám a vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu [16].

5.3.4 Plazmatický nástřik

Zdrojem energie je elektrický oblouk vytvořený mezi wolframovou a měděnou elektrodou. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu, který vstupuje do hořáku, na jehož druhém konci vystupuje proud plazmy s teplotou až 20 000 K. Do proudu plazmy je pomocí nosného plynu přiveden nanášený práškový materiál. Díky vysoké teplotě plazmatu je možné nanášet i těžkotavitelné materiály [16].



Obrázek 13 - Aplikace žárového nástřiku a ukázka hotové součásti [18]

5.4 Otěruvzdorné návary

Navařování se ve velkém měřítku používá v průmyslu jak pro renovaci opotřebených dílů, tak i pro vytváření otěruvzdorných povrchových vrstev. Výhodou návarů je široké spektrum přídavných materiálů s rozmanitými vlastnostmi. Přídavné materiály jsou k dispozici ve formě obalených elektrod, trubičkových elektrod, drátů, tyčinek prášků nebo navařovacích past. Volba přídavného materiálu a technologie závisí na několika faktorech: tvar a rozměr součásti, chemické složení základního materiálu, způsob namáhání, druh opotřebení. Na volbu mají rovněž vliv i faktory ekonomické [16]. Mezi známé výrobce přídavných materiálů můžeme zařadit např.: Corodur, Lincoln-Electric, Böhler, Esab, Castrolin, Fileur aj. V technické dokumentaci výrobců je možné nalézt užitečné informace o volbě přídavného materiálu pro danou aplikaci včetně doporučeného postupu.

ŠNEKOVÉ DOPRAVNÍKY, ŠNEKOVÉ LISY, MÍCHACÍ VRTULE			
	Elektroda	Drát	Trubičkový drát
Snadněji opracovatelné návary méně opotřebované otěrem s povrchem bez trhlinek	UTP DUR 600 UTP DUR 650	UTP A DUR 600 UTP A DUR 650	SK 500-G, SK 600-G, SK 650-G, SK 258-O
Transportní šneky a míchací vrtule s minerálním otěrem za běžných teplot	UTP LEDURIT 60	UTP A LEDURIT 60 (WIG a plamen)	SK 255-O, SK 866-O
Velmi silný minerální otěr, např. tlačný šnek, míchání hutné hmoty	UTP LEDURIT 65 UTP 75	UTP A 7550, UTP A 7560 (WIG a plamen)	SK A 45-O, SK 900-O, SK 900Ni-G
Otěr za vysokých teplot	UTP LEDURIT 65	-	SK A 43-O do ca. 450°C SK A 45-O do ca. 600°C SK A 83-O do ca. 800°C
Otěr za teplot až 1000°C a otěr v silně korozivním prostředí	UTP CELSIT 701 UTP CELSIT 760	UTP A CELSIT 701 N	SK STELKAY 1A-G

Obrázek 14 - Doporučení návarových materiálů [19]

Při navařování dochází k pevnému metalurgickému spoji mezi návarem a podkladem. Při navařování první vrstvy dochází k promíšení svarového kovu se základním materiálem. Pro dosažení požadovaných vlastností je nutné užít více

vrstev návaru. Proces navařování je doprovázen deformacemi a vznikající hrubý povrch vyžaduje následné opracování [16].

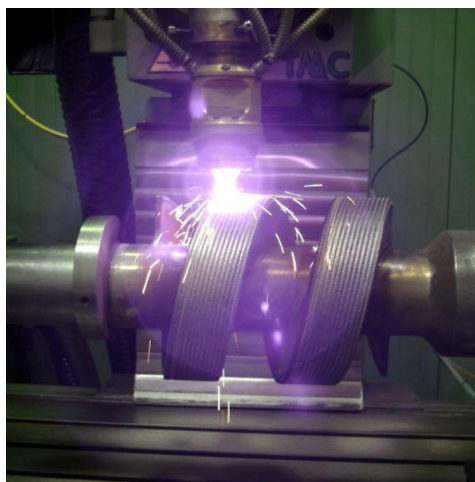
Pro aplikace, při nichž se uplatňují mechanismy abrazivního nebo erozivního opotřebení, se obvykle volí návarové materiály na bázi Fe-Cr-C. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení je dána především strukturou a podílem jednotlivých fází v navařené vrstvě. Podíl fází je ovlivněn metalurgickými ději, které probíhají během navařování. Významným faktorem je stupeň promísení základního a přídavného materiálu. Mísením se rozumí změna chemického složení při míchání přídavného a základního materiálu nebo již navařené housenky [20,21].

Mezi nejnovější a vůbec nejdokonalejší způsoby navařování se řadí laserové navařování (laser cladding). Mezi pozitiva této technologie můžeme například zařadit [22]:

- *nízké rozpouštění navařovaného materiálu v podkladu*
- *vysoká přilnavost k podkladu*
- *nízká deformace a malá tepelně ovlivněná oblast*
- *jemná mikrostruktura díky rychlému ochlazování*
- *velká materiálová flexibilita - kovy, keramiky, polymery*
- *výsledná vrstva bez defektů a trhlin*
- *kompaktní technologie*

I tato technologie má svá negativa, která jsou především ekonomického charakteru [22]:

- *strojně a instrumentačně náročné*
- *nutné strojní vedení*
- *investičně velmi náročné*



Obrázek 15 - Laserové navařování [23]

5.5 Povlaky vytvořené z plynné fáze

Povlakem nazýváme látku, která je určitým způsobem nanесena na povrch základního materiálu [24]. (Proto se jako povlaky označují i návary a žárové nástřiky.)

Metody, které využívají k tvorbě povlaků plynné fáze lze rozdělit do dvou skupin [25]:

- *metody chemického povlakování (CVD)*
- *metody využívající fyzikálních způsobů (PVD)*

Ostrá hranice mezi nimi však mizí a nově vyvíjené metody někdy nelze jednoznačně zařadit, protože bývají kombinací obou metod. Všechny tyto povlaky jsou charakteristické malou tloušťkou (několik μm).

Pro kvalitní povlakování je velmi důležitá adheze mezi povlakem a základním kovem. Měřítkem adheze je odpor mezi proti šíření trhliny mezi povlakem a základním materiálem. Odolnost povlaku proti porušení je dána především typem a složením, významnými činiteli jsou ale i činitelé jako tloušťka, struktura, velikost napětí, kvalita spojení se základním materiálem a způsob namáhání [24].

5.5.1 Metoda PVD

Princip fyzikálních metod (Physical Vapour Deposition) spočívá v tom, že se povlakovací materiál převádí do plynné fáze a to pomocí elektronového děla, nízkonapěťového oblouku nebo bombardováním urychlenými ionty netečného plynu. Podmínkou metody je vytvoření vysokého vakua. Vakuum zajistí vyšší rychlost odpařování a zároveň potlačuje oxidaci. Metoda probíhá při relativně nízkých teplotách (pod $600\text{ }^{\circ}\text{C}$), díky čemuž nedochází k tepelnému ovlivnění součásti. Povlak může být vytvářen:

- *napařováním*
- *naprašováním*
- *iontovým plátováním*

U zmíněných metod existují různé kombinace a varianty, které se od sebe odlišují použitým zdrojem tepla, ionizace nebo urychlování reakčních látek pro tvorbu sloučenin [24,25].

Autoři v publikaci [24] zmiňují tyto výhody:

- *získává se přesně definované chemické složení povlaku*

- *rovnoměrný průběh procesu zajišťuje dokonalý růst vrstvy povlaku*
- *vynikající adheze povlaku se základním materiálem*
- *získává se vysoká hustota vytvořeného povlaku*

Mezi nevýhody pak řadí:

- *složitý vakuový systém*
- *nutnost pohybu předmětu pro rovnoměrné ukládání povlaku po celém povrchu*

5.5.2 Metoda CVD

Při chemických metodách CVD (Chemical Vapour Deposition) dochází k vytváření povlaku na podložce reakcí chemických sloučenin přiváděných v plynném stavu k základnímu materiálu (podložce). Reakcemi, které probíhají v plynné fázi či na rozhraní plynné a tuhé fáze dochází ke vzniku těžkých produktů, ale i technicky využitelných pevných látek určitých vlastností. Produkty tohoto chemického procesu jsou následně na ohřátém povrchu součásti ukládány. Metody probíhají při teplotách 700 až 1500 °C [24,25].

Nukleací a růstem tuhé fáze na podložce se připravují povlaky z kovů i polovodičů, sloučeniny, především nitridy, karbidy a boridy. Vyloučené povlaky chrání základní materiál proti oxidaci, korozi a proti otěru. Povlaky nacházejí široké uplatnění v různých oborech průmyslu. Velká pozornost je v současné době věnována tvrdým otěruvzdorným povlakům, kterých se užívá u řezných a tvářecích nástrojů ale i u konstrukčních součástí strojů [25].

Vlastnosti povlaků závisí převážně na typu přechodové zóny a na struktuře povlaku. Pro spojení základního materiálu s povlakem je velice žádoucí postupný přechod složení. Dobré mechanické vlastnosti a korozní odolnost vykazují povlaky s jemnozrnnou strukturou, velkou hustotou a hladkým povrchem. Povlaky vytvářené pro zlepšení tření nebo opotřebení mají tloušťku od 3 do 15 μm [25].

Mezi výhody CVD autoři [24] řadí:

- *vysoká hustota povlaku a vynikající adheze povlaku k základnímu materiálu*
- *rovnoměrné povlakování předmětu bez ohledu na geometrický tvar*

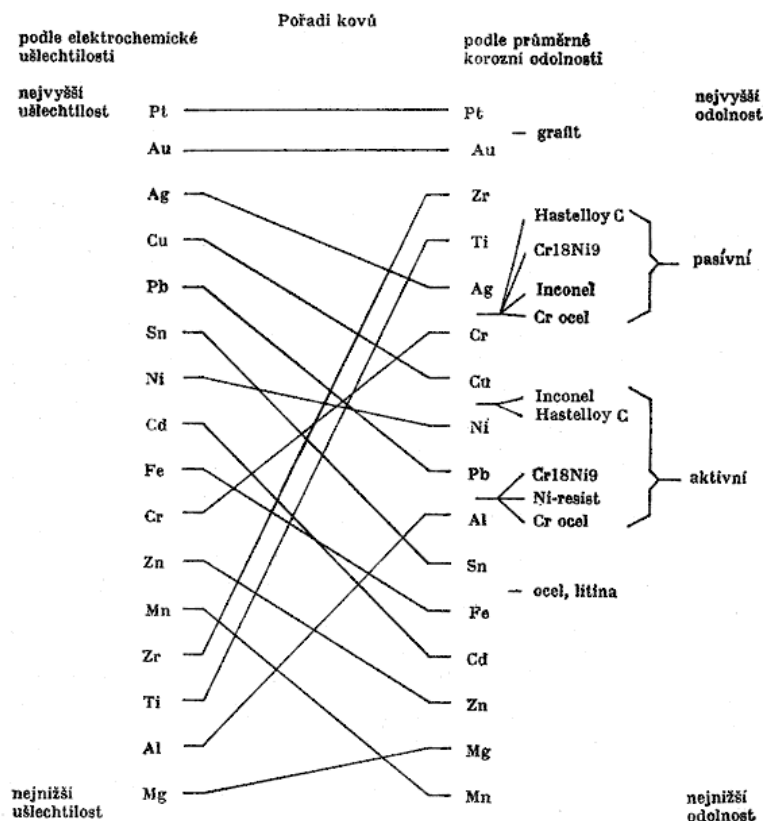
Mezi nevýhody lze zařadit:

- *omezený výběr materiálů pro povlakování*
- *nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu*
- *obtížně predikovatelné finální vlastnosti ochranných vrstev*

6 Koroze

V samém úvodu práce bylo zmíněno, že při degradaci strojních součástí se může současně uplatnit několik degradačních mechanismů. Při zpracování olejnatých semen jsou pracovní orgány lisů a extrudérů vystaveny i chemicky agresivnímu prostředí, a tak se zde vedle abrazivního opotřebení uplatňuje i koroze.

Koroze představuje fyzikálně chemické znehodnocování materiálu za působení okolního prostředí. Většina kovů je v podstatě nestálá a dochází k samovolnému přechodu do oxidovaného stavu. Tento přechod se vyznačuje snížením volné entalpie soustavy. Na charakter a rychlost korozního napadení má vliv i přítomnost nově vzniklé korozní zplodiny, která může mít v mnoha případech ochranné vlastnosti (při současném působení abrazivního opotřebení jsou však produkty koroze okamžitě odstraňovány). Volná entalpie souvisí s elektrochemickými a korozními potenciály kovů. Podle těchto potenciálů se sestavují tzv. řady napětí [5]. Na následujícím obrázku jsou řady kovů sestaveny podle elektrochemické ušlechtilosti a na druhé straně je uvedeno skutečné pořadí prvků podle jejich průměrné korozní odolnosti.



Obrázek 16 - Porovnání elektrochemické ušlechtilosti a průměrné korozní odolnosti kovů [26]

Podle mechanismu průběhu korozního děje se rozlišují dva typy koroze [5]:

- *chemická koroze*
- *elektrochemická koroze*

6.1 Chemická koroze

Chemická koroze probíhá jako chemická reakce mezi povrchem součásti a nevodivým prostředím. Zahrnuje případy koroze v plynech a neelektrolytech. Tento typ koroze je mnohem méně častý než elektrochemická koroze. Nejznámější chemickou korozí je vytváření okují na kovech v plynné atmosféře za vysokých teplot [5].

6.2 Elektrochemická koroze

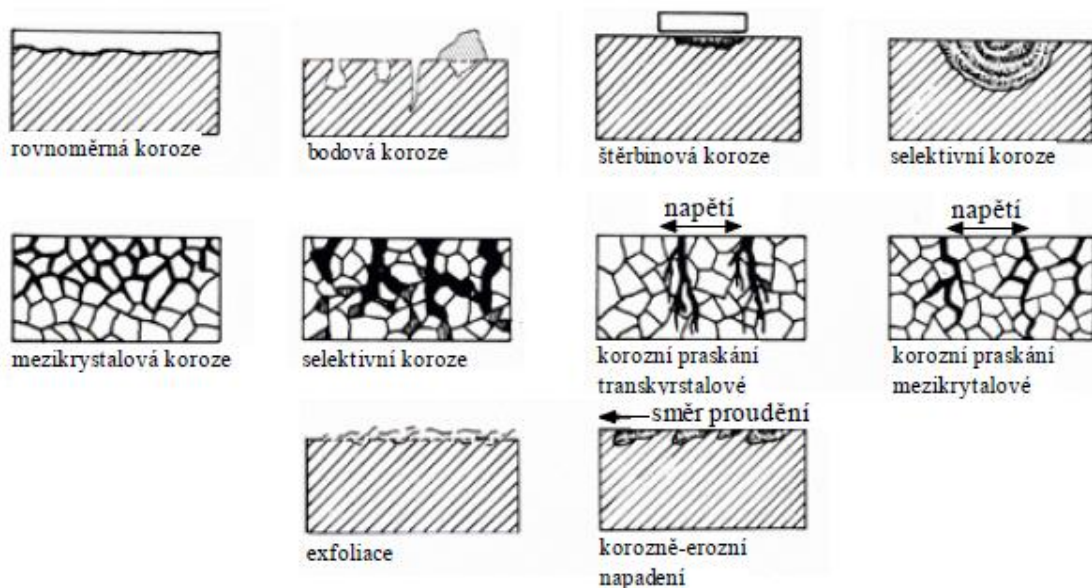
Elektrochemická koroze zahrnuje případy koroze kovů v elektricky vodivém prostředí (elektrolytu). Každá korozní reakce zahrnuje dvě dílčí reakce - anodovou a katodovou, protože se jedná o reakci oxidačně-redukční. Anodová reakce odpovídá oxidaci kovů, a tím tedy vlastní korozi. Katodová reakce odpovídá redukci některé oxidující složky roztoku. Obě tyto reakce mohou probíhat buďto na témž místě nebo na místech odlišných. Obě dílčí reakce probíhají na témž místě, pokud je kov homogenní a jestliže i složení roztoku je stejné po celé ploše dotyku s kovem. Spojením dvou kovů v korozním prostředí může vzniknout tzv. korozní makročlánek. Při tomto spojení se anodová reakce soustředí především na méně ušlechtilý kov. Podobné spojení různorodých částí samozřejmě vzniká v samotné struktuře kovů a jejich slitin [5].

Jednou z podmínek dalšího průběhu koroze je odstraňování elektronů katodovou reakcí. Trvalý průběh koroze vyžaduje přísun reagujících látek z roztoku ke kovu a odstraňování korozních zplodin. V mnoha případech mohou nastat následné reakční děje, které vedou ke vzniku tuhých korozních zplodin, které mohou zásadním způsobem rozhodnout o korozním chování kovu nebo slitiny. Takovým příkladem může být třeba vznik rzi. Obdobným způsobem vzniká např. při korozi mědi hydroxid mědnatý apod. Jestliže korozí zplodiny vytvářejí na povrchu kovu ochrannou vrstvu, mluvíme o tzv. pasivitě. Pasivní vrstva je obvykle tvořena velmi stálými oxidy. Samozřejmě i při pokrytí povrchu velmi odolnými zplodinami dochází k určitým úbytkům. Tento jev se vysvětluje tím, že vznikající vrstva se do jisté míry rozpouští a je neustále obnovována [5].

6.3 Formy korozního napadení

Mezi nejdůležitější druhy elektrochemické koroze řadíme atmosférickou korozi, korozi ve vodách a půdách, korozi vodnými roztoky kyselin, zásad a solí. Kromě rovnoměrné koroze, při níž koroduje takřka celý povrch, se můžeme setkat i s jinými formami koroze, které jsou často i velmi nebezpečné. Například při mezikrystalové nebo transkrystalické korozi může dojít k úplnému porušení mechanických vlastností materiálů, aniž by došlo k výrazné změně vzhledu. K bodové korozi mají sklon především materiály používané v pasivním stavu, které jsou vystaveny agresivnímu prostředí, které je schopno pasivitu porušovat. Tato koroze se vyskytuje např. i u korozivzdorných ocelí za přítomnosti chloridů [5].

V případě zvyšování otěruvzdornosti součásti pomocí navařování je důležité, aby byl povrch bez trhlin. Trhliny totiž mohou zasahovat až do rozhraní návarzákladní materiál. V takovém případě hrozí korozní praskání, které vede k odloupení navařené vrstvy [20].



Obrázek 17 - Formy korozního napadení [27]

6.4 Korozivzdornost

Součásti, které jsou v provozu vystaveny silnému chemickému účinku pracovního prostředí je nutno chránit vhodnými povrchovými úpravami (kde to funkce součásti dovolí), nebo se vyrábějí z korozivzdorných ocelí. Tyto oceli se vyznačují velkým obsahem chromu. Dalšími legujícími prvky jsou Ni nebo Mn. Základem odolnosti proti korozi v oxidačních prostředích je již zmíněné pasivování oceli. K pasivování oceli je třeba minimálního obsahu kolem 12 % Cr v tuhém roztoku železa α nebo γ . Chrom, který je vázaný např. v karbidech nelze počítat [5,27].

Hlavním legujícím prvkem v případě návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení je chrom. Přítomnost tohoto prvku je žádoucí i z hlediska korozní odolnosti. Dobrou odolnost proti abrazivnímu opotřebení vykazují návarové vrstvy s vyloučenými karbidy a malým podílem austenitu. U některých návarů dochází ke vzniku karbidů M_7C_3 . Pod tímto označením se skrývá karbid $(Fe, Cr)_7C_3$. Karbid M_7C_3 tedy váže chrom, čímž poklesne jeho podíl v austenitu. Tvorba primárních karbidů M_7C_3 tedy s sebou přináší riziko snížené korozivzdornosti. Je proto vhodné, aby přídatný materiál obsahoval i další prvky, které mají větší afinitu k uhlíku než chrom. Tvorba těchto karbidů se u korozivzdorných materiálů potlačuje přidáním Nb a Ti. Niob a titan jsou přidávány i za účelem tvorby velmi tvrdých karbidů NbC a TiC, které souhrnně označujeme jako MC karbidy [5,20,27].

7 Hygienické požadavky

Kromě technického a ekonomického hlediska hraje důležitou roli při výběru materiálu i hledisko hygienické. Povrchovými úpravami opatřené pracovní orgány přicházejí totiž do styku s krmivem nebo potravinami a musí být proto zdravotně nezávadné.

Hygienické požadavky na výrobky určené pro styk s potravinami jsou stanoveny vyhláškou ministerstva zdravotnictví č. 38/2001 Sb., o hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmů [28].

Výrobky, které jsou určeny pro styk s potravinami, musí být vyrobeny tak, aby za normálních nebo předvídatelných podmínek nedocházelo k uvolňování složek do pokrmů v množství, které by mohlo [28]:

- *ohrožit lidské zdraví*
- *způsobit nepřijatelnou změnu ve složení potravin*
- *ovlivnit organoleptické vlastnosti potravin*

V této vyhlášce jsou dále pro výrobky pro styk s potravinami stanoveny kromě hygienických požadavků též limity. Tyto limity a požadavky musí být ověřovány podle pravidel, které jsou stanoveny rovněž touto vyhláškou. Pokud jsou limity překročeny, je možné požádat o povolení výjimky. Návrh na povolení výjimky musí obsahovat několik náležitostí. Jednou z nich je údaj o koncentraci požadované látky v hotovém výrobku a zdůvodnění technické nutnosti jejího použití [28].

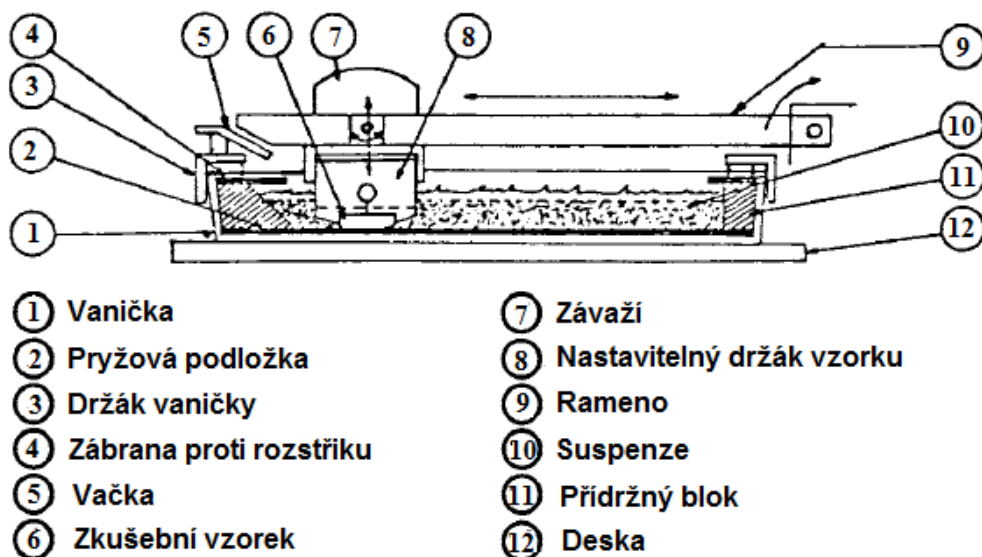
Povrchy a povlaky výrobků musí být bez porušení, odolné proti praskání, odlamování, odprýskávání a otěru. Kromě toho musí odolávat působení potravin, potravinářských surovin a látek. Povrchová úprava musí být souvislá, stejnoměrně nanesená, s minimálním množstvím mikroskopických pórů, dobře lpící na výrobku [28].

Pro výrobu kovových výrobků pro styk s potravinami lze užít korozivzdorné ocele (tzv. nerez ocele obsahující nejvýše 21 % chromu, 14 % niklu, 10,5 % manganu, 0,1 % olova a 0,05 % kadmia). Litina, různé druhy a slitiny železa, které snadno podléhají rzi, musí být opatřeny vhodnou povrchovou úpravou, která je specifikována vyhláškou.

8 Návrh zařízení

Při návrhu zařízení pro testování abrazivního opotřebení budeme vycházet z normy ASTM G75. Při zkoušce popsané v této normě koná vzorek přímočarý vratný pohyb po dnu nádoby (vaničky), která je naplněna abrazivní suspenzí. Jedná se tedy o experimentální přístroj s volnými abrazivními částicemi. Výhodou zařízení je možnost testování vzorků v libovolné suspenzi. Protože lisování nebo extruze probíhá za zvýšené teploty, byl vznesen požadavek, aby zařízení umožňovalo zkoušení materiálů při teplotě až 150 °C.

8.1 Popis typického provedení



Obrázek 18-Řez zařízením [14]

Zkušební zařízení zahrnuje minimálně dvě pracovní ramena. K ramenu je připevněn plastový držák vzorku. Držák musí umožňovat výškovou nastavitelnost vzorku, aby byla zajištěna rovnoběžnost jeho třecího povrchu s pryžovou podložkou. Vzorek je vsazen do obrobené drážky a sevřen pomocí nerezového šroubu.

Vzorek je přitlačován předepsanou silou o velikosti 22,24 N. Požadované zatížení se nastaví pomocí připevněného závaží.

Každé rameno by mělo mít samostatnou vaničku. Rozměry vaničky jsou přibližně 50 x 380 x 50 mm. Vanička, stejně jako držák vzorku, je vyrobena z plastu, aby se minimalizovaly elektrolytické děje.

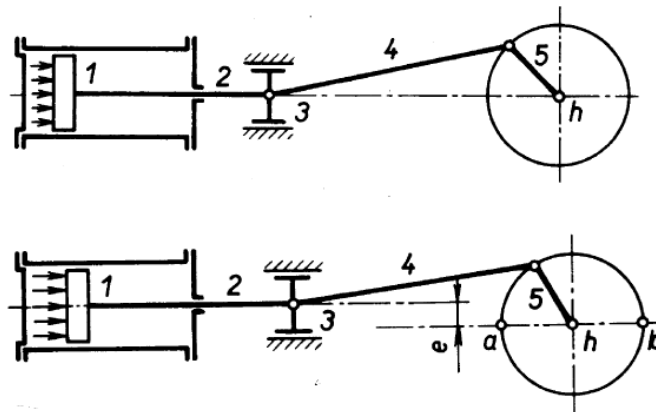
Z plastu jsou zhotoveny i přídržné bloky, které slouží k přidržení pryžové podložky, kterou je pokryto dno nádoby. Přídržné bloky jsou zkoseny, aby se vytvořil žlab ve tvaru písmene V.

8.2 Vlastní návrh

U typického provedení popsaného v normě je přímočarý vratný pohyb vzorku vyvozen pomocí klikového mechanismu. Rotační pohyb lze na pohyb přímočarý transformovat například použitím lineárního vedení s řemenem či pohybovým šroubem. Od těchto variant však bylo upuštěno jednak z důvodu relativně vysoké frekvence přejezdů, tak i z důvodu ekonomického (nutnost řízení pohonu).

8.2.1 Klikový mechanismus obecně

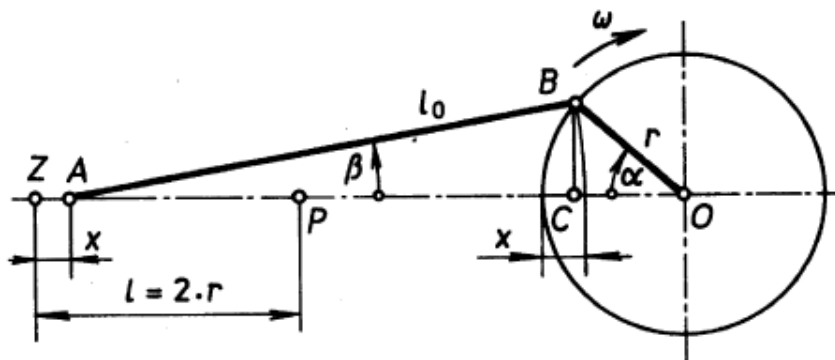
Klikové ústrojí umožňuje změnu posuvného a vratného pohybu na rotační pohyb hřídele a naopak. Píst 1 koná posuvný pohyb. Posuvný pohyb koná i pístní tyč 2, křížák 3 s čepem a část ojnice 4. Ojnice slouží ke spojení čepu křížáku s čepem kliky. Klikový čep koná společně s klikou 5 rotační pohyb kolem osy hřídele h .



Obrázek 19 - Klikový mechanismus [29]

Klikový mechanismus může být centrický nebo excentrický. Excentrický mechanismus se užívá zřídka. Jeho výhodou je to, že dává větší zdvih pístu, než činí průměr klikové kružnice. Střední rychlost při obou zdvích je odlišná, a tudíž je odlišná i doba zdvihů.

8.2.2 Kinematika klikového ústrojí



Obrázek 20 - Kinematické schéma [29]

Na předchozím obrázku je zobrazeno kinematické schéma centrického klikového mechanismu

kde l je zdvih

l_o - délka ojnice

r - poloměr kliky

Z - zadní úvrať (úvrať vzdálenější ose O)

O - osa klikového hřídele

P - přední úvrať

α - úhel vychýlení kliky z nulové polohy

β - úhel vychýlení ojnice.

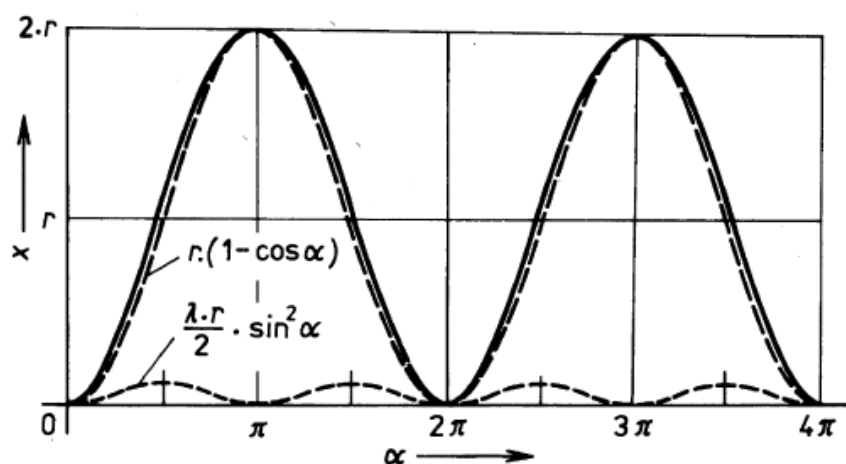
Poměr $\frac{r}{l_o}$ se značí λ . Posuv křížáku ze zadní úvrati označme x . Dráhu x lze vypočítat z rovnice:

$$x = r + l_o - l_o \cdot \cos \beta - r \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

Po aplikaci goniometrických vztahů, rozvoji dle binomické věty a zanedbání některých členů lze vzdálenost x určit pomocí vztahu:

$$x = r \cdot [1 - \cos \alpha + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin^2 \alpha] \quad (9)$$

Můžeme si povšimnout toho, že v této rovnici již nevystupuje úhel β . Poloha x je dána úhlem natočení kliky a poměrem délek kliky a ojnice.



Obrázek 21 - Posuv křížáku [29]

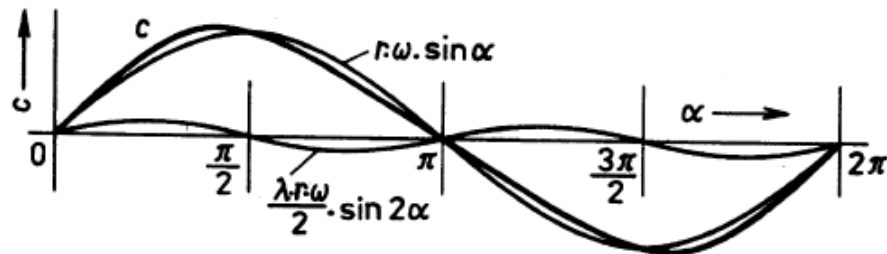
Rychlost křížáku c je dána přibližným vztahem:

$$c = \omega \cdot r \cdot [\sin \alpha + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin 2\alpha] \quad (10)$$

kde ω je úhlová rychlost kliky. Pro střední pístovou rychlost c_s platí:

$$c_s = \frac{2 \cdot l \cdot n}{60} \quad (11)$$

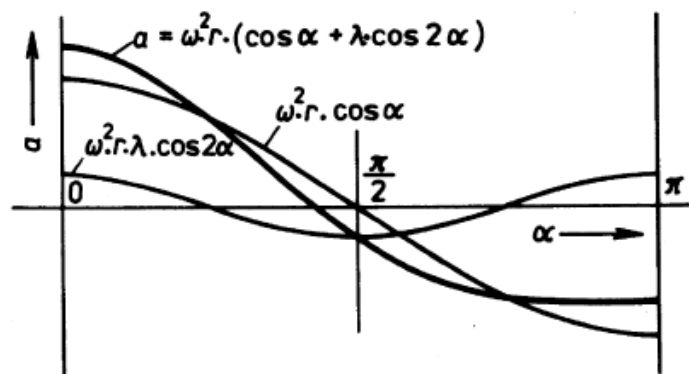
kde n jsou otáčky kliky.



Obrázek 22 - Rychlost křížáku [29]

Zrychlení křížáku a je dáno rovnicí:

$$a = \omega^2 \cdot r \cdot [\cos \alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha] \quad (12)$$



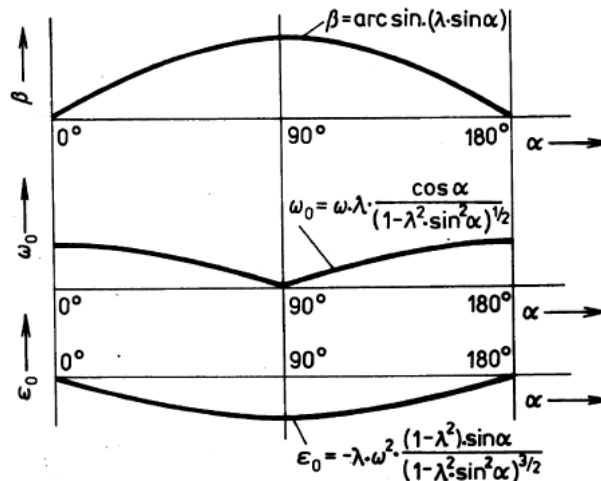
Obrázek 23 - Zrychlení křížáku [29]

Maximální hodnoty dosahuje zrychlení v úvratích ($\alpha = 0 \vee \alpha = \pi$)

$$a_z = \omega^2 \cdot r \cdot [1 + \lambda] \quad (13)$$

$$a_p = -\omega^2 \cdot r \cdot [1 - \lambda] \quad (14)$$

Ojnice koná složitý pohyb, který je určen posuvným pohybem křížáku a rotačním pohybem klikového čepu. Pohyb ojnice se proto rozkládá na elementární pohyby: posuvný pohyb křížáku a na druhotný výkyvný pohyb kolem křížákového čepu. Tento výkyvný pohyb je dán úhlovou dráhou, úhlovou rychlostí a úhlovým zrychlením ojnice [29].



Obrázek 24 - Průběh kinematických veličin ojnice [29]

8.2.3 Silové poměry v klikovém mechanismu

V případě zkušebního zařízení, je na kliku přiváděn vnější hnací krouticí moment. Hnací ústrojí musí překonávat pasivní odpory a setrvačné účinky. Setrvačné síly zatěžují všechny členy mechanismu. Velikost setrvačných sil závisí na hmotnosti členů, jejich rozložení a na jejich zrychlení.

8.2.4 Výpočet klikového mechanismu a návrh pohonu

V normě ASTM G75 jsou uvedeny otáčky klikového mechanismu (48 ot/min) a zdvih (203,2 mm). Zdvih je roven dvojnásobku poloměru kliky. V literatuře se doporučuje, aby poměr délky kliky a ojnice byl pokud možno nižší než 1/3. Obvykle se pohybuje v rozmezí od 1/6 do 1/3. Délku ojnice volíme 300 mm. Zadavatel požaduje, aby zařízení umožňovalo provádět zkoušky při vyšších rychlostech než je uvedeno v normě a při přítlačné síle až 60 N na jeden vzorek.

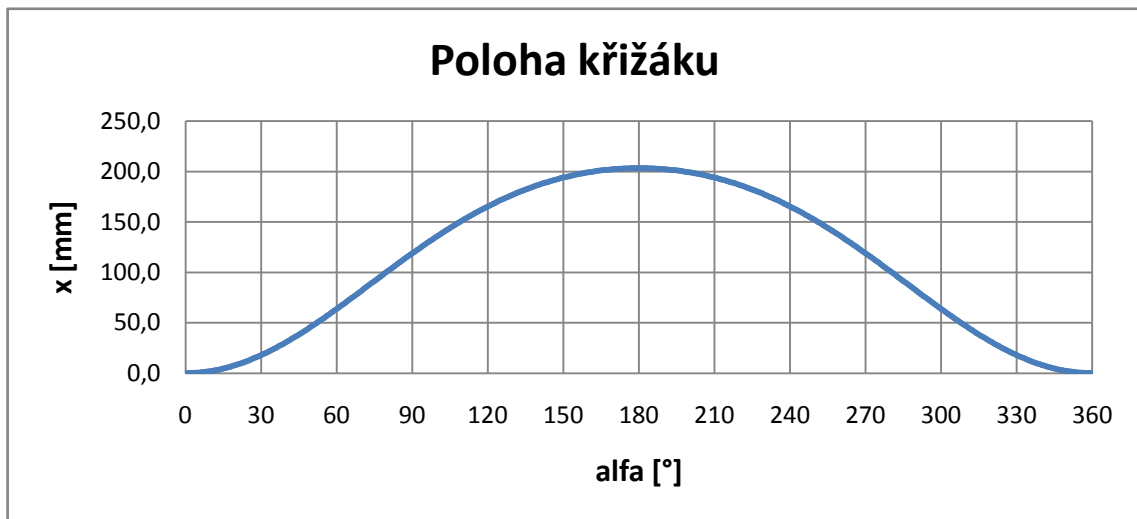
Rychlost pohonu bude regulována pomocí frekvenčního měniče. U vytipované elektropřevodovky jsou jmenovité výstupní otáčky rovny 76,71 ot/min, což odpovídá přibližně 1,5 násobku počtu otáček stanovených normou. Jednoduchým výpočtem je možné se přesvědčit, že normalizovaných otáček bude dosaženo při napájecí frekvenci přibližně 31 Hz a motor tudíž nebude vyžadovat přídavné chlazení.

Tabulka 4 - Parametry klikového mechanismu

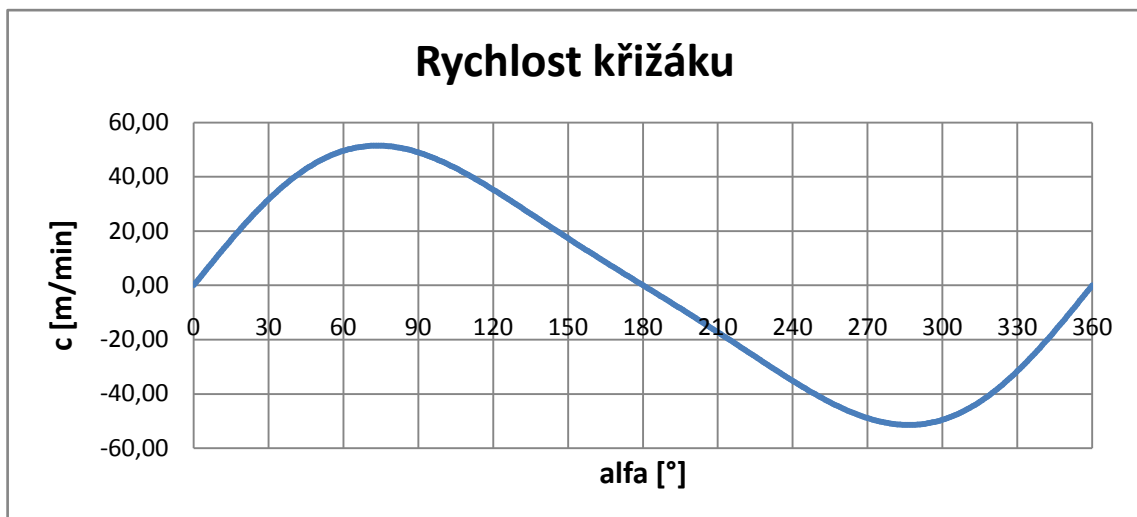
Zdvih l [mm]	Poloměr kliky r [mm]	Délka ojnice l_o [mm]	λ [-]	Otáčky stroje n [ot/min]	Střední pístová rychlost c_s [m/min]
203,2	101,6	300	0,338	76,71	31,17

Výpočet klikového mechanismu bude proveden při jmenovitých výstupních otáčkách elektropřevodovky a maximálním zatížení jednotlivých vzorků.

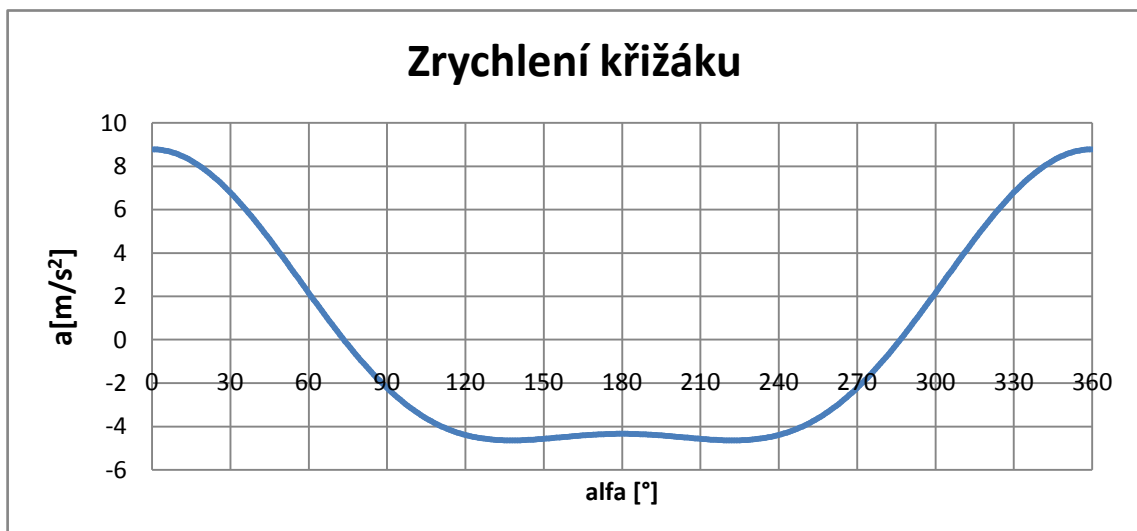
Pro určení velikosti setrvačných sil je nutné stanovit průběh zrychlení křížáku. K výpočtu setrvačných sil i pasivních odporů je dále nutné znát hmotnosti jednotlivých členů, které snadno určíme z vytvořeného 3D modelu.



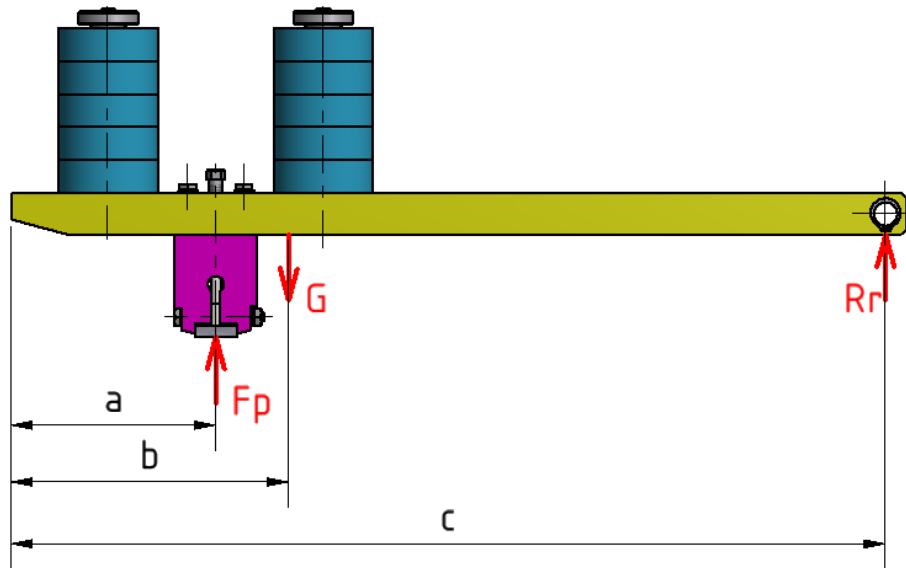
Obrázek 25 - Poloha křížáku v závislosti na úhlu natočení kliky ($n = 76,71$ ot/min)



Obrázek 26- Rychlost křížáku v závislosti na úhlu natočení kliky ($n = 76,71$ ot/min)



Obrázek 27 - Zrychlení křížáku v závislosti na úhlu natočení kliky ($n = 76,71$ ot/min)



Obrázek 28 - Sestava ramene

Sestava ramene představuje posuvnou hmotu, která koná přímočarý vratný pohyb. Pomocí momentové rovnice určíme přitlačnou sílu F_p působící na vzorek. Rameno považujeme za nosník na dvou podporách. G je tíhová síla působící v těžišti. V obrázku jsou dále zakótovány potřebné vzdálenosti pro výpočet reakcí.

Tabulka 5 - Hodnoty pro výpočet přitlačné síly

Hmotnost ramene m_r [kg]	Vzdálenost a [mm]	Vzdálenost b [mm]	Vzdálenost c [mm]
6,925	123	167	527,5

$$F_p = m_r \cdot g \cdot \frac{c - b}{c - a} = 6,925 \cdot 9,81 \cdot \frac{527,5 - 167}{527,5 - 123} = 60,54 \text{ N} \quad (15)$$

kde g je gravitační zrychlení.

Celková přitlačná síla F_{pc} je přímo úměrná počtu ramen. Zařízení bude opatřeno čtyřmi rameny.

$$F_{pc} = 4 \cdot F_p = 4 \cdot 60,54 = 242,17 \text{ N} \quad (16)$$

Celkovou třecí sílu F_{tc} získáme součinem celkové přitlačné síly a součinitele tření μ . Pro návrhový výpočet uvažujeme relativně vysoký součinitel tření 0,6 (ocel-pryž). Skutečný součinitel tření bude nižší, neboť kapalnou složkou v abrazivní suspenzi bude rostlinný olej.

$$F_{tc} = \mu \cdot F_{pc} = 0,6 \cdot 242,7 = 145,3 \text{ N} \quad (17)$$

Reakční síla působící na konci jednoho ramene:

$$R_r = G - F_p = 6,925 \cdot 9,81 - 60,54 = 7,39 \text{ N} \quad (18)$$

Celková reakční síla R_{rc} 4 ramen:

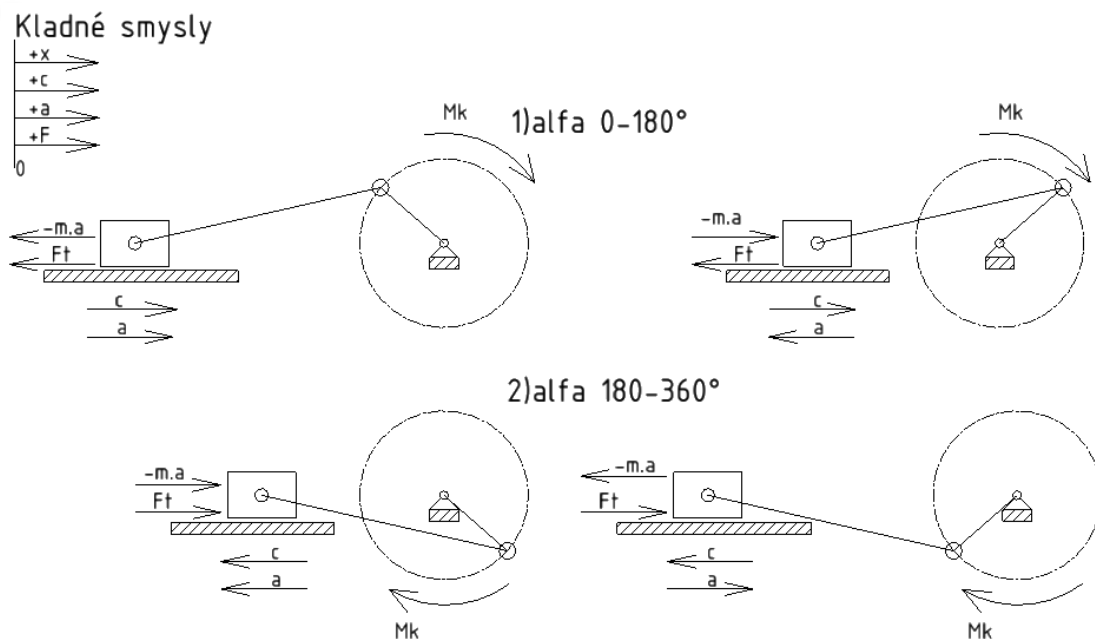
$$R_{rc} = 4 \cdot R_r = 4 \cdot 7,39 = 29,56 \text{ N} \quad (19)$$

Tato síla přitlačuje křížák k vodícím tyčím.

Ke křížáku je pomocí kolíkového spoje připojena ojnice. Ojnice koná složitý obecný pohyb. Provedeme proto dvoubodovou redukci hmotnosti. Díky symetrii ojnice se do křížákového čepu a klikového čepu redukuje polovina hmotnosti ojnice. Hmotnost redukovanou do křížákového čepu přičteme k posuvným hmotnostem. Hmotnost redukovanou do klikového čepu kliky přičteme k hmotnostem rotačním. Dalšími rotačními hmotnostmi jsou klikový čep a klika. Odstředivá síla rotujících hmot zatěžuje hřídel převodovky radiální silou. Vlivem náhrady ojnice dvěma body se dopustíme určité chyby (odlišná setrvačnost náhradní soustavy), kterou je možno kompenzovat tzv. kompenzačním momentem. Při běžných řešeních se zanedbává.

Výpočty silových poměrů byly provedeny v MS Excel. Protože velikost silových účinků závisí na úhlu natočení kliky, budou zde uvedeny pouze použité výpočtové vztahy a příslušné grafy.

Na následujícím obrázku je znázorněna orientace kinematických veličin a silových účinků pro čtyři různá natočení kliky α . Setrvačná síla vždy působí proti smyslu zrychlení. Třecí síla působí proti smyslu pohybu. Při výpočtu je nutné zavést kladné smysly jednotlivých veličin a ty respektovat. Vypočtené záporné hodnoty pak značí, že skutečný smysl je opačný než zvolený.



Obrázek 29 - Orientace kinematických a silových veličin pro 4 různá natočení kliky

Celková posuvná hmotnost mechanismu je rovna součtu dílčích posuvných hmotností. Mezi posuvné hmotnosti řadíme čtyři ramena, křížák a posuvnou hmotnost ojnice.

$$m_{pc} = m_{rc} + m_k + m_{po} \quad (20)$$

Tabulka 6 - Posuvné hmotnosti

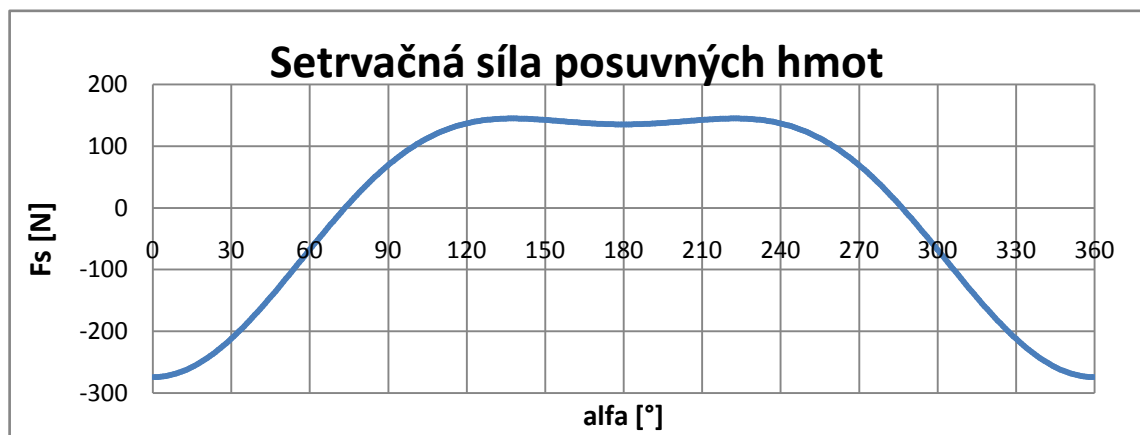
Celková hmotnost ramen m_{rc} [kg]	27,700
Hmotnost křížáku m_k [kg]	3,364
Hmotnost posuvné hmoty ojnice m_{po} [kg]	0,174
Celková posuvná hmota m_{pc} [kg]	31,238

Pro stanovení setrvačné síly uijeme průběh zrychlení křížáku. Setrvačnou sílu určíme za pomoci vztahu:

$$F_s = - m_{pc} \cdot a \quad (21)$$

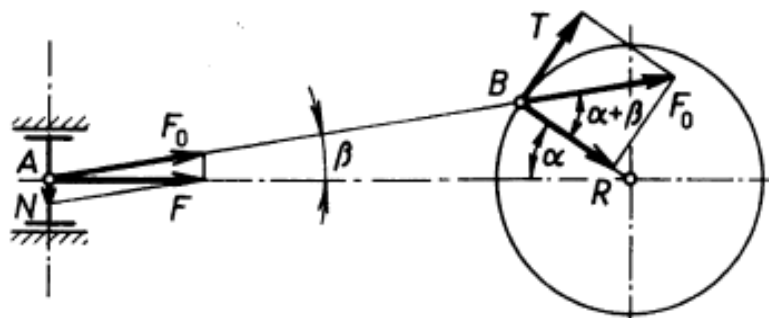
kde m_{pc} je celková posuvná hmotnost

a - zrychlení křížáku.



Obrázek 30 - Setrvačná síla posuvných hmot

Kromě setrvačné síly působí na křížákový čep třecí síla F_{tc} . Na následujícím obrázku je znázorněn silový rozbor klikového mechanismu.



Obrázek 31 - Rozklad síly na křížákový čep [29]

Sílu na křížákový čep F lze rozložit na sílu v ojnici F_o a normálovou sílu N , která působí na vedení. Sílu F_o následně můžeme rozložit na tečnou sílu T a radiální sílu R .

Použité výpočtové vztahy [29]:

$$F_o \approx \frac{F}{\cos\beta} \quad (22)$$

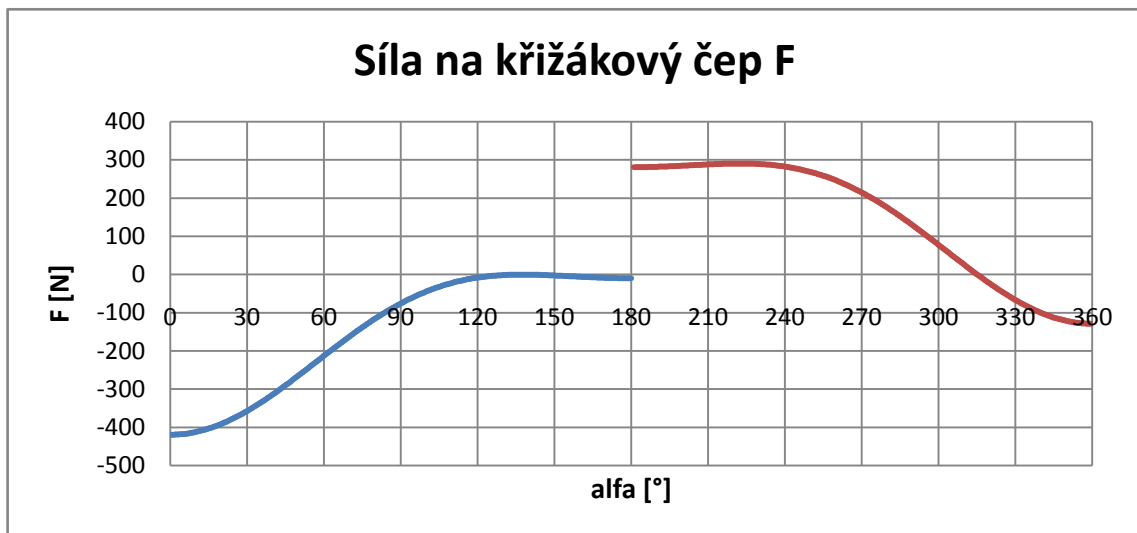
$$\sin\beta = \lambda \cdot \sin\alpha \quad (23)$$

$$N = F \cdot \tan\beta \quad (24)$$

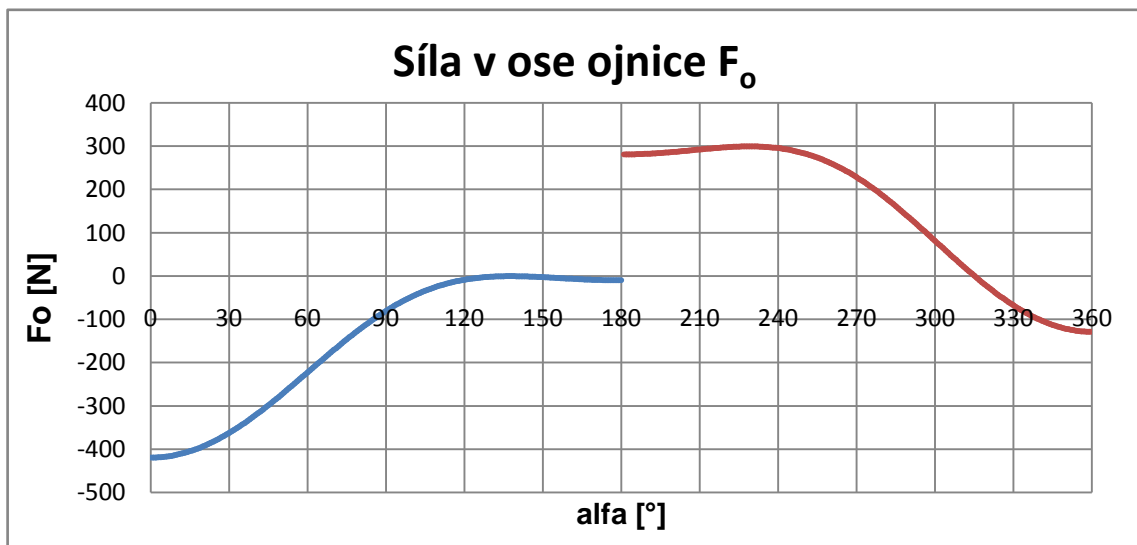
$$T = F_o \cdot \sin(\alpha + \beta) \quad (25)$$

$$R = F_o \cdot \cos(\alpha + \beta) \quad (26)$$

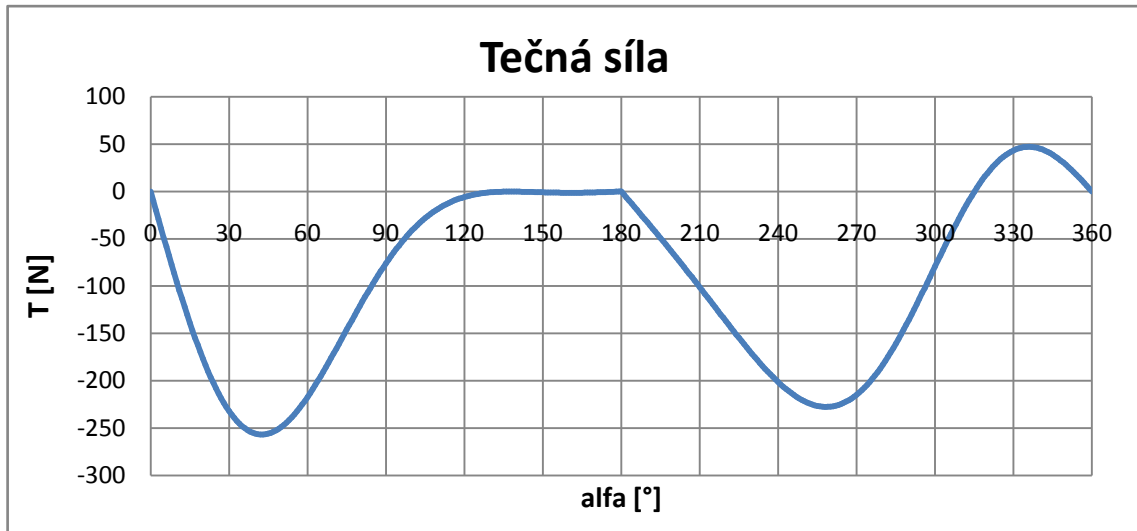
Síla na křížákový čep F je dána superpozicí třecí síly F_t a setrvačné síly F_s .



Obrázek 32 - Síla na křížákový čep

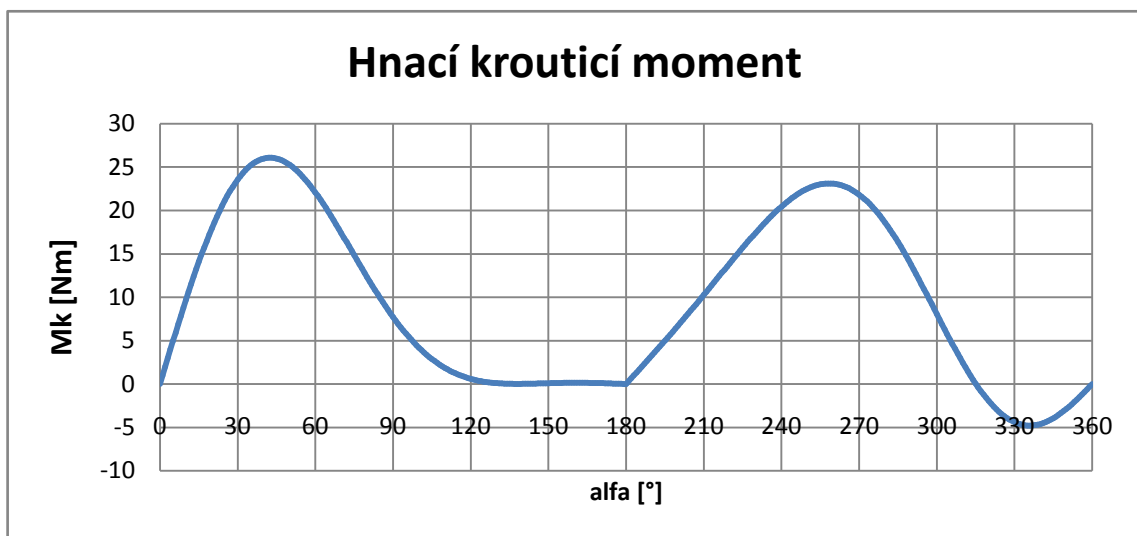


Obrázek 33 - Síla v ose ojnice



Obrázek 34 - Tečná síla

Na základě znalosti průběhu tečné síly na klice určíme průběh hnacího krouticího momentu na klice, který je potřebný pro silovou rovnováhu mechanismu. Hnací krouticí moment získáme jako záporně vzatý součin tečné síly a poloměru kliky.



Obrázek 35 - Hnací krouticí moment

Zmíňme zde ještě skutečnost, že ve výpočtu jsme neuvažovali tření v lineárním vedení a ložiskách ojnice. U lineárního vedení výrobci udávají, že součinitel tření se pohybuje v řádech tisícín. Nepřesnost, které se dopustíme, je kompenzována již zmíněnou volbou součinitele tření mezi podložkou a vzorkem. Na základě výpočtu volíme kuželočelní elektropřevodovku od firmy Varvel.

Tabulka 7 - Specifikace elektropřevodovky Varvel

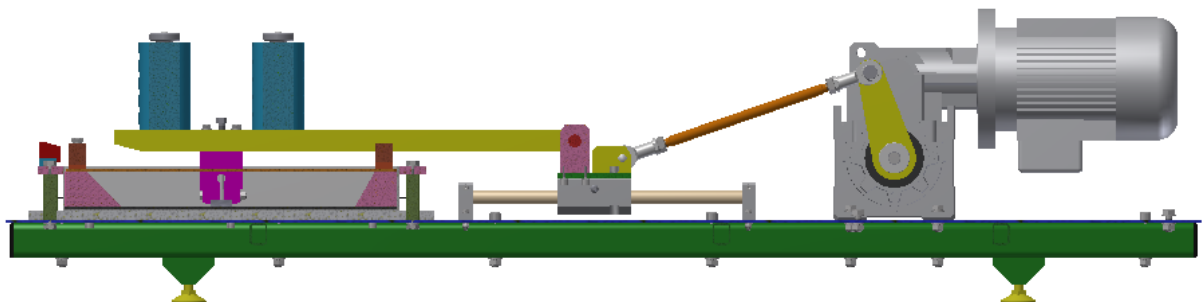
Označení elektropřevodovky Varvel	M RV 13 B3 H1 18,25 71 B5 AS 25X45 RH MT 0.25 kW 71 A4 B5 X1	
Typ		RV - kuželočelní převodovka
Převodový poměr i		18,25
Vstupní otáčky	[ot/min]	1400
Výstupní otáčky	[ot/min]	76,71
Výstupní moment	[Nm]	29,26
Servisní faktor		4,6
Účinnost		0,94
Moment setrvačnosti	[kgm ²]	0,8868
Výkon elektromotoru	[kW]	0,25
Počet pólů		4

8.2.5 Popis vlastní konstrukce

Následující text této kapitoly bude věnován popisu konstrukčního řešení.

8.2.5.1 Sestava ramene

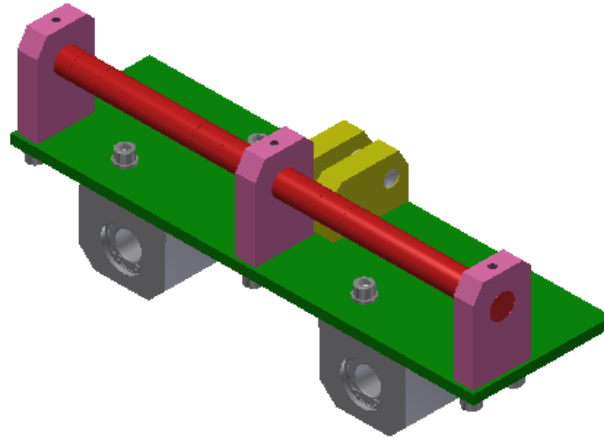
Sestava ramene (viz obr. 28) je tvořena ramenem, držákem vzorku a závažím, které přitlačuje vzorek k pryžové podložce požadovanou silou. Závaží je tvořeno několika kotouči, které se nasouvají na závrtné šrouby a následně se zajistí pomocí rýhovaných matic. Na konci ramene je proveden úkos, který slouží k nadzdvžení ramen v zadní úvrati.



Obrázek 36 - Detail zařízení v řezu

8.2.5.2 Křížák

Křížák sestává z desky, která je přišroubována ke dvěma tandemovým linear-setům s kuličkovými pouzdry. Linear-sety se pohybují po dvou vodících tyčích. K desce jsou dále připevněna dvě oka pro kolíkový spoj a tři držáky tyče. Na tyči jsou otočně uložena čtyři ramena. Posuv ramen ve směru osy tyče je zamezen pojistnými kroužky Seeger. Tyč pro uložení ramen je zajištěna třemi stavěcími šrouby.



Obrázek 37 - Křížák

Nyní provedeme kontrolu kuličkových pouzder s označením SDE-16. Síla, kterou působí křížák na vedení je dána superpozicí tíhy křížáku, reakce ramen R_{rc} a normálové síly N , která vznikne rozkladem síly F na křížákový čep. Maximální hodnota je přibližně 80 N. Při znalosti působící síly je možné stanovit životnost pouzdra v metrech L_m . Výpočetní vztah včetně hodnot potřebných koeficientů lze nalézt v technické dokumentaci poskytované dodavatelem [30]. Velikost přitlačné síly se během otáčky mění. Pro jednoduchost uvažujme konstantní zatížení $P = 20$ N (každé pouzdro přenáší čtvrtinu přitlačné síly).

$$L_m = \left(\frac{C_d}{P} \cdot K_Q \cdot K_S \right)^3 \cdot 10^5 = \left(\frac{686}{20} \cdot 1 \cdot 1 \right)^3 \cdot 10^5 = 4 \cdot 10^9 \text{ m} \quad (27)$$

kde C_d je dynamická únosnost pouzdra

K_Q - koeficient směru zatížení

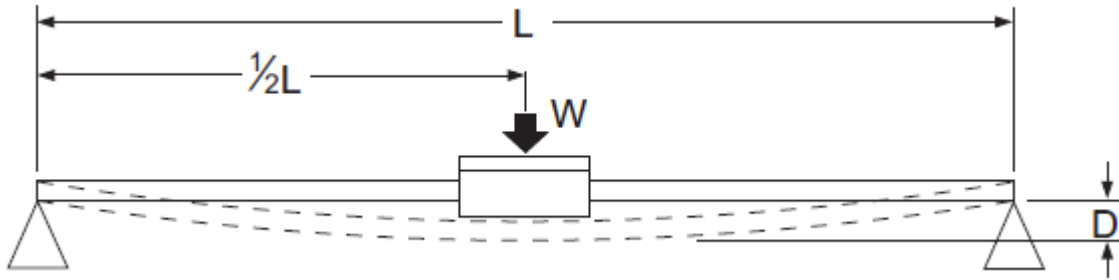
K_S - koeficient tvrdosti tyčí

Při jmenovitých otáčkách elektromotoru se vzorek pohybuje rychlostí $c = 1870$ m/hod. Životnost pouzdra v hodinách L_h lze stanovit vztahem:

$$L_h = \frac{L_m}{c} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ h} \quad (28)$$

8.2.5.3 Vedení křížáku

U lineárního vedení provedeme kontrolu tuhosti. Maximální doporučený průhyb by neměl překročit hodnotu 0,5 mm. Stanovíme proto sílu, která způsobí průhyb o této hodnotě, a porovnáme ji se silou působící na křížák. Průměr tyčí je 16 mm. Největší průhyb při konstantním zatížení nastane tehdy, když se linear-set nachází na středu tyče.



Obrázek 38 - Průhyb vodící tyče [30]

Sílu W potřebnou pro průhyb tyče D o 0,5 mm stanovíme pomocí vztahu:

$$W = \frac{D \cdot 48 \cdot EI}{L^3} = \frac{0,5 \cdot 48 \cdot 612,6 \cdot 10^6}{324^3} = 432 \text{ N} \quad (29)$$

kde E je Youngův modul

I - kvadratický moment průřezu

L - délka vedení

Vypočtená hodnota odpovídá maximální přípustné síle na jednu vodící tyč z hlediska doporučené deformace. Křížák se pohybuje po dvou vodících tyčích a proto je přípustné zatížení křížáku rovno dvojnásobku vypočtené hodnoty. Skutečné zatížení dosahuje hodnoty pouze 80 N. Lze proto konstatovat, že vedení je dostatečně tuhé.

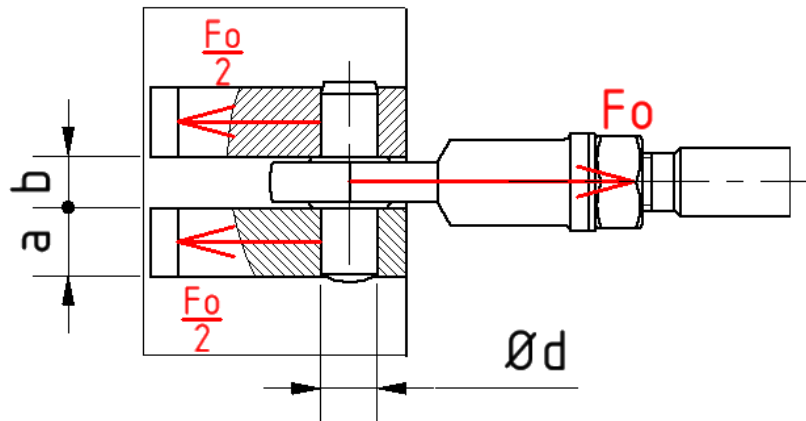
8.2.5.3 Ojnice

Ke křížáku je pomocí kolíkového spoje připojena ojnice. Dřík ojnice je tvořen tyčí se závitovými konci. Na závitových koncích jsou našroubovány kloubové hlavy a matice sloužící k předepnutí spoje.



Obrázek 39 - Ojnice

Nyní provedeme kontrolu kolíkového spoje. Maximální síla v ose ojnice $F_{max} = 420 \text{ N}$. Průměr kolíku d je 10 mm.



Obrázek 40 - Kolíkový spoj

Kolík je namáhán na střih. Smykové napětí τ v kolíku se stanoví pomocí vztahu:

$$\tau = \frac{F_{omax}}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{2 \cdot 420}{\pi \cdot 10^2} = 2,67 \frac{N}{mm^2} \quad (30)$$

Dále provedeme kontrolu tlaku v oku p_o . Šířku oka označme a .

$$p_o = \frac{F_{omax}}{2 \cdot d \cdot a} = \frac{420}{2 \cdot 10 \cdot 12} = 1,75 \frac{N}{mm^2} \quad (31)$$

Dovolené hodnoty smykového napětí a měrného tlaku se u běžných konstrukčních materiálů pohybují okolo 70 N/mm^2 . Vypočtené hodnoty smykového napětí a měrného tlaku v oku jsou oproti dovoleným hodnotám velmi nízké a spoj tak s velkou rezervou vyhovuje. Obdobným způsobem lze zkontrolovat i spoj mezi ojnicí a klikou.

Ojniční dřík je vystaven střídavé tahové a tlakové osové síle, ohybu od setrvačných sil hmot ojnice a ohybu od vlastní tíhy. Vzhledem k nízké hmotnosti a nízké hodnotě zrychlení zkontrolujeme ojnici pouze na vzpěr.

Dřík se kontroluje v rovině kyvu (≈ 2 . případ vzpěru) a v rovině kolmé na rovinu kyvu (≈ 4 . případ vzpěru) [29]. Dřík ojnice je kruhová tyč o průměru $d_o = 12 \text{ mm}$. Díky kruhovému průřezu platí pro poloměr setrvačnosti i jednoduchý vztah:

$$i = \frac{d_o}{4} = \frac{12}{4} = 3 \text{ mm} \quad (32)$$

Protože je štíhlostní poměr i poloměr setrvačnosti v obou rovinách stejný, stačí se zabývat pouze 2. případem vzpěrné pevnosti, pro který vychází kritická vzpěrná síla nižší než pro 4. případ.

Štíhlost prutu λ je dána vzorcem:

$$\lambda = \frac{l_o}{i} = \frac{300}{3} = 100 [-] \quad (33)$$

Pro štíhlostní poměr < 105 (\approx mezní štíhlost λ_m) bude proveden výpočet kritického napětí dle Tetmajera [29].

$$\sigma_T = \sigma_K \cdot \frac{\sigma_K - \sigma_U}{\lambda_m - 40} \cdot (\lambda - 40) = 235 \cdot \frac{235 - 188}{105 - 40} \cdot (100 - 40) = 191,61 \frac{N}{mm^2} \quad (34)$$

σ_T je kritická napětí podle Tetmajera, σ_K je mez kluzu a σ_U je mez úměrnosti. Uvažovaným materiálem dřívku je ocel ČSN 11 373 s mezí kluzu $235 \frac{N}{mm^2}$. Pro ocel o nižší pevnosti lze uvažovat hodnotu meze úměrnosti $188 \frac{N}{mm^2}$ [31].

Maximální tlaková síla v ojnici $F_{o_max}^d = 300 N$.

Pro součinitel bezpečnosti ve vzpěru k_v platí vztah:

$$k_v = \frac{\sigma_T}{\sigma_d} = \frac{\sigma_T}{\frac{4 \cdot F_{o_max}^d}{\pi \cdot d_o^2}} = \frac{191,61}{\frac{4 \cdot 300}{\pi \cdot 12^2}} = 72,41 [-] \quad (35)$$

kde σ_d je napětí ve dřívku ojnice od tlakové osové síly.

Hodnota součinitele bezpečnosti musí být větší než minimální hodnota bezpečnosti, kterou lze stanovit dosazením do vzorce [31]:

$$k_{v_min} = 1,75 \cdot \left(1 + \frac{\lambda - 40}{\lambda_m - 40} \right) = 1,75 \cdot \left(1 + \frac{100 - 40}{105 - 40} \right) = 3,37 [-] \quad (36)$$

Z kontroly je patrné, že ojnice dané zatížení bez problémů přenesou.

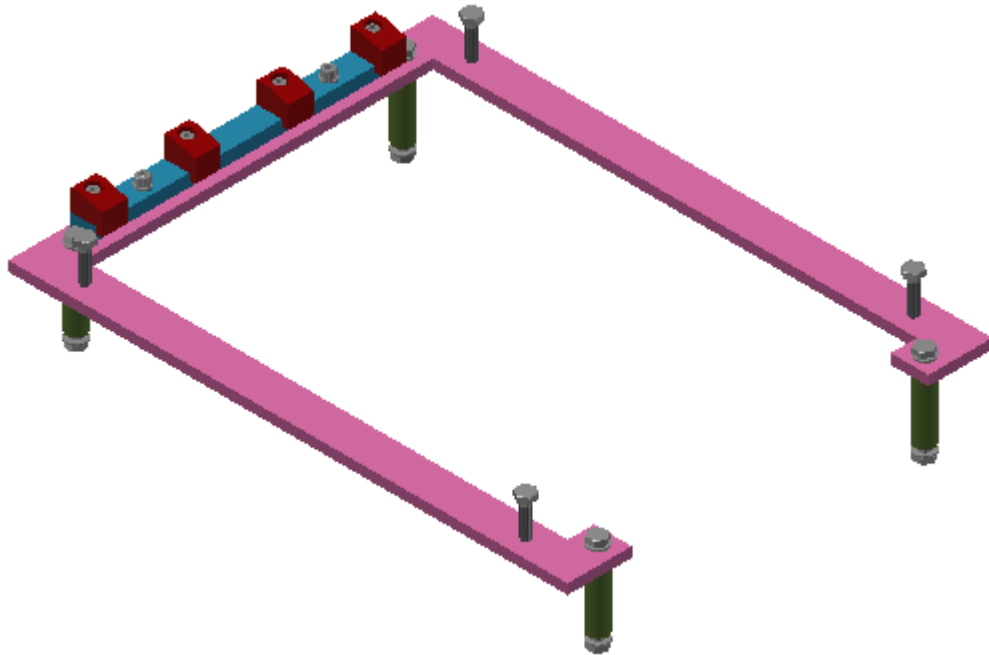
Kroužky kloubové hlavy konají vůči sobě kývavý pohyb. U ložiska proto můžeme provést kontrolu statické bezpečnosti. Vzhledem k vysoké statické únosnosti ložiska $C_o = 13\,600 N$ a relativně nízkému zatížení $F_{o_max} = 420 N$, dostáváme velmi vysokou hodnotu koeficientu statické bezpečnosti s_o .

$$s_o = \frac{C_o}{F_{o_max}} = \frac{13600}{420} = 32 [-] \quad (37)$$

8.2.5.2 Konzola

Konzola sestává z plechu ve tvaru písmene U a čtyř noh se závitovými děrami pro uchycení k základní desce. K plechu je pomocí dvou šroubů připevněna čtvercová tyč, ke které jsou přišroubovány čtyři vačky. Vačky slouží k nadzdvížení ramen, aby se zajistila obměna abrazivních částic pod třecí plochou vzorku. Ve

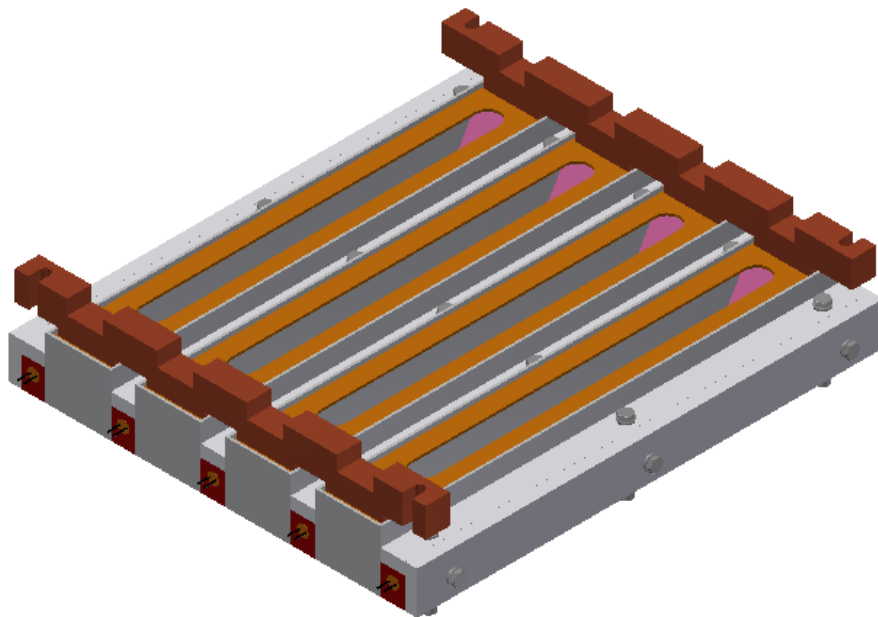
čtvercové tyči jsou zhotoveny oválné díry, díky nimž je umožněn posuv tyče pro nastavení výšky zdvihu vzorku, která by měla být alespoň 1 mm.



Obrázek 41 - Konzola

8.2.5.3 Pracovní blok

Na následujícím obrázku je vyobrazen pracovní blok. Pracovní blok je tvořen sadou vaniček, pryžových podložek, přídržných bloků, vík (zábran rozstříku), dále pak topnými patronami, jejich pouzdry a přídržnými lištami.

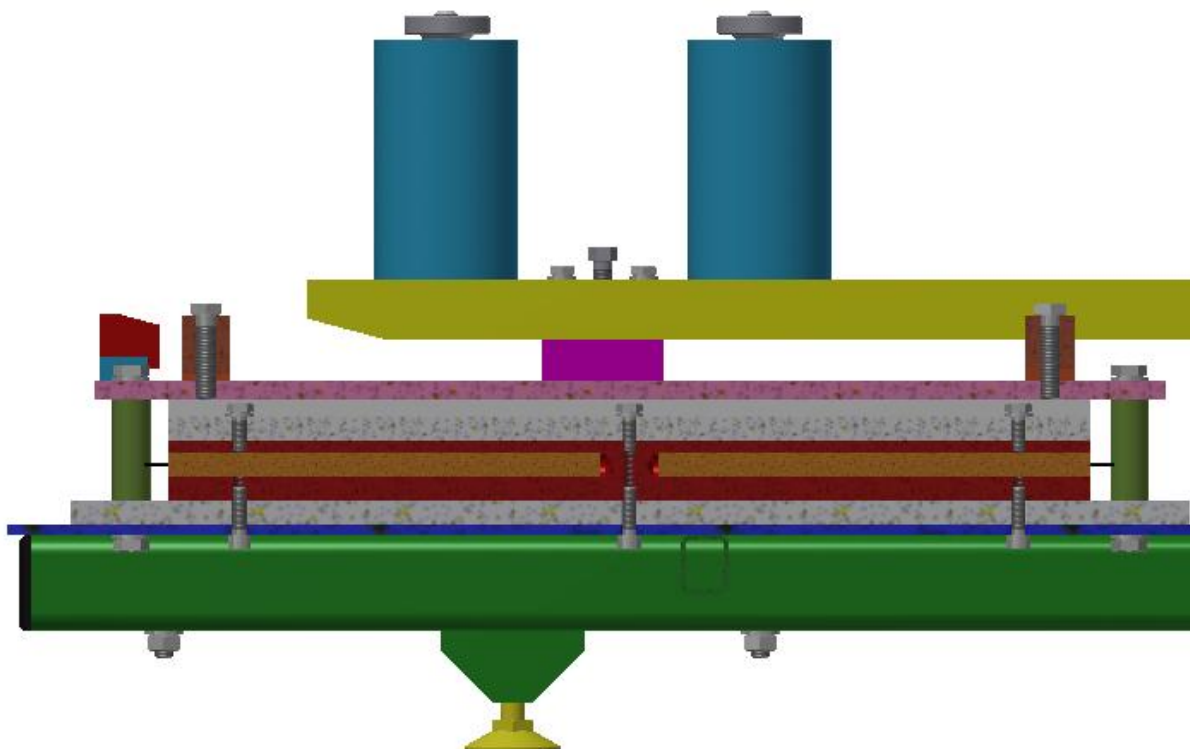


Obrázek 42 - Sestava pracovního bloku

Testování vzorků bude probíhat za zvýšené teploty. Ohřev vaniček je realizován pomocí topných patron, které se vkládají do pouzder s vystruženými

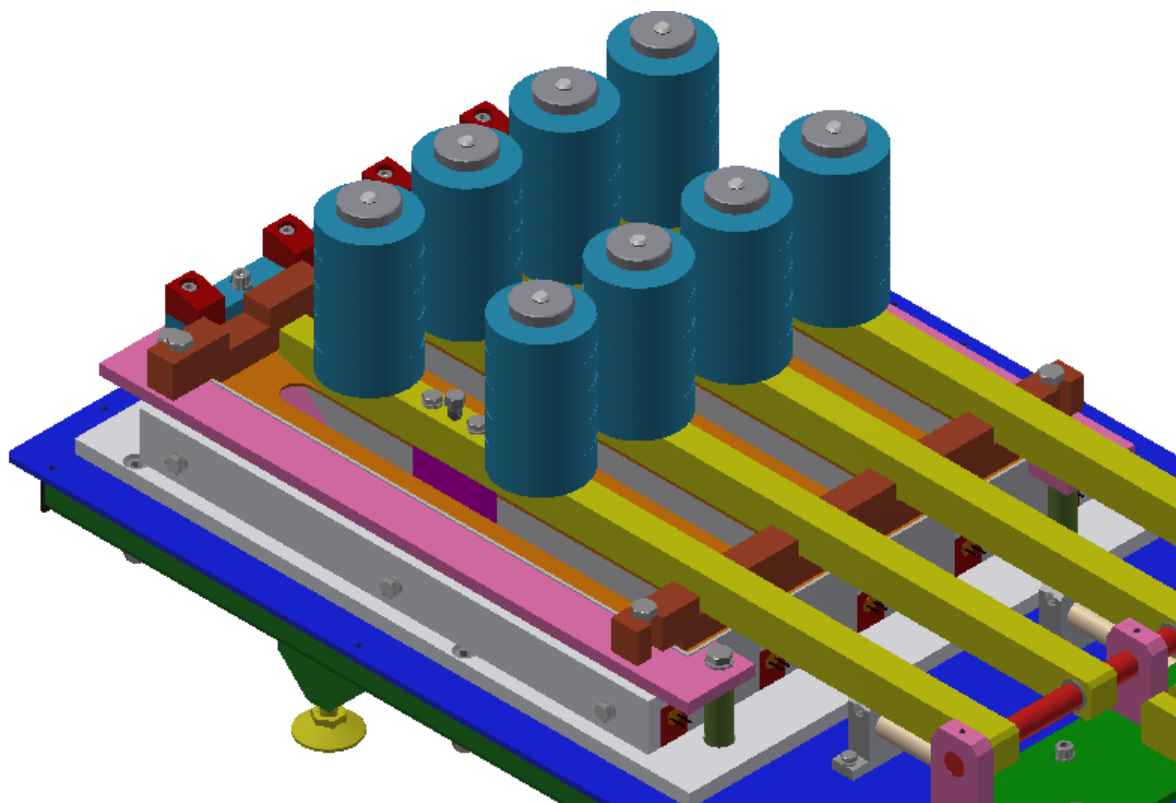
děrami. Protože na dnech vaniček je umístěna pryžová podložka, která by v případě spodního ohřevu ztěžovala prostup tepla, jsou pouzdra s topnými tělesy umístěna z boku vaniček.

Aby se snížily tepelné ztráty a teplo přecházelo z topných patron primárně do vaniček, jsou vaničky včetně pouzder umístěny na izolační desce. Izolací jsou opatřeny i ty plochy pouzder, které nejsou ve styku s vaničkami, čímž se usměrní tok tepelné energie.

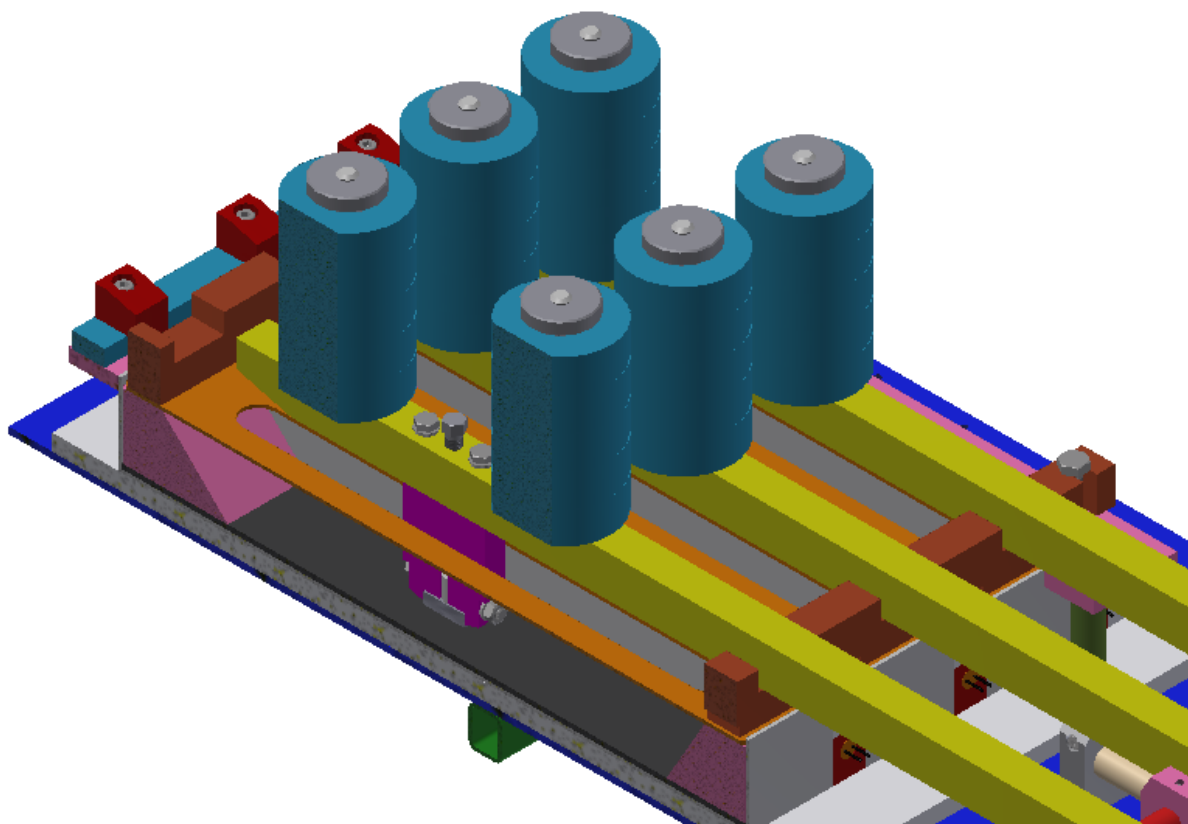


Obrázek 43 - Upevnění pouzder topných patron

Pouzdra patron jsou připevněna k základní desce pomocí šroubů. Vaničky se vkládají mezi jednotlivá pouzdra a k ustavení jejich polohy slouží plech konzoly, který plní funkci dorazu. Pohyb vaniček je zamezen třecími silami mezi vaničkami a deskou, na které jsou vaničky loženy. Potřebná přítlačná síla se vyvozuje utažením šroubů. Přítlačná síla se přenáší prostřednictvím přítlačné lišty, víka, přídržného bloku, pryžové podložky a dna vaničky. Tímto způsobem uchycení dojde současně i k přidržení pryžové podložky. Její deformace současně zajistí dosednutí přítlačné lišty na všechny přítlačné bloky.



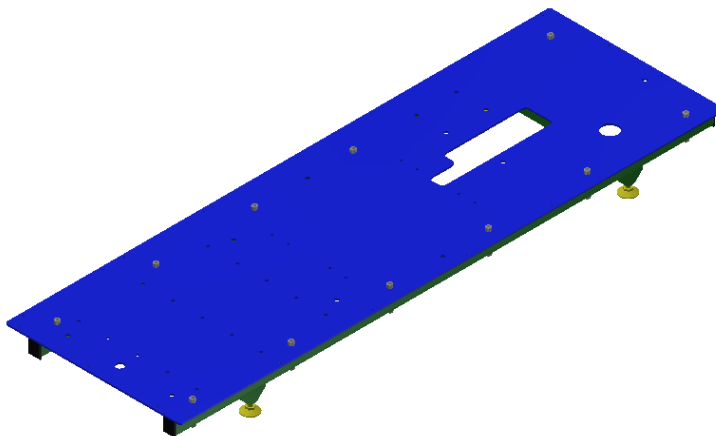
Obrázek 44 - Detail pracovní části zařízení



Obrázek 45 - Řez pracovní části zařízení

8.2.5.4 Podstavec

Podstavec sestává ze základní desky, rámu, víček a stavitelných noh. Rám je svařen ze dvou podélných a tří příčných obdélníkových jechlů. K podélným jechlům jsou dále přivařeny čtyři výpalky pro zašroubování stavitelných noh tak, aby se z manipulačních důvodů spodní strana jecklu nacházela ve výšce 50 mm.

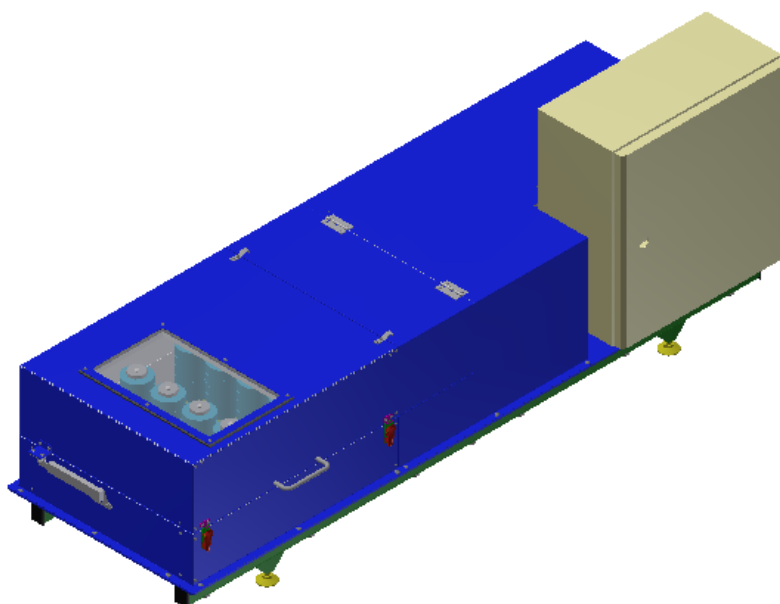


Obrázek 46 - Podstavec

Protože je k podstavci přímo připevněna převodovka, jejíž osová výška je menší než poloměr kliky, bude nutné v základní desce vypálit otvor, který zabrání kolizi.

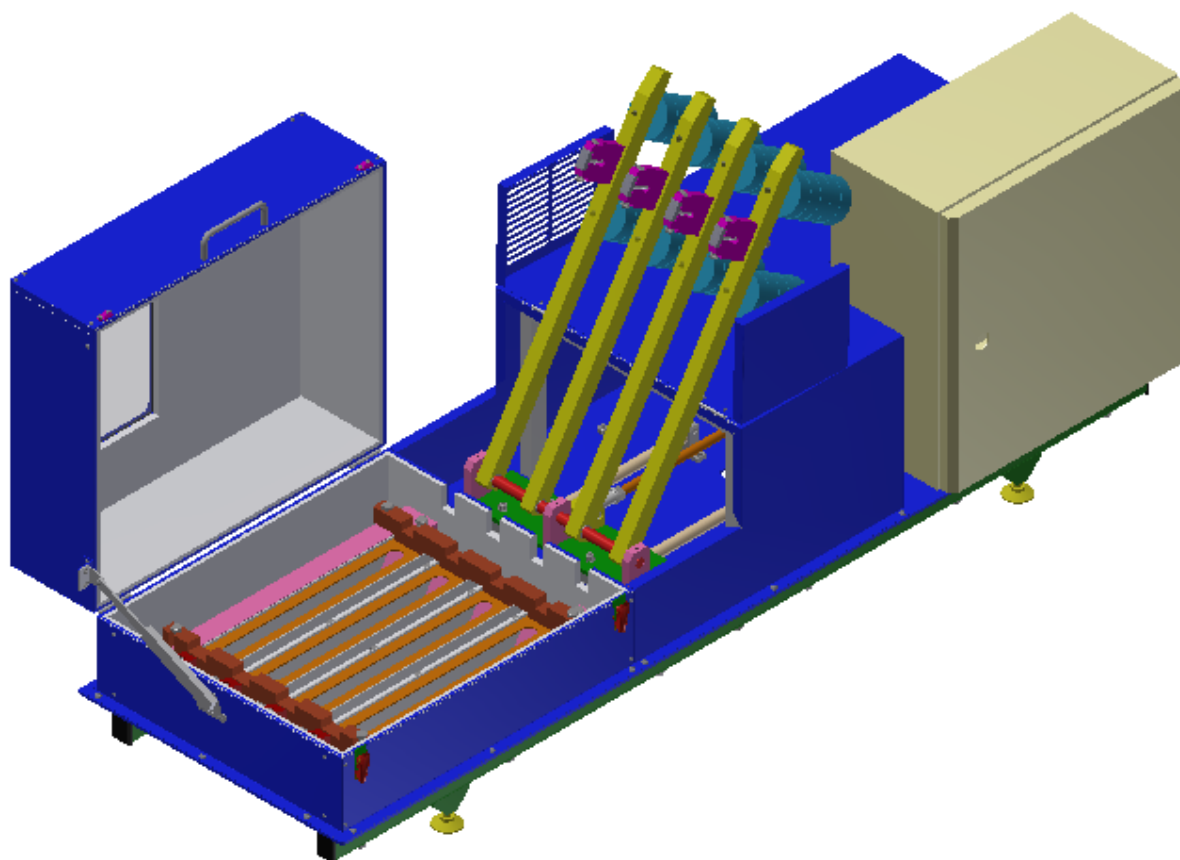
8.2.5.5 Krytování

Zařízení bude opatřeno krytem a to zejména ze dvou důvodů. Prvním z nich je bezpečnost obsluhy. Krytovaním se zamezí přístup k pohyblivým částem mechanismu a sníží se tak riziko případného zranění obsluhy vlivem nepozornosti či nedbalosti. Druhým důvodem je pak snížení tepelných ztrát.



Obrázek 47 - Zakrytované zařízení

Kryt pracovní části je řešen jako dělený. Spodní část krytu je připevněna k základní desce. Horní odklopná část je ke spodní části připevněna pomocí dvou pantů. Při otevření je horní část aretována pomocí podpěry. K plechovému krytu obou částí jsou za účelem snížení tepelných ztrát připevněny izolační desky z Glassthermu HT250. Další odklopnou částí je střední kryt, po jehož vyklopení je možné vyklopit ramena pro montáž či demontáž zkušebního vzorku.



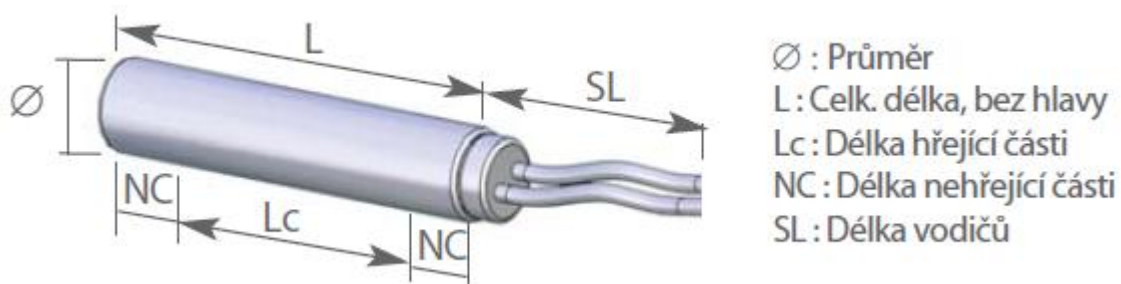
Obrázek 48 - Odklopné kryty

9 Ohřev

9.1 Způsob ohřevu

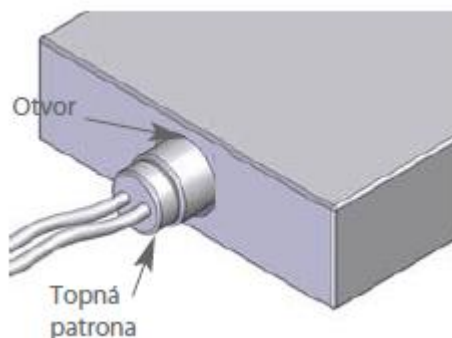
Ohřev bude realizován pomocí topných patron. Patrony se běžně užívají pro ohřev při zpracování plastů, tváření, u balících strojů, pro ohřev forem, vtokových soustav, svářecích lišt apod. [32].

Topné patrony pracují na principu tepelné kondukce. Nesmějí být proto používány bez kontaktu s ohřivanou plochou. Doporučená délka otvoru pro topnou patronu se obvykle volí o 2 mm větší, než je délka patrony. Otvor musí být přesný, čistý a s odpovídající kvalitou povrchu. Doporučená tolerance díry je H7, které se prakticky dosáhne vystružením. Do otvoru nesmějí být v žádném případě zasunuty napájecí vodiče. Pro snadnější montáž, demontáž a lepší přestup tepla se užívají montážní teplosměnné pasty [32,33].



Obrázek 49 - Topná patrona a její rozměry [32]

Výrobou topných patron se v České republice zabývá např. firma ELKOP Technik s.r.o., která zhotoví topné těleso na základě zvolených rozměrů, výkonu a napětí. Plášť topných patron je vyráběn z mosazi nebo z nerezů, který je určen pro měrný výkon až 30 W/cm². Měrný výkon se obvykle volí nižší, což zajistí delší životnost patron [33].

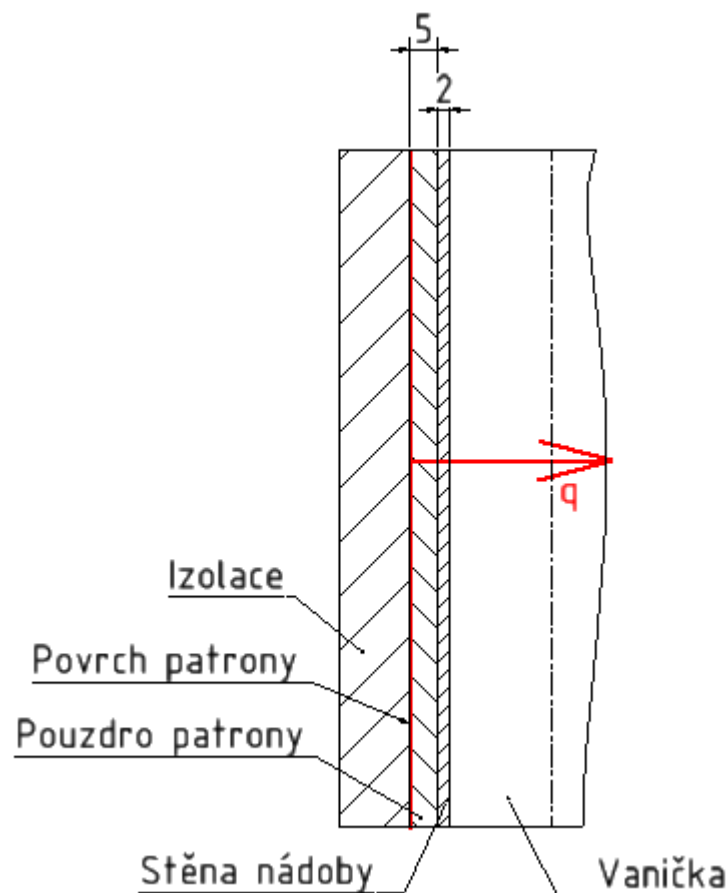


Obrázek 50- Nainstalovaná patrona [32]

9.2. Výpočet doby ohřevu

Teplo z topné patrony prostupuje do tekutiny skrze pouzdro a stěnu vaničky. Ocel je velice dobrý vodič, který klade prostupu tepla velmi malý odpor. Jinak je tomu však na rozhraní oleje se stěnou vaničky. Protože je na dnu vaničky umístěna pryžová podložka, jejíž pracovní teplota je stanovena na 200 °C (krátkodobě až 300 °C), nesmí teplota stěny tuto teplotu překročit.

Topná patrona je zdrojem konstantního tepelného toku. Velikostí teplosměnné plochy je určena hodnota hustoty tepelného toku q .



Obrázek 51 - Výpočtový model prostupu tepla

Tepelný tok \dot{Q} je definován vztahem [34]:

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (38)$$

kde k je součinitel prostupu tepla stěnou, S je teplosměnná plocha a Δt je teplotní diference.

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}} \quad (39)$$

Tabulka 8 - Význam jednotlivých symbolů

δ_1 - tloušťka pouzdra patrony [m]	0,005
λ_1 - součinitel tepelné vodivosti pouzdra (ocel) [W/m·K]	50
δ_2 - tloušťka stěny vaničky [m]	0,002
λ_2 - součinitel tepelné vodivosti vaničky (nerezová ocel) [W/m·K]	15
α - součinitel přenosu tepla [W/m ² ·K]	-

Součinitel přenosu tepla α závisí na všech proměnných, které ovlivňují proudění v okolí stěny, a určuje se z kritériálních rovnic.

K určení součinitele přenosu tepla je třeba vypočítat Prandtlovo, Grashofovo a Nusseltovo číslo.

$$Pr = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_{tek}} \quad (40)$$

$$Gr = \frac{\gamma \cdot g \cdot \Delta t \cdot L_{char}^3}{\nu^2} \quad (41)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda_{tek}} \quad (42)$$

Význam jednotlivých symbolů je uveden následující tabulce. Kapalinou uvažovanou ve výpočtu je řepkový olej.

Tabulka 9 - Hodnoty veličin pro výpočet součinitele prostupu tepla [35]

Teplota stěny [°C]	200
Teplota oleje [°C]	150
Rozdíl teplot Δt [°C]	50
Součinitel objemové roztažnosti γ [1/K]	0,0008
Gravitační zrychlení g [m/s ²]	9,81
Charakteristický rozměr L [m] (výška stěny)	0,018
Kinematická viskozita ν [m ² /s]	0,00000354
Tepelná kapacita oleje c_p [J/kg·K]	2278
Hustota oleje ρ [kg/m ³]	825,9
Dynamická viskozita oleje η [Pa·s]	0,002927
λ_{tek} - součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]	0,162

Dosazením do výše uvedených vztahů získáme následující hodnoty:

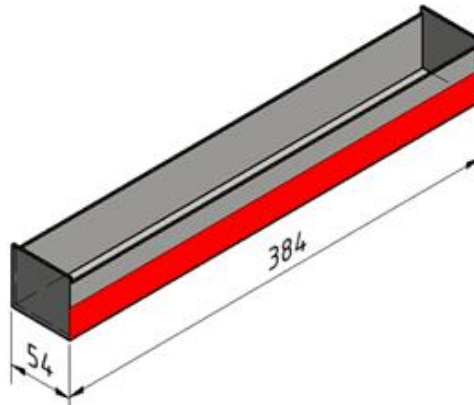
Tabulka 10 - Vypočtené hodnoty

Pr [-]	41
Gr [-]	182203
Gr · Pr [-]	7499243
$Nu = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$ [-]	28
α [W/m ² ·K]	254

Skutečná hodnota součinitele prostupu tepla bude záviset na druhu použitého oleje a jeho vlastnostech.

Při znalosti součinitele prostupu tepla α je možné určit součinitel prostupu tepla stěnou k .

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}} = \frac{1}{\frac{0,005}{50} + \frac{0,002}{15} + \frac{1}{254}} = 240 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (43)$$



Obrázek 52 - Teplosměnná plocha vaničky

Jako teplosměnnou plochu jednoho boku vaničky uvažujeme pás o rozměrech 384x18 mm (tato plocha je z vnitřní strany omočena olejem). Teplosměnná plocha jedné vaničky je rovna dvojnásobku. Celková teplosměnná plocha S je dána součtem ploch čtyř vaniček.

$$S = 4 \cdot 2 \cdot 0,018 \cdot 0,384 = 0,055 \text{ m}^2 \quad (44)$$

Celkový výkon topných patron vypočteme ze vztahu:

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta t = 240 \cdot 0,055 \cdot 50 = 663 \text{ W} \quad (45)$$

Výkon topných patron volíme 600 W.

Při znalosti výkonu topných patron provedeme orientační výpočet doby ohřevu při zanedbání ztrát. Stanovíme množství tepla potřebného pro ohřev pouzder, vaniček, pryžové podložky, přídržných bloků a oleje.

Tabulka 11 - Vstupní hodnoty pro výpočet doby ohřevu

Výkon topných patron P [W]	600
Hmotnost přídržných bloků, patron a pouzder a vaniček m_o [kg]	16,413
Hmotnost oleje m_{ol} [kg]	0,6
Hmotnost pryžových podložek m_{pod} [kg]	0,212
Měrná tepelná kapacita oceli c_o [J/kg·K]	450
Měrná tepelná kapacita oleje c_{ol} [J/kg·K]	2 000
Měrná tepelná kapacita podložek c_{pod} [J/kg·K]	1420

Teplota okolí t_{ok} [°C]	20
Maximální teplota t_{max} [°C]	150
Maximální rozdíl teplot Δt [°C]	130

Tepelná kapacita C je definována vztahem:

$$C = \frac{\delta Q}{dt} \quad (46)$$

kde δQ je elementární teplo, které je nutno dodat pro zahřátí tělesa o 1 °C a dt je elementární změna teploty. Pokud tepelnou kapacitu podělíme hmotností, získáme měrnou tepelnou kapacitu, která představuje teplo, které je nutno dodat 1 kg látky pro zvýšení teploty o 1° C [36].

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\delta Q}{m \cdot dt} \quad (47)$$

Maximální uvažovaná testovací teplota je 150 °C. Pro zahřátí na tuto teplotu je potřeba dodat teplo:

$$Q = m_o \cdot c_o \cdot \Delta t + m_{ol} \cdot c_{ol} \cdot \Delta t + m_{pod} \cdot c_{pod} \cdot \Delta t = 16,413 \cdot 450 \cdot 130 + \\ + 0,6 \cdot 2000 \cdot 130 + 0,212 \cdot 1420 \cdot 130 = 1,155 \text{ MJ} \quad (48)$$

Čas T potřebný pro ohřev určíme pomocí vztahu:

$$T = \frac{Q}{P} = \frac{1,155 \cdot 10^6}{600} = 1925 \text{ s} \cong 32 \text{ min} \quad (49)$$

kde P je celkový výkon patron. Skutečná doba ohřevu bude samozřejmě kvůli tepelným ztrátám delší.

9.3 Regulace teploty

Pro řízení teploty se užívají regulátory teploty a polovodičové spínače. Regulátory teploty jsou analogové nebo digitální. Provedení může být stolové nebo pro zabudování do panelu. Typ regulace je většinou ON/OFF nebo PID. Vstupem regulátorů bývá nejčastěji termočlánek nebo odporové čidlo PT100. Teplotní čidla se obvykle umísťují v blízkosti patron. Výrobci však nabízí i patроны se zabudovaným termočlánekem, který snímá teplotu uprostřed topného jádra nebo u pláště [32]. V případě testovacího zařízení je vhodné instalovat termočlánek na přídržný blok umístěný ve vaničce, aby bylo možné měřit přímo teplotu suspenze.



Obrázek 53 - Regulátor teploty [32]

9.4 Testování za zvýšené teploty

S testováním za zvýšené teploty souvisí i volba vhodných materiálů. Zatímco u standardních zařízení, které pracují za normálních teplot, jsou vaničky včetně přídržných bloků a držáku vzorku vyrobeny z plastu, u námi navrhovaného zařízení budou tyto komponenty vyrobeny z nerezové oceli.

Na dno vaničky se umísťuje pryžová podložka. V normě [14] je přímo zmíněn materiál MIL-R-6855C, Class 2, Grade 80. Maximální přípustná teplota je 225 °F což odpovídá teplotě 107 °C. Daný materiál nelze proto použít. Užijeme proto fluorkaučukovou pryž FPM 80 (Viton), která je jednak vhodná pro vysoké teploty, má vynikající odolnost proti olejům a zároveň má i požadovanou tvrdost 80 ShA. Teplotní odolnost je až 250 °C [37]. Tloušťka pryže je 3 mm.

Při stanovení maximální testovací teploty je třeba mít na paměti tzv. teplotu rozkladu oleje (smoking point). Při dosažení teploty rozkladu dochází ke tvorbě plynů a vedlejších produktů. Rozklad je doprovázen nepříjemným štiplavým zápachem. Vyšší teploty snáze snášejí rafinované oleje, které mají často oproti olejům nerafinovaným teplotu rozkladu často až dvojnásobně vyšší [38].

Tabulka 12 - Teploty rozkladu vybraných olejů [38]

Olej	Teplota rozkladu [°C]
Nerafinovaný řepkový	107
Nerafinovaný slunečnicový	107
Nerafinovaný sójový	107
Rafinovaný řepkový olej	204
Rafinovaný slunečnicový	227
Rafinovaný sójový	232

10 Metodika testování

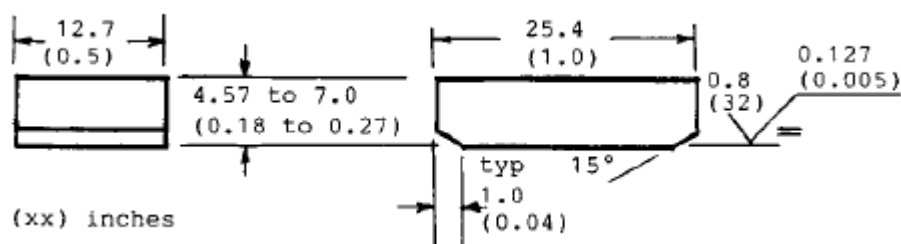
10.1 Referenční materiál

Referenčním materiálem je v případě Millerova testu, který slouží k určení abrazivity suspenze, chromová slitina, která je patentována firmou Wooley Tool and Manufacturing Co. Složení materiálu je uvedeno v následující tabulce:

Tabulka 13 - Chemické složení referenčního materiálu [14]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Fe [%]
2,5	1	0,6	0,25	28	0,3	0,8	zbytek

Materiál je dostupný ve formě odstředivě litých trubek. Popis tepelného zpracování a přípravy vzorku je uveden v normě [14]. Hotové vzorky nabízí například firma Falex Friction and Wear Test Machine.



Obrázek 54 - Rozměry vzorku [14]

10.2 Příprava vzorků

Pro test daného materiálu je třeba vyhotovit dva vzorky. Třecí povrch vzorků je leštěn nebo broušen. Vzorek se doporučuje na boku označit značkou nebo číslem.

Vzorky se demagnetizují, aby se vyloučily chyby při jejich vážení vlivem magnetismu. Minimalizují se tím i magnetické efekty v případě použití abrazivní suspenze s magnetickými kovovými částicemi.

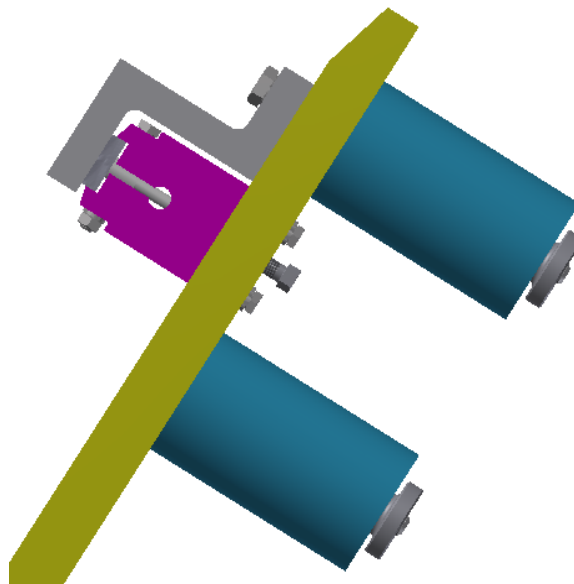
Vzorky se před měřením umyjí vodou s čisticím prostředkem, opláchnou a usuší papírovým ručníkem, který nepouští vlákna (tzv. lint-free). Vzorky se následně ponoří na pět minut do čističe elektroniky s obsahem izopropylalkoholu (izopropanolu). Po opětovném otření papírovým ručníkem se vzorky umístí na pět minut pod tepelnou lampu nebo horkovzdušný ventilátor. Ihned po vychladnutí se vzorky zvaží s přesností na 0,1 mg a naměřené hodnoty se zaznamenají v příslušném protokolu měření.

10.3 Příprava vaniček

Před testováním je třeba vaničky vyčistit, aby se odstranili případné zbytky suspenze po předchozím testování. Poté se do vaniček vloží nové pryžové podložky.

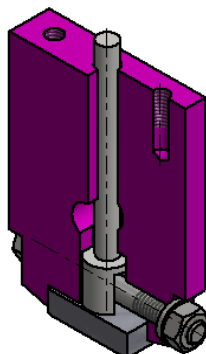
10.4 Montáž vzorku

Pro montáž vzorku je nejprve nutné vyklopit rameno. Vzorek se vloží mezi čelisti držáku tak, aby identifikační značka na boku vzorku směřovala směrem k obsluze. Poté se utáhne svěrný šroub, aby došlo k mírnému sevření vzorku. Pro přesné upnutí se užije montážního přípravku, který se přišroubuje k ramenu.



Obrázek 55 - Montáž vzorku pomocí přípravku

Po připevnění montážního přípravku se třecí plocha vzorku přitlačí na dosedací plochu přípravku utahením nastavovacího šroubu, který na vzorek působí prostřednictvím distanční tyčinky a válečku s vyfrézovanou drážkou. Poté se utáhne svěrný šroub, který vzorek mezi čelistmi pevně sevře. Následně se odejme montážní přípravek a celý postup se opakuje u zbylých ramen.



Obrázek 56 - Princip nastavení výšky vzorku

10.5 Finální kontrola upnutí vzorku

Třecí plocha vzorku se namočí pomocí razítkové podušky. Do vaničky se vloží pásek papíru a provede se obtisk třecí plochy. Při správné montáži se na papíru musí objevit kompletní obtisk.

10.6 Příprava suspenze

K přípravě suspenze by se měli užívat suché pevné částice. Vlhkost částic musí být v rovnováze s atmosférickou vlhkostí. Pevné částice se proto rozprostřou, aby vytvořili tenkou vrstvu, která je vystavena okolní atmosféře po dobu 24 hodin.

K určení Millerova čísla se každá z vaniček plní přibližně 300 g suspenze. Pozornost by se měla věnovat dodržení správné koncentrace. Obvyklá suspenze je tvořena 150 g pevných částic a 150 g tekutiny. Odměřená pevná a kapalná složka by se měla mísit přímo va vaničce.

Při testech pro zjištění SAR čísla je koncentrace pevných částí specifikována uživatelem. Údaje o poměru a složkách se uvedou v protokolu měření.

10.7 Průběh testování

Testování trvá šest hodin v nepřerušovaných dvouhodinových intervalech. Před každým dvouhodinovým cyklem je třeba danou suspenzi z důvodu usazování pevných částic promíchat. Po zahřátí suspenze na požadovanou teplotu a jejím promíchání se ramena sklopí do testovací polohy a po krátké době nutné k prohřátí vzorku se spustí testovací cyklus.

Po každých dvou hodinách se zařízení zastaví, odklopí se ramena, vyjmou se vzorky a následuje čištění, sušení, vážení a záznam dat tak, jak je popsáno v podkapitole 10.2. Poté se vzorky upevní zpět do držáků stejným způsobem jako v podkapitole 10.4 s tím rozdílem, že identifikační značky budou směřovat opačným směrem než v předešlém cyklu. Po skončení zkoušky se změří a zaznamená úbytek tloušťky pryžové podložky, který se zaokrouhlí na 0,01 mm.

10.8 Zpracování naměřených hodnot

K hodnocení odolnosti materiálu vůči abrazivnímu opotřebení se užívá dvou vzorků, u kterých se zaznamenává hmotnostní úbytek. Kumulovaný hmotnostní úbytek lze obecně vyjádřit pomocí rovnice:

$$M = A \cdot t^B \quad (50)$$

kde M je kumulovaný hmotnostní úbytek

t - čas

A, B - aproximační koeficienty

K určení koeficientů se užívá metoda nejmenších čtverců či jiná vhodná aproximační metoda.

Millerovo číslo a SAR číslo jsou úměrné rychlosti hmotnostního opotřebení M_r v čase 2 hodiny. Rychlost opotřebení M_r se udává v jednotkách mg/h.

$$M_r = A \cdot B \cdot t^{(B-1)} \quad (51)$$

Millerovo číslo MN se získá součinem rychlosti hmotnostní opotřebení M_r a koeficientem měřítka (18,18). Aby Millerovo číslo bylo bezrozměrné, je rozměr koeficientu měřítka h/mg.

$$MN = 18,18 \cdot M_r \quad (52)$$

SAR číslo se získá jednoduše násobením Millerova čísla podílem měrných hmotností (MH) referenčního materiálu (7,58) a materiálu vzorku.

$$SAR = MN \cdot \frac{7,58}{MH \text{ vzorku}} \quad (53)$$

11 Závěr

Oba dva cíle stanovené v úvodu diplomové práce byly splněny. V rešeršní části práce byly shrnuty základní pojmy a principy abrazivního opotřebení, byl podán stručný přehled otěruvzdorných povrchových úprav, jimiž lze zvýšit životnost strojních součástí a bylo rovněž pojednáno o experimentálních zařízeních, které se užívají k určení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení. Existuje několik principiálně odlišných zařízení, které lze dle podmínek v oblasti dotyku rozdělit na přístroje s vázanými či volnými abrazivními částicemi. Tato zařízení mají své klady a zápory a užívají se k simulaci rozdílných pracovních podmínek. Normalizované zkoušky opotřebení si nekladou za cíl napodobovat reálné provozní podmínky. Výsledky zkoušek poskytují informaci o odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení při podmínkách stanovených normou. Předpokládá se, že materiály, které vykazaly nejmenší objemové úbytky, budou nejvhodnější i v případě reálné aplikace. Tomu však nemusí být vždy, zvláště pak, pokud se při degradaci strojních součástí uplatňují další degradační mechanismy či jejich kombinace.

V praktické části práce byl proveden návrh testovacího zařízení dle požadavků zadavatele. Při návrhu zařízení jsme vycházeli z normy ASTM G75. Experimentální přístroj umožňuje volbu velikosti přitlačné síly, která činí až 60 N na jeden vzorek, což je přibližně 2,7 krát více než u standardního zařízení. Motor bude řízen pomocí frekvenčního měniče, díky čemuž bude možné volit i testovací rychlost. Námi navržené zařízení dále umožňuje provádět testy za zvýšené teploty. Při návrhu bylo rovněž pamatováno na bezpečnost obsluhy. Vzhledem k velkému množství pohyblivých částí, bylo zařízení opatřeno vhodným krytem. Pracovní část je navíc opatřena izolací, čímž dojde ke snížení tepelných ztrát. V závěru práce je zpracována metodika testování a způsob vyhodnocení naměřených dat. Výsledky zkoušek napomohou konstruktérům při volbě materiálu a vhodných povrchových úprav pro pracovní orgány extrudérů a lisů olejnatých semen.

Zdroje

- [1] LASEK, Stanislav. Základy degradačních procesů. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3373-6.
- [2] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [3] VOCEL, Milan, Vladimír DUFEK. Tření a opotřebenění strojních součástí. Praha: SNTL, 1976.
- [4] BEČKA, Jan. Tribologie. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1997, 212 s. ISBN 80-010-1621-8.
- [5] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. Strojírenské materiály. Praha: SNTL, 1966.
- [6] Opotřebenění materiálů. TRIBOLÓGIA [online]. © 2008 - 2014 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42009/opotrebeni-materialu.html>
- [7] BOHÁČEK, F. a kol.: *Části a mechanismy strojů II. Hřídele, tribologie, ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1987.
- [8] LIŠKA, Jaromír. Degradace strojírenských materiálů opotřebením [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=47171;zp=25174;download_prace=1. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Filípek, CSc.
- [9] ČSN 01 5084. Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebenění na brusném plátně. Praha: Český normalizační institut, 1973.
- [10] ASTM G65-85. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1985.
- [11] TU Clausthal [online]. © 2014 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.tu-clausthal.de/>
- [12] SUCHÁNEK, Jan, Vladimír KUKLÍK a Eva ZDRAVECKÁ. Abrazivní opotřebenění materiálů. Praha: [České vysoké učení technické], 2007, 162 s. ISBN 978-80-01-03659-4.
- [13] ASTM G105-89(1997). Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1997.
- [14] 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.
- [15] Technische Universität Chemnitz [online]. © 2014 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <https://www.tu-chemnitz.de/>
- [16] Otěrůvzdorné povrchové úpravy. Tribologie.cz [online]. 2012 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: http://www.tribologie.cz/dokuments/oteruvzdorne_povrchy_2012/05_suchanek.pdf
- [17] Zvyšování životnosti povrchů laserovým kalením. TRIBOLÓGIA [online]. © 2008 - 2014 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/zvysovani-zivotnosti-povrchu-laserovym-kalenim.html>
- [18] Otěrůvzdorné povlaky vytvářené metodami žárového nástřiku. Tribologie.cz [online]. 2011 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: http://www.tribologie.cz/seminar/seminar%202011/Ing_Sedlacek.pdf
- [19] Böhler Uddeholm [online]. © 2014 [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: <http://www.boehler-uddeholm.cz/>

- [20] CHOTĚBOŘSKÝ, Rostislav, Petr HRABĚ, Miroslav MÜLLER, Miloš JIRKA a Jarmila SAVKOVÁ. Abrasivní opotřebení návarových materiálů na bázi Fe-Cr-C. Časopis Konstrukce: Informace o uplatnění konstrukcí a návazných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství [online]. 2009, č. 1 [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/UserFiles/files/K/2009/abraz_01.pdf
- [21] ESAB Česká Republika [online]. © 2014 [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/>
- [22] MRŇA, Libor. Navařování laserem. Institute of Manufacturing Technology [online]. [2014] [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__navarovani_laserem__mrna.pdf
- [23] Laser cladding. Comas Talleres Mecánicos [online]. [2014] [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: <http://www.tmcomas.com/en/laser-cladding/>
- [24] JIŘÍ STODOLA, Františka Pešlová. Opotřebení strojních součástí: monografie. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 80-723-1552-8.
- [25] SEDLÁČEK, Vladimír. Povrchy a povlaky kovů. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1992, 176 s. ISBN 80-010-0799-5.
- [26] Konstrukce strojů [online]. [2005] [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: <http://konstrukce.webz.cz/>
- [27] UMI - Ústav materiálového inženýrství ČVUT [online]. © 2014 [cit. 2014-12-25]. Dostupné z: <http://umi.fs.cvut.cz/>
- [28] Vyhláška ministerstva zdravotnictví ze dne 19. ledna 2001 o hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmů. In: Sbírka zákonů č. 38/2001. 2001.
- [29] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. 5., přeprac. vyd. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL, 1990, 707 s. Technický průvodce. ISBN 80-03-00426-8.
- [30] Lineární vedení - Matis s.r.o. [online]. © 2015 [cit. 2015-04-6]. Dostupné z: <http://www.matis.cz/>
- [31] ŠVEC, Vladimír. Části a mechanismy strojů: příklady. Vyd. 4. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 121 s. ISBN 978-80-01-04137-6.
- [32] Acim jouanin fabriquant de resistances electriques chauffantes [online]. © 2015 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.acim-jouanin.fr/tcheque/acim%20jouanin%20accueil%20uvod.html>
- [33] ELKOP - VÝROBCE A DODAVATEL TOPNÝCH TĚLES A TOPNÝCH PATRON [online]. ©2010 [cit. 2015-04-6]. Dostupné z: <http://www.elkop.cz>
- [34] NOŽIČKA, Jiří. Základy termomechaniky. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008, 187 s. ISBN 978-80-01-04022-5.
- [35] Vlastnosti řepkového oleje [online]. Česká Skalice: Farmet a.s., 2015 [cit. 2015-06-09].
- [36] ČERNÝ, František, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. Fyzika I. 4., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 174 s. ISBN 978-80-01-04612-8.
- [37] Hydraulické, průmyslové a odsávací hadice | GMS - Most [online]. © 2005 - 2015 [cit. 2015-04-6]. Dostupné z: <http://www.gms-most.cz>
- [38] Teplota rozkladu tuků a olejů. Dadalova kuchařka [online]. © 2015 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://dadala.hyperlinx.cz/mas/masr0008.html>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 - ŘEZ POVRCHOVÝMI VRSTVAMI OBROBENÉ STYKOVÉ PLOCHY [4].....	11
OBRÁZEK 2 - SCHÉMA ZÁKLADNÍCH MECHANISMŮ OPOTŘEBENÍ [4]	12
OBRÁZEK 3 - ČASOVÝ PRŮBĚH OPOTŘEBENÍ [4].....	17
OBRÁZEK 4 - ZJEDNODUŠENÝ MODEL RÝHOVÁNÍ POVRCHU MATERIÁLU ABRAZIVNÍM ZRNEM [3]	18
OBRÁZEK 5 - ODDĚLOVÁNÍ ČÁSTIC Z POVRCHU OPOTŘEBOVÁVANÉ SOUČÁSTI [3]	19
OBRÁZEK 6 - ZÁVISLOST POMĚRNÉHO OPOTŘEBENÍ A POMĚRNÉ ODOLNOSTI PROTI OPOTŘEBENÍ ZKOUŠENÉHO KOVU NA TVRDOSTI ABRAZIVA [3].....	21
OBRÁZEK 7 - ZKOUŠKA OPOTŘEBENÍ NA BRUSNÉM PLÁTĚ [8]	23
OBRÁZEK 8 - ZKOUŠKA OPOTŘEBENÍ V BONDOVÉ PŘÍSTROI [8]	23
OBRÁZEK 9 - ZKOUŠKA OPOTŘEBENÍ V BRUSNÉ NÁDOBĚ [8].....	24
OBRÁZEK 10 - TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ DLE ASTM G65 [11].....	24
OBRÁZEK 11-TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ DLE ASTM G105 [13].....	27
OBRÁZEK 12 - PRINCIP TESTU DLE ASTM G75 [11]	27
OBRÁZEK 13 - APLIKACE ŽÁROVÉHO NÁSTRÍKU A UKÁZKA HOTOVÉ SOUČÁSTI [18].....	32
OBRÁZEK 14 - DOPORUČENÍ NÁVAROVÝCH MATERIÁLŮ [19]	32
OBRÁZEK 15 - LASEROVÉ NAVAŘOVÁNÍ [23].....	33
OBRÁZEK 16 - POROVNÁNÍ ELEKTROCHEMICKÉ UŠLECHTILOSTI A PRŮMĚRNÉ KOROZNÍ ODOLNOSTI KOVŮ [26]	36
OBRÁZEK 17 - FORMY KOROZNÍHO NAPADENÍ [27].....	38
OBRÁZEK 18-ŘEZ ZAŘÍZENÍM [14].....	41
OBRÁZEK 19 - KLIKOVÝ MECHANISMUS [29]	42
OBRÁZEK 20 - KINEMATICKÉ SCHÉMA [29]	42
OBRÁZEK 21 - POSUV KŘÍŽÁKU [29].....	43
OBRÁZEK 22 - RYCHLOST KŘÍŽÁKU [29]	44
OBRÁZEK 23 - ZRYCHLENÍ KŘÍŽÁKU [29].....	44
OBRÁZEK 24 - PRŮBĚH KINEMATICKÝCH VELIČIN OJNICE [29]	45
OBRÁZEK 25 - POLOHA KŘÍŽÁKU V ZÁVISLOSTI NA ÚHLU NATOČENÍ KLIKY (N=76,71 OT/MIN)	46
OBRÁZEK 26- RYCHLOST KŘÍŽÁKU V ZÁVISLOSTI NA ÚHLU NATOČENÍ KLIKY (N=76,71 OT/MIN)	46
OBRÁZEK 27 - ZRYCHLENÍ KŘÍŽÁKU V ZÁVISLOSTI NA ÚHLU NATOČENÍ KLIKY (N=76,71 OT/MIN)	46
OBRÁZEK 28 - SESTAVA RAMENE.....	47
OBRÁZEK 29 - ORIENTACE KINEMATICKÝCH A SILOVÝCH VELIČIN PRO 4 RŮZNÁ NATOČENÍ KLIKY	48
OBRÁZEK 30 - SETRVAČNÁ SÍLA POSUVNÝCH HMOT	49
OBRÁZEK 31 - ROZKLAD SÍLY NA KŘÍŽÁKOVÝ ČEP [29]	49
OBRÁZEK 32 - SÍLA NA KŘÍŽÁKOVÝ ČEP	50
OBRÁZEK 33 - SÍLA V OSE OJNICE.....	50
OBRÁZEK 34 - TEČNÁ SÍLA	51
OBRÁZEK 35 - HNACÍ KROUTICÍ MOMENT.....	51
OBRÁZEK 36 - DETAIL ZAŘÍZENÍ V ŘEZU	52
OBRÁZEK 37 - KŘÍŽÁK.....	53
OBRÁZEK 38 - PRŮHYB VODÍCÍ TYČE [30].....	54

OBRÁZEK 39 - OJNICE	54
OBRÁZEK 40 - KOLÍKOVÝ SPOJ	55
OBRÁZEK 41 - KONZOLA	57
OBRÁZEK 42 - SESTAVA PRACOVNÍHO BLOKU	57
OBRÁZEK 43 - UPEVNĚNÍ POUZDER TOPNÝCH PATRON	58
OBRÁZEK 44 - DETAIL PRACOVNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ	59
OBRÁZEK 45 - ŘEZ PRACOVNÍ ČÁSTÍ ZAŘÍZENÍ	59
OBRÁZEK 46 - PODSTAVEC	60
OBRÁZEK 47 - ZAKRYTOVANÉ ZAŘÍZENÍ	60
OBRÁZEK 48 - ODKLOPENÉ KRYTY	61
OBRÁZEK 49 - TOPNÁ PATRONA A JEJÍ ROZMĚRY [32]	62
OBRÁZEK 50- NAINSTALOVANÁ PATRONA [32]	62
OBRÁZEK 51 - VÝPOČTOVÝ MODEL PROSTUPU TEPLA	63
OBRÁZEK 52 - TEPLOSMĚNNÁ PLOCHA VANIČKY	65
OBRÁZEK 53 - REGULÁTOR TEPLoty [32]	67
OBRÁZEK 54 - ROZMĚRY VZORKU [14]	68
OBRÁZEK 55 - MONTÁŽ VZORKU POMOCÍ PŘÍPRAVKU	69
OBRÁZEK 56 - PRINCIP NASTAVENÍ VÝŠKY VZORKU	69

Seznam tabulek

TABULKA 1 - VELIČINY POUŽÍVANÉ PRO HODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ.....	17
TABULKA 2 - TECHNICKÁ DATA PŘÍSTROJE [9].....	22
TABULKA 3 - PARAMETRY TESTU [10].....	26
TABULKA 4 - PARAMETRY KLIKOVÉHO MECHANIZMU.....	45
TABULKA 5 - HODNOTY PRO VÝPOČET PŘÍTLAČNÉ SÍLY.....	47
TABULKA 6 - POSUVNÉ HMOTNOSTI.....	49
TABULKA 7 - SPECIFIKACE ELEKTROPŘEVODOVKY VARVEL.....	52
TABULKA 8 - VÝZNAM JEDNOTLIVÝCH SYMBOLŮ.....	64
TABULKA 9 - HODNOTY VELIČIN PRO VÝPOČET SOUČiniteLE PROSTUPU TEPLA [35].....	64
TABULKA 10 - VÝPOČTENÉ HODNOTY.....	64
TABULKA 11 - VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET DOBY OHŘEVU.....	65
TABULKA 12 - TEPLoty ROZKLADU VYBRANÝCH OLEJŮ [38].....	67
TABULKA 13 - CHEMICKÉ SLOŽENÍ REFERENČNÍHO MATERIÁLU [14].....	68

Seznam příloh

PŘÍLOHA A - VÝKRES SESTAVY - 01_TESTOVACÍ_ZAŘÍZENÍ_LIST_1	I
PŘÍLOHA B - VÝKRES SESTAVY - 01_TESTOVACÍ_ZAŘÍZENÍ_LIST_2	II
PŘÍLOHA C - VÝKRES SESTAVY - 02_KŘIŽÁK	III
PŘÍLOHA D - VÝKRES SESTAVY - 03_RAMENO	IV
PŘÍLOHA E - VÝKRES SESTAVY - 04_KONZOLA	V
PŘÍLOHA F - VÝKRES SESTAVY - 05_PRACOVNÍ_BLOK	VI
PŘÍLOHA G - KUSOVNÍK - TZ-K-01_TESTOVACÍ_ZAŘÍZENÍ	VII
PŘÍLOHA H - KUSOVNÍK - TZ-K-02_KŘIŽÁK	VIII
PŘÍLOHA I - KUSOVNÍK - TZ-K-03_RAMENO	IX
PŘÍLOHA J - KUSOVNÍK - TZ-K-04_KONZOLA	X
PŘÍLOHA K - KUSOVNÍK - TZ-K-05_PRACOVNÍ_BLOK	XI
PŘÍLOHA L - VZOROVÝ FORMULÁŘ	XII