

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá posouzením vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na únavové poškození nekonformně zakřivených těles. Byl vytvořen 3D parametrický model experimentálního zařízení v modelovém prostředí Autodesk Inventor. S jeho pomocí byla navržena a uskutečněna rekonstrukce experimentálního zařízení tak, aby bylo možné získat opakovatelné výsledky za podmínek prokluzu třecích povrchů. To umožnilo ukázat vliv povrchových nerovností (vtisků) třecích povrchů na kontaktní únavovou životnost při podmínkách smíšeného mazání a různých velikostech prokluzu třecích povrchů.

ANOTATION

Diploma thesis describes influence of directed modified topography of frictional surfaces on fatigue wear non-conformal incurvate solids. It was created 3D parametric model of experimental test rig in modelling environment Autodesk Inventor. With the help of model was designed and carried reconstruction of experimental test rig so to possible obtain repeatable results under the sliding conditions of frictional surfaces. It enabled show influence of surface irregularities (dents) frictional surfaces on contact fatigue service life in conditions mixed lubrication regime and different values of slide to roll ratio.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cílená modifikace topografie, kontaktní únavová životnost - RCF, prokluz - STR, R-mat2

KEY WORDS

Surface texturing, rolling contact fatigue - RCF, sliding - STR, R-mat2

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690:

POPELKA, J. *Vliv cílené modifikace topografie na únavové poškození třecích povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, za použití uvedené literatury, pod odborným vedením pana doc. Ing. Ivana Křupky, Ph.D.

V Brně dne

.....

PODĚKOVÁNÍ

Autor využívá této příležitosti k poděkování doc. Ing. Ivanovi Křupkovi, Ph.D za jeho cenné rady a odborné vedení této diplomové práce. Autor by chtěl dále poděkovat panu Ing. Martinovi Vrbkovi, Ph.D za konzultace spojené s experimentálním zařízením R-mat. Panu Rostislavovi Konečnému vedoucímu prototypové dílny za technické realizace. V neposlední řadě všem, kteří mě podpořili v dosavadním studiu.

Všem ze srdce děkuji.

Úvod	13
1 Přehled současného stavu poznání	15
1.1 Kontaktní únavová životnost	15
1.1.1 Průběh napětí	16
1.1.2 Koncentrace napětí	17
1.1.3 Vznik a šíření trhlin	19
1.2 Vliv topografie třecího povrchu na kontaktní únavu	20
1.2.1 Přirozené povrchové nerovnosti	20
1.2.2 Dodatečné poškození třecích povrchů	22
1.2.3 Cílená modifikace povrchové topografie	24
2 Formulace řešeného problému a jeho analýza	26
2.1 Formulace problému	26
2.2 Analýza problému	26
3 Vymezení cílů práce	28
4 Návrh metodického přístupu k řešení	29
4.1 Obecné požadavky na experimentální zařízení [41]	29
4.2 Typy experimentálních zařízení	29
4.3 Komerční výrobci experimentálních zařízení pro RCF	33
4.3.1 Experimentální zařízení PCS Instruments	33
4.3.2 Experimentální zařízení Tribolab	34
4.4 Experimentální zařízení R-mat	36
4.4.1 Pohon a uložení kotoučů	36
4.4.2 Testovaný vzorek a jeho uložení	37
4.4.3 Mazací systém	38
4.4.4 Aplikace zatížení	39
4.4.5 Zpracování a analýza signálu	39
4.4.6 Popis příčin rekonstrukce	40
5 Analýza a interpretace získaných výsledků	41
5.1 Detekce poškození vzorku	41
5.1.1 Původní řešení	41
5.1.2 Nová koncepce	41
5.1.3 Řešení Viditech	43
5.2 Prokluzový systém	44
5.2.1 Původní řešení	44
5.2.2 Nová koncepce	45
5.2.3 Analýza prokluzových podmínek	48
5.3 Experiment	52
5.3.1 RCF test v podmínkách čistého valení	53
5.3.2 RCF test v podmínkách prokluzu 20%	54
5.4 Diskuse dosažených výsledků	58
5.4.1 Rekonstrukce zařízení	58
5.4.2 Experimenty	62
6 Závěr	64
seznam použitých zdrojů	65
seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	70
seznam obrázků a grafů	71
seznam tabulek	72
seznam příloh	73

seznam výkresové dokumentace.....	74
--	-----------

ÚVOD

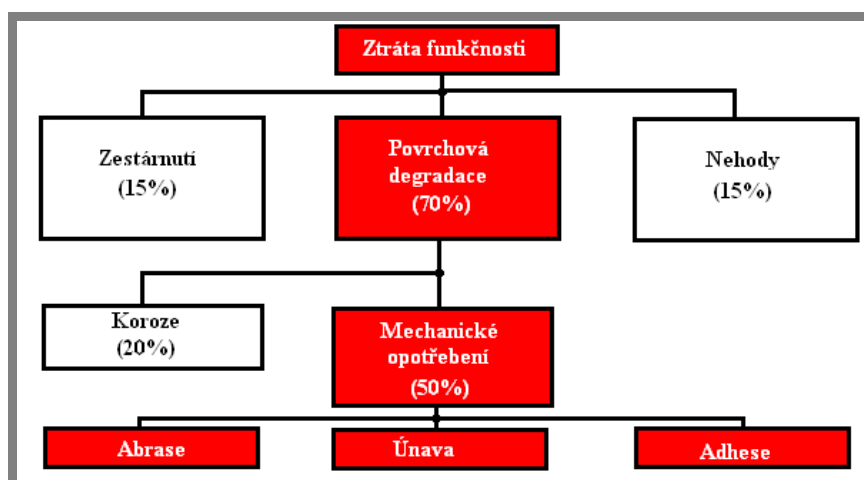
S životností strojních součástí je neodmyslitelně spojen termín "únava materiálu". Právě tento mezní stav představuje velmi často konec životního cyklu součásti. V minulosti k závadám tohoto typu zpočátku docházelo u součástí parních strojů. S rozšířením železniční a letecké dopravy dospěl problém až k přímému ohrožení lidských životů [1]. Vznikla věda zabývající se únavou materiálu ve smyslu zkoumání vzniku a mechanismu únavy. Ukázalo se, že se jedná o velmi komplexní problematiku sahající od metalurgie (většina strojírenských součástí je z kovových materiálů), přes lomovou mechaniku (věda zabývající se iniciací a šířením trhlin v materiálu), až po tribologii (věda zabývající se třením, opotřebením a mazáním součástí). Do spojitosti s únavou se zapojili i ekonomické aspekty. Při pokusech vyčíslit ztráty způsobené únavovým selháním se v některých publikovaných člancích hovoří až o 4% HDP jak v americké, tak v evropské ekonomice [2].

V dnešní době má tato věda za sebou přibližně 200. let vývoje a riziko ohrožení lidských životů značně pokleslo. Nicméně, nadále dochází k neočekávaným selháním jako například při nehodě německého rychlovlaku Inter City Express 884 [3], [4]. Při tomto neštěstí zemřelo 102 pasažérů a 88 jich bylo zraněno (obr. 0-1). Příčinou nehody se pravděpodobně stala kontaktní únava materiálu.



Obr. 0-1 Havárie rychlovlaku ICE 884 [3], [4]

Obrázek 0-2 dokladuje, že únavové selhání ve smyslu povrchové degradace se podílí na ztrátě funkčnosti součástí relativně vysokým podílem [5].



Obr. 0-2 Přehled příčin ztráty funkčnosti [5]

Specifickým druhem únavy je kontaktní únava. Vyskytuje se nejčastěji ve valivém ložisku, ve styku zubů ozubených kol, popřípadě v místech styku vačky se zdvihátkem. Stejný fenomén nalezneme v železniční dopravě při styku kol s kolejnicí. Léta vývoje prokázala, že na životnost takovýchto součástí má zásadní vliv povrchová topografie a právě proto se v dnešní době dostává do popředí výzkum vlivů změn v povrchové topografii.

Tato práce si klade za cíl experimentální ověření adaptace technologie cílené modifikace topografie třecích nekonformních povrchů z hlediska kontaktní únavové životnosti. Této technologie je již využíváno u konformně zakřivených povrchů. Nabízí se otázka, zda je rovněž aplikovatelná u nekonformně zakřivených povrchů. Příznivé výsledky v oblasti smíšeného mazání jsou již patrné [6]. Při výzkumu vlivu na kontaktní únavu nekonformně zakřivených povrchů jsou výsledky prozatím diskutabilní.

Navíc, je možné této technologii využít při simulaci poškození kontaktních povrchů vtisky atd. a zvážit tak možné negativní důsledky jak záměrných, tak nežádoucích změn topografie povrchů na kontaktní únavu.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

1.1 Kontaktní únavová životnost

1.1

V této kapitole jsou uvedeny základní odchylky kontaktní únavové životnosti od únavové životnosti strukturální (viz. *Příloha I*). Za kontaktní únavovou životnost se považuje degradace třecích povrchů při vzájemném valivém pohybu. Charakteristickým projevem porušení je pitting. Ačkoli neexistuje sjednocující norma, v odborné literatuře je pitting označován jako kritérium ukončení životnosti kontaktních povrchů. Jak již bylo zmíněno výše, kontaktní únava se vyskytuje u strojních uzlů, kde dochází ke kontaktu dvou většinou nekonformně zakřivených povrchů. Tyto uzly přenášejí vysoká zatížení a pracují často v nevyhovujících podmínkách. Většinou právě taková místa určují servisní interval stroje kvůli kontrole, popřípadě výměně dílu. K nekonformnímu styku dochází ve valivých ložiskách a také ve výstředníkových mechanismech. Dalším zástupcem jsou převodové mechanismy. V úvahu přichází i dentální materiály [7]. V neposlední řadě to je styk železničního kola s kolejničí.

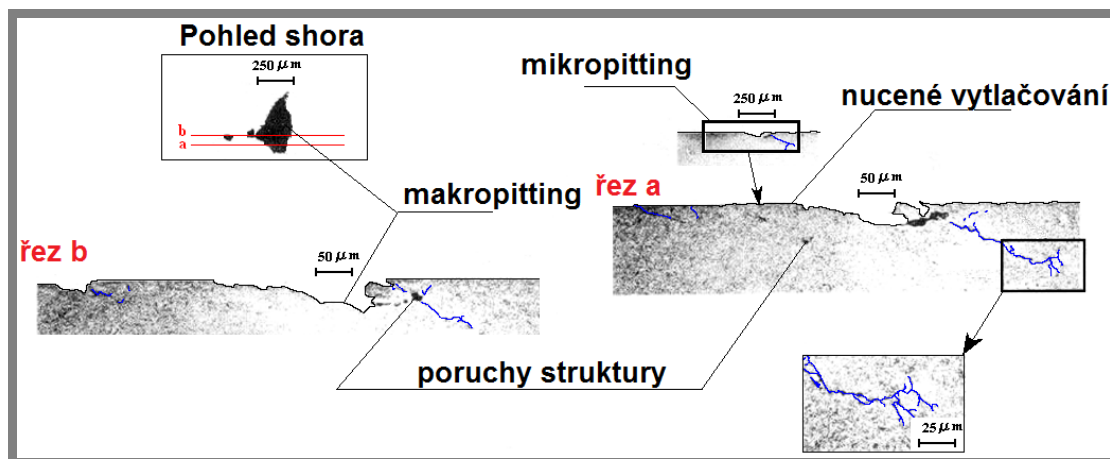


Obr. 1-1 Strojní uzly s možným výskytem kontaktní únavy [48,49]

Právě v železničním průmyslu byla poprvé rozlišena kontaktní únavová životnost již více než před 100 lety.

První systematické studium kontaktní únavové životnosti (dále jen RCF z anglického **R**olling **C**ontact **F**atigue) provedl v roce 1935 S. Way. Zabýval se pittingem, který vzniká na železničních kolech a u převodových mechanismů. Zlomovým okamžikem ale byl rok 1969. V tomto roce společnost NASA uspořádala symposium, kde ústředním tématem byla i RCF. Na symposiu vystoupil W. E. Litmann v zastoupení společnosti TIMKEN a představil jako první typické projevy RCF (obr. 1-2) spolu s mnoha ilustracemi [8]:

1. Počátek v místních koncentrátoch napětí (konce valivých elementů atd.)
2. Iniciační únavového poškození se nachází pod povrchem
3. U povrchově zpevněných součástí dochází k nucenému vytlačování
4. Na povrchu se RCF projevuje ve formě pittingu popř. micropittingu
5. Porušení součásti lomem

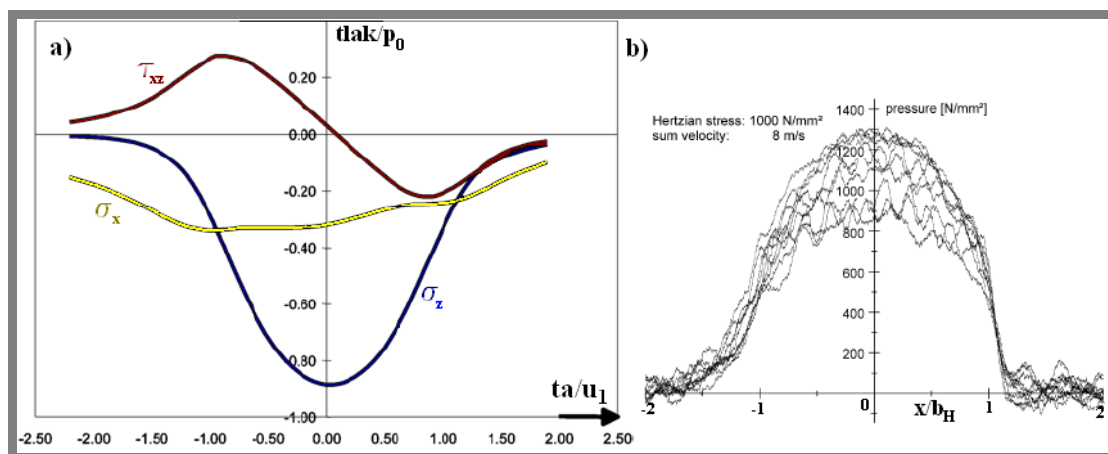


Obr. 1-2 Přehled typických projevů RCF

1.1.1 Průběh napětí

Při výčtu odlišností RCF je vhodné začít od zatížení. Zatímco při strukturální únavě jsou materiály nejčastěji vystaveny tahu, tlaku, ohybu popřípadě krutu, při RCF je zatížení téměř striktně tlakové. Dle literatury [9], je možné shrnout napětěvé působení do následujících hlavních bodů:

1. Všechna hlavní napětí jsou tlaková
2. Mezi funkcemi jejich působení není zjevná lineární závislost
3. Napětí jsou lokální (většinou omezeny na hloubku přibližně rovnou polovině šířky kontaktu)
4. Smykové napětí během cyklu podstoupí kompletní reverzaci



Obr. 1-3 a) průběh napětí při odvalení [9] b) kolísání tlaku v důsledku povrchových nerovností [10]

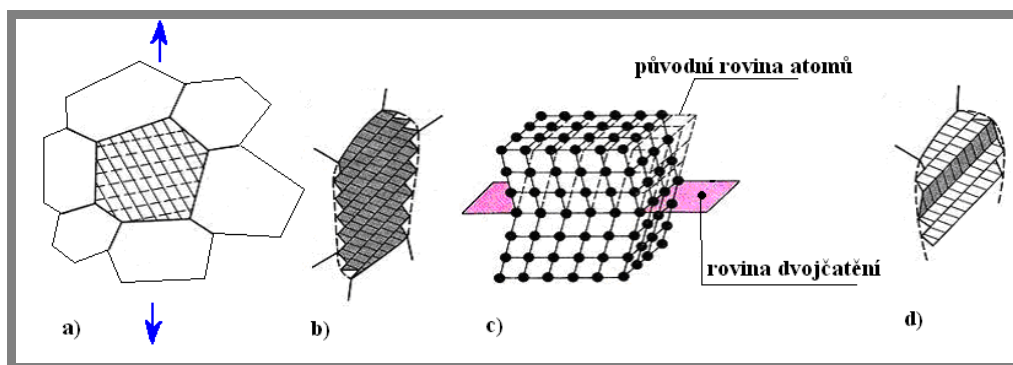
Situace se zásadně mění při uvažování reálných "drsňých" povrchů (obr. 1-3b). Práce na toto téma publikovali například T. H. Kim a A. V. Olver [9], B.-R. Höhn, K. Michaelis a O. Kreil [10], P. Kumar, S.C. Jain a S. Ray [11]. V neposlední řadě hraje roli i průtok maziva kontaktem. Je patrné, že na základě těchto jednoznačných odchylek je prakticky každý RCF experiment odlišný od strukturální

únavy, protože pro každý cyklus je přítomno celé spektrum zatížení různých směrů i amplitud.

1.1.2 Koncentrace napětí

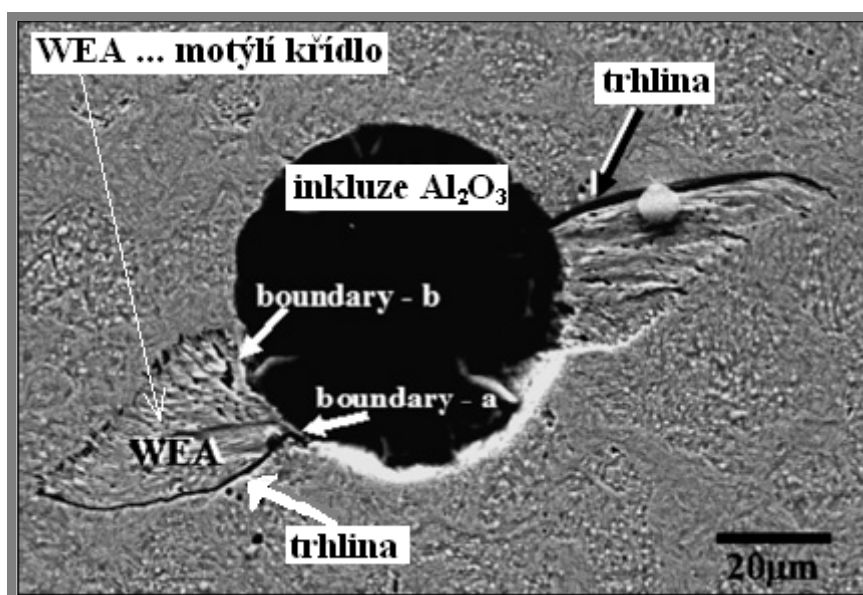
1.1.2

U RCF je důležité rozlišit kde dochází k lokalizaci koncentrace napětí. Může docházet ke koncentraci napětí hluboko pod třecím povrchem, nebo v jeho blízkosti. Napětí jsou natolik vysoká, že dochází k překročení meze kluzu. To způsobí elastická a plastická přetvoření materiálu. Tváření může probíhat dvěma způsoby: skluzem nebo dvojčatěním s následným skluzem (obr. 1-4). V tomto případě hraje významnou roli struktura materiálu. A. Voskamp [12] ukázal, že orientace zrn feritu ovlivňuje následné šíření trhlin a může docházet i k dynamické rekrystalizaci.



Obr. 1-4 a) zrno zatížené skluzem b) deformace zrna c) schéma dvojčatění d) deformace zrna [17]

Tuto domněnku potvrzují nedávné studie, kde pomocí pokročilých metod elektronové mikroskopie byl pozorován výskyt dynamické rekrystalizace v blízkosti povrchů vměstků [13-15]. Pro takto změněné zóny se zažil název "Butterflies" (obr. 1-5).



Obr. 1-5 Změna mikrostruktury v okolí vměstku [15]

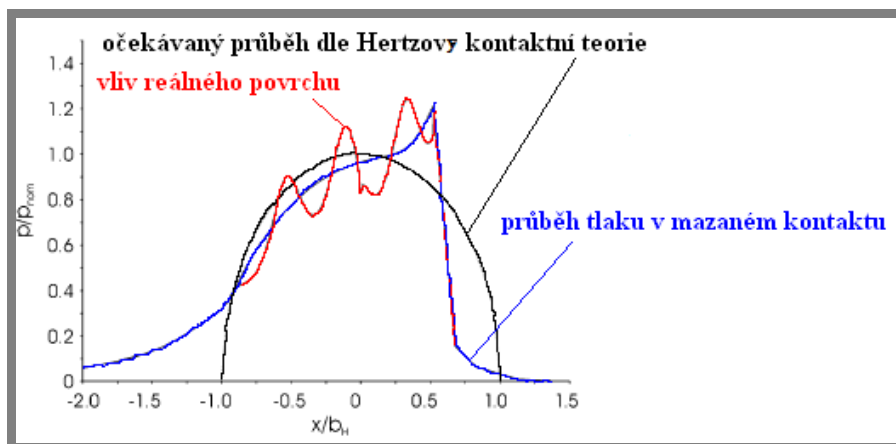
Význam přítomnosti vměstků, které jsou tvořeny reakcí s kyslíkem při výrobě, je značný. Proto je často při výrobě použito podtlakového odplynění. Nicméně rozvoj technologie výroby ložiskových materiálů vedl k zásadní redukci vměstků v materiálu [16] a tím i snížení jejich podílu na vznik RCF. Velký vliv má i rozložení karbidů v materiálu, avšak silné poškození prvotní struktury při RCF znesnadňuje detailní popsání významu vlivu změn na úrovni mikrostruktur. Nicméně tyto mikrostruktury vlivem dynamické rekrystalizace obsahují velký počet poruch a hranice mezi mikrostrukturou a martenzitickou maticí představují místa velkých koncentrací napětí.

Na druhé straně, existují odlišné názory odvolávající se na komplexní složení ložiskových materiálů. Materiály obsahují přinejmenším 4. fáze [8]:

1. udržení austenit
2. primární tvrdý kov (cementit),
3. temperovaný a souvislý martenzit (popouštění)
4. karbidy

Ložiskové oceli tedy jsou nestabilní již sami o sobě. Z těchto důvodů není změna mikrostruktury až tak překvapujícím jevem.

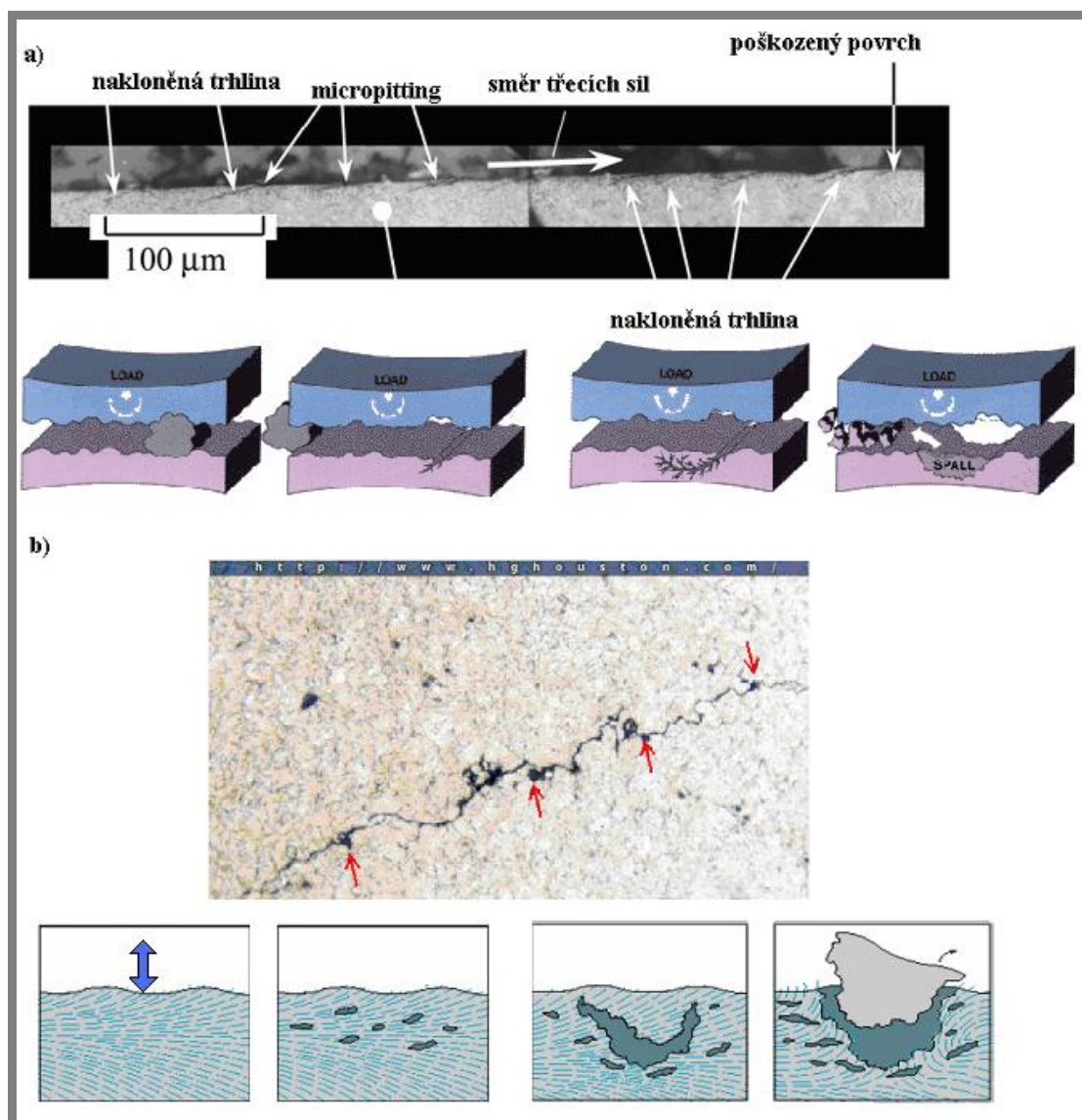
S tím, jak dochází k vývoji nových druhů ocelí k iniciaci únavového poškození dochází v blízkém okolí pod třecím povrchem. Jestliže kontakt pracuje za podmínek smíšeného mazání, nebo ještě hůře v podmínkách "hladovění", dostává se do popředí vliv topografie třecího povrchu. Důkazy tohoto tvrzení je možné nalézt například v jedné z četných prací E. V. Zaretského [18]. Přímý kontakt povrchových nerovností způsobuje významný nárůst tlaku, který může dosahovat až dvojnásobku [9]. Takový nárůst tlaku způsobí zvýšení povrchového a zejména podpovrchového napětí. Navíc, výstupky a prohlubně (způsobené technologií výroby) působí jako koncentrátoři napětí. Vzhledem k tomu, že v ložiskových ocelích je výrazně redukován objem vměstků, je povrchově zahájená únava nejčastější. Právě změna v rozložení kontaktního tlaku je používána jako nástroj pro definování změn v rozložení napětí [9]-[11]. Tyto koncentrátoři jsou pravděpodobně důvodem pro iniciaci mikrotrhlin na povrchu součástí.



Obr. 1-6 Rozložení kontaktního tlaku [9]

1.1.3 Vznik a šíření trhlin

Zatímco příčiny koncentrace napětí jsou relativně známé, způsob prvotních porušení už daleko méně. Jak je zmíněno výše, porušení může být zahájeno na povrchu nebo pod povrchem. Pro RCF je charakteristický sklon únavových trhlin. Sklonění trhlin je spojeno s působením smykových napětí. Bylo ukázáno, že s rostoucí velikostí skluzu mezi aktivními povrchy se zmenšuje úhel iniciačních trhlin relativně ke kontaktnímu povrchu [19]. U podpovrchově zahájené trhliny se ukazuje, že její sklon je spíše závislý na směru valení (obr. 1-7).



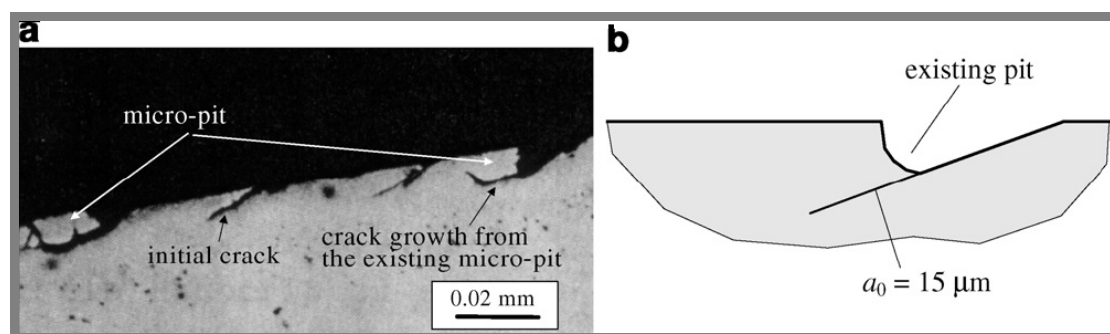
Obr. 1-7 a) iniciace trhliny těsně pod povrchem [8] b) iniciace trhliny hluboko pod povrchem [20,48]

Následné šíření trhlin je velmi diskutovanou problematikou. Pro vyšetřování směru a rozsahu růstu je využívána numerická metoda LEFM (Lineární elastická lomová mechanika). V této metodě je rozhodující velikost napětí vznikající ve špičce trhliny (K-koncepce, příp. K-faktor). Šíření trhliny je navíc komplikováno přítomností maziva v trhlíně. Mazivo, po vtlačení do trhliny, je vlivem odvalení hermeticky uzavřeno. V důsledku toho vzniká hydrostatický tlak, jako dodatečné

zatížení, které napomáhá separaci stěn trhlin a tím podporuje šíření. Skutečnosti, že pro vývoj pittingu je mazivo nezbytné, si všiml už S. Way [8]. Do pozornosti se tedy dostali i vlastnosti maziva ve vztahu k formování pittingu [21], [22]. Na druhou stranu, při styku železničního kola s kolejnicí je mazivo přítomno pouze zřídka ve formě dešťové vody. I přesto k pittingu dochází. Tyto skutečnosti vedly k vývoji mnoha FEM modelů simulujících růst trhliny [19,23,24].

K prvotnímu povrchovému poškození dochází v důsledku mikro-pittingu na který má největší vliv právě topografie třecího povrchu [19]. Velký rozdíl v napěťových polích mezi okolím blízko u povrchu a pod povrchem způsobuje, že trhliny nepropagují do hloubky. Tento rozdíl vytváří výstupky na povrchu, které jsou důsledkem technologie povrchové úpravy. Právě tyto výstupky se v kontaktu často dostávají do přímého styku. Proto nejprve vznikne okem nepozorovatelný mikro-pittingový důlek. Takovéto důlky dále působí jako napěťové koncentrátoři a často jsou místem iniciací pro makro-pitting (obr. 1-8).

Na vznik pittingových důlku existují dva názorové směry. Jeden z nich je založen na představě, že magistrální trhlina po dosažení kritické délky změni svůj směr propagace směrem k povrchu, čímž dojde k oddělení materiálu. Druhou možností je, že pitting vzniká vzájemným křížením více magistrálních trhlin. V praxi se z hlediska servisních intervalů strojů zdá mikro-pitting daleko zajímavější, proto se jeho studiu věnuje velká pozornost [19,23,24].



Obr. 1-8 Rozvoj mikro-pittingu na makro-pitting a) experiment b) vyvinutý model [24]

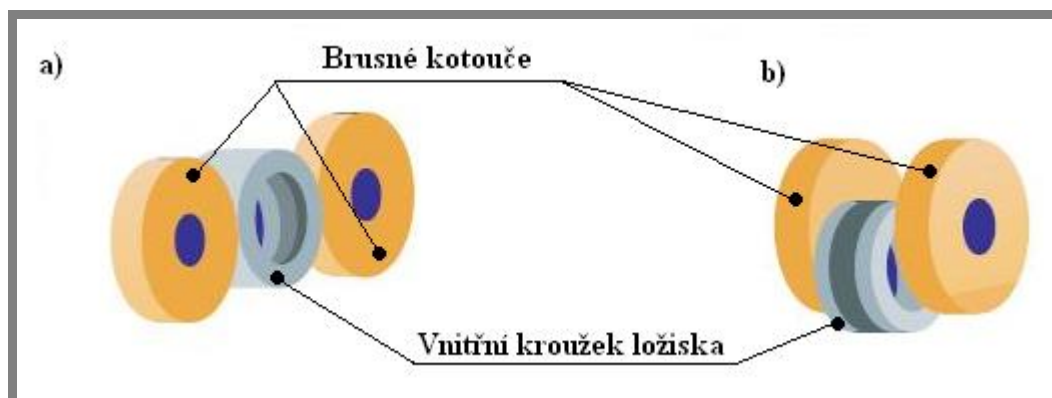
1.2 Vliv topografie třecího povrchu na kontaktní únavu

Kvalita kontaktních ploch (zejména drsnost povrchu) má zásadní vliv na RCF. Reálné technické povrchy se výrazně liší od ideálních, tj. dokonale hladkých. Tyto změny přispívají zejména ke kolísání kontaktního tlaku a koncentraci napětí.

1.2.1 Přirozené povrchové nerovnosti

Pro dokončování kontaktních povrchů jsou zpravidla využívány technologie abrazivního obrábění, jako např. broušení, honování, lapování a superfinišování. Různé metody produkují různou topografii třecích povrchů. Pro valivá ložiska bývá často využito honování pro obrábění vodících drážek a lapování pro obrábění valivých elementů. Navíc, i když kontaktní povrchy mají stejnou drsnost, technologie výroby je identická, povrchová topografie je různá. Tyto odchylky jsou dány různými postupy výrobců, jejichž cílem je dosažení pokud možno co nejkratšího

strojového času, protože dokončovací metody obrábění představují zpravidla relativně dlouhý proces.

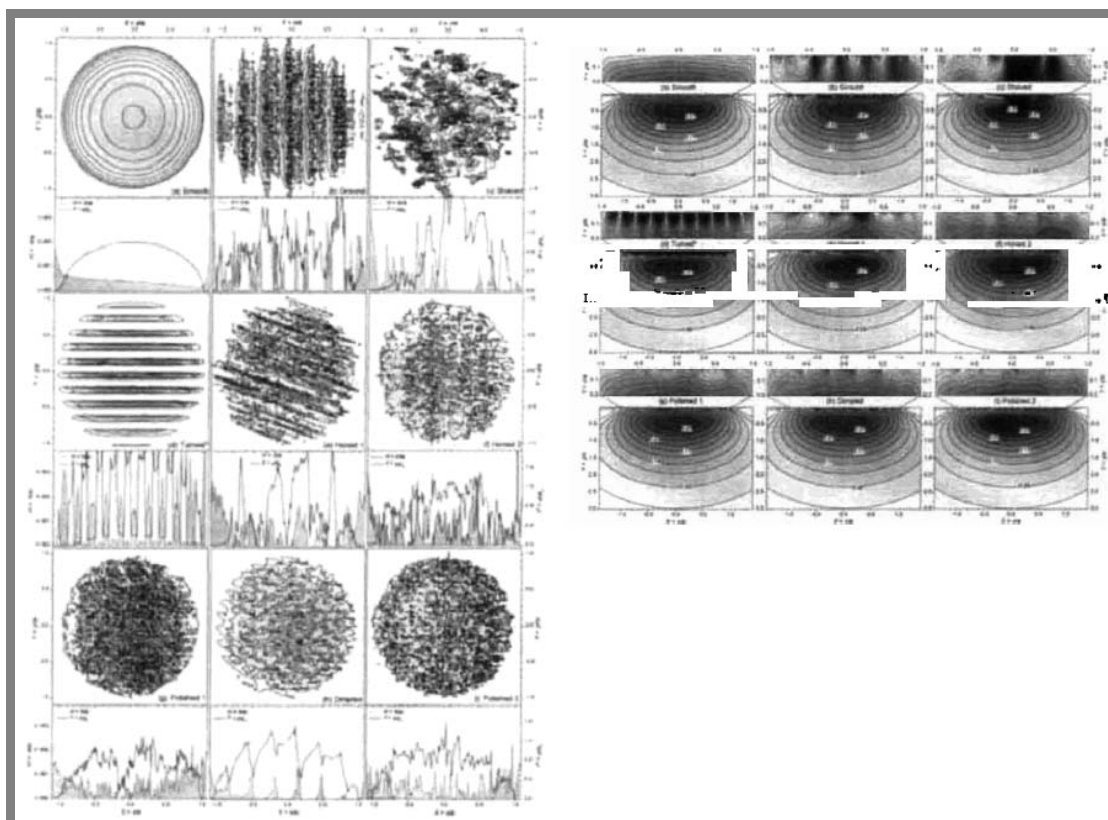


Obr. 1-9 Výroba drážky (a) a čel vnitřního kroužku (b) [50]

Topografie třecích povrchů mají významný vliv na rozložení tlaku v mazaném kontaktu. Zatímco u hladkých povrchů lze rozložení velmi přesně odhadnout z Hertzovy kontaktní teorie, u skutečných povrchů je rozložení tlaku výrazně odlišné. Vzhledem k tomu se problematice rozložení kontaktního tlaku u reálných povrchů věnuje zvýšená pozornost. B.-R. Höhn, K. Michaelis a O. Kreil [10] se zaměřili na vliv směru povrchových nerovností, které vznikají během broušení. Autoři rovněž simulovali umělé povrchové nerovnosti různých směrů a rozestupů (vlnových délek). Z jejich závěrů vyplývá, že podélné stopy po broušení (obr. 1-9a) mají negativní dopad na tloušťku mazacího filmu. P. Kumar, S. C. Jain a S. Ray [11] studovali vliv rychlosti třecích povrchů s defekty. Jejich výpočtový model dokáže na základě vlnové délky nerovností, drsnosti třecích povrchů a jejich vzájemné rychlosti odhadovat koeficient tření a minimální tloušťku mazacího filmu. Po simulování různých praktických podmínek došli k závěru, že změny drsnosti povrchu a vlnové délky nerovností mohou způsobit změnu součinitele tření až o 98%.

D. Epstein a kol. [25] studovali chování šesti různých povrchů vyrobených pomocí standardních technologií. Jednalo se o broušený, ševingovaný, soustružený, honovaný, leštěný a uměle důlkovaný povrch. Zaměřili se na tři základní parametry: kontaktní tlak, povrchové a podpovrchové napětí, za podmínek smíšeného mazání (obr. 1-10). Přínosem jejich studie je i skutečnost, že do svých simulací zahrnuli vliv prokluzu. Neméně zajímavé bylo zkoumání zvýšení teploty kontaktních povrchů, které může být velice důležité pro rekrystalizační děje zmíněné v kapitole 1.1.2. Na základě numerické analýzy přechodových dějů dospěli k těmto závěrům [25]:

1. Vypočítaná kontaktní únavová životnost odhadovaná na základě povrchových a podpovrchových napětí byla nejvyšší u hladkého povrchu. Dále následoval povrch leštěný, uměle důlkovaný, honovaný, nefinišovaný, soustružený a ševingovaný.
2. Okamžitý nárůst teploty povrchů činil od 50°C u hladkého povrchu do 435°C u honovaného povrchu.



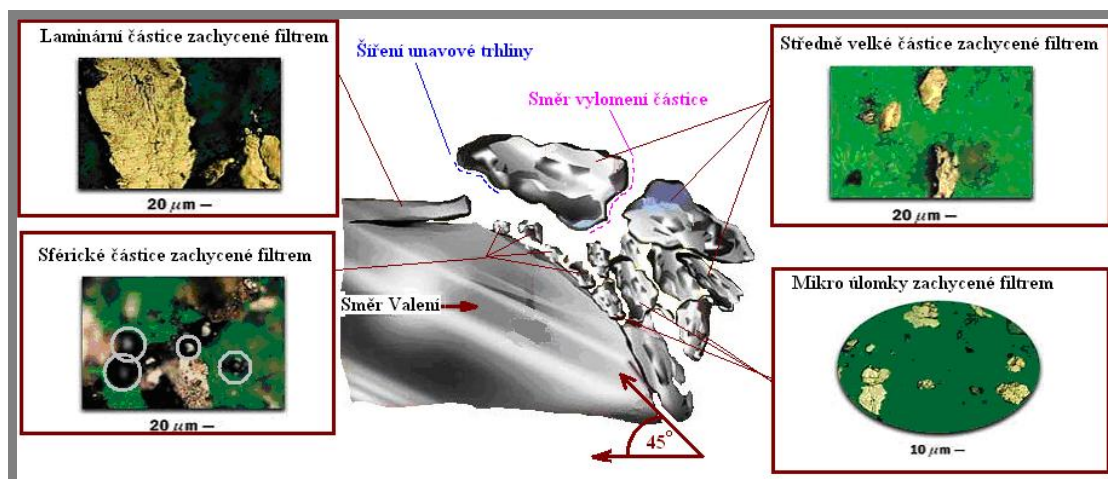
Obr. 1-10 Ukázky zkoumaných povrchových topografií [25]

1.2.2 Dodatečné poškození třecích povrchů

Mimo výše zmíněné změny topografie povrchu vzniklé při výrobě, je zapotřebí vzít do úvahy i dodatečné poškozování třecích povrchů při provozu. Vzhledem k praktickým dopadům jsou tyto změny daleko důležitější s ohledem na RCF. Mechanismus vzniku takovýchto poškození je poměrně zřejmý. Mazivo může být kontaminováno nečistotami z jiných třecích uzlů. Tento problém se týká zejména oběhového způsobu mazání. I přesto, že tyto systémy jsou vybaveny filtry, některé částice filtr překonají a po průchodu mazaným kontaktem způsobí dodatečná poškození. V případě, že se nejedná o oběhové mazání, ale o uzavřený strojní uzel, mohou být zdrojem takových částic samotné třecí povrchy. K uvolňování částic dochází zejména při záběhu.

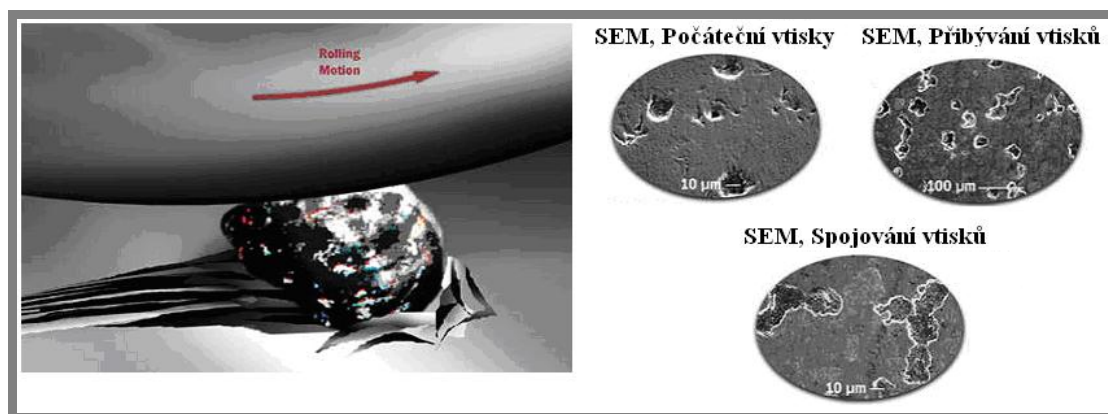
Tvar uvolněných částic je předmětem mnoha studií. Uvolněné částice, jejich tvar a velikost, totiž velmi korespondují se stupněm únavového poškození povrchů [26]. Rozlišují se čtyři typické druhy takových částic (obr. 1-11). První vznikající částice jsou mikro-úlomky. Provázejí prvotní únavové poškození kontaktních povrchů. Způsobují pouze mírné poškození povrchů okem nerozeznatelné. Svou velikostí (10-30 μm) jsou rozměrově blízké mikro-pittingu. Další stupněm opotřebení už vzniká pozorovatelný mikro-pitting, jehož důsledkem jsou laminární částice, které patří mezi nejčastější kontaminanty maziva. Jejich opětovný průchod přes kontaktní oblast může způsobit jejich rozlomení na více menších částic. Typická velikost těchto částic se pohybuje v rozmezí 50-200 μm . Důsledkem dalšího stupně opotřebení jsou středně velké částice, jejichž vznik je přisuzován růstu trhlin do

větších hloubek pod úhlem cca 45°. Jejich uvolnění z povrchu již představuje vážný stupeň poškození. Po jejich uvolnění dochází k významné změně topografie povrchu. Při výskytu těchto částic ve filtru je zpravidla požadována výměna ložiska. Jejich typické rozměry se blíží laminárním částicím, tedy 50-200 μm . Posledními typickými částicemi jsou kulovité částice doprovázející všechny stupně opotřebení. Tyto částice jsou často přisuzovány doprovodným jevům při opotřebení jako je například prokluz, nebo nadměrné zahřívání povrchů.



Obr. 1-11 Přehled částic uvolněných z povrchu [26]

K poškození třecích povrchů výše uvedenými částicemi může docházet v principu dvojím způsobem (obr. 1-12).

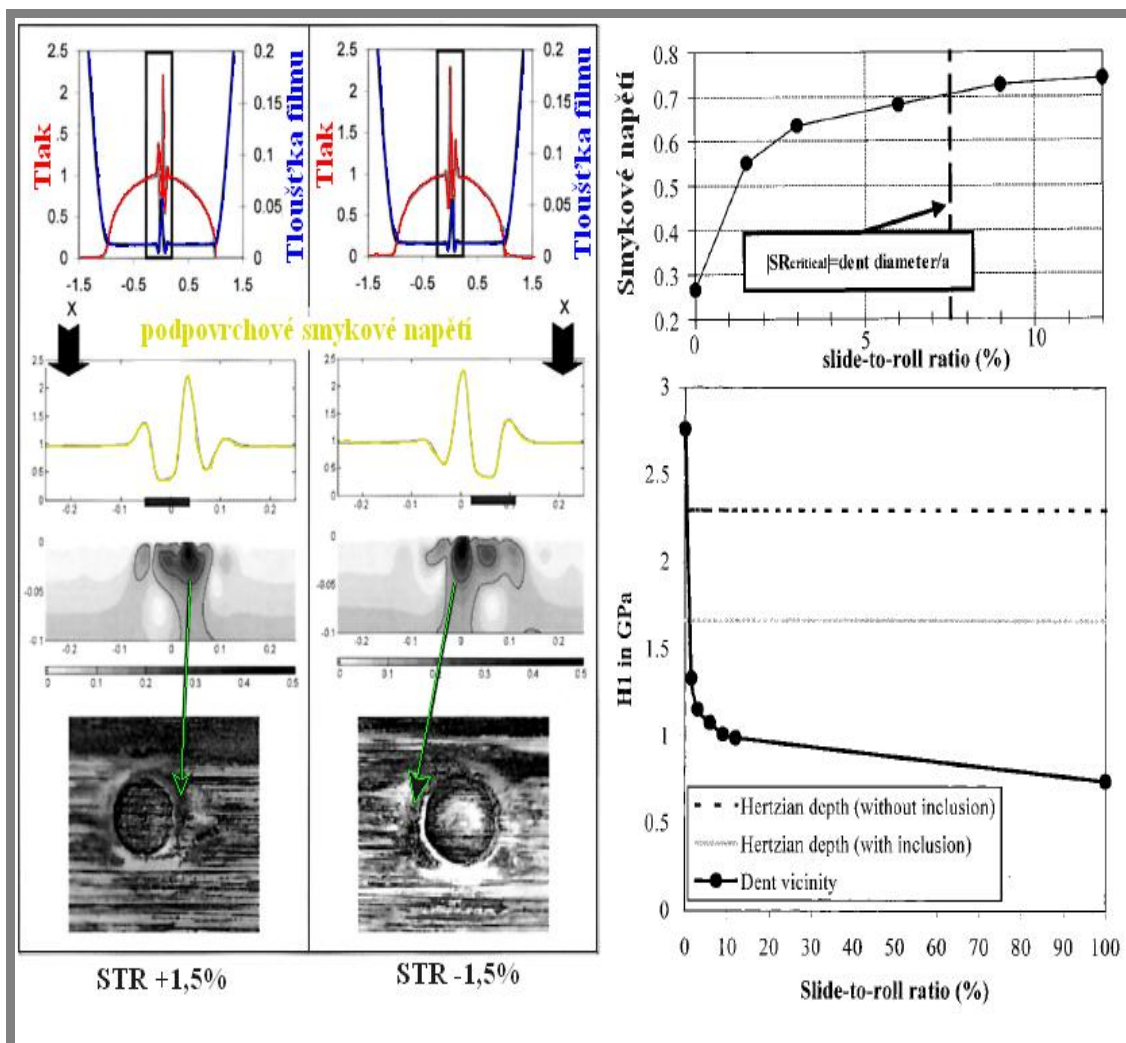


Obr. 1-12 Vlevo: Poškození povrchu zabodnutou částicí Vpravo: Poškození povrchu vtisky [26]

Částice může na povrchu zanechat vtisk nebo zůstane zabodnutá v jednom ze dvou kontaktních povrchů a následně v druhém povrchu zanechává rýhu. Studium změn v rozložení tlaku takto poškozených povrchů patří k nejdůležitějším výzkumům. Bezespору taková poškození mají za následek zvýšení součinitele tření, povrchového a podpovrchového napětí.

D. Nelias a F. Ville [27] ukázali, že lokalizace napětí v blízkosti vtisku je řízena nikoliv směrem valení, ale právě velikostí a orientací prokluzu. To vysvětluje fakt, že porušení povrchů se vyskytuje za nebo před vtiskem (obr. 1-13). Nárůst napětí může dokonce přesahovat dvojnásobek meze kluzu typických ložiskových

ocelí. Nelias a Ville rovněž představili kritérium kritického prokluzu. Ten je stanoven jako funkce průměru vtisku a velikosti kontaktu. Po jeho překročení může vznikat nukleace trhlin v materiálu.

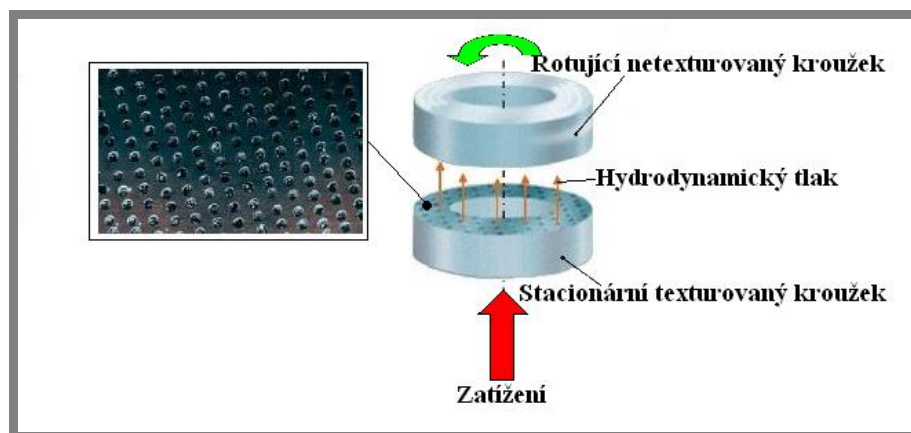


Obr. 1-13 Kolísání tlaku, nárůst smykových napětí v okolí vtisku. Nárůst smykového napětí v důsledku STR poměru [27]

1.2.3 Cílená modifikace povrchové topografie

Zcela jiný náhled na roli vtisků na třecích površích, dávají nedávné studie využívající cílené modifikace topografie třecích povrchů. LST (z anglického Laser Surface Texturing) technologie úpravy třecích povrchů bylo použito pro úpravy povrchů mechanických těsnění (obr. 1-14). Aplikace přispěla ke snížení teploty a součinitele tření [28]. Dle výsledků společnosti SurfTech to může koncovému zákazníkovi přinést ročně úsporu až 2 000 dolarů u čerpadla s výkonem 37 kW. Výzkum se tedy rozšířil a byl úspěšně aplikován na pístní kroužky spalovacích motorů. Došlo ke zlepšení záběhu součástí a zmenšení zadírání při nedokonalém mazání. Principem této metody je skutečnost, že mazivo uzavřené v mělkém důlku,

vytváří dodatečný hydrodynamický tlak. Tento působí proti zatížení a pomáhá separovat třecí povrchy.



Obr. 1-14 Princip LST technologie [29]

Aplikace LST technologie je úspěšně zvládnuta pro konformně zakřivené Je ale otázkou, zda je možné aplikovat tuto technologii pro nekonformně zakřivené povrchy (tj. různý rádius zakřivení kontaktních ploch). Před deseti lety (to je přibližně délka vývoje LST technologie) přinesla čistě experimentální studium tohoto jevu skupina autorů z Japonska [31, 32]. Tato práce ukázala pozitivní dopad na RCF i pro nekonformně zakřivené povrchy. To bylo zpočátku přijato s velkými rozpaky [35] a začal tak podrobný výzkum adaptace LST technologie pro nekonformní povrchy. Na roli důlků v třecích površích je možné nahlížet dvěma způsoby. Jako na mikro-zásobníky maziva, nebo jako na potenciální koncentrátoři napětí. To vede ke dvěma cestám výzkumu.

Výsledky studia vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na tloušťku mazacího filmu potvrdily pozitivní dopad mělkých důlků na zvýšení tloušťky filmu v podmínkách smíšeného mazání [33, 34, 38, 39]. Zároveň prokázaly, že v EHD mazacím režimu nedochází k zásadnímu poklesu. Navýšená tloušťka filmu redukuje kontakt kov na kov a díky tomu nedochází k výraznému kolísání kontaktního tlaku. Tato skutečnost vysvětluje i pokles tření.

Tato diplomová práce se věnuje studiu možných negativních dopadů. Dosud totiž není zcela objasněný vliv cílené modifikace topografie na RCF. Obecně lze takové nerovnosti na třecím povrchu chápat jako koncentrátoři napětí, které snižují RCF. Avšak některé studie naznačily naopak pozitivní vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na RCF, zejména za podmínek smíšeného mazání [36, 37].

Aplikace LST technologie pro nekonformně zakřivené povrchy tedy směřuje k situacím, kdy jsou součásti provozovány v podmínkách smíšeného mazání. Vhodnou aplikací by mohli být vysoce zatížené díly, nebo vysokootáčkové stroje. Obecně řečeno tam, kde provozní podmínky nedovolují tvorbu dostatečné tloušťky mazacího filmu.

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

2.1 Formulace problému

Cílená modifikace topografie třecích povrchů představuje jeden z přístupů ke zvýšení schopnosti mazacích filmů oddělovat třecí povrchy, a tak snižovat tření a opotřebení třecích povrchů. Tento přístup předpokládá vytvoření soustavy mikro-důlku na třecích površích, na jejichž chování v mazaném kontaktu je možné nahlížet dvěma způsoby:

1. Mikro-zásobníky maziva zvyšující tloušťku mazacího filmu při jejich průchodu kontaktem.
2. Koncentrátory napětí a místa s možnou nukleací trhlin.

O tom, který z výše uvedených náhledů bude převažovat, rozhoduje mazací režim. Pro smíšené mazání převažuje první náhled. Pro EHD mazání převažuje druhý náhled. Existuje tedy několik otázek v souvislosti s touto problematikou:

1. Je možné vhodným uspořádáním mikro-důlků dosáhnout zlepšení tribologických vlastností?
2. Který parametr má rozhodující vliv? Geometrie důlků, nebo jejich rozmístění?
3. Existuje vhodná geometrie důlku minimalizující negativní dopad při EHD mazání?
4. Jak se projeví vliv STR poměru při větším počtu důlků?

Odpověď na tyto otázky může poskytnout pouze komplexní studium této problematiky zohledňující vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na tloušťku a tlak v mazacím filmu a na únavové poškození třecích povrchů.

2.2 Analýza problému

Pracoviště Ústavu Konstruování se již po několik let touto problematikou zabývá a některé výše uvedené otázky již byly částečně zodpovězeny v předchozím výzkumu [6]. Byla provedena srovnávací měření při podmínkách EHD s hladkým i reálným povrchem opatřeným mělkými mikro-vtisky pro STR poměr $\pm 0,5$. Získané výsledky prokázaly významný vliv hloubky mikro-vtisků na tloušťku mazacího filmu. Další experimenty již při podmínkách smíšeného mazání potvrdili pozitivní dopad na tloušťku mazacího filmu. Výsledek byl podpořen kvalitativním testem opotřebení chromové vrstvy [6]. Dále byl odladěn postup reverzního výpočtu kontaktního tlaku na základě experimentálně získané tloušťky filmu [40]. Tak je nyní možné studovat vliv mikro-vtisků na rozložení tloušťky i tlaku v mazaném kontaktu.

Z pohledu výzkumu vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na rozložení tloušťky a tlaku v mazacím filmu je laboratoř velmi dobře vybavená. Dalším nutným krokem však bylo zlepšení vybavení v oblasti testování RCF. První krok na tomto poli představovala práce O. Šamánka [30]. Jeho práce byla věnována úvodnímu studiu posouzení vlivu hloubky mikro-vtisků na RCF.

V současné době pozornost směřuje ke zkvalitnění samotných RCF testů. V této souvislosti pracoviště disponuje zkušebním zařízením R-mat. Šamánek ve své práci poukázal na nedostatky tohoto zařízení, které v největší míře pramenily ze zastaralosti zařízení.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

V souvislosti s výše uvedeným byly vytyčeny cíle této diplomové práce. V důsledku zastaralosti zkušebního zařízení R-mat dochází k ne zcela korektním výsledkům zkoušek s vysokým rozptylem měřených údajů (ca. $31 \cdot 10^7$ cyklů při čistém valení). Je diskutabilní do jaké míry je tento rozptyl způsoben samotným zařízením. Tuto otázku bude možné částečně zodpovědět po prvním bloku rekonstrukce. Autor v této souvislosti prozkoumal literaturu a pokusil se načerpat přehled zkušebních strategií a konstrukcí zkušebních strojů.

Prvním cílem je zdokumentování současného stavu zařízení. Tento cíl sleduje dva důvody. Prvním důvodem je absence drtivé většiny výkresové dokumentace tohoto zařízení. Ukázalo se, že tato skutečnost výrazně komplikuje rekonstrukční práce. Zejména při postupu zástavby nových dílů. Parametrické modely navíc umožní popsat strukturu a princip funkce celého zařízení. Druhým cílem je nutnost znalosti současného stavu z důvodu případného návratu k původnímu řešení při negativním dopadu prvního bloku rekonstrukce. Dokumentace je zpracována v modelovém prostředí Autodesk Inventor.

Druhým cílem je rekonstrukce detekčního zařízení poškození vzorků. Detekce je realizována pomocí akcelerometrů. Vysoké náklady moderních snímačů přivedli autora k myšlence konstrukce vlastního detekčního zařízení. Jeho možné využití bude diskutováno v následujících kapitolách.

Třetím cílem a zároveň posledním krokem prvního bloku rekonstrukce, je úprava prokluzového systému. Cílem je zvýšit spolehlivost zařízení, snížit hlučnost a přesnost přenášených výkonů.

Po dokončení rekonstrukčních prací byly provedeny srovnávací zkoušky s cílem posoudit zlepšení, nebo zhoršení vlastností zkušebního zařízení R-mat. Zkoušky byly prováděny i se vzorky obsahujícími cíleně modifikovaný povrch. Sledovaným parametrem je počet zátěžných cyklů před selháním. Pro test byl zvolen STR poměr 20 %. Dosažené výsledky jsou následně analyzovány. Vzhledem k délce trvání jedné zkoušky a časové náročnosti při přípravě vzorků, nebyly do této práce zahrnuty zkoušky při jiných hodnotách prokluzu.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4

Experimentální ověření teoretických řešení patří k jedním z nejdůležitějších úkolů výzkumu. Takováto ověření jsou časově i finančně velmi náročná. Pro věrohodné výsledky je zapotřebí provést velký počet zkoušek, aby byl zajištěn dostatečný základ pro statistické vyhodnocení. Nároky kladené na zkušební stroje jsou rovněž poměrně přísné. Navíc jsou výsledky často přísně utajované, zejména jedná-li se o experimenty financované ze soukromé sféry.

Na Ústavu Konstruování FSI VUT v Brně jsou únavové zkoušky realizované pomocí experimentálního zařízení R-mat. Toto zařízení bylo zkonstruováno před více než 20 lety. Nároky na přesnost a variabilitu měření od této doby značně vzrostly. V důsledku zastarání měřicího vybavení docházelo k velkému rozptylu naměřených hodnot a tím k nespolehlivosti výsledků (viz. kapitola 4.4.6). Před realizací nových experimentů bylo tedy zapotřebí zahájit rekonstrukci zkušebního zařízení R-mat. Autor v této souvislosti prozkoumal stávající požadavky a řešení na jiných pracovištích. Přehled současných přístupů je rozebrán v následujících kapitolách.

4.1 Obecné požadavky na experimentální zařízení [41]

4.1

1. Zařízení by mělo být schopno testovat vzorky různých tvarů (rovinné, kulové atd.)
2. Zkušební vzorky by měly být co nejmenší z důvodu nižších nákladů a vyšší přesnosti výroby
3. Snadné upnutí a kalibrování vzorku v jedinečné poloze
4. Kontaktní tlaky až 5 000 MPa. Okamžité odstavení zátěže po detekci poškození
5. Možnost velkého rozsahu a kontroly otáček při testech
6. Řízení dodávek maziva
7. Kvalitní on line diagnostika otáček, zatížení a poškození vzorku
8. Záznam dat pro posprocessing

4.2 Typy experimentálních zařízení

4.2

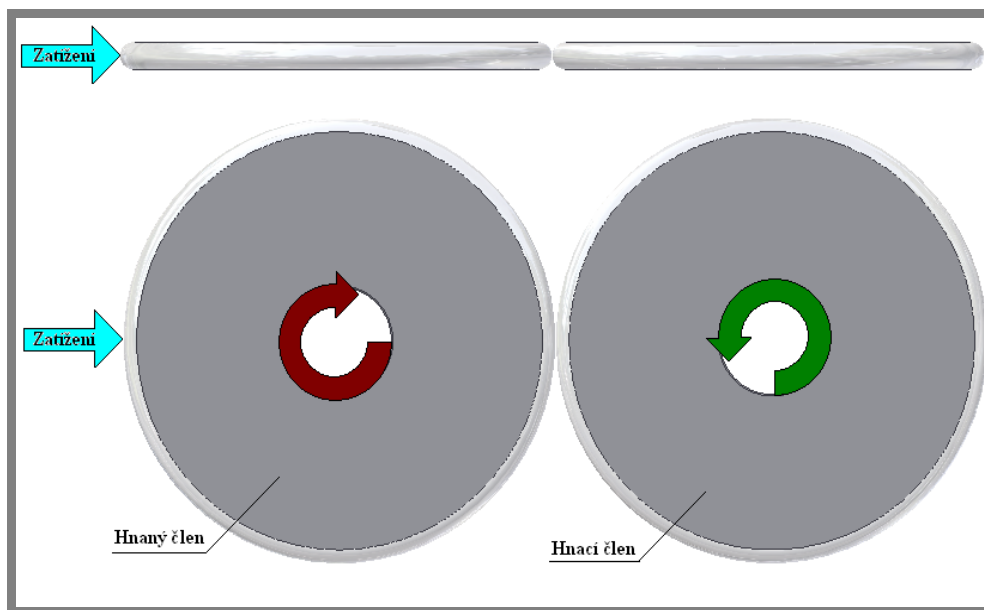
Pro testování RCF bylo v minulých dekádách vyvinuto poměrně mnoho typů experimentálních zařízení. V dnešní době mezi nejrozšířenější patří zařízení využívající:

1. Dva kotouče (anglicky disc on disc)
2. Kotouč a válcovou tyč (anglicky disc on rod)
3. Kuličku a válcovou tyč (anglicky ball on rod)
4. Kuličku a rovinnou plochu (anglicky ball on plate nebo ball on flat)
5. Čtyři kuličky (anglicky four ball)

add. 1) Tento typ zařízení patří mezi nejrozšířenější. Umožňuje realizaci liniového i bodového kontaktu. Kontakt je vytvářen zatížením jednoho ze dvou kotoučů, zatímco druhý kotouč je poháněn (obr. 4-1). Geometrie disků

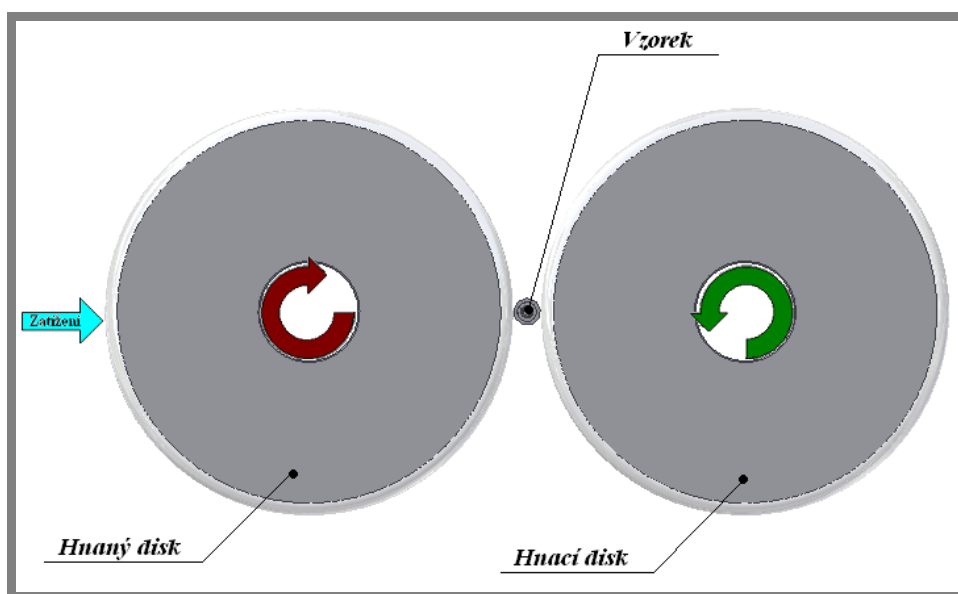
jsou většinou identické. Výhody této metody spočívají v krátké době testování, protože je možno využít vysokých otáček. Dále je možné aplikovat poměrně vysoká zatížení (až do 5GPa kontaktního tlaku). Zařízení jsou zpravidla kompaktní a umožňují simulace podmínek prokluzu ve velkém rozsahu. V anglické literatuře jsou zařízení tohoto typu označována jako twin disk test rig.

Mezi nevýhody patří vysoké náklady na zkušební tělesa (velké rozměry, vysoká požadovaná přesnost).



Obr. 4-1 Princip dvoukotoučového stroje

add. 2) Tato varianta rozšiřuje možnosti předcházejícího typu zařízení a odstraňuje některé její nedostatky. Rozměry vzorku jsou redukovány, čímž klesají náklady na jeho výrobu (obr. 4-2).

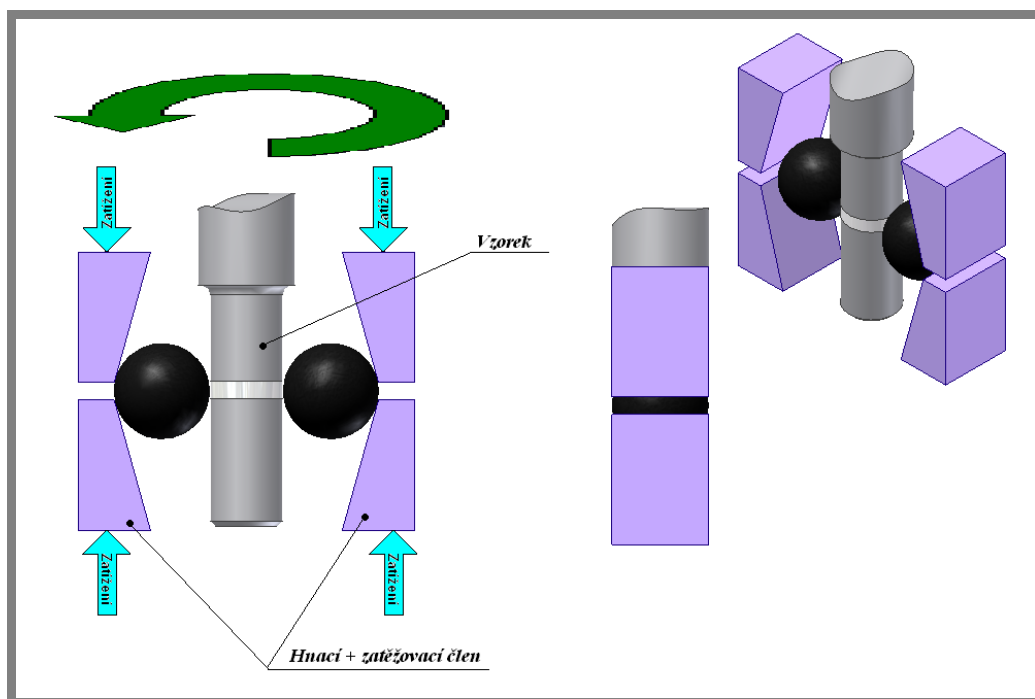


Obr. 4-2 Princip využívající kontakt disk na tyč

Tvar vzorku umožňuje snadné obrábění a docílení vyšší přesnosti vzorku. Navíc je možné provést na jednom vzorku více zkoušek. Kontakt je během jedné otáčky vzorku realizován dvakrát. Doba testování tedy klesá o polovinu oproti předchozí metodě. Problematické je simulování různých režimů mazání.

add. 3) Tuto metodu často využívají výrobci ložisek. Výhodou jsou nízké náklady na zkušební vzorky a možnost testování v širokém rozsahu otáček. Jejich tvar umožňuje snadnou obrobitelnost a dosažení velké přesnosti (obr. 4-3). Rozměry vzorku rovněž umožňují více testů na stejném kusu, což přináší větší reprodukovatelnost výsledků.

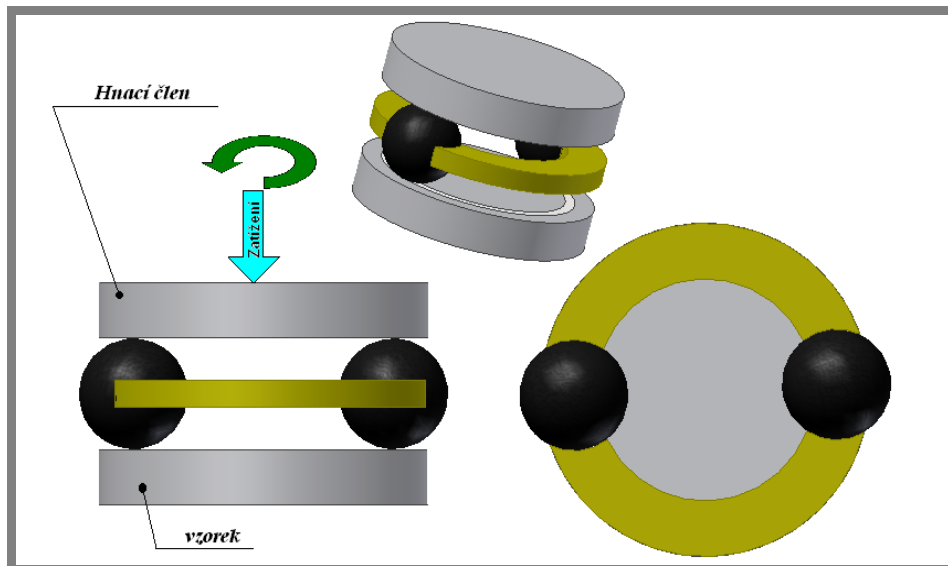
U této metody je ale mnohem hůře aplikovatelný prokluz. Mazivo je aplikováno po kapkách do kontaktního místa. To je odlišný přístup oproti nejpoužívanějšímu typu tj. vstřikováním tryskou. Zatížení je realizováno pomocí kalibrovaných pružin, což limituje zatížení na určité diskrétní hodnoty. Změny v mechanických vlastnostech pružin se musí brát v úvahu. Navíc, aplikace zatížení se omezuje pouze na směr kolmý ke vzorku.



Obr. 4-3 Princip využívající kontaktu kulička na tyč

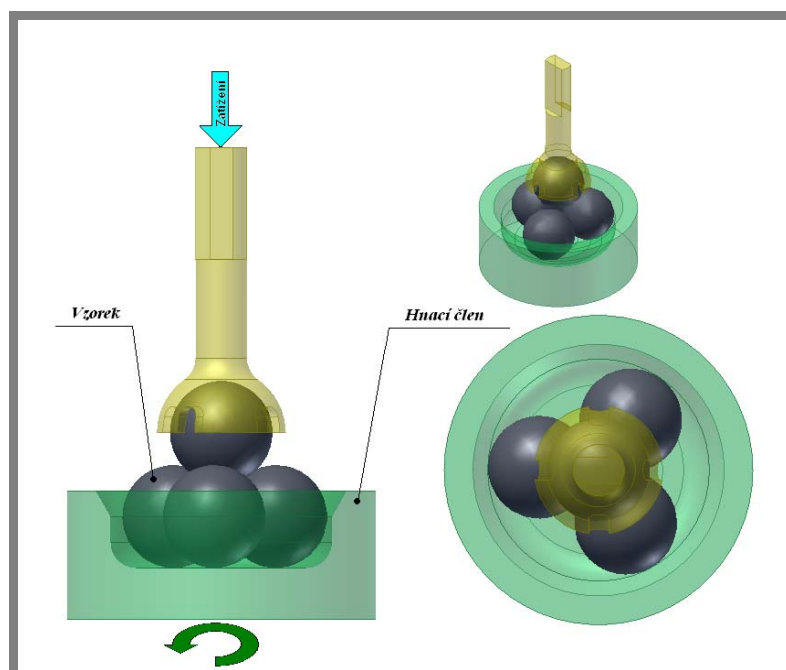
add. 4) Tento typ vychází z testování valivých elementů axiálních ložisek (obr. 4-4). Rozsah testování je velmi velký jak s ohledem na otáčky, tak i zatížení. Při modifikaci daného zařízení je možné simulovat podmínky prokluzu v širokém rozmezí. Zatížení je aplikováno na kotouče (v anglické literatuře nazývané washers). Rovinná plocha spodního statického kotouče navíc umožňuje dobrou aplikaci ochranných vrstev (např. nitridace). Z tohoto důvodu je zařízení hojně využíváno pro vyšetřování jejich mechanických vlastností. Horní povrch kotouče je opatřen drážkou stejně jako tomu je v ložisku. Výhodou je aplikace různých dávek maziva a simulování mnoha režimů mazání. Je možné testovat vzorky různých tvarů

při jistých modifikacích klece. Aplikace zatížení se omezuje pouze na směr kolmý k rovině povrchu. Rozměry vzorku jsou poměrně velké a je požadována vysoká rovinnost ploch kotoučů, jejíž dodržení je poměrně technologicky náročné.



Obr. 4-4 Princip využívající kontakt plocha na kouli

add. 5) Čtyřkuličkové stroje mají své výhody zejména ve variabilitě testování (obr. 4-5). Zatížení je aplikováno přes horní kuličku, která svou geometrií simuluje vnější kroužek ložiska. Spodní miska naopak simuluje geometrii vnitřního kroužku ložiska. Valivé elementy a zároveň zkušební vzorky představují zbylé kuličky.



Obr. 4-5 Princip využívá kontakt mezi kuličkami

Tento princip je velice blízký podmínkám ve valivém ložisku s hlubokou drážkou. Navíc konfigurace misky umožňuje realizovat testy různých režimů mazání a různých typů kontaktů. Účinnost tohoto principu je zvýšena použitím pěti kuliček. Takový princip je využíván například v laboratořích NASA.

Použití se omezuje pouze na kulové plochy. Náklady na přesnost vzorku jsou vysoké.

Tabulka 1. obsahuje srovnání výhod a nevýhod jednotlivých typů experimentálních zařízení. Autor v této souvislosti zavedl stupnici o třech úrovních. Úroveň jedna znamená - nesplňuje v plném rozsahu. Úroveň dva znamená - splňuje pouze s modifikacemi. Poslední třetí stupeň znamená - splňuje požadavky.

Tab. 1 Výhody a nevýhody jednotlivých typů experimentálních zařízení

Požadavky	Dva kotouče	Kotouč a kruhová tyč	Kulička a kruhová tyč	Kulička a rovninná plocha	Čtyři kuličky
vysoké otáčky	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •
simulace prokluzu	• • •	• • •	• •	• •	• •
vysoká zatížení	• • •	• • •	• •	• • •	• • •
různý směr zatížení	• •	• •	• •	•	• • •
různé geometrie vzorků	•	• •	•	• • •	• • •
nízké náklady na výrobu vzorku	•	• • •	• • •	•	•
různé režimy mazání	• • •	• •	•	• • •	• • •

4.3 Komerční výrobci experimentálních zařízení pro RCF

4.3

Při výzkumu RCF na ÚK bylo nejprve zvažováno zakoupení nového experimentálního zařízení, proto autor prozkoumal dostupné zdroje. Podařilo se objevit pouze dva výrobce.

4.3.1 Experimentální zařízení PCS Instruments

4.3.1

Toto zařízení je výrobkem společnosti PCS Instruments. Je zaměřeno na tvorbu a detekci mikro-pittingu ve zkušebním materiálu. Je využíváno testovací strategie disk na tyč. Kontakt je během jediné otáčky vytvořen třikrát. To výrazně redukuje testovací čas. Zařízení umožňuje širokou škálu testovacích podmínek (včetně oteplení maziva). Mezi přednosti patří i nízká spotřeba testovaného oleje. Celý proces je plně automatizován a řízen procesorem včetně odhadu tření. Více

informací je možné získat na internetových stránkách společnosti PCS Instruments [42].

Důvod, proč nebylo toto zařízení zakoupeno, jsou vysoké pořizovací náklady (ca. 4 000 000 CZK).



Obr. 4-6 Zkušební zařízení MPR [42]

Tab. 2 Základní parametry zkušebního zařízení MPR [42]

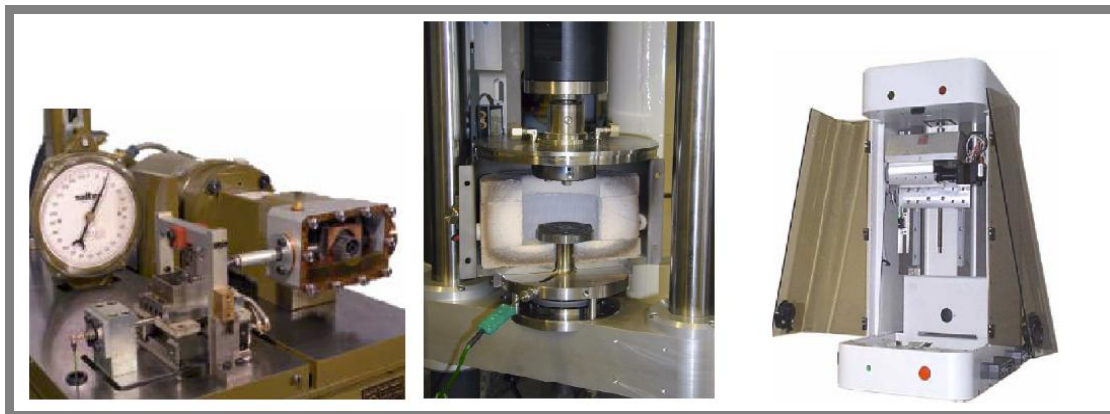
Specifikace MPR	
Zatížení	0 až 2000 N
Kontaktní tlak	3,2 GPa
Rychlost	0 až 4 m/s
STR poměr	0 až 200%
Teplota prostředí	až 150°C
Objem maziva	150 ml
Počet cyklů za hodinu	$1 \cdot 10^6$ při rychlosti 3,5 m/s

4.3.2 Experimentální zařízení Tribolab

Tato společnost ve své nabídce nabízí poměrně mnoho testovacích přístrojů, kterých by mohlo být využito při studiu RCF. Namátkou je možné jmenovat TE 77. Tento stroj je bohužel spíše zaměřen na změny třecích účinků. Jeho variabilita umožňuje nastavit konfiguraci vhodnou pro měření RCF, ale bohužel nesplňuje podmínky v oblasti zatížení.

Zařízení TE 92 HS pracuje na principu čtyřkuličkové testovací strategie. Zařízení pokrývá širokou škálu požadavků. Odlišnosti jsou pouze ve strategii testování, geometrii vzorku a aplikaci prokluzu. Při příznivé ceně zařízení není vyloučeno, že se dostane do větší pozornosti.

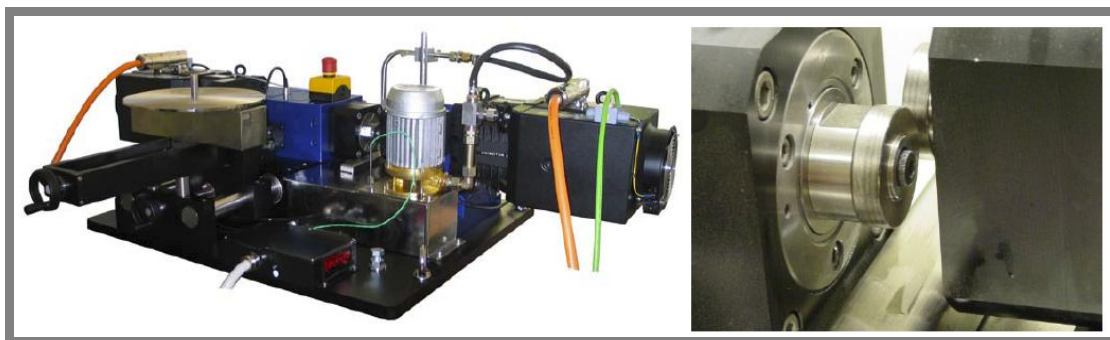
Neméně zajímavým zařízením je micro-macro tribometer. Tento stroj vyniká vysokou variabilitou proveditelných zkoušek. Většina zkoušek je založena na principech valivý element na plochu. To ale opět není požadovaná testovací strategie. A proto i přesto, že se jedná o kvalitní zařízení, není pro aplikaci vhodné.



Obr. 4-7 [43] TE 77, TE92HS, Micro/macro tribometer

Poslední zařízení ze sortimentu společnosti tribolab, které přichází v úvahu je UTM 2000 Twin-disc. Zařízení je založeno na disk na disk principu. Dále, umožňuje on line měření zatížení, otáček a tření. Díky dvojici servomotorů dokáže měnit STR poměr. Promyšlený mazací systém realizuje různé mazací režimy od smíšeného až po plně mazací režim.

Zařízení tedy splňuje všechny požadavky. Odlišnosti jsou pouze ve zkušební strategii. Velké rozměry vzorku prodlužují jeho přípravu. Navíc geometrie vzorku představuje liniový kontakt. Na autorově pracovišti je zkoumán bodový kontakt.



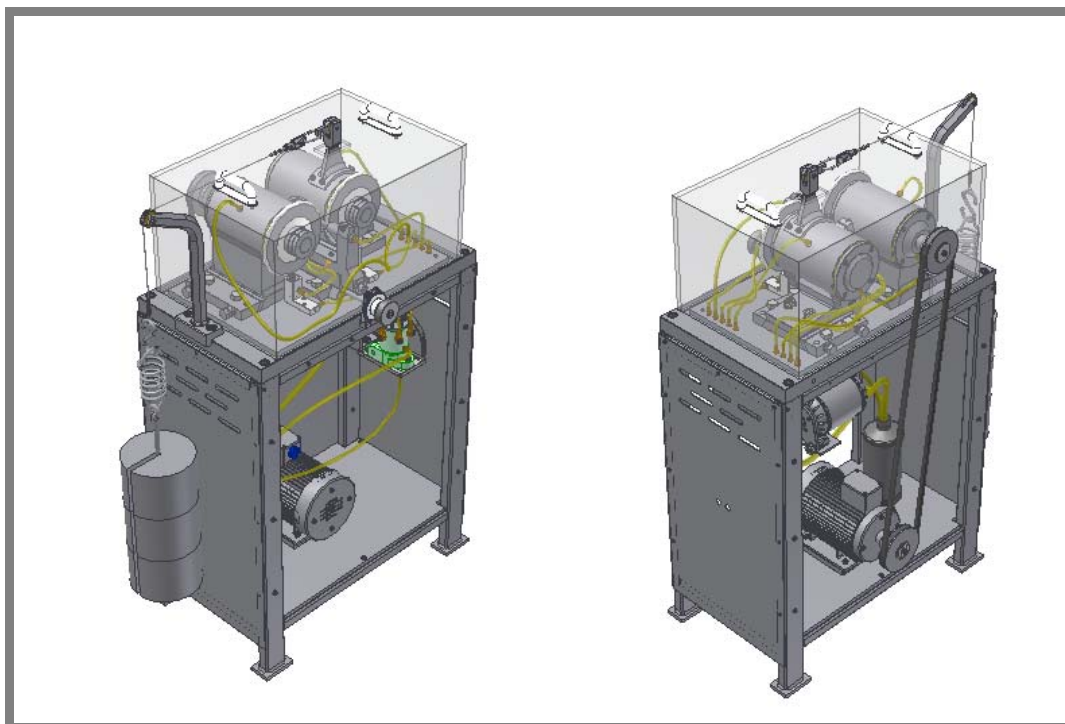
Obr. 4-8 Zkušební zařízení UTM 2 000 Twin disc [43]

Tab. 3 Přehled základních parametrů UTM 2000 twin disc [43]

Specifikace UTM 2000 Twin disk	
Zatížení	0 až 2000 N (mrtvé hmoty)
Třecí síla	0 až 50 N
Rychlost	0,1 až 3000 ot./s
STR poměr	-
Teplota prostředí	až 100°C

4.4 Experimentální zařízení R-mat

Vysoké náklady na experimentální zařízení vedou světová pracoviště ke konstrukci vlastních strojů. Podobná situace je i na autorově pracovišti. Zařízení R-mat2 bylo zkonstruováno přibližně v letech 1975. Od této doby je využíváno pro experimentální zkoušky RCF na VUT v Brně. Autor při bližším seznámení s tímto strojem došel k závěru, že se jedná o dobře promyšlené experimentální zařízení, které je možné vhodnými rekonstrukcemi uvést do vyhovujícího stavu pro výzkum RCF. Vzhledem k faktu, že o stroji se dochovalo minimum informací, uvádí autor jeho stručný popis v souladu s cílem 1 této diplomové práce.



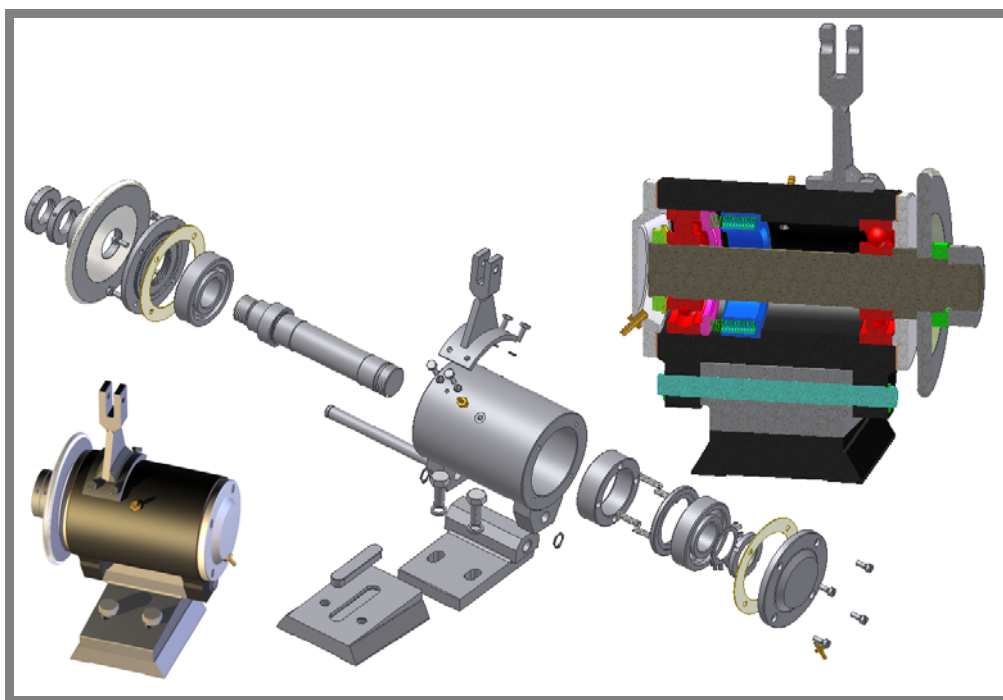
Obr. 4-9 Experimentální zařízení R-mat2d

4.4.1 Pohon a uložení kotoučů

Pohon experimentálního zařízení je závislý na jeho konkrétní variantě. Autor se zabývá rekonstrukcemi na zařízení typu *c* a *d*. Tato zařízení jsou poháněna střídavým, třífázovým, asynchronním elektromotorem o jmenovitém výkonu 500 W a jmenovitých otáčkách 1 400 ot./min (R-mat2d) respektive 1 580 ot./min (R-mat2c). Odtud je výkon přenášen pomocí klínové řemenice na statické vřeteno v poměru 0,853 (R-mat2d) respektive 0,4 (R-mat2c).

Testovací kotouče jsou uloženy ve dvou vřetenech. Jedno vřeteno je statické a druhé pohyblivé (rotační pohyb okolo pohyblivého čepu) z důvodu aplikace zatížení na testovací kotouč. Hřídel s kotoučem je uložena identicky pro obě vřetena pomocí jednořadého kuličkového ložiska. Ložisko (typ 6307 ČSN 02 4637) blíže ke kotouči je fixováno pevně na třech místech, zatímco druhé ložisko je pevně fixováno pouze ve dvou místech. Třetí bod je realizován dotlačením pomocí pružin. Ložisko, respektive jeho vnější kroužek, tedy za jistých okolností může být přesunuto. Tato

konfigurace předchází délkovým přetvořením hřídele v místě uložení kotoučů vlivem oteplení, které by mohlo negativně ovlivnit měření ve smyslu vzájemné polohy kotoučů. Hřídel statického vřetena je přizpůsobena pro osazení klínové řemenice. Této hřídele je rovněž využito u prototypového zařízení R-mat2c z důvodu různého pohonu vřeten ve smyslu otáček. Přenášení výkonu mezi těmito hřídeli je podrobně věnována kapitola 5.2. Samotný plášť obou vřeten je vyroben z robustního dutého profilu, aby se předešlo pružným deformacím při zatížení. Obě vřetena jsou ukotvena na základovou desku pomocí lichoběžníkových profilů a pevně fixována.

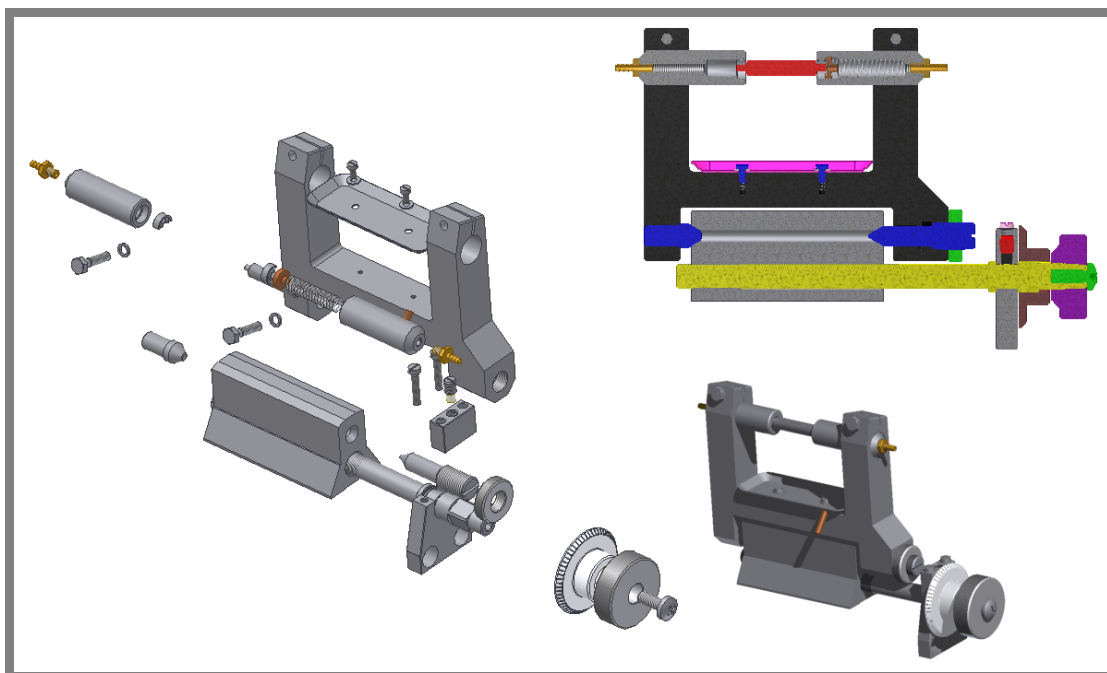


Obr. 4-10 Schéma pohyblivého vřetene

4.4.2 Testovaný vzorek a jeho uložení

Zkušební vzorek je válcového tvaru. O výhodách této konfigurace bylo pojednáno v kapitole 4.2. Pro jeden vzorek je realizováno zpravidla až 10 zkoušek v jednotlivých "stopách". Vzorek je uložen na dvou ložiscích typ 624 ČSN 02 4630. Ložiska jsou umístěny v pouzdrech, ve kterých je jedno fixováno pevně a druhé volně dorazem pružinou obdobně jako tomu je ve vřetenech. Tato konfigurace se opět snaží předcházet dodatečně vznikajícím napětím od délkového přetvoření vlivem oteplení. Konfigurace rovněž umožňuje snadné vyjmutí a upnutí vzorku do pouzdra. Samotná pouzdra jsou pomocí svěrného spoje pevně fixována s U-ramenem. Na tomto rameni je také přišroubováno vibrační čidlo. Samotné rameno je otočně spojeno se základnou přes upínací trny. Toto uložení je možné upravovat. Jednoznačným požadavkem jsou vymezené vůle. Základna pro ukotvení se základovou deskou využívá stejný princip jako vřetena, tedy pomocí lichoběžníkových profilů. Změnou je ale skutečnost, že základna je uložena pohyblivě, protože je potřeba nastavovat jednotlivé zkušební "stopy" na vzorku. Za tímto účelem prochází základnou posuvový šroub, který je ovládán kruhovým madlem na přední straně stroje. Zajištění

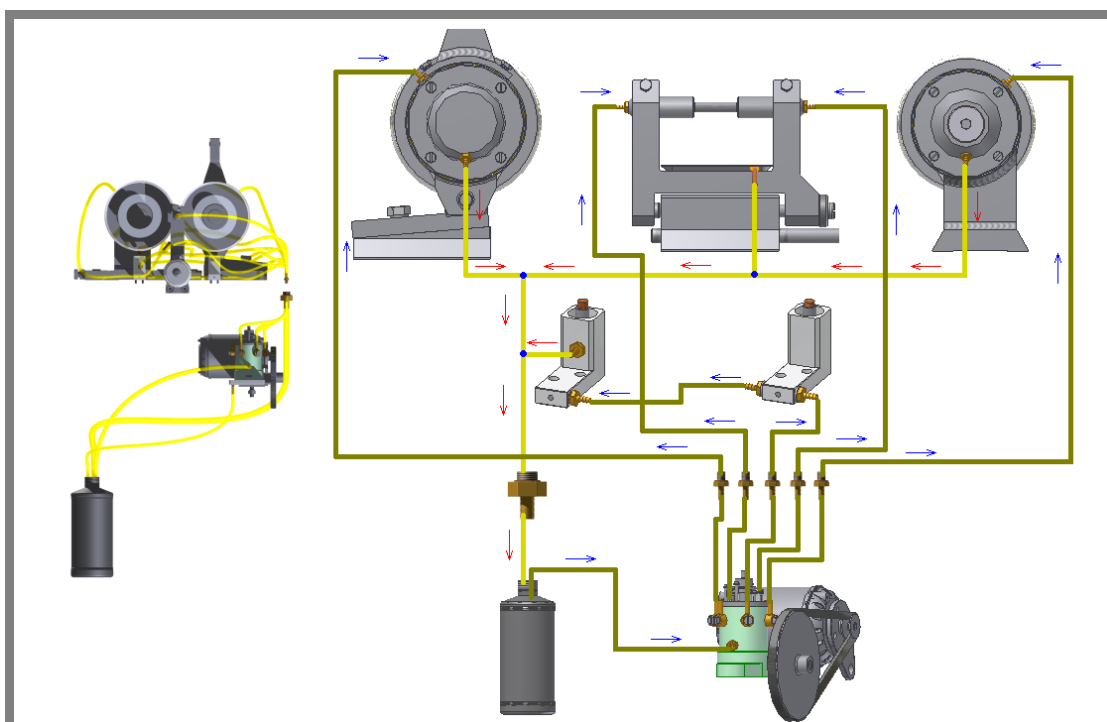
nastavené polohy je vytvořeno zablokováním posuvového šroubu stavěcím šroubem na horní straně kotvícího lože.



Obr. 4-11 Schéma držáku vzorku

4.4.3 Mazací systém

Experimentální zařízení R-mat2 jsou zkonstruována pro kapalná maziva.



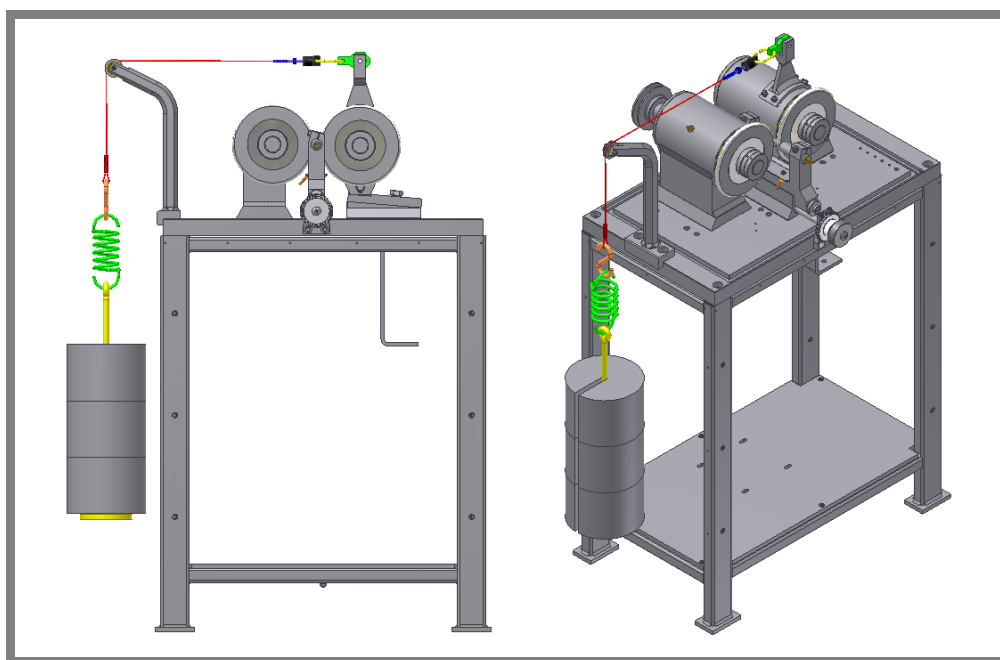
Obr. 4-12 Schéma mazacího okruhu

Mazání je realizováno jako vícepotrubní centrální oběhový systém. Mazivo je v zásobníku na spodní části stroje. Odtud je čerpáno dávkovacím čerpadlem. Toto čerpadlo má svůj nezávislý pohon v podobě třífázového asynchronního elektromotoru na střídavé napětí o výkonu 25 W a jmenovitých otáčkách 1 340 ot./min. Od tohoto pohonu k čerpadlu se výkon přenáší pomocí klínové řemenice v poměru 0,01. Dále pomocí vačkového mechanismu je mazivo distribuováno do pěti potrubí z plastových hadiček. Tento systém dodává mazivo celkem k šesti mazacím bodům. Hladina maziva je regulována odtokem. Přebytečné mazivo se vrací pomocí centrálního potrubního systému zpět do zásobníku.

4.4.4 Aplikace zatížení

4.4.4

Aplikace zatížení je založena na principu "mrtvé" váhy. Zatížení tvoří kalibrované závaží v hodnotách 1, 1,76, 5, 6,1, 6,53, 7,13 a 10 kg. Tíhová síla závaží je přenášena pomocí lanka a pákového mechanismu na plášť pohyblivého vřeten. V části mezi závažím a vřetenem je zařazen pružný člen v podobě pružiny. Tento má za úkol tlumit případné rázy. Pohyblivé vřeteno přitlačí skrze testovací kotouč vzorek na statické vřeteno. Aplikovaná síla se rozloží na kontaktní tlak, který je možné odhadovat na základě Hertzovy kontaktní teorie. Zařízení R-mat2 umožňuje vytvořit kontaktní tlak až 5 GPa.



Obr. 4-13 Schéma zátěžového systému

4.4.5 Zpracování a analýza signálu

4.4.5

Poškozený vzorek pittingem se projeví nárůstem vibrací U-ramene. Na tomto rameni je přišroubován akcelerometr. Seismická hmota snímače působí na piezokrystal, který převádí působení na elektrický spojitý signál s citlivostí cca. 100 mV/g. Tento signál je dále zpracován řídicí jednotkou, která je nastavena na "poplachovou" hodnotu (cca. 2,2 mm/s). Tato hodnota byla získána na základě

zkušeností při měření RCF v laboratoři kontaktní únavy. Tato část se stala předmětem rekonstrukce a bude podrobněji rozebrána v kapitole 5.1. Po detekci poplachové meze je zařízení R-mat2b, c zastaveno pomocí spínacího relé elektromotoru. Řídící jednotka sleduje čas měření ve smyslu od spuštění, do poškození vzorku. Výstupem je čas v minutách. Na základě otáček a času je možné stanovit počet cyklů do poškození.

4.4.6 Popis příčin rekonstrukce

Zařízení R-mat bylo zkonstruováno přibližně v roce 1975. Obecně, princip testování od této doby zůstal prakticky nezměněn. Nicméně, diagnostika a specifikace zkoušek doznaly jistých změn. V současné době rostou nároky na simulaci prokluzu. Za tímto účelem je přizpůsobeno pouze zařízení R-mat2c jako prototyp. Ukázalo se, že prototyp prokluzového systému je nevyhovující a vyžaduje úpravy. Problémy tohoto prototypu jsou podrobně rozebrány v kapitole 5.2.1. Navíc, opotřebení některých dílů způsobuje v současné době rozptyl měření. Rozptyl se pohybuje v hodnotách okolo $30 \cdot 10^6$ cyklů. Dále, některé zkoušky nejsou platné, protože zařízení bylo odpojeno později. Zařízení ale má své kvality a jeho principy jsou léty prověřené. Tyto důvody vedou k rekonstrukci za účelem odstranění nedostatků v současném stavu. Závažné nedostatky vyžadující neodkladnou rekonstrukci jsou tedy následující:

- diagnostika poškození vzorku
 - zvýšení citlivosti snímače
 - on-line sledování měření na dálku
 - záznam dat pro postprocessing
 - ovládání spínacího relé elektromotoru
- odstranění nedostatků prototypu prokluzového zařízení
 - zpřesnit přenášené výkony
 - zvýšit spolehlivost
 - snížit hlučnost a omezit vibrace
 - zajistit variabilitu prokluzových podmínek

Výhledově je vhodné věnovat pozornost následujícím nedostatkům:

- seřízení testovacích disků do horizontální a vertikální roviny
- on-line diagnostika otáček
- rekonstrukce mazacího systému
 - teplotní stabilizace/variabilita okruhu
 - rozdělení okruhu na dva nezávislé (pro vzorek, pro periferie)
 - kontrola dodávek maziva a jeho filtrace
 - odstavení zátěže spolu s elektromotorem po překročení poplachové meze

5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

5

5.1 Detekce poškození vzorku

5.1

Detekce poškození je realizována pomocí změn vibrací U-ramene. Na tomto rameni je uložen vzorek. Změna v topografii povrchu, ve smyslu vzniku pittingu, způsobí nárůst amplitudy vibrací. Nepoškozený a nemodifikovaný povrch vzorku způsobuje vibrace s efektivní hodnotou rychlosti přibližně 1,6 mm/s. Se vzrůstajícím poškozením vibrace stoupnou přibližně na efektivní hodnotu 2,2 mm/s. Tyto hodnoty jsou přirozeně závislé na velikosti zatížení a otáček stroje.

5.1.1 Původní řešení

5.1.1

V původní konstrukci byl využit akcelerometr B&K 4328. Signál vyhodnocovala jednotka SA 57. Na této jednotce se nastavuje jak citlivost snímače, tak poplachová mez. Dlouhá léta provozu snímače snížila jeho detekční schopnosti. S rostoucím časem provozu bylo stále obtížnější naleznout optimální hodnotu citlivosti vzhledem k pittingu. Navíc, když byla naleznuta správná hodnota pro jednu sérii měření, pro následující měření platila jiná. Tyto skutečnosti způsobily nevěrohodnost výsledků s vysokým rozptylem a často nedocházelo k detekci vůbec.

5.1.2 Nová koncepce

5.1.2

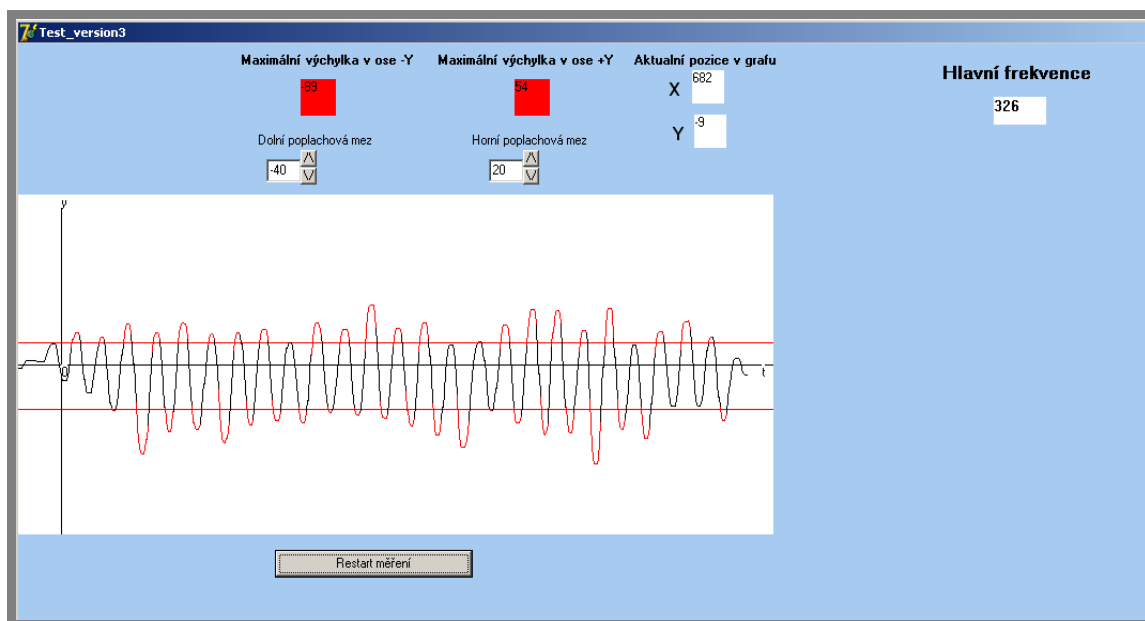
Pro rekonstrukci této části stroje autor prozkoumal komerční řešení. Realizace by vyžadovala investici cca 50 000,- pro každé experimentální zařízení. Tato částka vedla autora k myšlence konstrukce vlastního detekčního zařízení. Jako čidlo se autor pokusil využít optické polohovací zařízení, které se používá jako periferie u PC. Parametry moderních polohovacích zařízení se téměř přibližují některým akcelerometrům. Autor si pro své testy vybral laserové polohovací zařízení s následujícími parametry:

Tab. 4 Přehled parametrů Microsoft Laser mouse 6 000 v1.0

Výrobce	Microsoft
Typ	Laser mouse 6 000 v1.0
Rozlišení	1 000 dpi
Počet snímků za vteřinu	6 000
Maximální zrychlení	Neuvedeno
Maximální rychlost	Neuvedeno
Odezva	1 ms

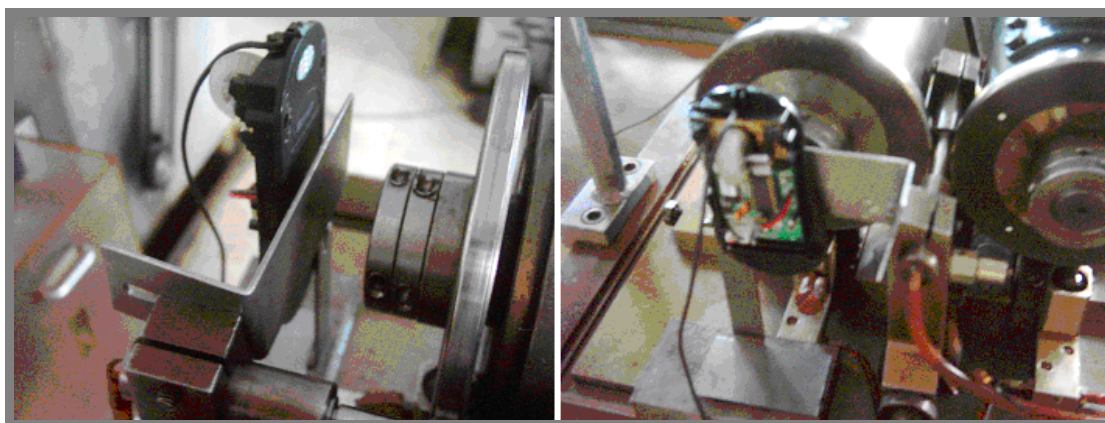
Tyto parametry teoreticky umožňují zařízení zaměřit rozdíl v posuvu povrchu o 0,03 mm. Vzorkovací frekvence snímání povrchu je 6 000 Hz. To znamená, že maximální teoretická frekvence měřených kmitů je 3 000 Hz. Informace o poloze může být mezi periferií a PC aktualizována 1 000 během vteřiny.

Dále, ve vývojovém prostředí Delphi autor vytvořil zkušební software (software je součástí DVD přiloženého k této práci).



Obr. 5-1 Ukázka řídicího softwaru

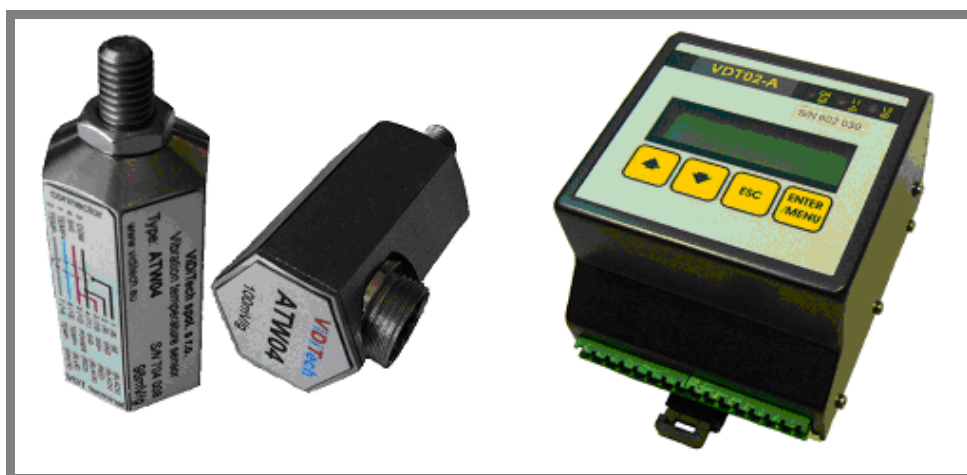
Polohovací zařízení bylo demontováno a upnuto k zařízení R-mat2d. Pro testy byl zvolen poškozený vzorek. Ukázalo se, že zvolené polohovací zařízení nedosahuje potřebné citlivosti a není možné detekovat poškození. Problémem se stává pravděpodobně nízká komunikační rychlost mezi periferií a PC. Vzhledem k tomu, že zařízení je připojeno přes USB port, není v autorových schopnostech dosáhnout vyšší komunikační rychlosti než 1 kHz. Z toho plyne frekvenční rozsah měření bez antialiasingového efektu 0-500 Hz. Takovéto pásmo je příliš nízké vzhledem k otáčkám vzorku, které dosahují hodnot více než $7\,000\text{ min}^{-1}$.



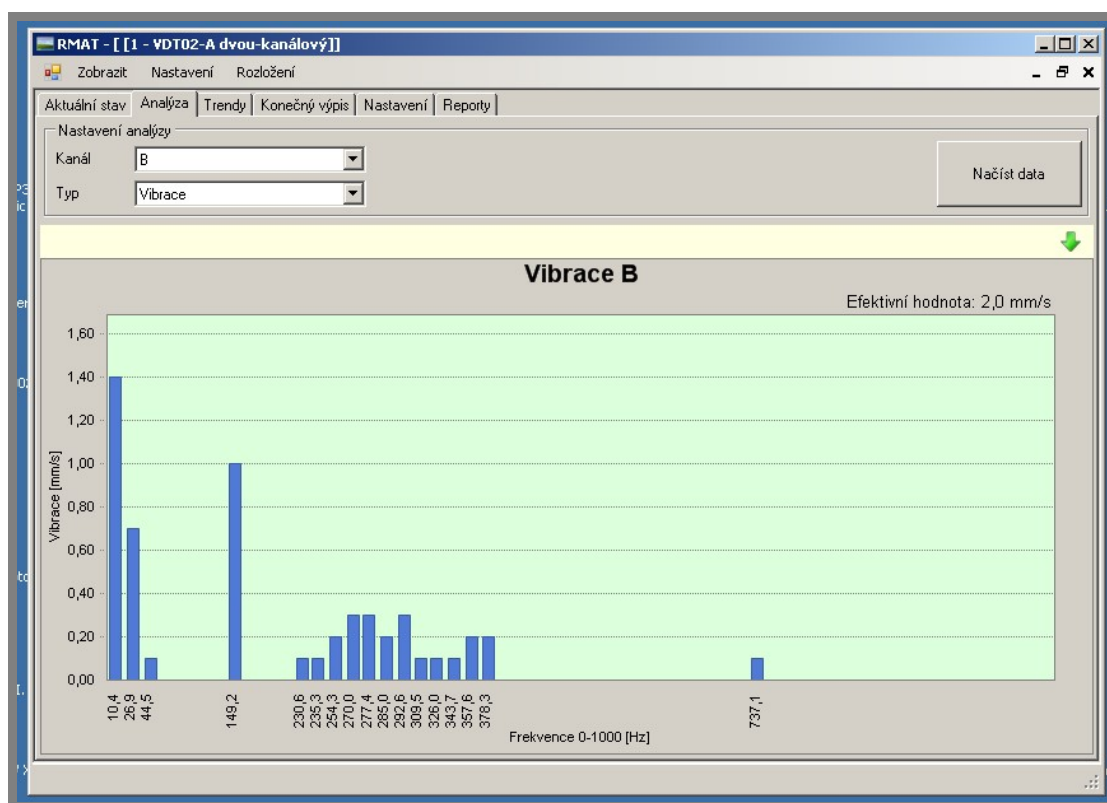
Obr. 5-2 Zkušební upnutí polohovacího zařízení

5.1.3 Řešení Viditech

V průběhu řešení se podařilo získat nové detekční zařízení od společnosti Viditech zahrnující akcelerometr a vyhodnocovací jednotku. Zařízení bylo úspěšně testováno. Software navíc umožňuje sledovat průběh zkoušky po internetu. Poskytuje i možnosti využití Fourierovi transformace. Je tedy možné sledovat rozkmity ve frekvenčním spektru. Řídicí jednotka obsahuje spínací relé, které stroj po detekci poškození odpojí. Čidla navíc měří teplotu v místě upnutí snímače a to až do 120°C.



Obr. 5-3 [55] Nový akcelerometr ATW04, Nová jednotka VDT02-A



Obr. 5-4 Ukázka při měření vibrací na stroji R-mat2c

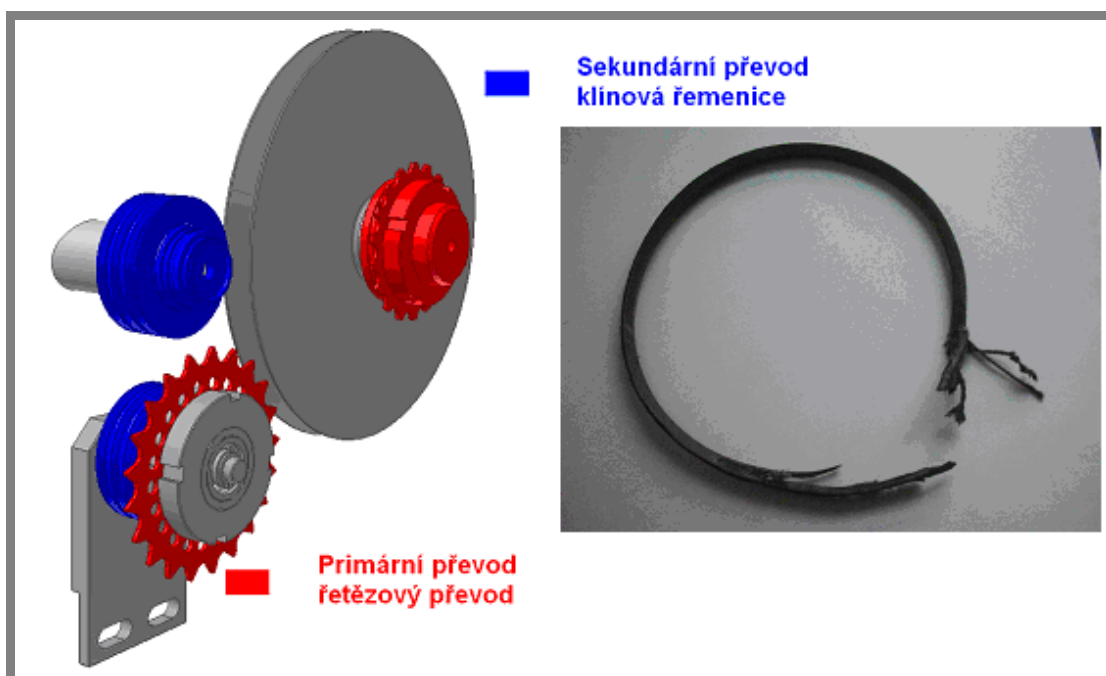
Je ale nutné vzít v úvahu nevhodný způsob upnutí akcelerometru k U-rameni. Vzhledem k rozdílu mezi upnutím původního a nového akcelerometru (původně M6 nyní M8) bylo nutné vytvořit upínací desku. Tato deska zvyšuje poloměr měřicího bodu oproti zkušebnímu vzorku. Generovaná zrychlení jsou tedy nepatrně vyšší. Po úspěšném testování byl systém Viditech aplikován na zkušební zařízení R-mat 2b a R-mat 2c.

5.2 Prokluzový systém

Nový prokluzový systém představuje ve skutečnosti inovaci na zařízení R-mat2c. Tento systém, využívající převodu klínovými řemínky, byl zkonstruován jako prototyp. Při aplikaci vyšších zatížení se projeví nedostatky původního zařízení. Nová koncepce odstranila nedostatky původního řešení a umožnila realizaci prokluzu mezi kotouči v úrovních cca. 20, 15, 10 a 5%.

5.2.1 Původní řešení

Původní koncepce je založena na dvojím převodu. Od statického vřetene je výkon přenášen řetězovým převodem na mezikus. Změnou řetězových kol dochází ke změně převodového poměru a tím i prokluzových podmínek. Převod není možné realizovat přímo, protože by mohlo docházet ke zkreslení přenosu zatížení na pohyblivé vřeteno. Druhý převod je v poměru 1:1 a je realizován pomocí klínové řemenice.



Obr. 5-5 Původní prokluzový systém

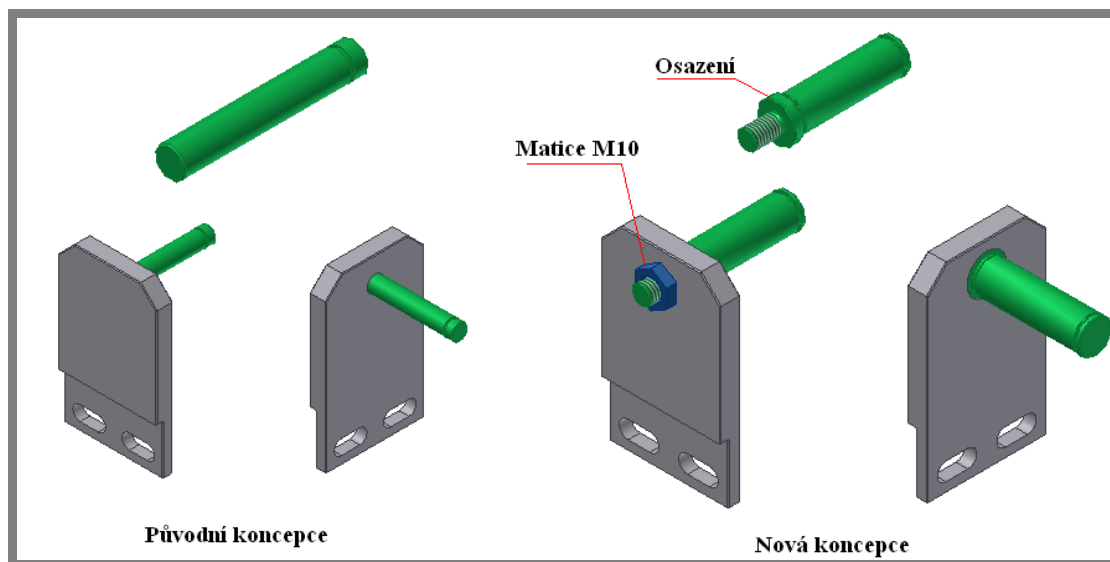
Problémy tohoto prototypu byly v uložení mezikusu systému. Čep, který byl pevně spojen s tělesem, se při aplikaci zatížení uvolnil. Následné vibrace způsobily nesouosost řetězového převodu. Na základě těchto skutečností docházelo ke svlékání řetězu z kola. Navíc, z fyzikální podstaty řetězového převodu vyplývá, že otáčky vlivem navíjení řetězu mírně kolísají (pro dané uspořádání cca. 2,5%). To způsobuje různý prokluz v čase během měření, a to je nežádoucí. Klínová řemenice navíc nezajišťovala zcela korektní přenos otáček na pohyblivé vřeteno. Vlivem tahových sil docházelo ke smýkání řemene v drážce. Důsledkem přehřívání bylo nadměrné opotřebení. Často docházelo k přetržení řemene. Původní koncepce nebyla pro testy vyhovující. V neposlední řadě původní řešení bylo poměrně hlučné.

5.2.2 Nová koncepce

5.2.2

Výsledné řešení je pátou vývojovou verzí. Požadavky na novou koncepci zahrnovaly odstranění nedostatků uvedených v kapitole 4.4.6. Po dohodě byl vznesen požadavek na změnu prokluzu mezi kotouči v úrovních 5, 10, 15, 20%. Dále bylo požadováno zvýšení průměru čepu. Autor zachoval koncepci dvojího převodu, ale řetězový a klínový převod byl zaměněn za synchronní řemenový. Největší změny byly provedeny v mezikusové části převodu.

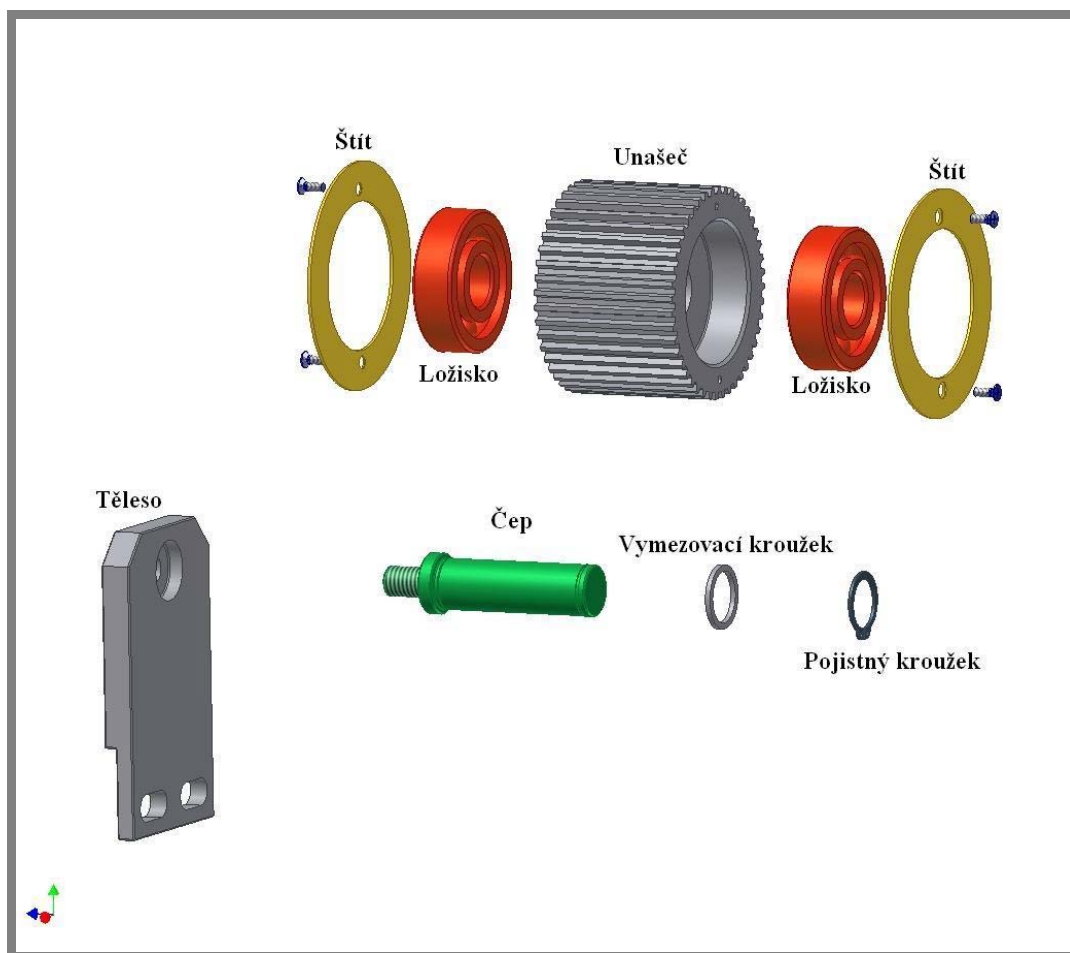
První změnou je modifikace uložení čepu v tělese. Pro dosažení spolehlivého řešení bylo na čepu vytvořeno osazení o průměru 20 mm. Pro správnou fixaci bylo zvoleno uložení s mírným přesahem. Aby bylo zajištěno, že nedojde k uvolnění čepu, bylo na jeho konci vytvořeno šroubové spojení. Dotažením matice je zaručeno, že k uvolnění nedojde, ale část zároveň zůstává snadno demontovatelná.



Obr. 5-6 Původní uložení a navrhované nové uložení

Druhou podstatnou změnou byla nová konstrukce unašeče. Autor zvolil pro oba převody stejný typ ozubení (HTD 5M). Dále, analýzou osových vzdáleností byl stanoven optimální počet zubů na mezikusu (44). Sjednocení typu a počtu zubů umožnilo řešit unašeč z jediného kusu. Uložení unašeče na čepu zůstalo zachováno, tedy pomocí dvojice ložisek. Větší rozměry unašeče dovolují osadit větší ložiska (ZKL 6303 AZ ČSN 02 4640). Tím stoupla životnost daného uzlu a předpokládá se i

pokles vibrací. Větší vnitřní kroužek ložiska umožňuje navýšení průměru čepu z původních 10 mm na 17 mm.



Obr. 5-7 Nové řešení unašeče

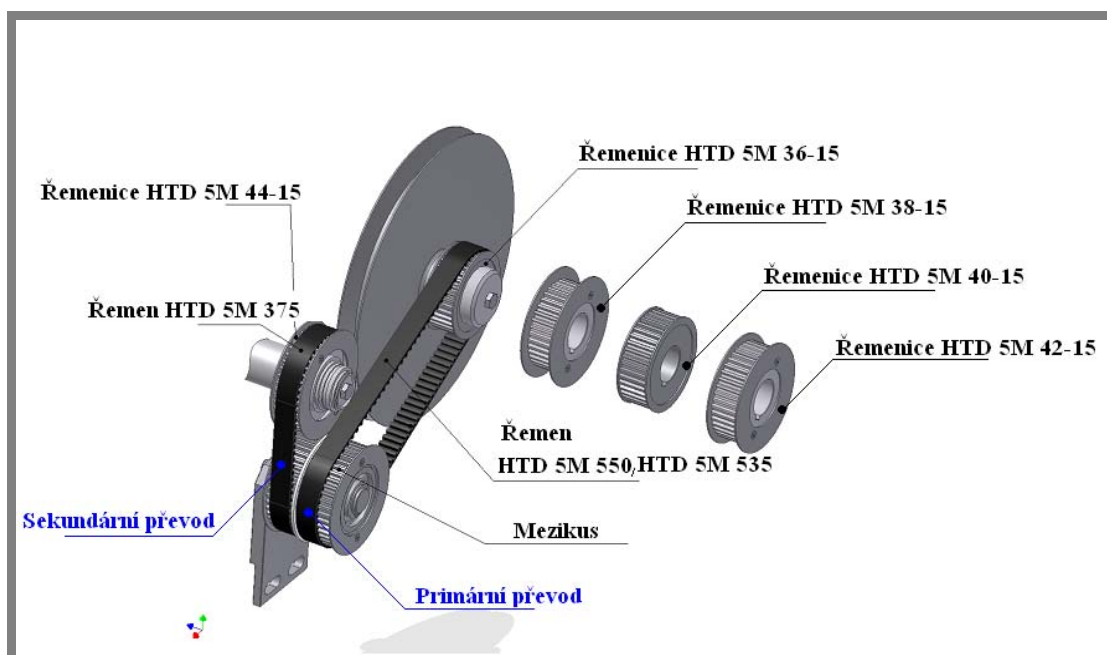
Změna prokluzu je realizována změnou převodového poměru v primárním převodu (Obr. 5-8). Poměr se mění v závislosti na zvoleném počtu zubů respektive zvolené řemenici. V důsledku diskrétních hodnot počtu zubů není reálné vytvořit prokluz v požadovaných hodnotách. Přehled navrhovaných prokluzů je v tabulce 5.

Tab. 5 Dosažitelné prokluzové podmínky

Přehled použitých převodů			
z1 [-]	z2 [-]	převodový poměr [-]	Prokluz [%]
42	44	1,048	4,7
40	44	1,1	9,5
38	44	1,158	14,6
36	44	1,222	20

Záměna řemenic je realizována na hřídeli statického vřetene. Přenos krouticího momentu mezi řemenicí a hřídelí je zajištěn perem. Z důvodu různých osových vzdáleností jednotlivých převodů byl pro převody s prokluzem 20 a 15% využit řemen s 550 zuby. Pro převod s prokluzem 10 a 5% byl použit řemen s 535 zuby. Vyráběné řemenice byly dodatečně osazeny plechovými štíty, aby bylo zaručeno, že nedojde ke svléknutí řemene z kola.

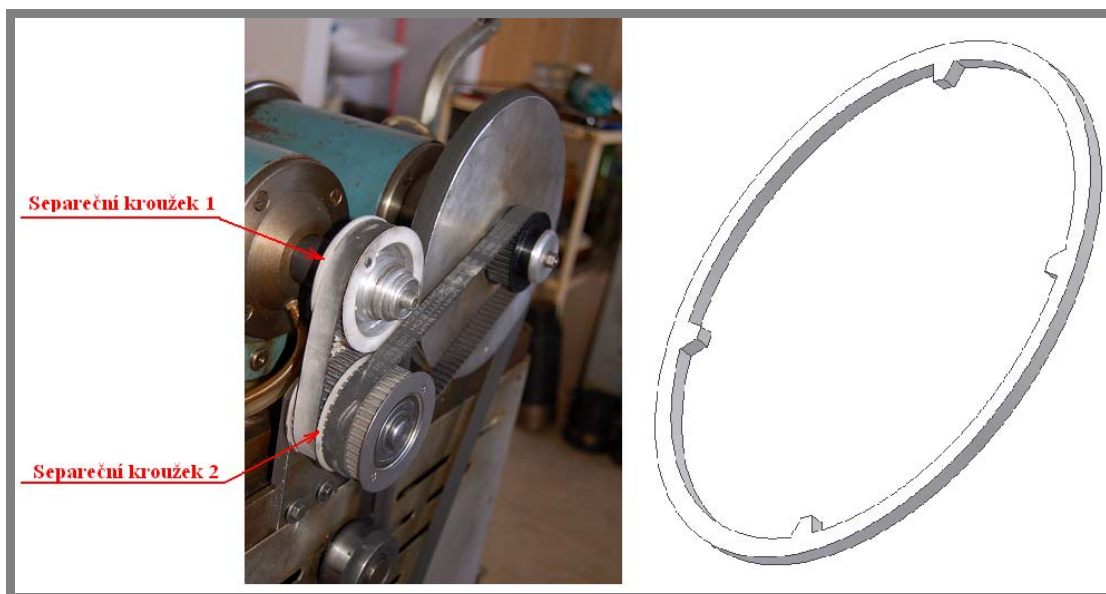
Po splnění funkčních parametrů následoval návrh řemene pomocí softwaru MITCALC. Vzhledem k výkonu pohonu (550 W) a otáčkám (603 ot./min) byl zvolen řemen typu HTD 5M o šířce 15 mm. Převodové ústrojí je navrženo k přenosu až 1,5 kW výkonu. Převod je tedy dvojnásobně předimenzován. To zaručuje jeho spolehlivost i v nejtěžších podmínkách.



Obr. 5-8 Návrh nového převodového mechanismu prokluzového systému

Následné testy prototypu odhalily nedostatky. Vlivem absence výkresové dokumentace musela být osová vzdálenost měřena. Vzhledem k nepřesnosti v tomto měření byl ještě dodatečně dokoupen řemen s 575 zuby pro upravení osové vzdálenosti. Dále, u zařízení R-mat2c není dodržena vzájemná rovnoběžnost os hřídelí s testovacími kotouči. Odstranit tuto nepřesnost by bylo velmi obtížné a nákladné. Jejím důsledkem je pohyb řemene směrem k plechovému štítu blíže ke stroji. Aby se předešlo případnému kontaktu mezi řemenem a štítem, byl dodatečně vytvořen separační kroužek, který je v kontaktu s řemenem. Pro výrobu bylo využito technologie Rapid prototyping. Kroužek je vyroben z materiálu ABS+ a funguje spolehlivě.

Opotřebením separačního kroužku vzniká bílý prášek. Proto je řemen v sekundárním převodu zbarven do bílé barvy. Opotřebením kroužku nedosahuje kritických hodnot. Po jedné sérii zkoušek (tj. 10) nebyl na kroužku pozorovatelný, ani měřitelný úbytek materiálu.

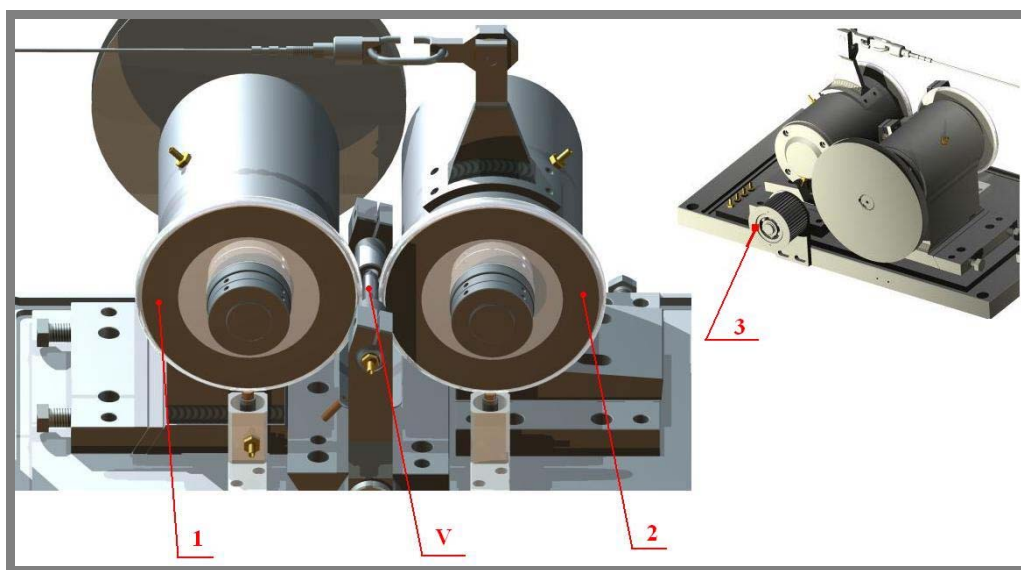


Obr. 5-9 Realizace prokluzového systému a jeho úpravy pomocí separačních kroužků

Celkové náklady pro nákup polotovarů a dílů dosáhly 6 200,- CZK. Tato částka je poměrně vysoká. Největšími položkami byly ozubené tyče, jako polotovary pro výrobu nestandardních řemenic (38 a 42 zubů). Cena dalších realizací tohoto systému by byla ale třetinová, protože je možné využít stávajících polotovarů.

5.2.3 Analýza prokluzových podmínek

Po rekonstrukci převodového systému prokluzu následovala verifikace požadovaných parametrů. Cílem byla analýza prokluzového poměru na zkušebním vzorku. Za tímto účelem byly změřeny otáčky testovacích disků (1,2), zkušebního vzorku (V) a unašeče (3) v mezikusu prokluzového systému.



Obr. 5-10 Kontrolované body

Měření bylo provedeno pomocí stroboskopické lampy a tachografu. V pozdějších fázích měření byly otáčky měřeny pouze pomocí stroboskopické lampy z důvodu snadnější manipulace při měření a spolehlivosti naměřených údajů. Stabilita prokluzových podmínek byla zjišťována pro tři zátěžové stavy a konfiguraci prokluzového systému na 20 %, tj. nejvyšší zatížení. Dále, měření probíhalo s repasovanými testovacími disky, které dosahují průměru 139 mm a zkušebním vzorku o průměru 9,6 mm. Prokluz mezi kotouči a vzorkem byl stanoven na základě empirického vztahu :

$$\Sigma[\%] = 2 \times \left(\frac{(U_1 - U_2)}{(U_1 + U_2)} \right) \times 100 \quad (1)$$

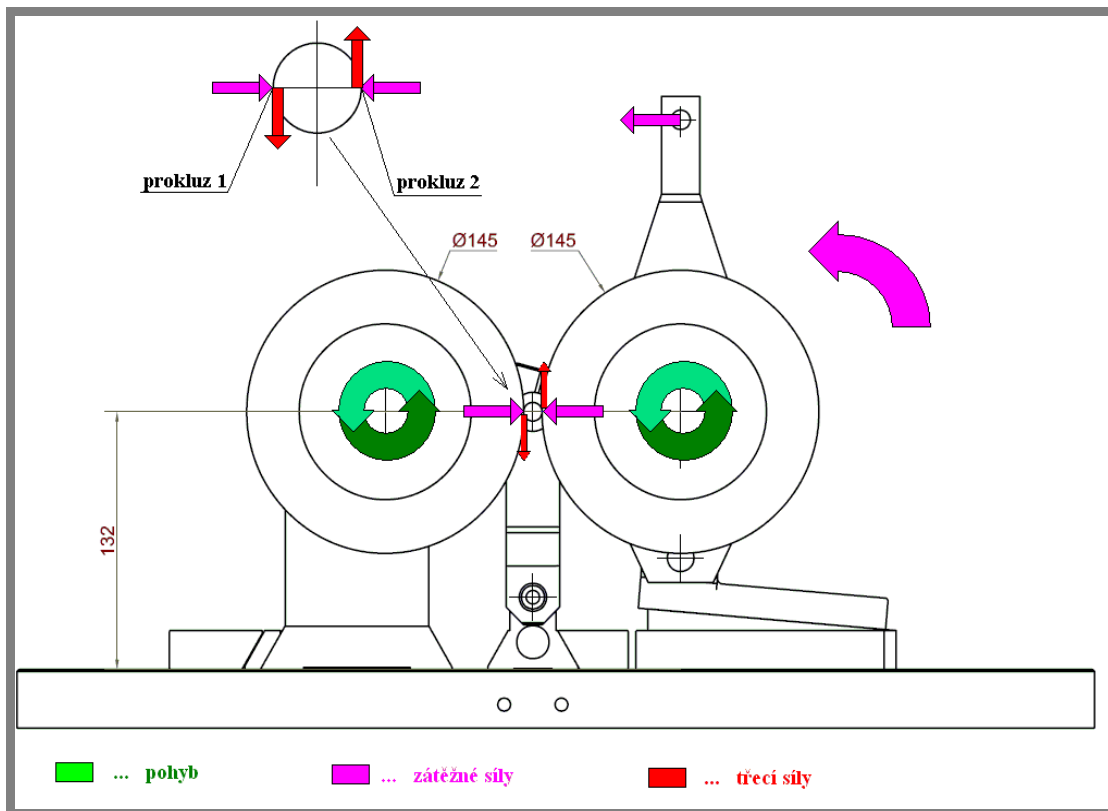
kde: $\Sigma [\%]$... prokluz
 $U_1 [\text{m.s}^{-1}]$... obvodová rychlost testovacího kotouče
 $U_2 [\text{m.s}^{-1}]$... obvodová rychlost vzorku

Přehled naměřených údajů následuje v tabulce 6.

Tab. 6 Přehled naměřených údajů

Měřicí bod	Rez zátěže	
	Stroboskop (ot./min)	SKF tachograf (ot./min)
1	613	615
2	501	500
3	501	500
Vzorek	–	–
Měřicí bod	Zátěž 16,75 k _o	
	Stroboskop (ot./min)	SKF tachograf (ot./min)
1	607	609
2	497	497 – 500
3	497	497 – 500
Vzorek	7 245	–
Měřicí bod	Zátěž 23,88 kg (po cca 5. min.)	
	Stroboskop (ot./min)	SKF tachograf (ot./min)
1	606	–
2	496	–
3	496	–
Vzorek	7 221	–
Měřicí bod	Zátěž 23,88 kg (po cca 3. hod.)	
	Stroboskop (ot./min)	SKF tachograf (ot./min)
1	608,609	–
2	498	–
3	498	–
Vzorek	7 265, 7 270	–

Naměřené hodnoty byly zpracovány dle vzorce (1) a jsou uvedeny v tab. 7. (níže). Vzhledem k podstatě měření na zkušebním vzorku během jedné otáčky dochází ke dvěma zátěžným cyklům. V obou cyklech dochází k prokluzu mezi kotoučem a vzorkem. Na obr. 5-11 jsou třecí účinky naznačeny červenou barvou, směr pohybu je označen zelenou barvou a zatížení fialovou.



Obr. 5-11 Princip funkce

Tab. 7 Dosažené prokluzové podmínky při různých zatížení

Zatížení	Prokluz 1	Prokluz 2
0 kg	-	-
16,75 kg	19,97 %	-0,04%
23,88 kg (po 5 min)	20,13 %	-0,17%
23,88 kg (po cca. 3 hod.)	19,86%	0,03%

Výsledky uvedené v tab. 7 byly nečekané vzhledem ke skutečnosti, že se očekávaly vyrovnané hodnoty prokluzu 1 a 2. Vzhledem k charakteru uložení byla očekávána obvodová rychlost vzorku cca 4 m/s dle vzorce (2) :

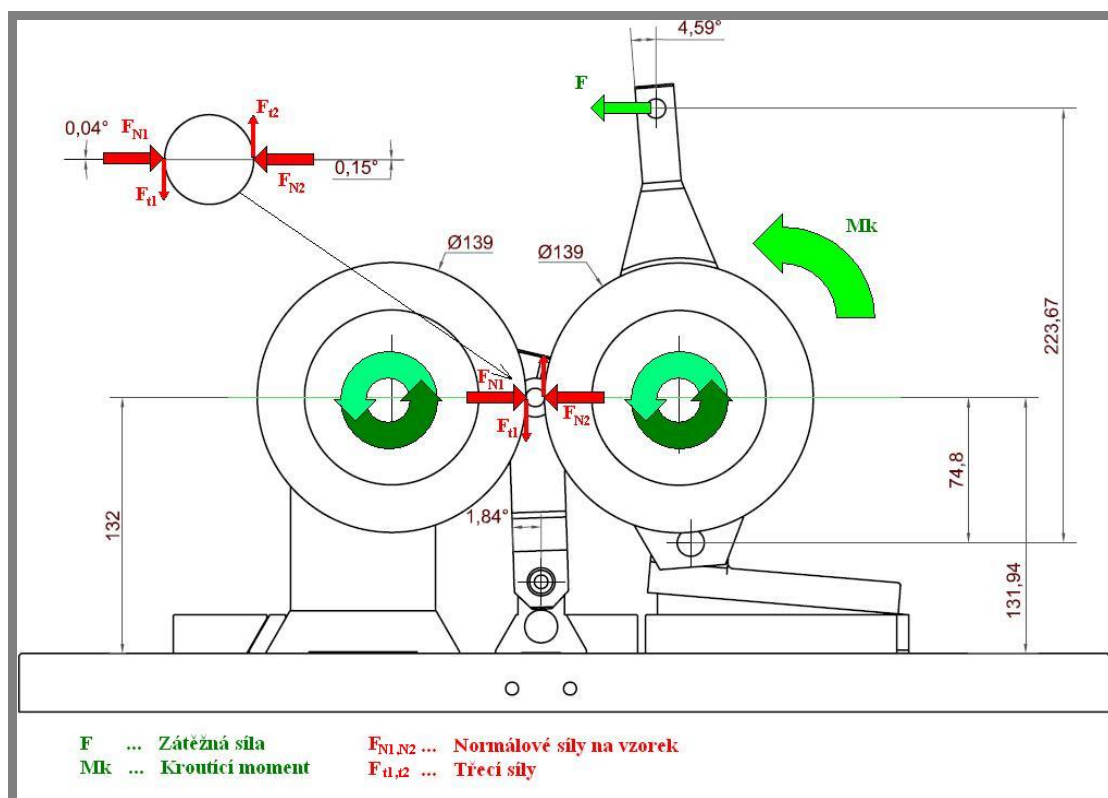
$$U_v = \frac{U_{t1} + U_{t2}}{2} \quad (2)$$

kde:	$U_v [\text{m.s}^{-1}]$	...	obvodová rychlost vzorku
	$U_{t1} [\text{m.s}^{-1}]$	...	obvodová rychlost testovacího kotouče 1
	$U_{t2} [\text{m.s}^{-1}]$	...	obvodová rychlost testovacího kotouče 2

Třecí účinky nebyly v rovnováze. Autor tedy na základě rekonstruovaného 3D modelu provedl analýzu přenosu sil mezi kotouči a vzorkem.

Podle výsledků je zřejmé, že dochází k vyrovnání otáček s pomaleji rotujícím kotoučem. Třecí síly na straně rychlejšího kotouče jsou minimální. Z charakteru výpočtu třecích sil je možné zvažovat změnu pouze dvou parametrů a to normálové síly, respektive součinitele tření. Změna součinitele tření je v principu daleko méně pravděpodobná. Testovací kotouče jsou zhotoveny s velkým důrazem na kvalitu povrchu ($R_a = 0,2 \mu\text{m}$). Tato hodnota je po výrobě kontrolována. Zkušební vzorky jsou zhotoveny také s vysokou přesností a jakostí povrchu $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. Typ maziva je identický pro oba kontakty. Množství maziva v kontaktu, respektive tloušťka mazacího filmu, se ale může lišit.

Nejprve byla analyzována velikost normálových sil. Zařízení R-mat je zkonstruováno pro testovací disky o průměru 145 mm. Při testech byly využity repasované disky o průměru 139 mm. To způsobuje vyklonění U-ramene v rovině yz přibližně o $1,84^\circ$. Pohyblivé vřeteno se vykloní přibližně o $4,59^\circ$ zatímco statické vřeteno je v původní poloze. To mohlo vést k porušení rovnováhy akčních a reakčních sil tedy normálových sil. Tato změna byla podrobně prozkoumána.

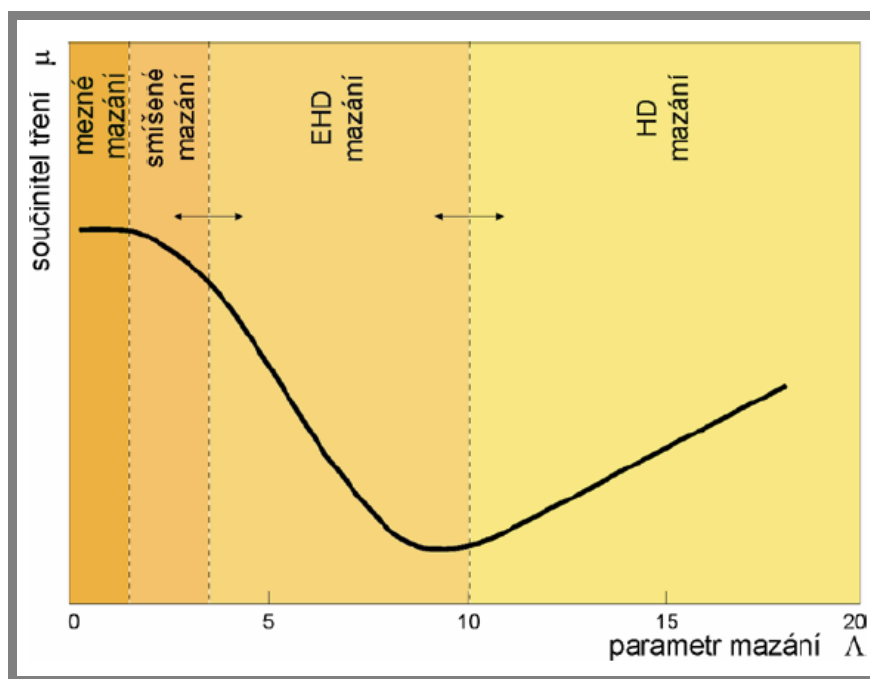


Obr. 5-12 Vliv repasovaných kotoučů na rovnováhu v rozložení sil

Závěrem je výsledek, že k porušení rovnováhy dochází, ale v daleko menším měřítku. Rozdíl sil v modelovém případě činil 0,19 N. Tato hodnota nemůže vést k zásadním změnám třecích účinků. Analýza dále ukázala dopad zmenšení průměru

testovacích disků na rovnováhu sil a potvrdila možnost využití repasovaných testovacích disků při výzkumu.

Do úvah tedy dále vstoupil vliv obvodové rychlosti v souvislosti se změnou součinitele tření. Vzhledem ke skutečnosti, že nejsou obecně k dispozici vztahy pro tloušťku mazacího filmu za různých podmínek prokluzu, autor odhadoval parametr mazání λ pouze na základě vzorců určených pro režim čistého valení. V místě prokluzu 1 je potom parametr mazání $\lambda \approx 0,6$ respektive $\lambda \approx 0,5$ v místě prokluzu 2.



Obr. 5-13 Ukázka Stribeckovi křivky

Výsledky naznačují, že v důsledku nárůstu obvodové rychlosti dojde k nárůstu parametru mazání cca. o 0,1. Protože není známa přesná Stribeckova křivka pro danou konfiguraci zařízení R-mat, není možné usuzovat jaký dopad tato změna může mít na součinitel tření. Dále je nutné upozornit na skutečnost, že výpočet parametru λ se může v prokluzových podmínkách výrazně změnit oproti podmínkám čistého valení. Poslední námitkou je teplota maziva v místě kontaktu. Vzhledem k tomu, že prokluz1 se výrazně liší od prokluzu 2, je pravděpodobná i různá teplota v oblasti kontaktu. S teplotou koresponduje i tloušťka mazacího filmu. Při výpočtu byla teplota považována za identickou tj. 30°C.

5.3 Experiment

Pro experimenty byly vytvořeny vzorky s upravenou topografií povrchu a následně vystaveny cyklickému namáhání v podmínkách čistého valení a prokluzu. Úprava topografie spočívala ve vytvoření jednotlivých vtisků o průměru cca. 40 μm a hloubce 4 μm . Zjišťovanou veličinou byl počet cyklů do vzniku makro-pittingu ve zkušební stopě. Podmínky měření $\lambda \approx 0,6$ odpovídají smíšenému mazacímu režimu.

5.3.1 RCF test v podmínkách čistého valení

Na zkušebním zařízení R-mat2b proběhly zkoušky v podmínkách čistého valení. Tyto podmínky jsou z hlediska RCF nejvýhodnější. Proto výsledky těchto zkoušek posloužily jako měřítko případných negativních dopadů prokluzu v kontaktu. Přehled podmínek měření následuje v tab. 8.

Tab. 8 Tabulka podmínek měření v čistém prokluzu

Zkušební zařízení		R-mat2b	
Geometrické údaje			
Průměr testovacího kotouče 1	145 mm	Průměr testovacího kotouče 2	145 mm
Průměr zkušebního vzorku	9,6 mm	Poloměr zaoblení kotoučů	4,5 mm
Povrchová drsnost Ra	0,2 μm	Povrchová drsnost Ra vzorku	0,1 μm
Materiálové vlastnosti			
Testovací kotouče		Vzorek	
Materiál	AISI 52 100	Materiál	AISI 52 100
Modul pružnosti v tahu E	2,1·10 ⁵ MPa	Modul pružnosti v tahu E	2,1·10 ⁵ MPa
Poissonova konstanta μ1	0,3	Poissonova konstanta μ2	0,3
Otáčky			
Otáčky statického vřetene	660 ot/min	Otáčky pohyblivého vřetene	660 ot/min
Otáčky vzorku	9 968 ot/min	Otáčky pohonu	---
Prokluz			
Obvodová rychlost kotouče 1	5 m/s	Obvodová rychlost kotouče 2	5 m/s
Obvodová rychlost vzorku	5 m/s		
Prokluz 1	0 %	Prokluz 2	0 %
Zatížení			
Hmotnost závaží	33 kg	Odhadovaný součinitel tření	0,1
Normálová síla Fn ₁	968,1 N	Normálová síla Fn ₂	968,1 N
Odhadovaná třecí síla F _{t1}	96,8 N	Odhadovaná třecí síla F _{t2}	96,8 N
Hertzův kontaktní tlak p ₁	4,97 GPa	Hertzův kontaktní tlak p ₂	4,97 GPa
Geometrie kontaktu			
Poloměr v ose směru valení a		0,3 mm	
Poloměr v ose kolmé na směr valení b		0,3 mm	
Mazivo			
Typ	Základový minerální olej bez aditiv: Renolin MA22 (viskozitní třída VG22)		
Dynamická viskozita při teplotě 20°C		0,021 Pa.s	
Tlakově viskozitní koeficient α		15 Gpa ⁻¹	
Odhadovaná minimální tloušťka filmu 1 h _{min}		146,1 nm	
Odhadovaná minimální tloušťka filmu 2 h _{min}		146,1 nm	
Teplota			
Teplota okolí	20°C	Teplota pod krytem	30°C
Teplota v místě uchycení senzoru	33°C		

Za podmínek uvedených výše proběhlo celkem 11 zkoušek. V měřicí stopě se nacházel vždy pouze jeden vtisk, který byl před experimentem označen kvůli identifikaci polohy po zkoušce. Rozměry vtisku jsou přibližně 40µm průměr a 4µm hloubka. Přehled výsledků následuje v tab.9.

Tab. 9 Přehled výsledků v podmínkách čistého valení

Stopa	Poškození makro-pittingem		Počet cyklů do poškození
	Modifikovaný vzorek	Kotouč	
1	pitt	pitt-výměna	454 819 904 ($4,5 \cdot 10^8$)
2	pitt		121 230 816 ($1,2 \cdot 10^8$)
3	pitt		261 460 640 ($2,6 \cdot 10^8$)
4	pitt	pitt- výměna po 116 745 216	291 544 064 ($2,9 \cdot 10^8$)
5	pitt	pitt -výměna po 179 782 848	346 627 232 ($3,5 \cdot 10^8$)
6	pitt		379 362 144 ($3,8 \cdot 10^8$)
7	pitt	pitt -výměna po 413 512 512	472 881 920 ($4,7 \cdot 10^8$)
8	pitt		186 162 368 ($1,9 \cdot 10^8$)
9	pitt		439 947 648 ($4,4 \cdot 10^8$)
10	pitt	pitt -výměna po 128 148 608	163 475 200 ($1,6 \cdot 10^8$)
11	pitt		119 177 408 ($1,2 \cdot 10^8$)
Aritmetický průměr			$2,942 \cdot 10^8$
Medián			$2,915 \cdot 10^8$
Směrodatná odchylka			$1,277 \cdot 10^8$

Série zkoušek ukázala RCF životnost v podmínkách smíšeného mazání. Cílem bylo porovnat rozptyl v měření a ověřit funkčnost nového akcelerometru, respektive jeho nastavení. Výsledky zkoušek dále posloužily jako měřítko pro posouzení případného negativního vlivu prokluzu. Téměř polovina (5) zkoušek ukázala nejprve porušení zkušebních kotoučů. Z tohoto důvodu výsledky takovýchto zkoušek nemusí být zcela korektní protože při porušení mohlo dojít k dočasnému rázovému přetížení. Na této skutečnosti se podílí vysoký počet zátěžných cyklů jak na vzorku, tak na testovacích kotoučích. Materiálová jednotnost zkušebních kotoučů může také hrát svou roli. Směrodatná odchylka měření $1,277 \cdot 10^8$ cyklů je téměř polovinou mediánu $2,915 \cdot 10^8$. Tyto čísla nenaznačují výrazné zlepšení v reprodukovatelnosti výsledků. Nicméně, je důležité podotknout, že pro kvalitní statistické zhodnocení by bylo zapotřebí provést daleko více zkoušek. Navíc, žádný detekovaný pitting nebyl "rozválcovaný". To naznačuje, že zařízení bylo odpojeno včas a na vysokém rozptylu hodnot se podepisuje jiný princip než kvalita diagnostiky. Jedním z možných vysvětlení je vysoký počet cyklů. Autor si dále povšiml nevyrovnanosti výsledků jednotlivých "stop", které se ve svém principu shodují se zařízením R-mat2c. Tato skutečnost je diskutována v kapitole 5.4.

5.3.2 RCF test v podmínkách prokluzu 20%

Jako první série měření v prokluzových podmínkách byla provedena zkouška s prokluzem 20%. Tyto nejnáročnější podmínky byly zvoleny záměrně s cílem

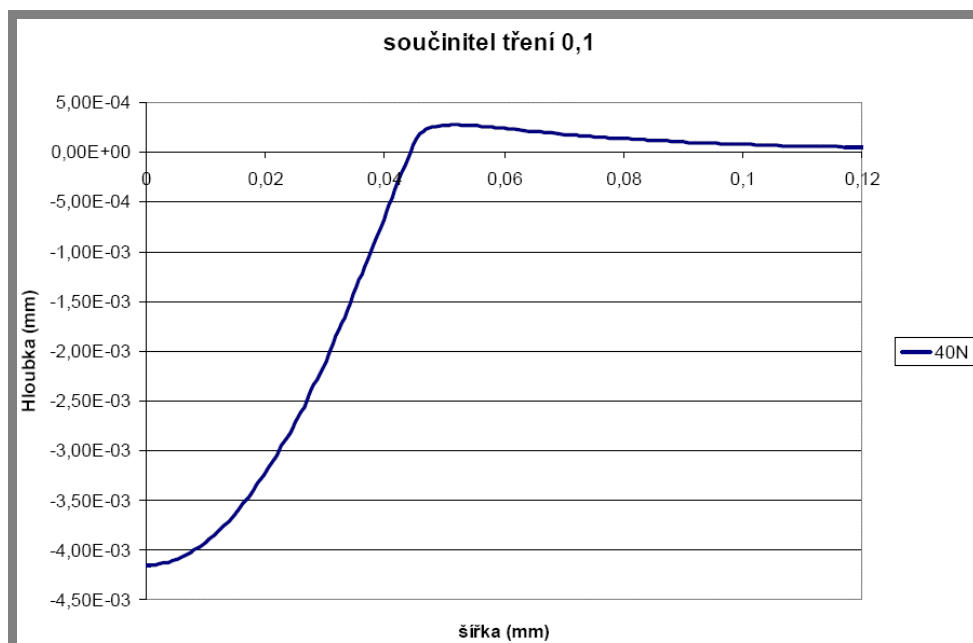
odhalit případné nedostatky prokluzového systému, ke kterým by pravděpodobně došlo právě v této konfiguraci. Přehled podmínek měření je v tabulce 10.

Tab. 10 Tabulka podmínek měření v prokluzu 20%

Zkušební zařízení		R-mat2c	
Geometrické údaje			
Průměr testovacího kotouče 1	139 mm	Průměr testovacího kotouče 2	139 mm
Průměr zkušebního vzorku	9,6 mm	Poloměr zaoblení kotoučů	4,5 mm
Povrchová drsnost Ra	0,2 μm	Povrchová drsnost Ra vzorku	0,1μm
Materiálové vlastnosti			
Testovací kotouče		Vzorek	
Materiál	AISI 52 100	Materiál	AISI 52 100
Modul pružnosti v tahu E	2,1·10 ⁵ MPa	Modul pružnosti v tahu E	2,1·10 ⁵ MPa
Poissonova konstanta μ1	0,3	Poissonova konstanta μ2	0,3
Otáčky			
Otáčky statického vřetene	606 ot/min	Otáčky pohyblivého vřetene	496
Otáčky vzorku	7 221 ot/min	Otáčky pohonu	2 950
Prokluz			
Obvodová rychlost kotouče	4,44 m/s	Obvodová rychlost kotouče 2	3,63 m/s
Obvodová rychlost vzorku	3,64 m/s		
Prokluz 1	20,13 %	Prokluz 2	-0,17%
Zatížení			
Hmotnost závaží	16 kg	Odhadovaný součinitel tření	0,1
Normálová síla Fn ₁	469,3 N	Normálová síla Fn ₂	469,3 N
Odhadovaná třecí síla F _{t1}	46,93 N	Odhadovaná třecí síla F _{t2}	46,93 N
Hertzův kontaktní tlak p ₁	3,91 GPa	Hertzův kontaktní tlak p ₂	3,91 GPa
Mazivo			
Typ	Základový minerální olej bez aditiv: Renolin MA22 (viskozitní třída VG22)		
Dynamická viskozita při teplotě 20°C		0,021 Pa.s	
Tlakově viskozitní koeficient		15 GPa ⁻¹	
Odhadovaná minimální tloušťka filmu 1		134,77 nm	
Odhadovaná minimální tloušťka filmu 2		117,52 nm	
Teplota			
Teplota okolí	20°C	Teplota pod krytem	35°C
Teplota v místě uchycení senzoru	43°C		

Za podmínek uvedených výše proběhlo celkem pět zkoušek s modifikovaným povrchem. Zkušební vzorek byl pomyslně rozdělen na dvě poloviny. Jedna polovina obsahovala modifikovaný povrch, zatímco druhá polovina byla ponechána

v původním stavu po výrobě. Modifikace spočívala v úpravě povrchu vzorku K8 vtiskem v každé stopě. Na základě diplomové práce O. Šamánka [30] byly vytvořeny vtisky pomocí vlačovacího tělíska silou 40 N. Tato konfigurace tvoří geometrii vtisku o průměru cca. 0,045 mm a hloubce cca. 0,0042 mm.



Obr. 5-14 Profil vtisku [30]

Přehled výsledků na zkušebním zařízení R-mat2c s modifikovaným povrchem stopy následuje v tabulce 11. :

Tab. 11 Přehled výsledků v podmínkách prokluzu 20% s modifikovaným povrchem

Stopa	Poškození makro-pittingem		Počet cyklů do poškození
	Vzorek K8 modifikovaný	Kotouč	
1	pitt		13 161 600 ($13,2 \cdot 10^6$)
2	pitt		11 376 000 ($11,4 \cdot 10^6$)
3	pitt		19 454 400 ($19,5 \cdot 10^6$)
4	pitt		20 779 200 ($20,8 \cdot 10^6$)
5	pitt		13 924 800 ($13,9 \cdot 10^6$)
Aritmetický průměr			$1,547 \cdot 10^7$
Medián			$1,392 \cdot 10^7$
Směrodatná odchylka			$0,369 \cdot 10^7$

Přehled výsledků pro stopy s nemodifikovaným povrchem :

Tab. 12 Přehled výsledků v podmínkách prokluzu 20% s nemodifikovaným povrchem

Stopa	Poškození makro-pittingem		Počet cyklů do poškození
	Vzorek K8 nemodifikovaný	Kotouč	
6	pitt		12 801 600 ($12,8 \cdot 10^6$)
7	pitt		11 203 200 ($11,2 \cdot 10^6$)
8	pitt		8 510 400 ($8,5 \cdot 10^6$)
9	pitt		13 334 400 ($13,3 \cdot 10^6$)
10	pitt		10 152 000 ($10,2 \cdot 10^6$)
Aritmetický průměr			$1,12 \cdot 10^7$
Medián			$1,12 \cdot 10^7$
Směrodatná odchylka			$1,758 \cdot 10^6$

Série zkoušek prokázala výrazný pokles RCF životnosti v prokluzových podmínkách. Tento pokles způsobuje nárůst smykových napětí, které jsou důsledkem prokluzu mezi aktivními třecími povrchy. K výraznému poklesu došlo i přes skutečnost, že povrch byl zatížen o cca. 1 GPa nižším kontaktním tlakem oproti zkouškám v režimu čistého valení. Makro-pittingové porušení ve stopě se ale nachází vždy mimo okolí umělého vtisku. To naznačuje, že důlky v povrchu nebyly iniciátory únavového porušení. Zajímavou skutečností je fakt, že při sérii zkoušek v prokluzových podmínkách se porušení vždy vyskytlo na zkušební vzorku. Oproti testům v čistém valení, kde k porušení docházelo i na zkušebních kotoučích. Tato skutečnost může pramenit z několika faktů:

1. Povrch zkušebních kotoučů nebyl únavově narušen z předchozích zkoušek.
2. Zkušební kotouč lépe odvádí teplo a jsou omezeny rekrytalizační děje.
3. Zkušební kotouče absorbují méně zátěžných cyklů v prokluzových podmínkách

Dále, „stopy“ s modifikovaným povrchem vykazují mírný nárůst RCF. Přítomnost jediného vtisku pravděpodobně může mít pozorovatelný vliv na zvýšení RCF životnosti v podmínkách smíšeného mazání. Pouze v jednom případě z pěti zkoušek byla RCF životnost nižší v porovnání "nejhorší" zkoušky modifikovaného povrchu s "nejlepší" zkouškou nemodifikovaného povrchu ($13,3 \cdot 10^6$ nemodifikovaný, $11,4 \cdot 10^6$ modifikovaný). V porovnání statistických hodnot výsledků jednoznačně modifikovaný povrch dosahuje vyšší RCF životnosti ($1,392 \cdot 10^7$ modifikovaný, $1,12 \cdot 10^7$ nemodifikovaný). Ve všech zkouškách došlo k odpojení zařízení R-mat2c ve správný okamžik, mazací okruh fungoval bez závady a je tedy možné zkoušky považovat za platné. Opět se ale objevil fenomén nevyrovnanosti zkoušek v jednotlivých stopách podobný zařízení R-mat2b. I když směrodatná odchylka ($1,758 \cdot 10^6$ respektive $0,369 \cdot 10^7$) značně poklesla. To opět naznačuje, že na zatížení vzorků může mít vliv jejich upnutí ve smyslu dodatečných zatížení.

5.4 Diskuse dosažených výsledků

5.4.1 Rekonstrukce zařízení

V první části této práce byl vytvořen kompletní 3D parametrický model zkušebního zařízení R-mat2d v prostředí Autodesk Inventor 8. Tento typ (z celkových šesti) byl zvolen záměrně, protože velká část dílů tohoto typu se shoduje s ostatními zařízeními R-mat. Následně tato data byla využita k popisu zařízení. Ucelený popis tohoto zařízení do této doby chyběl. Absence výkresové dokumentace zásadním způsobem zkomplikovala rekonstrukční práce. V budoucnu je tedy možné postupovat mnohem rychleji při dalších rekonstrukcích. Pro vznik 3D modelu bylo zapotřebí vytvořit modely 250 součástí. Hlavní sestava se skládá z celkem 528 dílů. Vzhledem k vysoké časové náročnosti této fáze bohužel nebyla prozatím obnovena výkresová dokumentace. Je zapotřebí zvážit její význam a případně v budoucnu tento nedostatek odstranit. Autor se věnoval této části s maximální možnou pečlivostí a připouští odchylky modelu od reality ± 1 mm u dílů navazujících na díly s dochovanou výkresovou dokumentací a ± 5 mm u dílů, které už nemají žádnou vazbu s jednoznačně danými díly. Při tvorbě dokumentace autor navíc objevil rozpory mezi dochovanou dokumentací a realitou. V případě, kdy rozpory v dochované dokumentaci způsobovaly v 3D modelu kolize (fyzikální, nebo v mechanických vazbách), autor upřednostnil reálné (funkční) řešení. V případě, kdy rozpor nezpůsobil žádnou kolizi, bylo v 3D modelu upřednostněno řešení na základě dochované dokumentace. Dále díky této revizi byly odhaleny dvě drobné chyby v sestavení zařízení R-mat2c. Pro přehled vzniklých dat autor zavedl následující systém ve značení:

1. 3D modely vzniklé na základě dochované dokumentace nesou označení stejné s razítkem na původním výkresu.
Příklad: VK5_300_080
2. Normalizované díly jsou označeny názvem, před kterým je současná norma ČSN popřípadě harmonizovaná norma ČSN-EN. Proto mohou některé normalizované díly nést odlišné označení od původní dokumentace.
Příklad: Šroub CSN_021101_M12x30
3. Díly u kterých bylo známo označení, ale neexistovala dochovaná výkresová dokumentace nesou před označením dovětek R jako rekonstruované.
Příklad: RVK5_400_614
4. Díly, u kterých se nedochovala jak výkresová dokumentace tak označení, jsou pojmenovány na základě funkce.
Příklad: maznice1
5. Pomocné sestavy, jako například modely pohonů a dávkovacího čerpadla, jsou vedeny samostatně.
6. Podobně jako pomocné sestavy je i rekonstruovaný prokluzový systém vedený samostatně.

7. Pro snadnější spuštění hlavní sestavy v aplikaci Autodesk Inventor je založena složka R_mat2d_komplet, která v sobě obsahuje všechny díly hlavní sestavy a není tedy nutné dohledávat cesty k dílům v jednotlivých složkách.

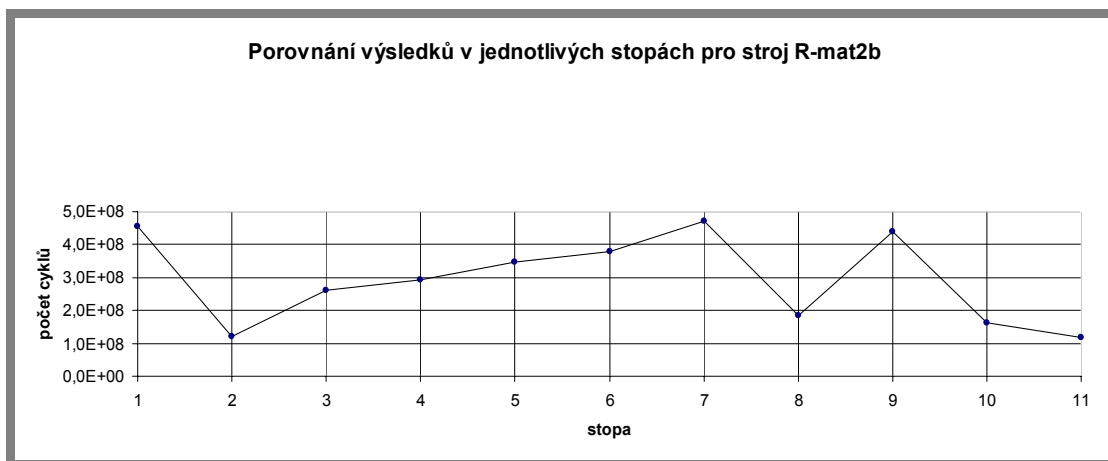
Vytvořená 3D dokumentace může v budoucnu sloužit k dalším analýzám zkušebních zařízení R-mat. Z hlediska MKP analýzy by bylo vhodné prozkoumat vznikající napěťová pole na zkušebním vzorku a jednoznačně tak stanovit odstup mezi jednotlivými zkušebními stopami tak, aby bylo vyloučeno vzájemné ovlivnění zkoušek zkouškami předchozími. Dále by bylo možné prozkoumat rám stroje R-mat z hlediska vlastních kmitů a provést tak kontrolu, zdali není zařízení provozováno v nevhodných otáčkách. V neposlední řadě dokumentace může posloužit k návrhu kalibračního přípravku pro zařízení, jehož potřeba v posledních letech stále více roste. Z hlediska dalších rekonstrukcí je možné na základě dokumentace stanovit přibližné množství cirkulujícího maziva a dimenzovat tak budoucí mazací okruh jak po stránce návrhové, tak po stránce výkonové. Poslední aktuální možností využití 3D dat je analýza dodatečného zatížení vzorku setrvačnými silami U-Ramene a odhalit tak možnou příčinu rozptylu měření mezi jednotlivými "stopami". Tato problematika je rozvedena níže.

První část rekonstrukce si položila za cíl obnovu vibrodiagnostické části zařízení. Autor se pokusil aplikovat zcela netradiční způsob měření vibrací pomocí laserového polohovacího zařízení. Autor odhadl možnosti využití takového zařízení na základě jejich parametrů. U konkrétně použitého zařízení Microsoft Laser mouse 6 000 v1.0 by mohly být měřitelné kmitý v rozsahu 0 - 500 Hz, s maximálním zrychlením cca. 10 g a minimální výchylce 0,03 mm. Ukázalo se, že pro podmínky zkušebního zařízení R-mat2d je tato koncepce nevyhovující pravděpodobně z důvodu nízké citlivosti a nevhodně zvolené reflexní plochy (kov). Vzhledem k tomu, že na trhu se nachází až třikrát citlivější zařízení a navíc je možné softwarově zvýšit komunikační rychlost, nemusí být tato myšlenka zcela nesmyslná. Pro jednoznačné posouzení zda jsou odhadované parametry správné, je zapotřebí zkonstruovat jednoduchý mechanický excitátor sinusových, popřípadě pilových kmitů s regulovatelnou frekvencí a amplitudou. Po verifikaci odhadovaných parametrů by bylo možné zvážit, zdali citlivější zařízení je schopno dosáhnout vyhovujících parametrů pro aplikaci na R-mat.

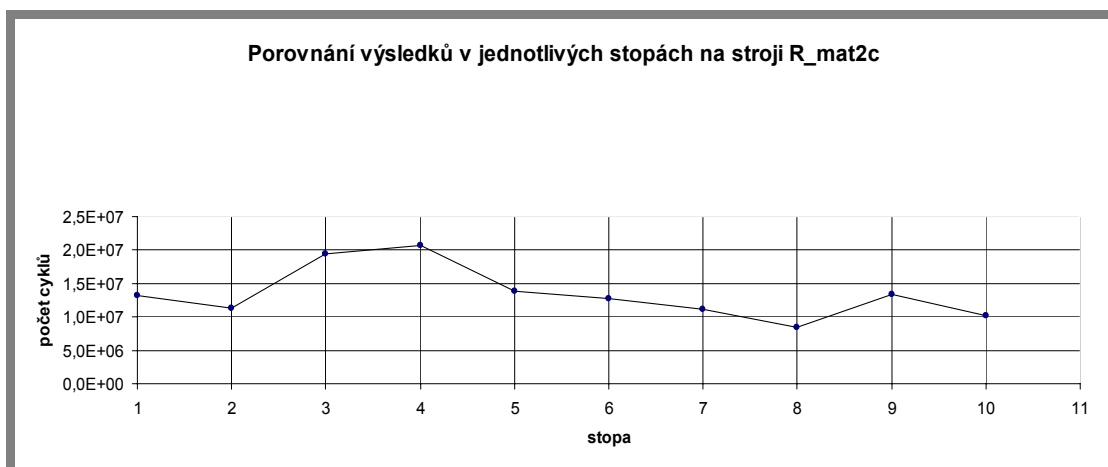
Mimo autorovu studii byla zvážena rekonstrukce stávajícího vibrodiagnostického systému od společnosti Brüel&Kjear. Společnost navrhla řešení dle nových požadavků v hodnotě cca. 50 000,- CZK. Současně byla zvážena nabídka společnosti VidiTech v hodnotě cca. 20 000,- CZK. Rekonstrukce obsahovala dva akcelerometry ATW04 s citlivostí 100 Ev/g a možností měření teploty v místě uchycení akcelerometrů až do 120°C. Nabídka dále obsahovala jednu vyhodnocovací jednotku VDT-02A s on-line zpracováním signálu, spínacím relé elektromotoru, Fourierovou analýzou, analýzou trendů a možností sledování stavu po internetu. Pro bližší informace autor odkazuje na manuál, který je v elektronické podobě připojen k této práci. Součástí dodávky byl stíněný kabel o délce pět metrů a v neposlední řadě software pro postprocessing. Pro aplikaci nového akcelerometru na U-rameno zařízení R-mat byla vytvořena kotvící deska. Nové akcelerometry prokázaly dostatečnou citlivost vzhledem k pittingovému porušení. Byla experimentálně odhadnuta přibližná velikost vibrací poškozeného vzorku o velikosti cca. 2,2 mm/s. Poplachová hodnota představuje nárůst hodnot přibližně o 1/3 oproti hodnotě vibrací

na počátku zkoušky. Vyhodnocovací jednotka odpojila zařízení vždy po porušení vzorku. Systém je dostatečně spolehlivý a prokázal možnost rekonstrukce vibrodiagnostické části. V současnosti je řešení VidiTech aplikováno na zařízení R-mat2b a R-mat2c. V budoucnu by bylo vhodné modifikovat upnutí akcelerometru k U-rameni. Současný stav může způsobovat drobná zkreslení v oblasti měřených zrychlení.

V neposlední řadě se ukázalo, že kvalita diagnostického systému neměla zásadní vliv na rozptyl v měření. Autor prozkoumal RCF zkoušky v jednotlivých stopách (obr. 5-15, 5-16)



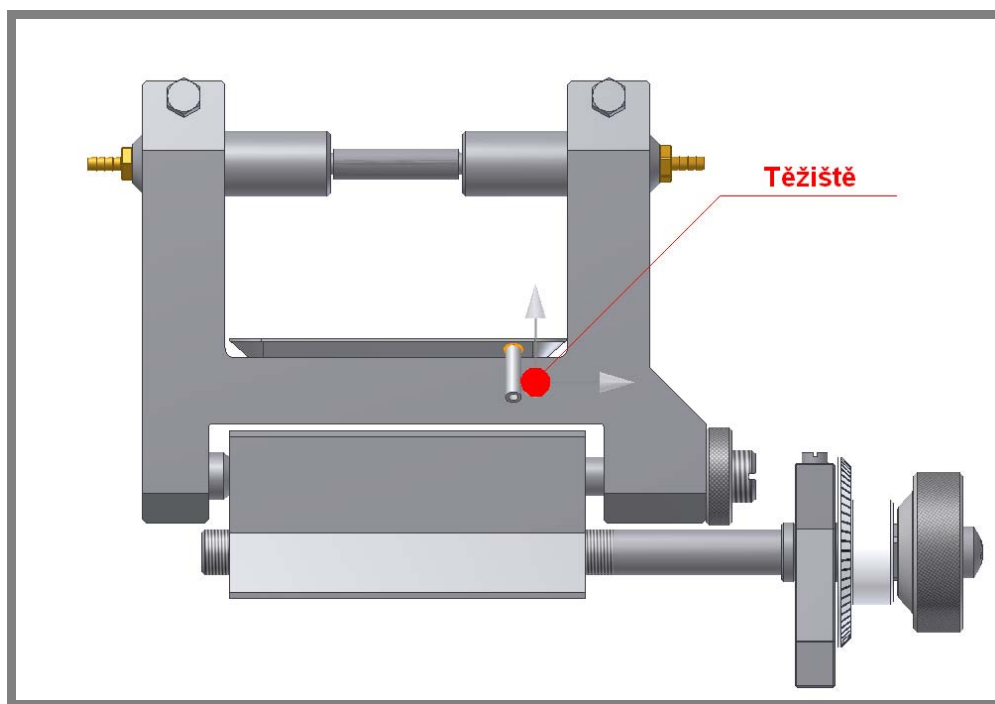
Obr. 5-15 Výsledky RCF v jednotlivých stopách zařízení R-mat2b



Obr. 5-16 Výsledky RCF v jednotlivých stopách zařízení R-mat2c

Výsledky ukazují, že krajní "stopy" na vzorku vykazují propad hodnot RCF. Stabilní pásmo ukázaly stopy 3-7 R-mat2b, respektive 5-9 R-mat2c. Navíc, trendy jsou si relativně podobné s výjimkou stabilních "stop" kde je situace opačná. To může naznačovat, že svou roli hraje místo aplikace zátěžných sil na vzorek. Stabilní stopy se mohou nacházet v blízkosti osy těžiště U-ramene. Zatímco krajní stopy se mohou pohybovat mimo tuto pomyslnou osu. V takovém případě by byl vzorek vystaven dodatečnému ohybovému namáhání vlivem setrvačných sil U-ramene, které dosahuje hmotnosti 1,691 kg oproti hmotnosti vzorku 0,024 kg. Tuto hypotézu je možné dokázat opětovnými zkouškami. V případě, že se objeví stejné trendy mezi

jednotlivými stopami, bude zapotřebí analyzovat situaci pomocí MKP a případně modifikovat upínací část vzorku. Jednoznačnou odpověď na otázku co způsobuje tak vysoký rozptyl v měření se prozatím nepodařilo nalézt. S jistotou lze tvrdit, že citlivost a nastavení vibro-diagnostického systému je vzhledem k pittingovému porušení správné.

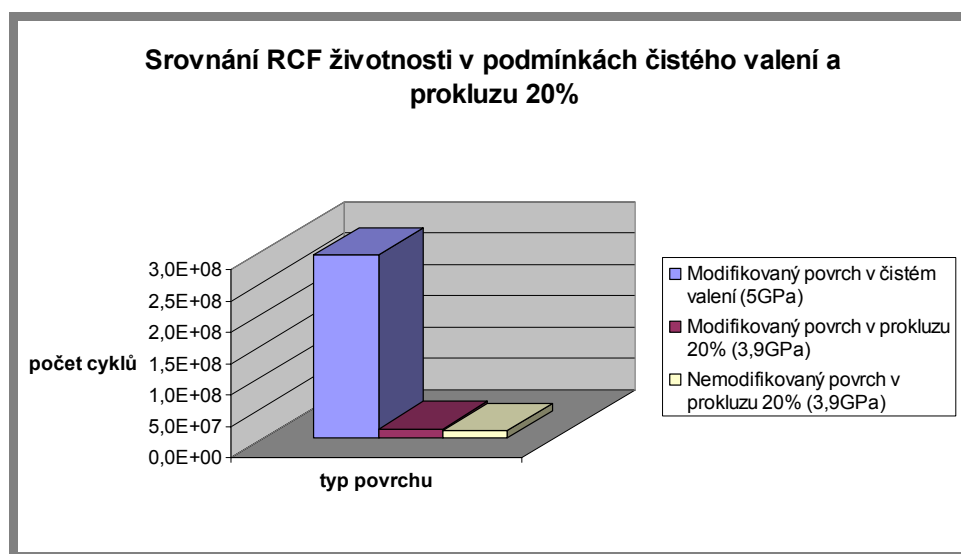


Obr. 5-17 Těžiště držáku vzorku

Inovace prokluzového systému na stanici R-mat2c proběhla úspěšně. Prototypové řešení převodového mechanismu fungovalo bez závady. Možnosti zkoušek jsou rozšířeny o simulaci prokluzových podmínek v rozsahu 4,7%, 9,5%, 14,6%, 20%. Systém byl stabilní i pro různé hodnoty zatížení. Podařilo se odstranit všechny nedostatky původního řešení. Náklady dosáhly 6 200,-CZK. V budoucnu by bylo vhodné vybavit systém napínacím mechanismem, aby se předešlo předčasnému opotřebení řemene v primárním převodu systému. Dále je možné zvážit, zda není výhodnější zakoupit stejnosměrný elektromotor s vhodnou regulací otáček pro případné rozšíření testování v prokluzových podmínkách na jiné stanice R-mat. Takovýto systém je ve světě běžně využíván. Prokluzové podmínky jsou potom volitelné v daleko širším rozsahu. Dále, zařízení R-mat vytváří zcela netypické testování se dvěma prokluzy během jedné otáčky. Takovýto způsob testování je zcela ojedinělý. Zkoušky v takovýchto podmínkách ukázaly zajímavý fenomén, kdy se ve smíšeném mazacím režimu prokluz vytvořil mezi rychlejším ze dvou zkušebních kotoučů zatímco otáčky vzorku se přizpůsobily pomalejšímu kotouči. Situace byla analyzována se závěrem, že tento jev je pravděpodobně způsoben změnou součinitele tření. Tato změna může souviset s tloušťkou mazacího filmu. Nedostatek informací v oblasti výpočtu tloušťky v podmínkách prokluzu a neznámá Stribeckova křivka pro danou konfiguraci prozatím nedovolují tuto hypotézu potvrdit.

5.4.2 Experimenty

Vlastní zkoušky vzorků proběhly na obou rekonstruovaných zařízeních. Na stanici R-mat2b proběhly zkoušky v režimu čistého valení a smíšeném mazacím režimu. Zkušební vzorek byl opatřen umělým vtiskem o rozměrech $40\mu\text{m}$ v průměru a $4\mu\text{m}$ v hloubce. Takovýto vtisk se nacházel vždy jeden ve zkušební "stopě". Vzorek byl zatížen 33 kg "mrtvé hmoty" což odpovídá kontaktnímu tlaku 5 GPa. Zkoušek proběhlo celkem 11. Vzhledem k relativně vysokému rozptylu hodnot byl pro popis výsledků zvolen statistický parametr medián. Modifikovaný vzorek dosáhl životnosti $2,915 \cdot 10^8$ cyklů se směrodatnou odchylkou $1,277 \cdot 10^8$ cyklů. Rozdíl mezi maximální hodnotou $4,729 \cdot 10^8$ cyklů a minimální hodnotou $1,192 \cdot 10^8$ cyklů je $3,537 \cdot 10^8$ cyklů. Během experimentů docházelo k porušení jak na vzorku, tak na zkušebním kotouči.



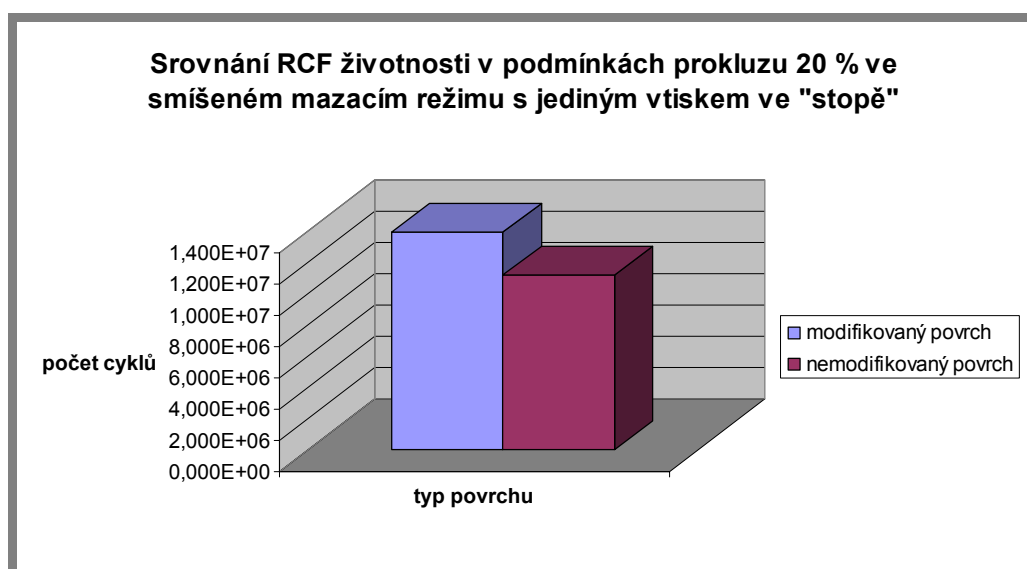
Obr. 5-18 RCF životnost v podmínkách čistého valení a podmínkách prokluzu

Při porušení kotouče (celkem pět případů) došlo k výměně a zkouška probíhala dál až do porušení vzorku. Obavy z rázového přetížení vzorku při porušení kotouče se nepotvrdily. Výsledky těchto zkoušek jsou rovnoměrně rozmístěny ve statistickém souboru a dvě takové zkoušky dokonce dosáhly maximálních hodnot. Ani jedno makro-pittingové porušení se nevyskytlo v blízkosti povrchu vtisku. To naznačuje, že umělé vtisky únavový proces negativně neovlivnily. Výsledky testů s nemodifikovaným povrchem v režimu čistého valení nemá bohužel autor k dispozici, a proto není možné provést přímé srovnání. Ale i přes vyšší zatížení dosáhly výsledky v režimu čistého valení mnohem vyšších hodnot než výsledky v podmínkách prokluzu 20%. To naznačuje, jak závažným problémem v technické praxi je prokluz.

Na stanici R-mat2c proběhly zkoušky v prokluzu 20% a smíšeném mazacím režimu. Prokluzové podmínky byly pečlivě analyzovány. Zkušební vzorek byl na jedné polovině opatřen umělými vtisky o rozměrech $40\mu\text{m}$ v průměru a $4\mu\text{m}$ v hloubce. Takovýto vtisk se nacházel vždy jeden v pěti zkušebních "stopách" z celkových deseti. Vzorek byl zatížen 16 kg "mrtvé hmoty", což odpovídá kontaktnímu tlaku 3,91 GPa. Pro popis výsledků byl opět zvolen statistický parametr medián.

Modifikované "stopy" dosáhly životnosti $1,39 \cdot 10^7$ cyklů se směrodatnou odchylkou $3,7 \cdot 10^6$ cyklů. Rozdíl mezi maximální hodnotou $2,078 \cdot 10^7$ cyklů a minimální hodnotou $1,332 \cdot 10^7$ cyklů je $9,403 \cdot 10^6$ cyklů. Během experimentů docházelo k porušení vždy na vzorku, ale mimo okolí umělého vtisku.

Nemodifikované "stopy" dosáhly životnosti $1,12 \cdot 10^7$ cyklů se směrodatnou odchylkou $1,758 \cdot 10^6$ cyklů. Rozdíl mezi maximální hodnotou $1,333 \cdot 10^7$ cyklů a minimální hodnotou $8,51 \cdot 10^6$ cyklů je $4,824 \cdot 10^6$ cyklů. Během experimentů docházelo k porušení vždy na vzorku. Nemodifikovaný povrch dosahoval menšího rozptylu v měření oproti modifikovanému. Většina zkoušek byla ve stabilních "stopách". Pokud se v budoucnu potvrdí, že na výsledku se promítá zkušební "stopa", bude vhodné připravovat modifikované a nemodifikované povrchy na samostatných vzorcích. V porovnání s modifikovaným povrchem je průměrná RCF životnost o cca. 19,4% nižší.



Obr. 5-19 RCF životnost v podmínkách prokluzu 20% pro modifikovaný a nemodifikovaný povrch

6 ZÁVĚR

Cílená modifikace topografie třecích povrchů představuje jeden ze současných přístupů ke snižování tření a opotřebení třecích povrchů velmi zatěžovaných strojních součástí. Nedávné studie ukázaly pozitivní vliv mělkých mikro-dutin na tloušťku mazacího filmu. Avšak na uměle vytvořené mikro-dutiny můžeme pohlížet nejen jako na mikro-zásobníky maziva, ale také jako na potenciální koncentrátoři napětí. Diplomová práce se proto zabývá posouzením vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na únavové poškození nekonformně zakřivených těles.

Byl vytvořen 3D parametrický model experimentálního zařízení v modelovém prostředí Autodesk Inventor. Tato data byla využita k ucelenému popisu zařízení, který do této doby chyběl. Pro vznik kompletního 3D modelu bylo vytvořeno 250 modelů součástí. Hlavní sestava se skládá z celkem 528 dílů. Prozatím nebyla obnovena výkresová dokumentace.

K experimentálnímu studiu RCF bylo užito zkušebních zařízení R-mat2b a R-mat2c, které však byly původně navrženy pro podmínky čistého valení. Z tohoto důvodu bylo nutné nejprve přistoupit k úpravě zařízení R-mat2c pro podmínky prokluzu. S pomocí modelu byla navržena a uskutečněna rekonstrukce experimentálního zařízení R-mat2c pro experimentální podmínky prokluzu třecích povrchů ve čtyřech úrovních (20%, 15%, 10%, 5%).

Úvodní série experimentů prokázaly nejen úspěšnou realizaci navržených rekonstrukcí, ale umožnila ukázat vliv prokluzu na RCF. Tak se podařilo splnit i cíle diplomové práce. Experimenty s jednotlivými mikro-vtisky naznačily, že mělké povrchových nerovnosti (vtisky) na třecích površích nemusí nezbytně snižovat kontaktní únavovou životnost při podmínkách smíšeného mazání. Přítomnost jediného důlku způsobila pozorovatelný nárůst životnosti přibližně o 19,4% v podmínkách prokluzu mezi aktivními povrchy 20%. V žádném případě porušení zkušebního materiálu AISI 52 100 nedošlo v blízkosti uměle vytvořeného vtisku i přes relativně vysoké kontaktní tlaky 3,91 GPa.

V budoucnu je zapotřebí dokončit sérii plánovaných zkoušek ve zbývajících prokluzových podmínkách (15%, 10%, 5%) a potvrdit tak výše zmíněné poznatky. Série s prokluzem 10% je v současnosti zahájena.

Vybavení laboratoře je připraveno pro zahájení zkoušek s více vtisky ve zkušební "stopě" v podmínkách čistého valení a prokluzu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PIZZO, P.P., EMERITUS., *Exploring Materials Engineering : Failure Analysis* [online]. August 1, 1997 , 12.02.2008 [cit. 2007-08-18].
Dostupný z WWW: <<http://www.engr.sjsu.edu/WofMatE/FailureAnaly.htm>>.
- [2] DRAPER, J., *Machine Design : New Ideas in Fatigue Analysis* [online]. c2008 [cit. 2007-08-18].
Dostupný z WWW:
<<http://machinedesign.com/ContentItem/63071/NewIdeasinFatigueAnalysis.aspx>>.
- [3] *Erik's Rail News : Archive* [online]. [1997] [cit. 2008-08-18].
Dostupný z WWW: <<http://eriksrailnews.com/archive/stuff/ice3.brussels.jpg>>.
- [4] *Danger Ahead : The Eschede Reports* [online]. c1998- , 11.03.2008 [cit. 2007-08-18].
Dostupný z WWW: <<http://danger-ahead.railfan.net/reports/eschede/>>.
- [5] FITCH, J., *Aren't Machines Supposed To Wear Out? Machinery Lubrication Magazine* [online]. September 2002, is. 200209 [cit. 2007-09-10].
Dostupný z WWW:
<http://www.machinerylubrication.com/article_detail.asp?articleid=389&relatedbookgroup=Wear%20Debris>.
- [6] KŘUPKA, I., et al., Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts., *Tribology International*, 2008,
doi:10.1016/j.triboint.2007.11.016
- [7] KOICHI, F. - CARRICKA, T.E. - BICKERC, R. - MCCABE, J.F.,
Effect of the applied load on surface contact fatigue of dental filling materials.
Dental Materials, December 2004, vol. 20, is. 10, p. 931-938.
- [8] OLVER, AV. *The Mechanism of rolling contact fatigue: an update. Proc. IMechE, J. Engineering Tribology*, 2005, vol. 219, p. 313-330.
- [9] KIM, T. H., OLVER, A. V. Stress history in rolling sliding contact of rough Surfaces. *Tribology International*, December 1998, vol. 31, is. 12, p. 727–736.
- [10] HOHN, B. - MICHAELIS, R. – KREIL, K. O. Influence of surface roughness on pressure distribution and film thickness in EHL-contacts. *Tribology International*, December 2006, vol. 39, is. 12, p. 1719–1725.
- [11] KUMAR, P. – JAIN, S. C. – RAY, S. Study of surface roughness effects in elastohydrodynamic lubrication of rolling line contacts using a deterministic model. *Tribology International*, October 2001, vol. 34, is. 10, p. 713–722.

- [12] VOSKAMP, A. Material response to rolling contact loading. *Trans Am. Soc. Mech. Engrs, J. Tribology*, 1985, vol. 107, p. 356–366.
- [13] OLVER, A. V. - SPIKES, H. A. - MACPHERSON, P. B. Wear in rolling contacts. *Wear*, 1986, vol. 112, p. 121–144.
- [14] SAUGER, E. - FOUVRY, S. - PONSONET, L. - KAPSA, P. - MARTIN, J. M. - VINCENT, L. Tribologically transformed structure in fretting. *Wear*, October 2000, vol. 245, is. 1-2, p. 39–52.
- [15] GRABULOV, A. – ZIESEB, U. - ZANDBERGENB, H. W. tem/sem investigation of microstructural changes within the white etching area under rolling contact fatigue and 3-D crack reconstruction by focused ion beam., *Scripta Materialia*, October 2007, vol. 57, is. 7, p. 635–638.
- [16] *Fafnir : WearEver TM ložiska* [online]. [2007] [cit. 2007-03-12]. Dostupný z WWW: <http://www.fafnir.cz/03hybridni_wearever.htm>.
- [17] LENFELD, P., *Technologie II : 01-technologie tváření kovů* [online]. [2005] , 5.12.2008 [cit. 2008-01-23]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm>.
- [18] ZARETSKY, E. V., *Life factors for rolling bearings, second edition*, STLE Publication SP-34 (Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Park Ridge, IL), 1999.
- [19] ZAFOSNIK, B. – GLODEZ, S. – ULBIN, M. – FLASKER, J. A fracture mechanics model for the analysis of micro-pitting in regard to lubricated rolling–sliding contact problème. *International Journal of Fatigue*, September–November 2007, vol. 29, is. 9-11, p. 1950–1958.
- [20] *The hendrix group : A CORROSION AND MATERIALS TECHNOLOGY SITE* [online]. c2001-2004 , 12.2.2004 [cit. 2008-02-11]. Dostupný z WWW: <http://www.hghouston.com/x/39_crack.html>.
- [21] TORRANCE, A. A. - MORGAN, J. E. – WAN, G. T. Y. An additive's influence on the pitting and wear of ball bearing steel. *Wear*, March 1996, vol. 192, is. 1-2, p. 66-73.
- [22] HERNANDEZ, A. - BATTEZA, J. E. – FERNANDEZ RICOA, R. – CHOU RODRIGUEZB. Rolling fatigue tests of three polyglycol lubricants. *Wear*, 2005, vol. 258, is. 10, s. 1467–1470.
- [23] FLASKER, J. – FAJDIGA, G. – GLODEZ, S. – HELLEN, T. K. Numerical simulation of surface pitting due to contact loading. *International Journal of Fatigue*, August 2001, vol. 23, is. 7, p. 599-605.

-
- [24] GLODEZ, S. – POTOČNIK, R. – FLASKER, J. – ZAFOSNIK, B. Numerical modelling of crack path in the lubricated rolling–sliding contact problems *Engineering Fracture Mechanics*, February-March 2008, vol. 75, is. 3-4, p. 880-891.
- [25] EPSTEIN - DMITRY - KEER - LEON, M. – WANG, Q. J. – CHENG, H. S. – ZHU – DONG – ERRICHELLO, R. Effect of Surface Topography on Contact Fatigue in Mixed Lubrication. *Tribology Transactions*, vol. 46, is. 4, p. 506-513.
- [26] DING, J. Determining Fatigue Wear Using Wear Particle Analysis Tools. *Practicing oil analysis* [online]. 2003, no. 200309 [cit. 2008-01-12]. Dostupný z WWW: <http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=526&relatedbookgroup=WearDebris>.
- [27] NELIAS, D. – VILLE, F. Detrimental Effects of Debris dents on Rolling Contact Fatigue. *Journal of Tribology*, 2000, vol. 122 / 55
- [28] ETSION, I. – HALPERIN, G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal. *Sealing Technology*, March 2003, vol. 2003, is. 3, p. 6-10.
- [29] *SurTech : Technology* [online]. [2005] , 5.12.2008 [cit. 2008-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.surface-tech.com/tech.html>>.
- [30] ŠAMÁNEK, O. *Vliv povrchových nerovností na funkci mazaných kontaktů strojních částí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [31] AKAMATSU et. al. Influence of Surface Roughness Skewness on Rolling Contact Fatigue Life, *Tribology Transactions*, 1992, vol. 35, is. 4, p. 745 – 750.
- [32] ETSION, I. State of the art in laser surface texturing. *Journal of Tribology*, Trans. of the ASME, 2005, vol. 127, p. 248-253.
- [33] MOURIER, L. - MAZUYER, D. – LUBRECHT, A. A. – DONNET, C. Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts. *Tribology International*, December 2006, vol. 39, is. 12, p. 1745-1756
- [34] KŘUPKA, I. – HARTL, M. The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films. *Tribology International*, July 2007, vol. 40, is. 7, p. 1100-1110.
- [35] ZHAI, X. Et. Al. On Mechanisms of fatigue life enhancement by surface dents in heavily loaded rolling line contacts. *Tribology Transaction*, 1997, vol. 40, p. 708-714.

- [36] NAKATSUJI, T. – MORI, A. The tribological effect of mechanically produced micro-dents by a micro diamond pyramid on medium carbon steel surfaces in rolling-sliding contact. *Meccanica*, 2001, vol. 36, p. 663-374.
- [37] NAKATSUJI, T. - MORI, A. The tribological effect of electrolytically produced micro-pools and phosphoric compounds on medium carbon steel surfaces in rolling-sliding contact. *Tribology Transaction*, 2001, vol. 44, p. 173-178.
- [38] DUMONT, M - LUGT, P. M. Surface feature effects in starved circular EHL contacts. Trans of ASME, *Journal of Tribology*, 2002, vol. 124, p. 358-366.
- [39] ZHAO, J. X. - SADEGHI, F. The effects of a stationary surface pocket on EHL line contact start-up. Trans of ASME, *Journal of Tribology*, 2004, vol. 126, p. 672-680.
- [40] VRBKA, Martin, et al. *Pressure Calculation from Experimentally Evaluated Lubricant Thickness within EHL Contacts: In International Joint Tribology Conference 22-24 October 2007, San Diego, California, USA.*
- [41] MANOJ, et al. Developmental studies on rolling contact fatigue test rig. *Wear*, 15 March 2008, vol. 264, is. 7-8, , p 708-718
- [42] PCS instruments : MPR (micro pitting rig) [online]. [2000] [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.pcs-instruments.com/mpr/mpr_home.shtml>.
- [43] Luleå University of Technology, Sweden [online]. [1990] [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.ltu.se/polopoly_fs/1.2097!utm2000%20twin-disc.pdf>.
- [44] PANTĚLEJEV, Libor. *Ústav materiálových věd a inženýrství : Studijní opory pro výuku předmětů* [online]. [2000] [cit. 2008-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/gu/Index.html>>.
- [45] *Krystalografická společnost : Krystalografie* [online]. [2000] [cit. 2008-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.xray.cz/krystalografie/str09a.htm>>.
- [46] *Essentia : Zvýšení výkonu válečkových ložisek od SKF* [online]. [2003] [cit. 2007-03-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.essentia.cz/index.php?obsah=32&id=68>>.
- [47] HALAMA, R. *Řešení elastoplastické napjatosti v bodovém styku dvou zakřivených těles pomocí MKP*. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2005. 130 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jiří Lenert, CSc..
- [48] VUT v Brně, Ústav Konstruování, prezentace předmětu Konstruování strojů, přednáška 4, Tření, mazání a opotřebení
Dostupný z WWW:

< <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf> >.

- [49] *The university of Sheffield* [online]. [2005] [cit. 2007-11-15]. Dostupný z WWW:
<<http://www.shef.ac.uk/mecheng/tribology/research/projects/reshipherwheel.htm>>.
- [50] NTN Bearing Corporation [online]. [1995] [cit. 2007-12-05]. Dostupný z WWW: <http://www.ntnamerica.com/pdf/Ball_Bearings.pdf>.
- [51] SVOBODA, P., KOVÁŘÍK, R., BRANDEJS, J. *Základy konstruování*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 186 s. ISBN: 80-7204-212-2
- [52] SVOBODA, P. aj. *Základy konstruování*. Výběr z norem pro konstrukční cvičení. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 288 s. ISBN: 80-7204-214-9
- [53] SOBEK, E. aj. *Základy konstruování. Návod pro konstrukční cvičení*. 5. vydání, přepracované. Brno: VUTIUM, 2002. 164 s. ISBN: 80-214-2090-1
- [54] TEA.Technik
T. E. A. TECHNIK, s.r.o. – katalog, <http://www.teatechnik.cz/katalogy-stazeni/>
- [55] ViDiTech [online]. c2007 [cit. 2008-04-13]. Dostupný z WWW:
<<http://www.viditech.eu/cz/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

a [mm]	- rozměr hlavní poloosy kontaktu ve směru valení
b [mm]	- rozměr hlavní poloosy kontaktu ve směru kolmém k valení
b_h [mm]	- ca. Přibližně polovina b
$ca.$ [-]	- přibližně
dpi [-]	- dot per inch = počet bodů na palec (rozlišení)
E [MPa]	- Youngův modul pružnosti v tahu
EHD [-]	- elastohydrodynamické (mazání)
FEM [-]	- final element metod (metoda konečných prvků)
F_{n1} [N]	- normálová síla na povrch vzorku v kontaktu 1 na stanici R-mat
F_{n2} [N]	- normálová síla na povrch vzorku v kontaktu 2 na stanici R-mat
F_{t1} [N]	- třecí síla v kontaktu 1 na stanici R-mat
F_{t2} [N]	- třecí síla v kontaktu 2 na stanici R-mat
g [$m \cdot s^{-2}$]	- tíhové zrychlení ($9,81 m \cdot s^{-2}$)
HDP [-]	- hrubý domácí produkt
h_{min} [nm]	- minimální tloušťka filmu
HTD [-]	- typ synchronního řemenového převodu
$LEFM$ [-]	- lineární elastická lomová mechanika
LST [-]	- laser surface texturing (cílená modifikace)
$NASA$ [-]	- americká společnost pro výzkum letectví a vesmíru
p_0 [MPa]	- kontaktní tlak
p_1 [MPa]	- kontaktní tlak v kontaktu 1 na stanici R-mat
p_2 [MPa]	- kontaktní tlak v kontaktu 2 na stanici R-mat
RCF [-]	- valivá kontaktní únavová životnost
STR [%]	- poměr vyjadřující míru prokluzu mezi dvěma povrchy
t_j [-]	- to jest
u [$m \cdot s^{-1}$]	- rychlost třecích povrchů
U_1 [$m \cdot s^{-1}$]	- obvodová rychlost testovacího kotouče 1
U_2 [$m \cdot s^{-1}$]	- obvodová rychlost testovacího kotouče 2
USB [-]	- universal serial bus (typ sběrnice v PC)
U_{t1} [$m \cdot s^{-1}$]	- obvodová rychlost testovacího kotouče 1
U_{t2} [$m \cdot s^{-1}$]	- obvodová rychlost testovacího kotouče 2
U_v [$m \cdot s^{-1}$]	- obvodová rychlost vzorku
WEA [-]	- white etching area (rekrytalizovaná zóna = motýlí křídlo)
α [$Pa \cdot s$]	- tlakově viskozitní koeficient
Σ [%]	- symbol pro STR poměr
λ [-]	- parametr mazání
μ [-]	- součinitel tření
μ_1 [-]	- Poissonova konstanta testovacích kotoučů
μ_2 [-]	- Poissonova konstanta vzorku
σ_x [MPa]	- napětí v ose x
σ_z [MPa]	- napětí v ose z
τ_{xz} [MPa]	- smykové napětí v rovině xz

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 0-1 Havárie rychlovlaku ICE 884 [3], [4]	13
Obr. 0-2 Přehled příčin ztráty funkčnosti [5]	13
Obr. 1-1 Strojní uzly s možným výskytem kontaktní únavy [48,49]	15
Obr. 1-2 Přehled typických projevů RCF	16
Obr. 1-3 a) průběh napětí při odvalení [9] b) kolísání tlaku v důsledku povrchových nerovností [10]	16
Obr. 1-4 a) zrno zatížené skluzem b) deformace zrna c) schéma dvojčatění d) deformace zrna [17].....	17
Obr. 1-5 Změna mikrostruktury v okolí vměstku [15]	17
Obr. 1-6 Rozložení kontaktního tlaku [9].....	18
Obr. 1-7 a) iniciace trhliny těsně pod povrchem [8] b) iniciace trhliny hluboko pod povrchem [20,48]	19
Obr. 1-8 Rozvoj mikro-pittingu na makro-pitting a) experiment b) vyvinutý model [24]	20
Obr. 1-9 Výroba drážky (a) a čel vnitřního kroužku (b) [50].....	21
Obr. 1-10 Ukázky zkoumaných povrchových topografií [25].....	22
Obr. 1-11 Přehled částic uvolněných z povrchu [26]	23
Obr. 1-12 Vlevo: Poškození povrchu zabodnutou částicí Vpravo: Poškození povrchu vtisky [26].....	23
Obr. 1-13 Kolísání tlaku, nárůst smykových napětí v okolí vtisku. Nárůst smykového napětí.....	24
Obr. 1-14 Princip LST technologie [29].....	25
Obr. 5-1 Ukázka řídicího softwaru	42
Obr. 5-2 Zkušební upnutí polohovacího zařízení	42
Obr. 5-3 [55] Nový akcelerometr ATW04, Nová jednotka VDT02-A	43
Obr. 5-4 Ukázka při měření vibrací na stroji R-mat2c	43
Obr. 5-5 Původní prokluzový systém	44
Obr. 5-6 Původní uložení a navrhované nové uložení.....	45
Obr. 5-7 Nové řešení unašeče	46
Obr. 5-8 Návrh nového převodového mechanismu prokluzového systému.....	47
Obr. 5-9 Realizace prokluzového systému a jeho úpravy pomocí separačních kroužků	48
Obr. 5-10 Kontrolované body	48
Obr. 5-11 Princip funkce	50
Obr. 5-12 Vliv repasovaných kotoučů na rovnováhu v rozložení sil	51
Obr. 5-13 Ukázka Stribeckovi křivky.....	52
Obr. 5-14 Profil vtisku [30]	56
Obr. 5-15 Výsledky RCF v jednotlivých stopách zařízení R-mat2b	60
Obr. 5-16 Výsledky RCF v jednotlivých stopách zařízení R-mat2c	60
Obr. 5-17 Těžiště držáku vzorku	61
Obr. 5-18 RCF životnost v podmínkách čistého valení a podmínkách prokluzu.....	62
Obr. 5-19 RCF životnost v podmínkách prokluzu 20% pro modifikovaný a nemodifikovaný povrch.....	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Výhody a nevýhody jednotlivých typů experimentálních zařízení.....	33
Tab. 2 Základní parametry zkušební zařízení MPR [42]	34
Tab. 3 Přehled základních parametrů UTM 2000 twin disc [43].....	35
Tab. 4 Přehled parametrů Microsoft Laser mouse 6 000 v1.0	41
Tab. 5 Dosažitelné prokluzové podmínky	46
Tab. 6 Přehled naměřených údajů	49
Tab. 7 Dosažené prokluzové podmínky při různých zatížení	50
Tab. 8 Tabulka podmínek měření v čistém prokluzu.....	53
Tab. 9 Přehled výsledků v podmínkách čistého valení	54
Tab. 10 Tabulka podmínek měření v prokluzu 20%.....	55
Tab. 11 Přehled výsledků v podmínkách prokluzu 20% s modifikovaným problémem	56
Tab. 12 Přehled výsledků v podmínkách prokluzu 20% s nemodifikovaným povrchem	57

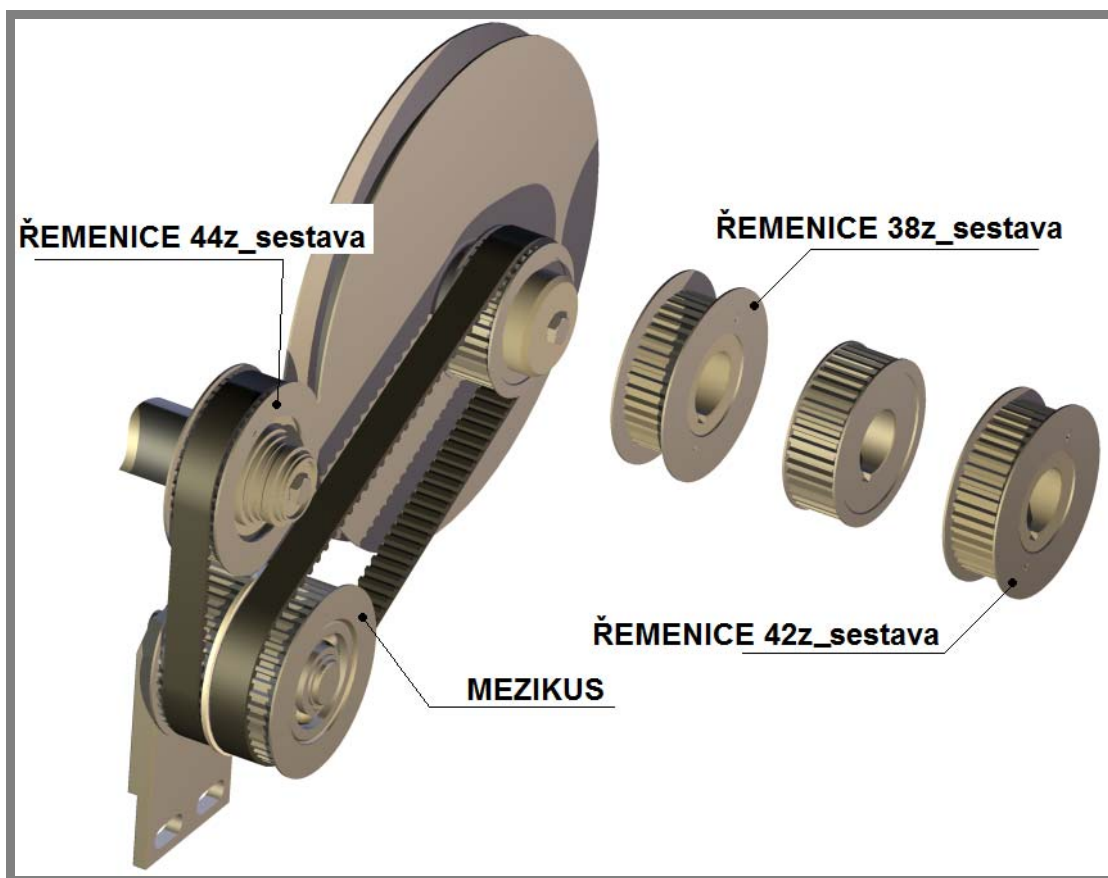
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1. : Strukturální (klasická) únava materiálu

Příloha č. 2. : Vliv cílené modifikace na tloušťku filmu ve smíšeném mazacím režimu

SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

PŘEVODOVÝ MECHANISMUS	3 - RMAT2C - 100
MEZIKUS	3 - RMAT2C - 010
ŘEMENOVÝ VÁLEC	4 - RMAT2C - 001
ČEP	4 - RMAT2C - 002
VYMEZOVACÍ KROUŽEK	4 - RMAT2C - 003
ŠTÍT1	4 - RMAT2C - 004
SEPARAČNÍ KROUŽEK	4 - RMAT2C - 005
ŘEMENICE 38z_SESTAVA	4 - RMAT2C - 020
ŘEMENICE 38z	4 - RMAT2C - 011
ŠTÍT2	4 - RMAT2C - 012
ŘEMENICE 42z_SESTAVA	4 - RMAT2C - 030
ŘEMENICE 42z	4 - RMAT2C - 021
ŘEMENICE 44z_SESTAVA	4 - RMAT2C - 040
ŠTÍT3	4 - RMAT2C - 031



Přehled výkresové dokumentace

Vliv cílené modifikace topografie na únavové poškození třecích povrchů.

vypracoval: Bc. Jakub Popelka

vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D

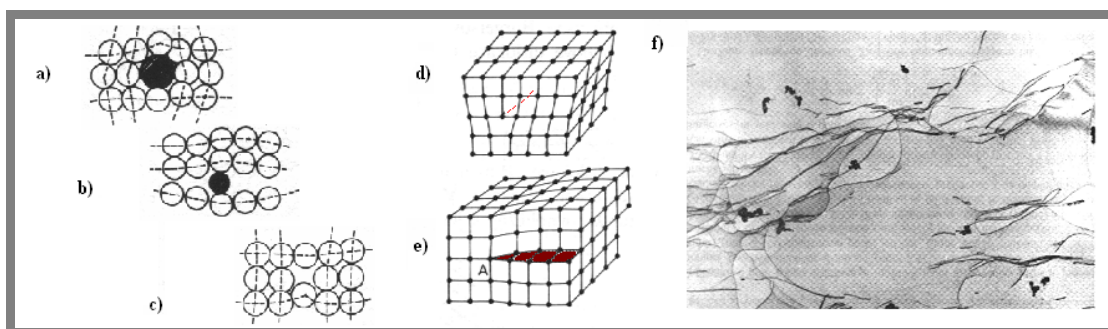
Aplikovaná mechanika, Počítačová podpora konstruování

2008

Příloha č. 1. : Strukturální (klasická) únava

Strukturální únava materiálu

Za únavu materiálu považujeme proces strukturních a mechanických změn materiálu. Reálný materiál je obvykle slitina o několika fázích (např. ložisková ocel obsahuje minimálně 4. fáze). Krystalizace materiálu je rovněž proces z velké části náhodný. Při formování zrn není orientace atomových mřížek jednotná. V tomto důsledku vznikají poruchy v materiálové struktuře. Zvýšení poruch nad rovnovážný stav je nadále způsobeno opracováním materiálů např. broušením, soustružením, tvářením atd. Největším generátorem poruch jsou tepelné úpravy materiálů.



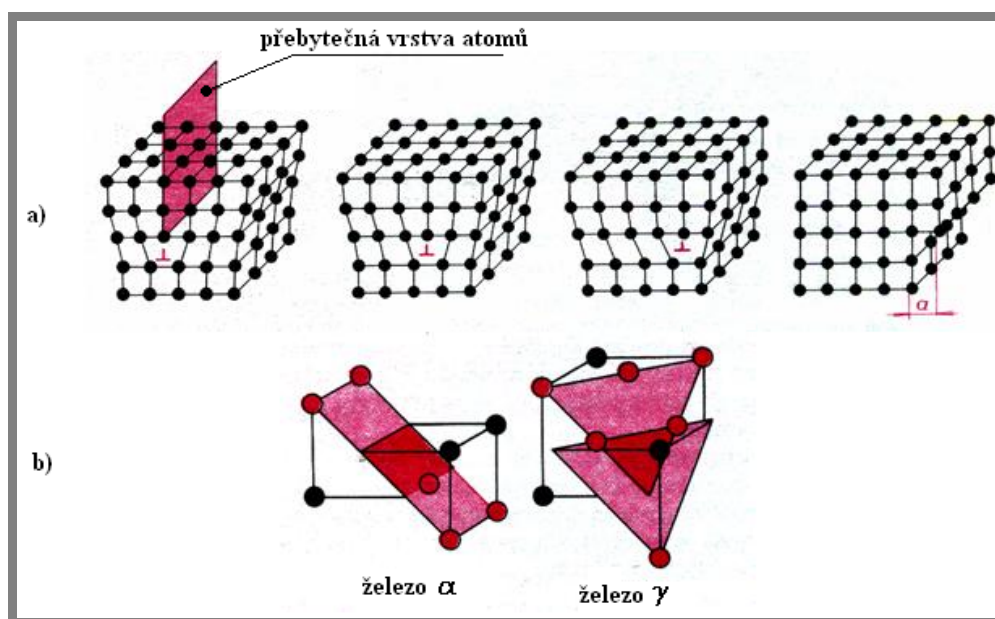
Obr. 1 Přehled poruch v krystalech.

Bodové: a) substituční atom, b) intersticiální atom, c) vakance.

Čárové: d) hranová dislokace, e) šroubová dislokace.

f) Snímek dislokační struktury pořízený pomocí elektronové mikroskopie [17]

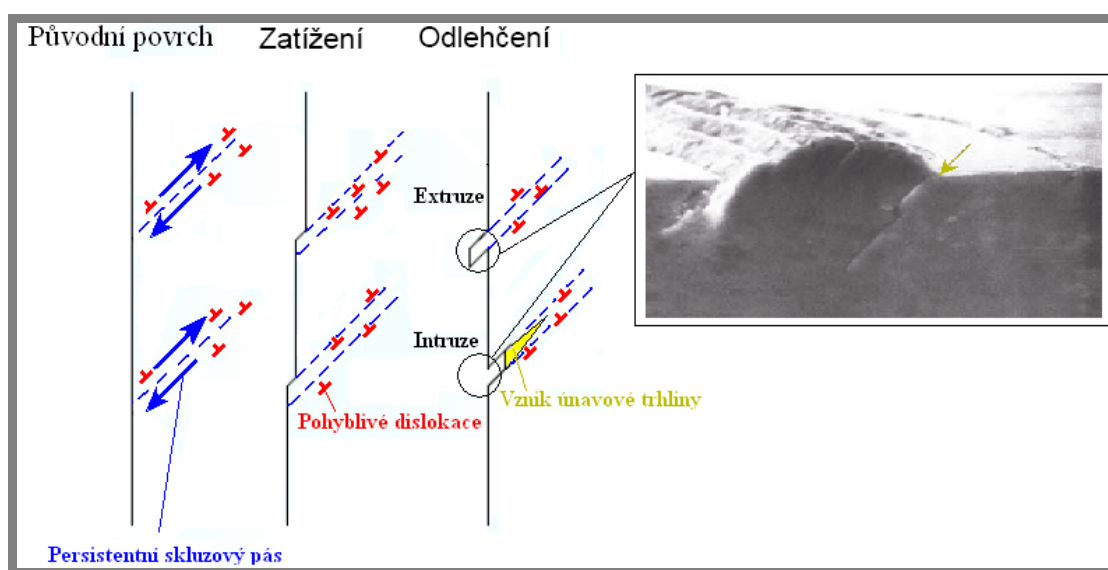
Z tohoto důvodu, i když zátěžné síly dle výpočtu způsobí napětí pod mezi kluzu, v jistých místech dojde k překročení meze kluzu a nastává plastizace materiálu. Zpočátku je toto plastické napětí v materiálu relaxováno zejména díky pohybu, generaci a interakcemi dislokací.



Obr. 2 a) Pohyb atomů vyvolaný pohybem hranové dislokace. b) Pohyb atomů ve skluzové rovině [45]

V této fázi hovoříme o cyklickém měknutí popřípadě zpevnění materiálu. O tom zda materiál bude zpevňovat nebo změkčovat, je možné rozhodnout na základě jednoduchého vztahu R_m/R_e . Pro materiály s tímto poměrem nižším než 1,2 zpravidla dochází k cyklickému měknutí. Naopak pro materiály s poměrem vyšším než 1,4 dochází ke zpevnění. Často je tento proces nazýván jako "záběh". Kromě dislokací jsou rovněž v pohybu i precipitační složky slitin. U ocelí zejména uhlíku. Dislokace se postupně formují do skluzových pásů, přičemž precipitační složky jim často v pohybu zabraňují. Po vyčerpání možnosti pohybu dislokací a precipitátů (saturovaný stav), nastávají v materiálu změny mechanických vlastností meze pevnosti a kluzu. Při těchto změnách může dojít k poklesu až o 1 GPa. Dále zpravidla poklesne mez únavy, modul pružnosti a hodnota vnitřního tlumení. Dále pak na počtu zátěžných cyklů, druhu a stavu materiálu. Tyto změny jsou součástí **1. stádia únavového procesu**.

Změna mechanických vlastností vede k překročení meze kluzu. V důsledku toho se začnou v materiálu akumulovat plastické deformace. Vlivem deformací se začnou formovat persistentní skluzová pásma při současném poklesu hustoty dislokací. Efektem toho stádia jsou extruze a intruze materiálu na povrchu. Zejména potom intruze zvyšují koncentrace napětí svým vrubovým efektem. Při vhodném přeleštění povrchu materiálu (odebrání extruzí a intruzí) je možné docílit zvýšení únavové životnosti.



Obr. 3 Vznik únavové trhliny

Trhliny z pohledu vysokocyklové únavy (více než 10^7 zátěžných cyklů) se začínají tvořit většinou na volném povrchu. Existují studie zabývající se gigacyklovou únavou (více než 10^9 zátěžných cyklů). V tomto odvětví je příčina selhání ukryta většinou pod povrchem. Efekt je nazýván jako rybí oko [44]. Zpravidla existují tři hlavní místa vzniku trhliny na povrchu:

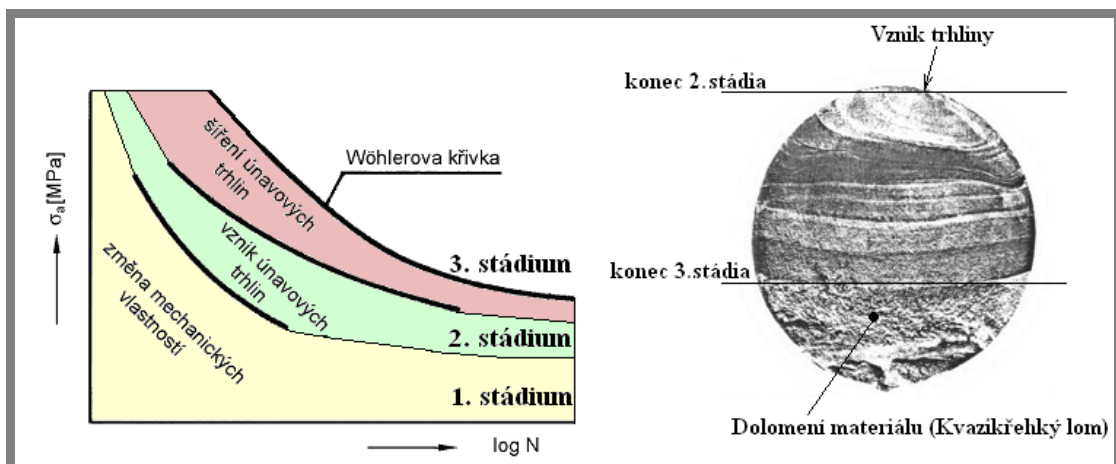
1. Únavová skluzová pásma
2. Hranice mezi jednotlivými zrny
3. Na přechodu mezi inkluzemi a matricí materiálu

Pro mechanismus vzniku trhlin existuje přibližně 5 hlavních teorií:

1. Prorůstání intruzí do hloubky
2. Křehký lom v kořeni intruze
3. Kondenzace vakancí při souběžné tvorbě dutin
4. Dekoheze krystalu způsobená akumulací dislokací
5. Nukleace na hranicích zrn (vznik intruzí mezi zrny)

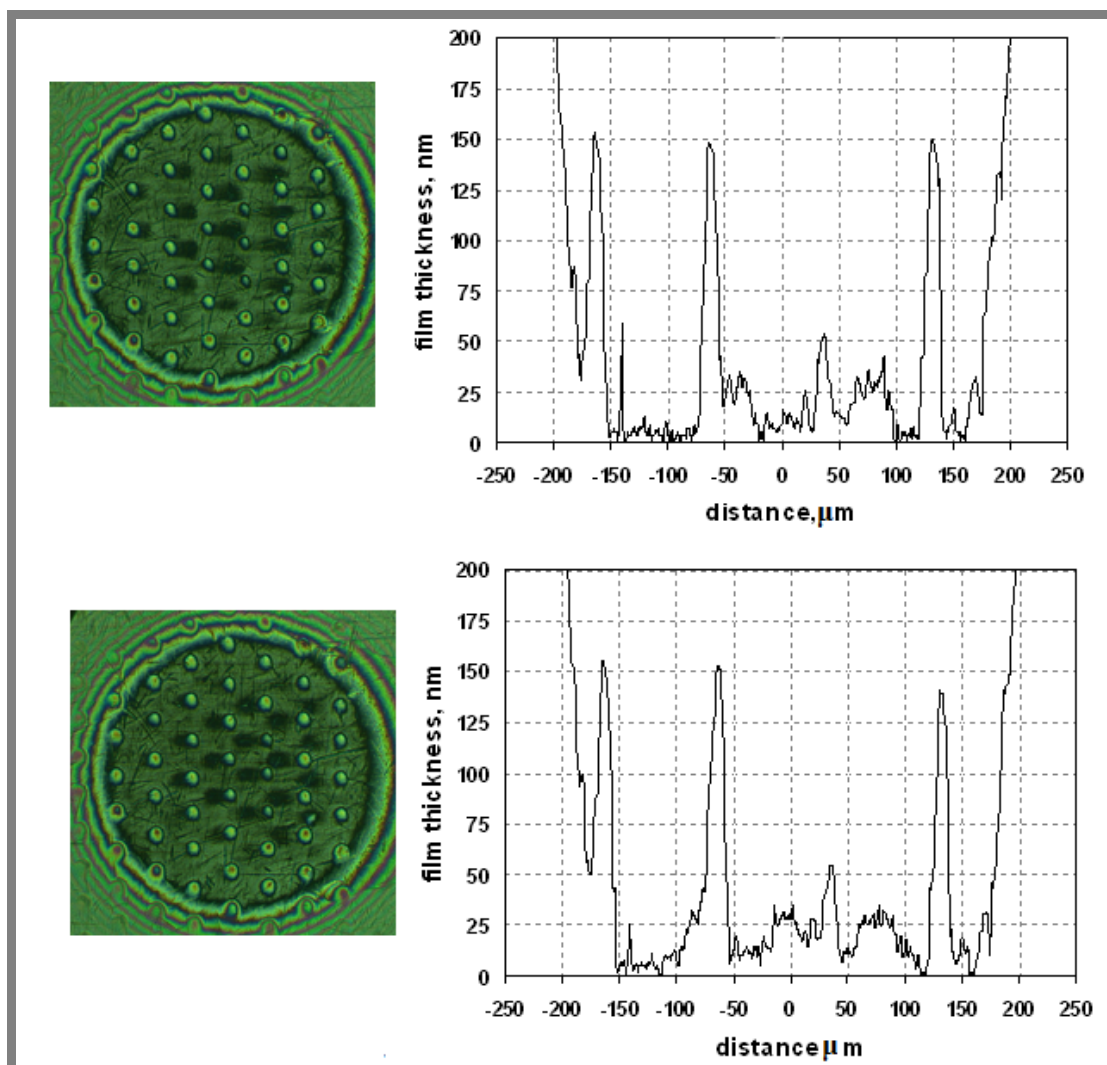
Vznik mikrotrhlin je považován za **2. stádium únavového procesu**. Zbytkové tlakové pnutí v materiálu, například po kalení, způsobují prodloužení doby iniciace mikrotrhliny. Naopak zbytková tahová pnutí mohou způsobit zkrácení doby iniciace mikrotrhliny.

V dalším stádiu vlivem spojování mikrotrhlin, nebo šířením dochází k růstu jediné "magistrální" trhliny. Trhlina se šíří v aktivním skluzovém systému. To je místem s maximálním smykovým napětím a vhodnou dislokační strukturou. S rostoucí délkou trhliny se zvyšuje koncentrace napětí ve špičce. Vzniká plastická zóna. S rostoucí plastickou zónou roste i vliv normálových napětí na šíření. V období, kdy na šíření trhliny začne mít dominantní vliv normálové napětí, hovoříme o přechodu z krystalografického do nekrystalografického šíření. Trhlina roste s každým zátěžným cyklem o jistou vzdálenost. Hovoříme o stabilním růstu trhliny. Konec **3. stádia únavy** je konečným lomem, nebo dolomením.

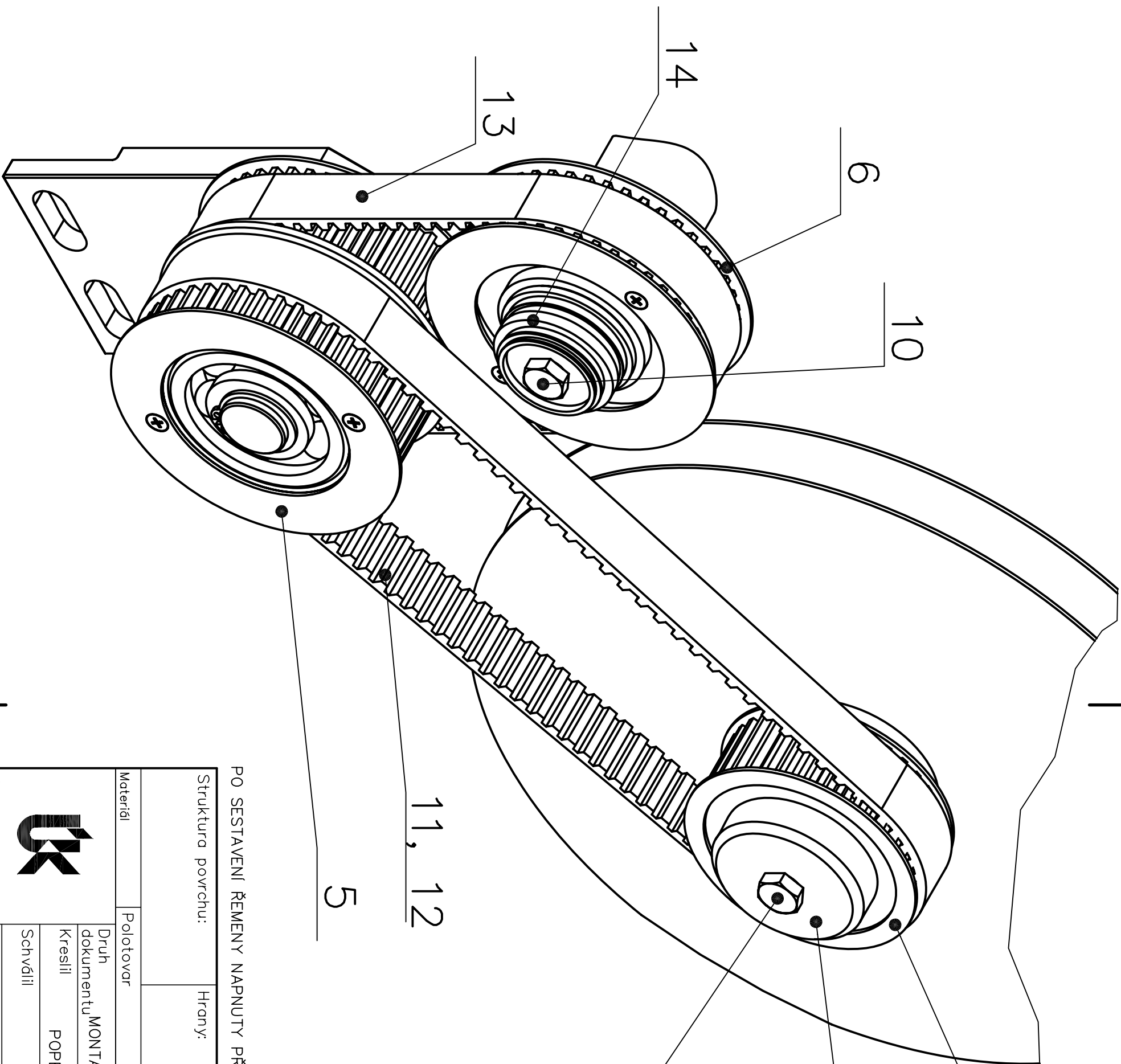


Obr. 4 Stádia únavového porušení

Příloha č. 2. : Vliv cílené modifikace na tloušťku filmu ve smíšeném mazacím režimu



Obr. 5 Vliv pole mělkých důlků na tloušťku filmu [6]



1, 2, 3, 4

9

10

11, 12

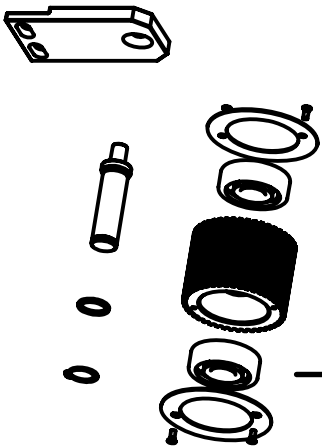
5

PO SESTAVENÍ ŘEMENY NAPNUTY PŘEMÍSTĚNÍM MEZIKUSU POZICE 5

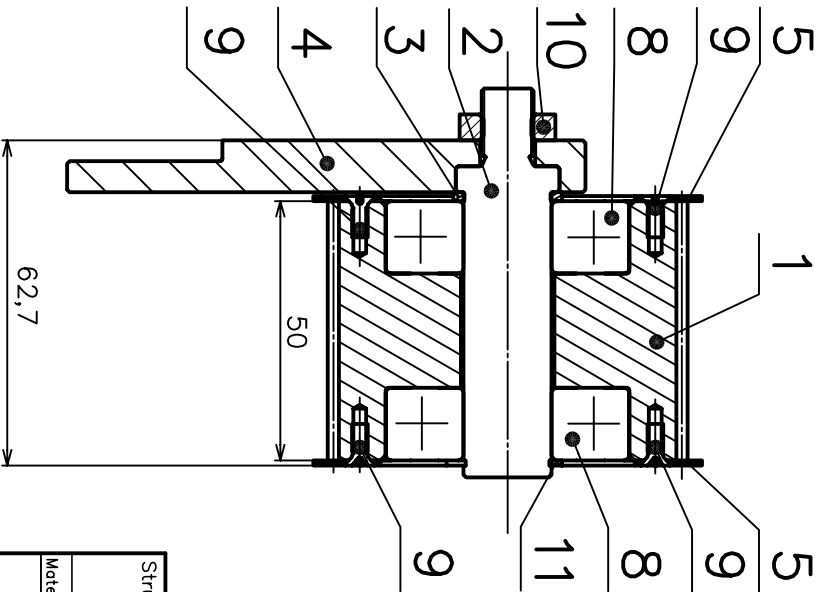
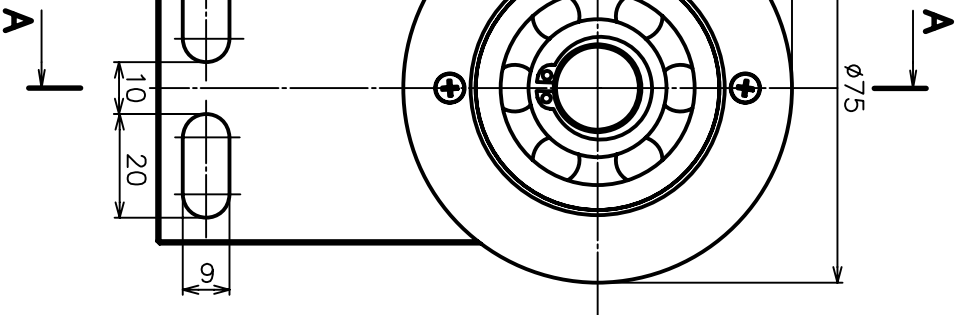
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko		Přesnost ISO 2768-mH	
				1: 2		Tolerování ISO 8015	
						Promítání 	
Materiál	Polotovary	Hmotnost 2,915 kg		CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016			
		Druh dokumentu		Název			
		Kreslil		MONTÁŽNÍ VÝKRES			
		Schválil		POPELKA			
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ		Datum vydání		Číslo dokumentu			
		14.03.2008		3-RMAT2C-100		List 1 / 2	

1		2		3		4	
A	Číslo	Název - označení		Polotovar		Hmot. J	
	polož.	Výkres - norma		Materiál			
	1	ŘEMENICE 36z		36-5M-15 (TEA TECHNIKS.r.o)		0,34	1
		4-RMAT2C-041		C40			
	2	ŘEMENICE 38z				0,18	1
		4-RMAT2C-020					
B	3	ŘEMENICE 40z		40-5M-15 (TEA TECHNIKS.r.o)		0,44	1
		4-RMAT2C-042		C40			
	4	ŘEMENICE 42z				0,21	1
		4-RMAT2C-030					
	5	MEZIKUS				1,17	1
		4-RMAT2C-010					
	6	ŘEMENICE 44z				0,17	1
		4-RMAT2C-040					
C	7						
	8						
	9	KROUŽEK1				0,03	1
		PŮVODNÍ DÍL					
	10	ŠROUB M6				0,01	2
		M6x1-12 ČSN EN ISO 4017					
D	11	OZUBENÝ ŘEMEN				0,29	1
		HTD-5M-550-15(TEA_TECHNIK)					
	12	OZUBENÝ ŘEMEN				0,29	1
		HTD-5M-535-15(TEA_TECHNIK)					
	13	OZUBENÝ ŘEMEN				0,02	1
		HTD-5M-375-15(TEA_TECHNIK)					
E	14	KROUŽEK2				0,01	1
		PŮVODNÍ DÍL					
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost Tolerování Promítání 		
Materiál		Polotovar		Hmotnost kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016		
F	 ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ	Druh dokumentu KUSOVNÍK		Název PŘEVODOVÝ MECH.			
		Kreslil POPELKA					
		Schválil		Číslo dokumentu			
		Datum vydání 14.03.2008		3-RMAT2C-100 List 2/ 2			
1		2		3		4	

Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	44



A-A



11	POJISTNÝ KROUŽEK 17		0,0008	1
	ČSN 02 2930			
10	MATICE M10		0,006	1
	M10x1 ČSN EN 24 036			
9	ŠROUB M3		0,002	4
	M3x0,5-8 ČSN EN ISO 7046-2			
8	LOŽISKO		0,218	2
	ZKL 6303 AZ ČSN 02 4640			
7				
6				
5	ŠTÍT1	P1-80X80 ČSN 42 5301	0,04	2
	4-RMAT2C-004	S195T		
4	TĚLESO	PŮVODNÍ DÍL	0,377	1
	4-RMAT2C-006	S195T		
3	VÝMEZOVACÍ KROUŽEK	TRØ22x2,9 ČSN 42 5715.01	0,002	1
	4-RMAT2C-003	S195T		
2	ČEP	Ø22 ČSN 42 5510.10	0,12	1
	4-RMAT2C-002	E335		
1	ŘEMENOVÝ VÁLEC	HTD-5M-200-44	0,96	1
	4-RMAT2C-001	EN-AW-6061		

Číslo polož	Název - označení	Položovar	Hmot. J	Množ.
	Výkres - norma			

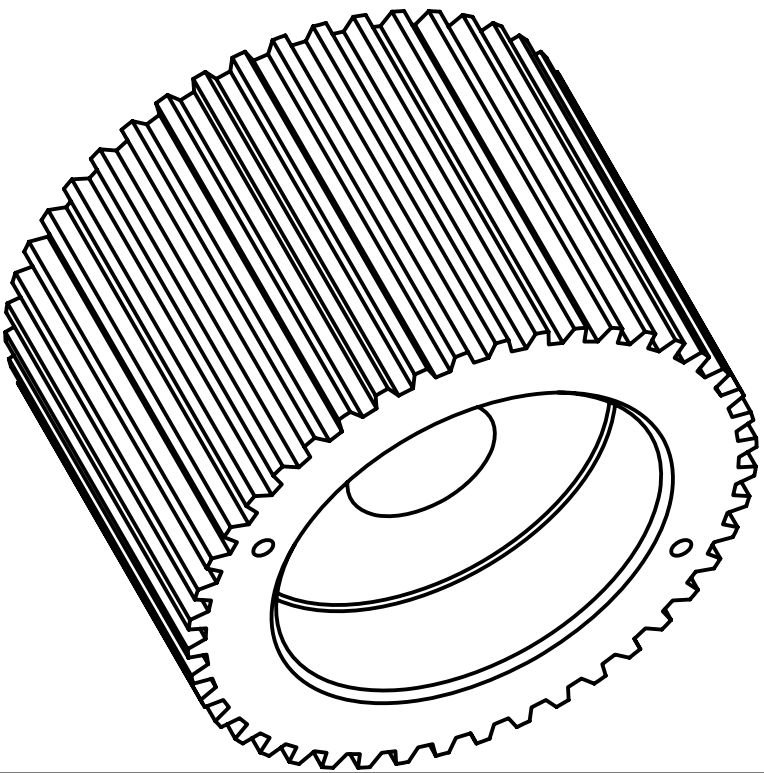
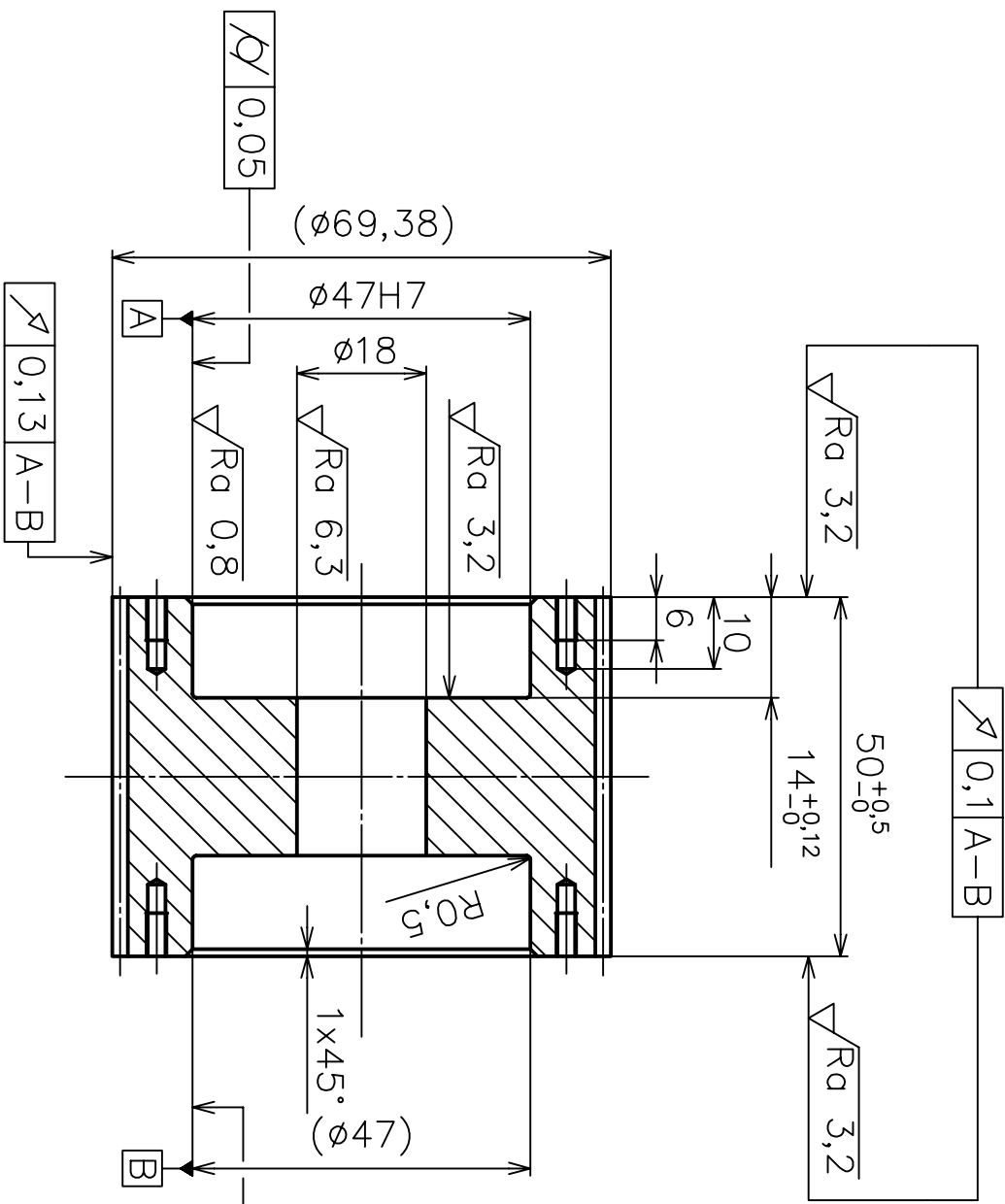
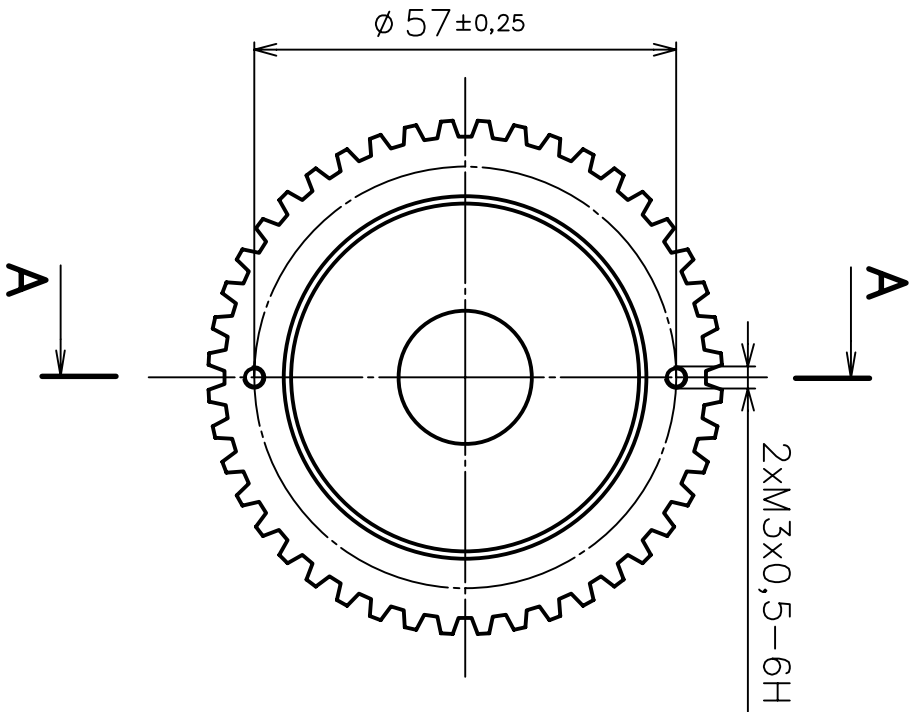
Struktura povrchu:		Hrany:	Měřítka	Přesnost ISO 2768—mH
			1:1	Tolerování ISO 8015
			Promítání 	
Materiál	Polotovary	Hmotnost	1,692 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016

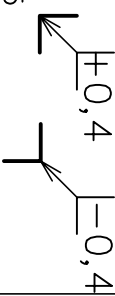
UK ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ	Polotovary		Hmotnost: 1,692 kg		CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
	Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY	Název		
	Kreslil	POPELKA	MEZIKUS		
	Schválil		Číslo dokumentu		
	Datum vydání	14.03.2008	3-RMAT2C-010		
			List 1 / 7		

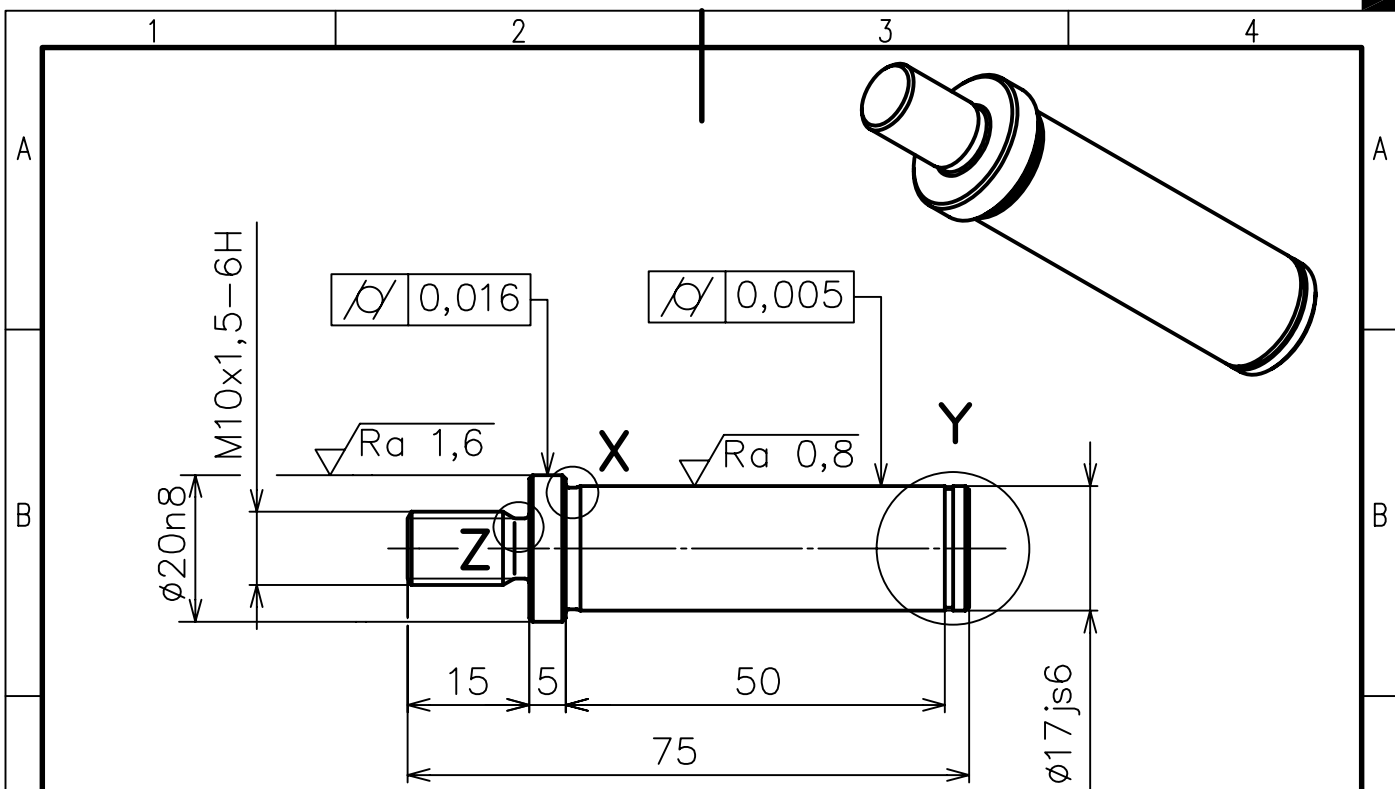
3-RMAT2C-010

List 1 / 7

Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	44



Struktura povrchu:		Hrany:			Měřítiko	Přesnost ISO 2768-mH
√ (✓)		ISO 13715	1:1		Tolerování ISO 8015	Promítání 
Materiál: EN-AW-6061		Položkový HTD-5M-200-44(TEA TECHNIKA s.r.o.)		Hmotnost 0,963kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
		Druh dokumentu		Název		
		Kreslil		ŘEMENOVÝ VÁLEC		
		Schválil		Číslo dokumentu		
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ		Datum vydání		3-RMAT2C-001		
		14.03.2008		List 2 / 7		

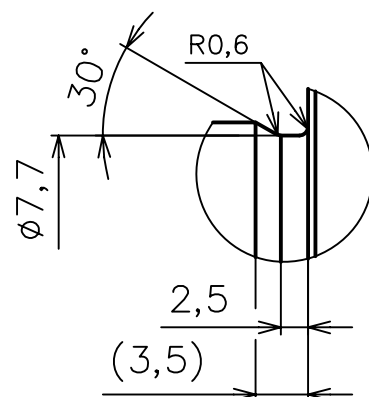
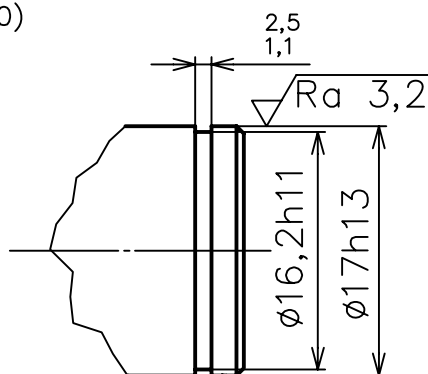
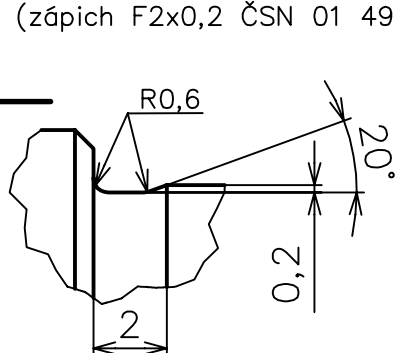


X (5:1)

Y (2:1)

Z (2:1)

(zápich F2x0,2 ČSN 01 4960)



E NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ = 1x45°

Struktura povrchu:

$\sqrt{Ra\ 6,3}$ (✓)

Hrany:

ISO 13715

$\begin{matrix} +0,4 \\ -0,4 \end{matrix}$

Měřítka

1:1

Přesnost ISO 2768-mH

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál E335

Polotovár ø22 ČSN 42 5510.10

Hmotnost 0,119 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES

Kreslil POPELKA

Schválil

Datum vydání 14.03.2008

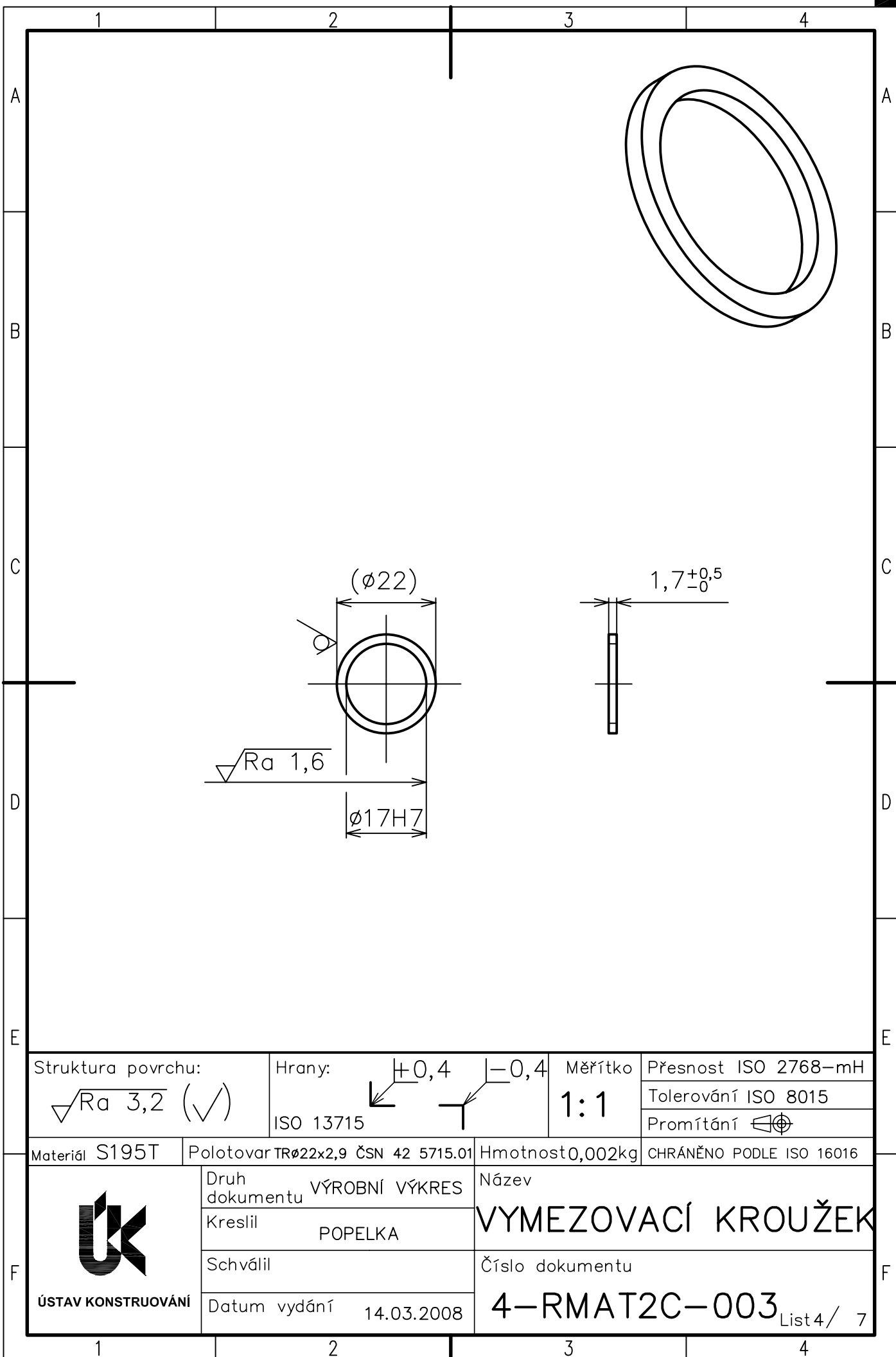
Název

ČEP

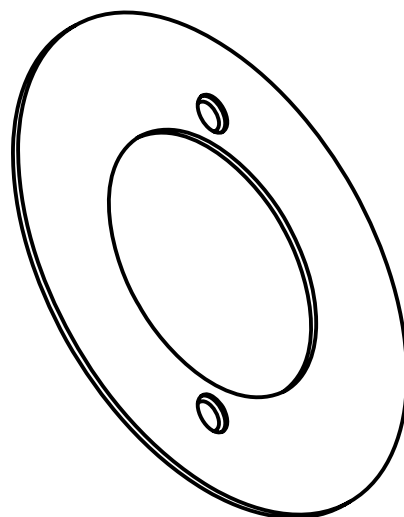
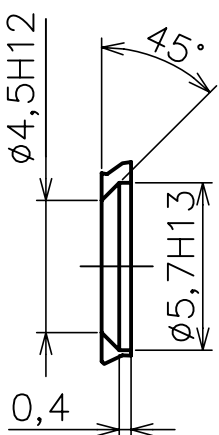
Číslo dokumentu

4-RMAT2C-002

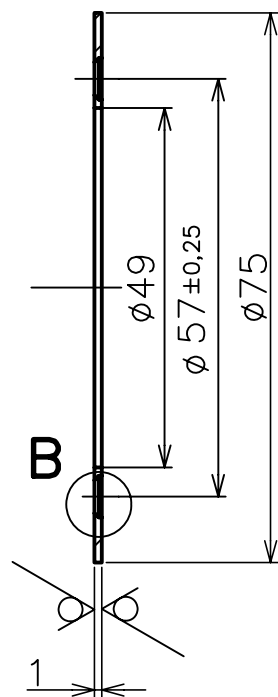
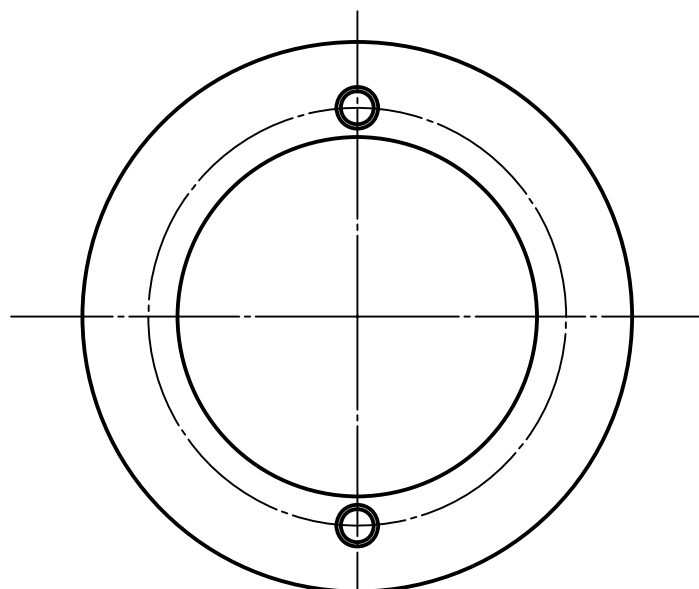
List 3/ 7



B (4:1)



A-A



Struktura povrchu:

$\sqrt{Ra\ 6,3}$ (✓)

Hrany:

$\pm 0,4$ $\pm 0,4$

ISO 13715

Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mH

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál S195T

Polotovár P1-80X80 ČSN 42 5301

Hmotnost 0,020 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Druh dokumentu

VÝROBNÍ VÝKRES

Kreslil

POPELKA

Schválil

Datum vydání

14.03.2008

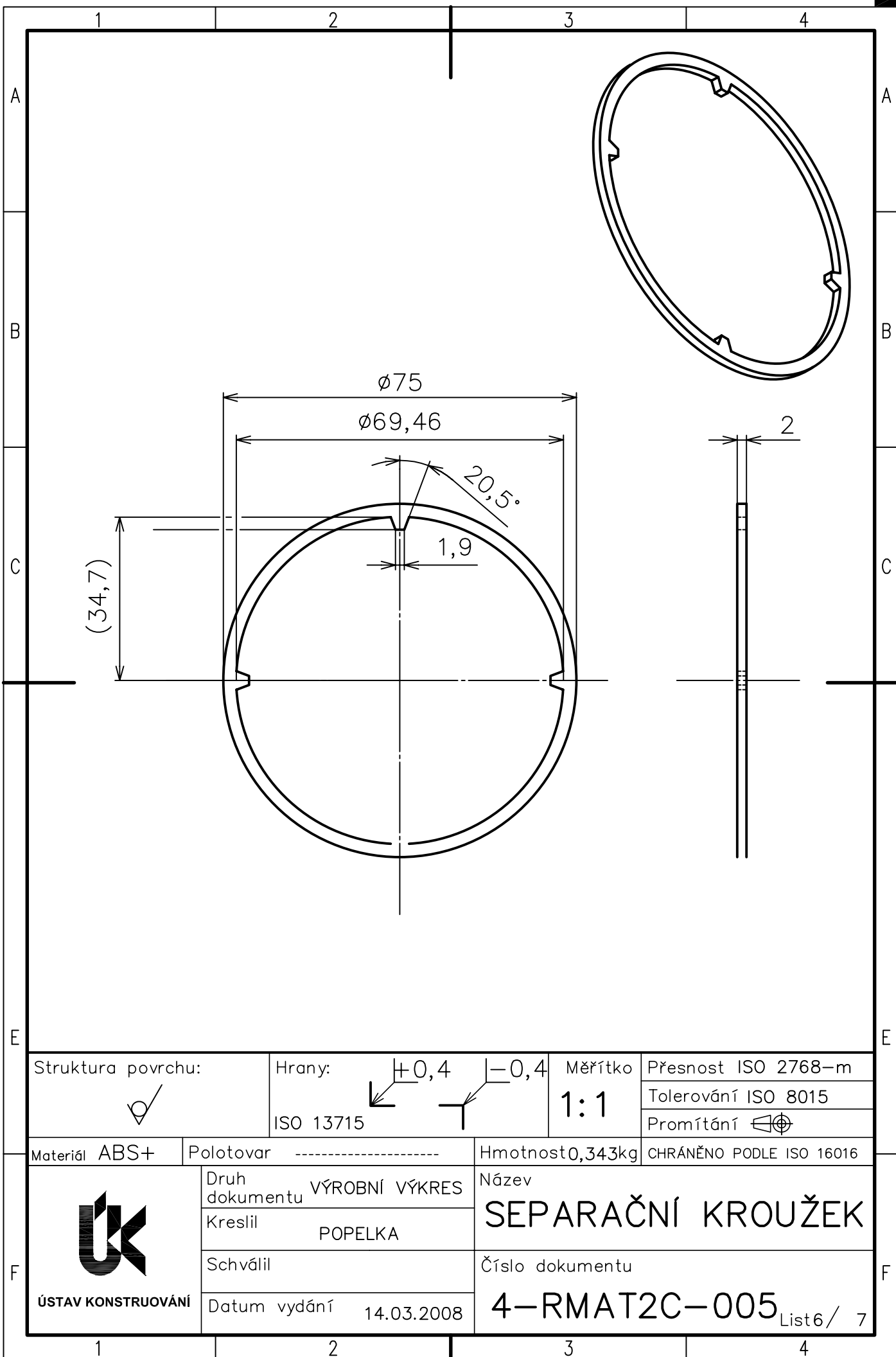
Název

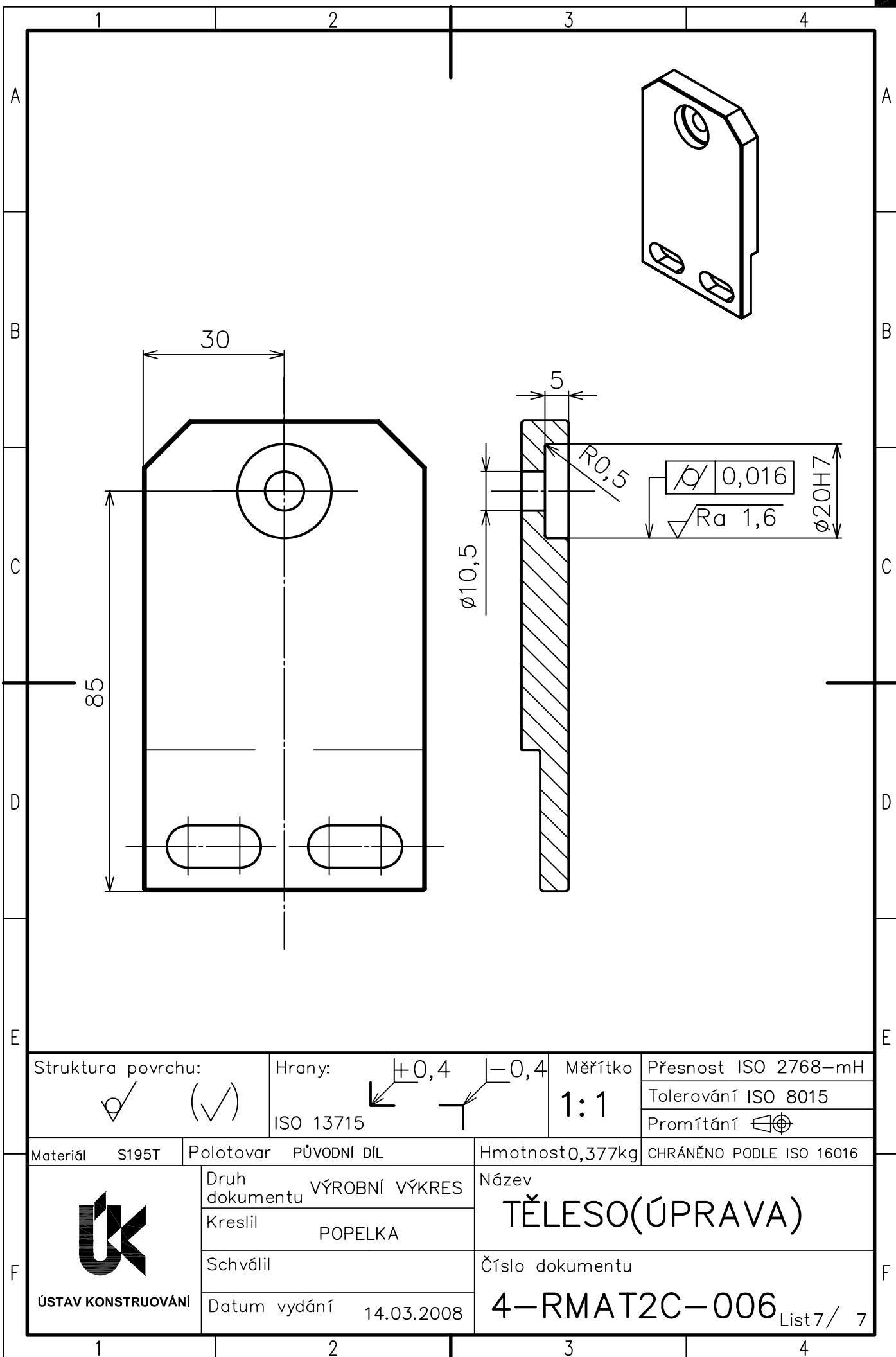
ŠTÍT1

Číslo dokumentu

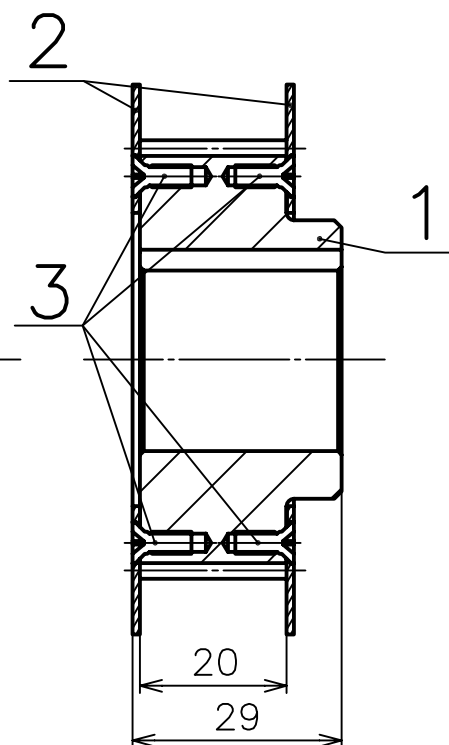
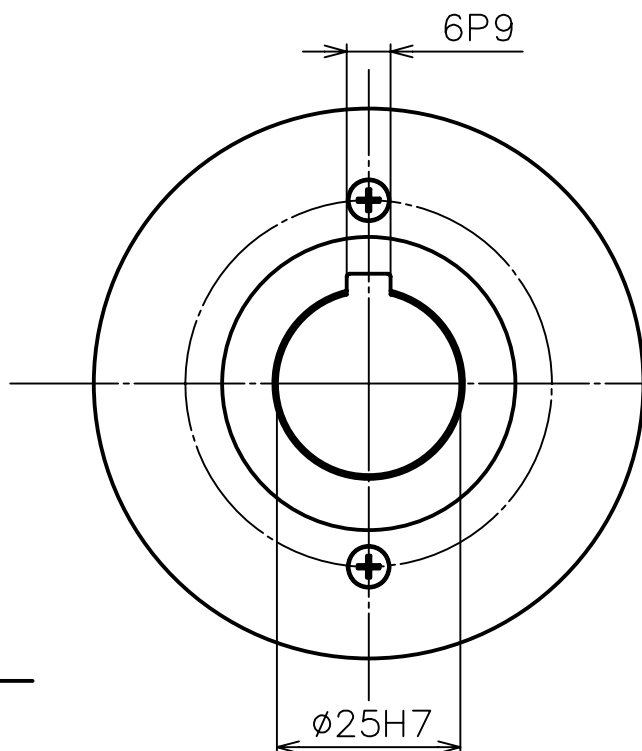
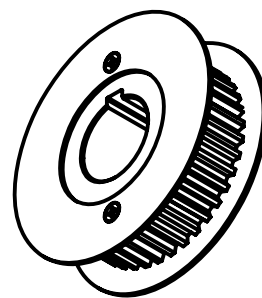
4-RMAT2C-004

List 5/ 7





Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	38



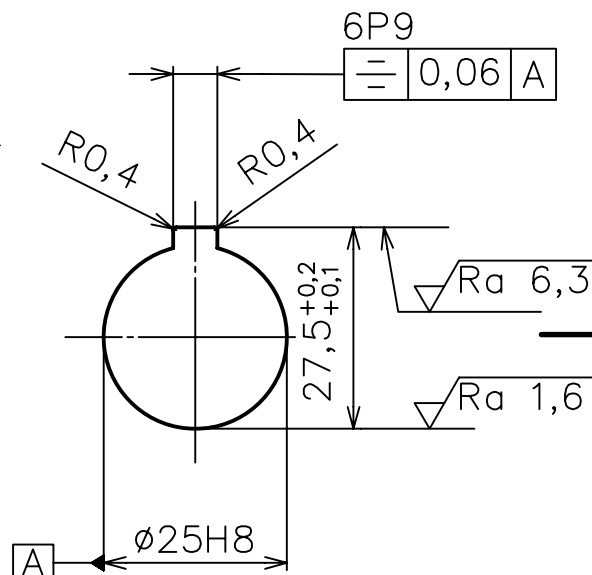
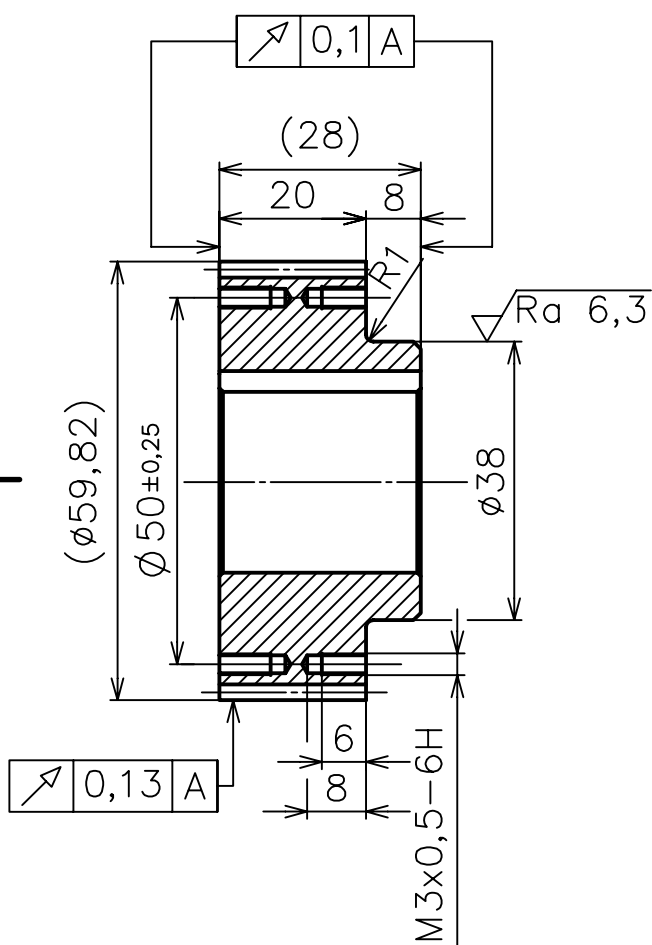
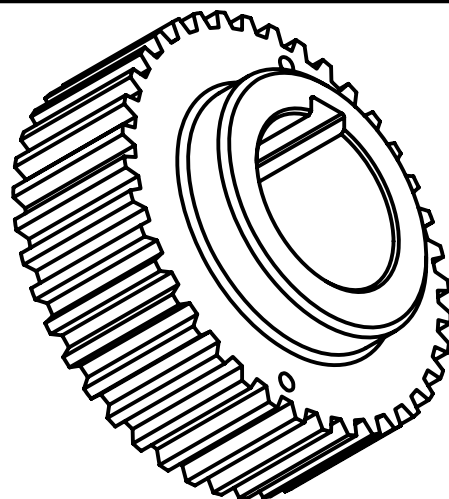
3	ŠROUB M3		0,002	4
	M3x0,5-8 ČSN EN ISO 7046-2			
2	ŠTÍT2	P1-80X80 ČSN 42 5301	0,048	2
	4-RMAT2C-012	S195T		
1	ŘEMENICE 38z	OZUB. TYČ HTD-5M-200-38	0,126	1
	4-RMAT2C-011	EN-AW-6061		

Číslo	Název - označení	Polotovár	Hmot.	J	Množ.
polož.	Výkres - norma	Materiál			

Struktura povrchu:	Hrany:	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mH
			Tolerování ISO 8015
			Promítání
Materiál	Polotovár	Hmotnost 0,177kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016

	Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY	Název ŘEMENICE 38z
	Kreslil POPELKA	
	Schválil	Číslo dokumentu 4-RMAT2C-020
	Datum vydání 14.03.2008	
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ		List 1 / 3

Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	38



NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ = 1x45°

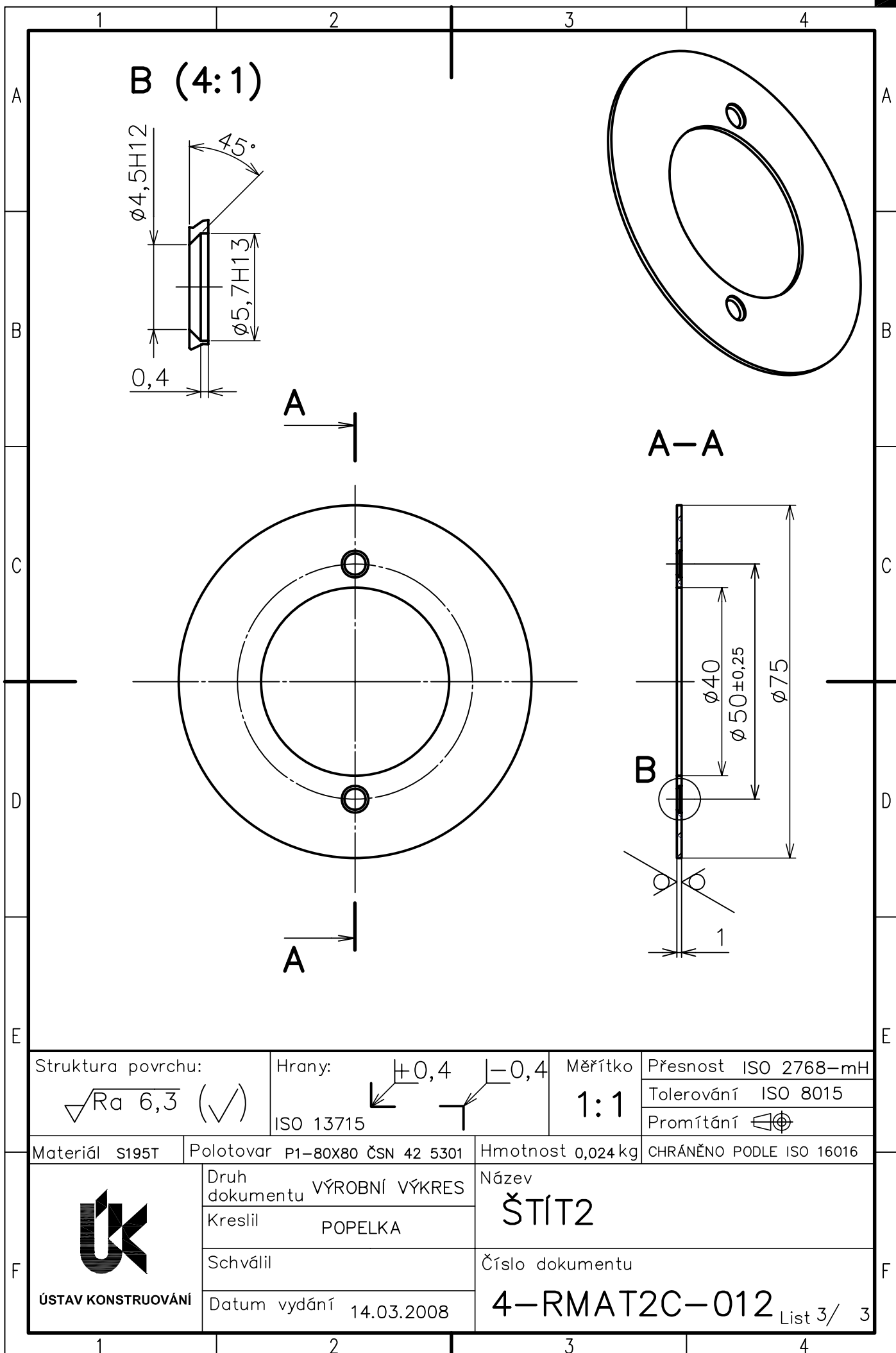
Struktura povrchu: $\sqrt{Ra\ 3,2}$ (✓)	Hrany: $\pm 0,4$ $-0,4$ ISO 13715	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mH Tolerování ISO 8015 Promítání
--	---	----------------	--

Materiál EN-6061	Polotovár 44-5M-15 (TEA TECHNIKS.r.o)	Hmotnost 0,126 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
------------------	---------------------------------------	-------------------	--------------------------

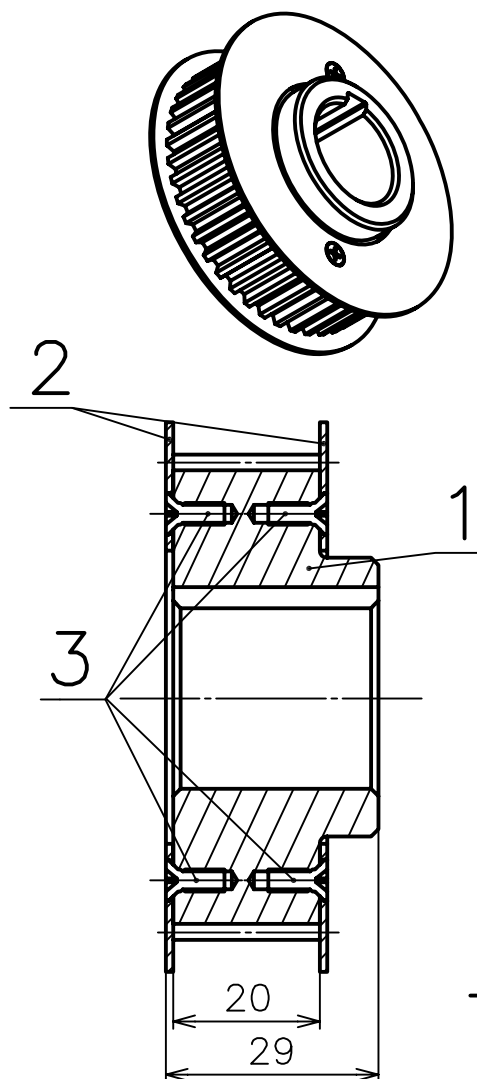
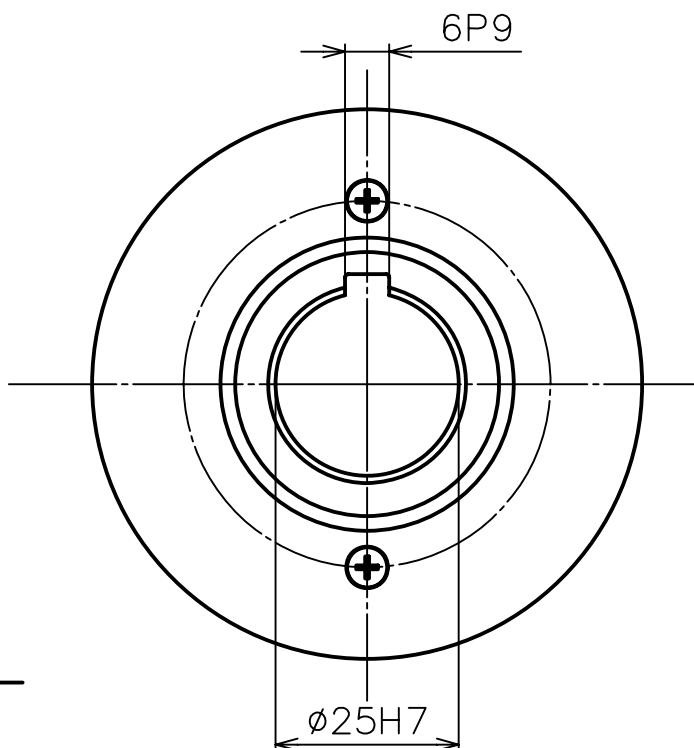


ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES	Název ŘEMENICE 38z
Kreslil POPELKA	Číslo dokumentu 4-RMAT2C-011
Schválil	List 2/ 3
Datum vydání 14.03.2008	



Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	42

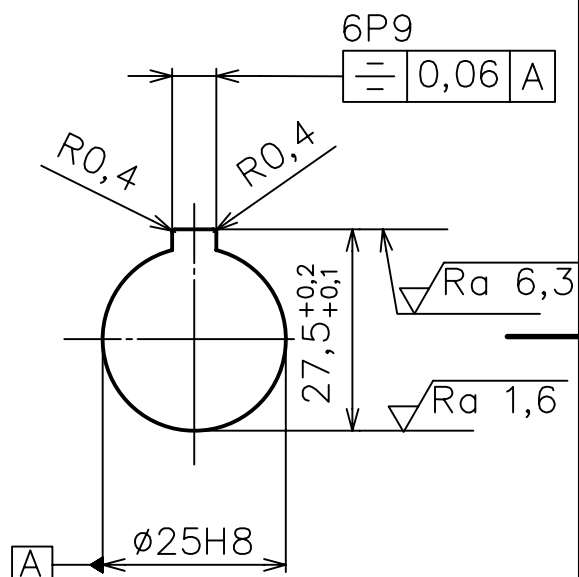


3	ŠROUB M3		0,002	4
	M3x0,5-8 ČSN EN ISO 7046-2			
2	ŠTÍT2	P1-80X80 ČSN 42 5301	0,048	2
	4-RMAT2C-012	S195T		
1	ŘEMENICE 42z	OZUB. TYČ HTD-5M-200-42	0,16	1
	4-RMAT2C-021	EN-AW-6061		

Číslo	Název - označení	Polotovár	Hmot.	J	Množ.
polož.	Výkres - norma	Materiál			

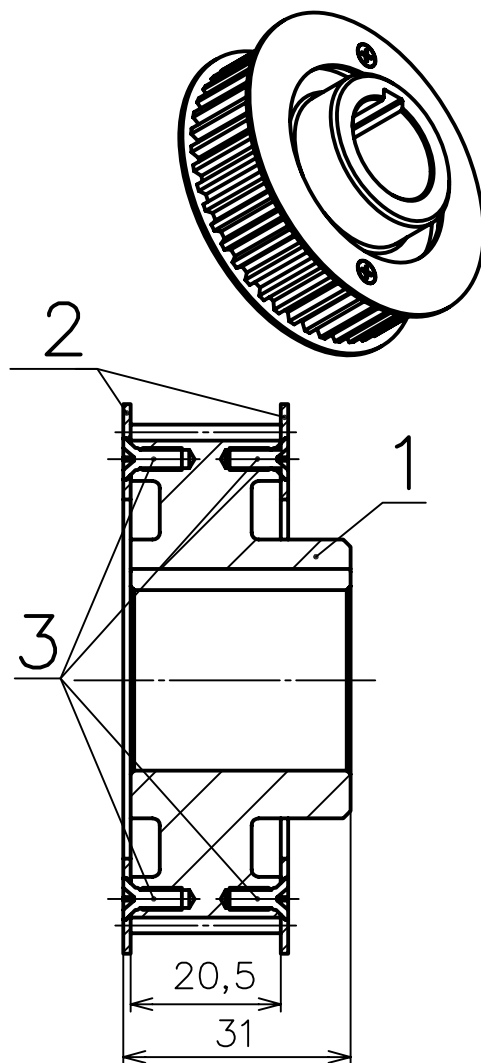
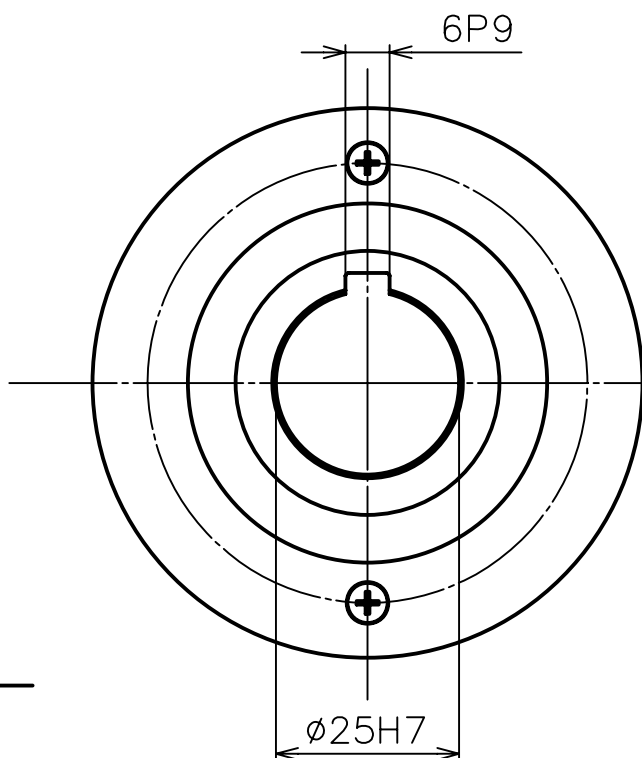
Struktura povrchu:	Hrany:	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mH
			Tolerování ISO 8015
			Promítání
Materiál	Polotovár	Hmotnost 0,21 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016

	Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY	Název ŘEMENICE 42z
	Kreslil POPELKA	
	Schválil	Číslo dokumentu
	Datum vydání 14.03.2008	4-RMAT2C-030 List 1 / 2



List 2/ 2

Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	44



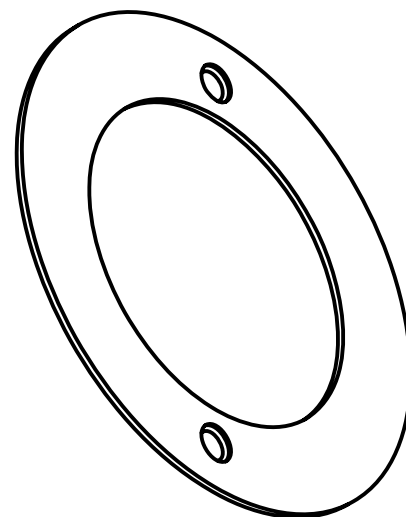
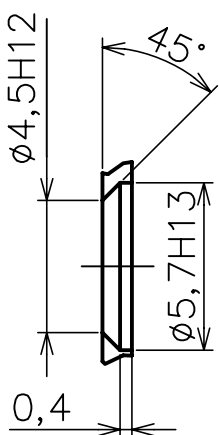
3	ŠROUB M3		0,002	4
	M3x0,5-8 ČSN EN ISO 7046-2			
2	ŠTÍT3	P1-80X80 ČSN 42 5301	0,048	2
	4-RMAT2C-031	S195T		
1	ŘEMENICE 44z	44-5M-15 (TEA.TECHNIKS.r.o)	0,159	1
	4-RMAT2C-032	EN-AW-6061		

Číslo	Název - označení	Polotovár	Hmot.	J	Množ.
polož.	Výkres - norma	Materiál			

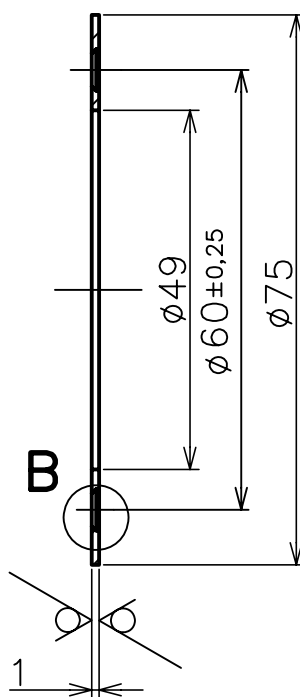
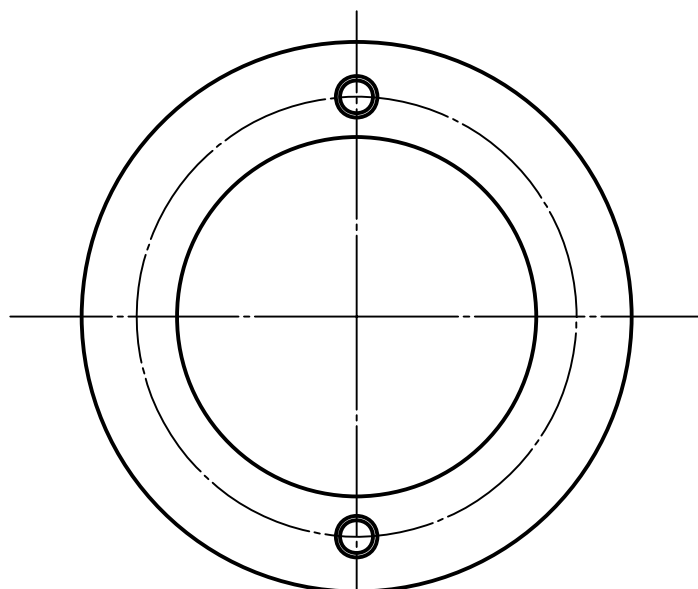
Struktura povrchu:	Hrany:	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mH
			Tolerování ISO 8015
			Promítání
Materiál	Polotovár	Hmotnost 0,166 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016

 ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ	Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY	Název ŘEMENICE 44z
	Kreslil POPELKA	
	Schválil	Číslo dokumentu 4-RMAT2C-040
	Datum vydání 14.03.2008	
		List 1 / 3

B (4:1)



A-A



Struktura povrchu:

$\sqrt{Ra\ 6,3}$ ($\checkmark$)

Hrany:

$\pm 0,4$ $\pm 0,4$

ISO 13715

Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mH

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál S195T

Polotovár P1-80X80 ČSN 42 5301

Hmotnost 0,020 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES

Kreslil POPELKA

Schválil

Datum vydání 14.03.2008

Název

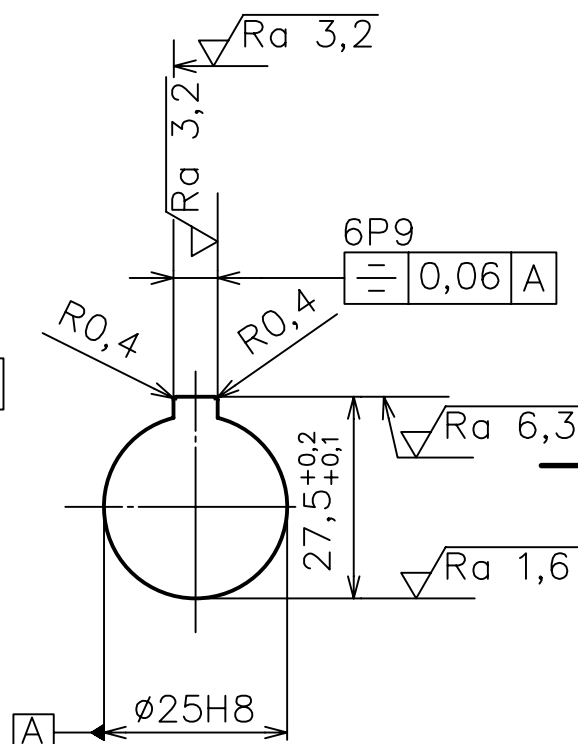
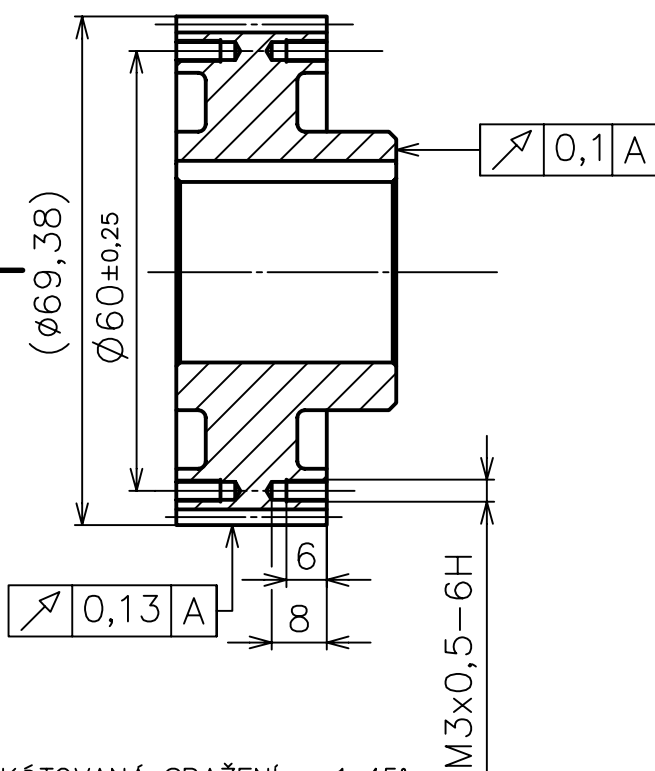
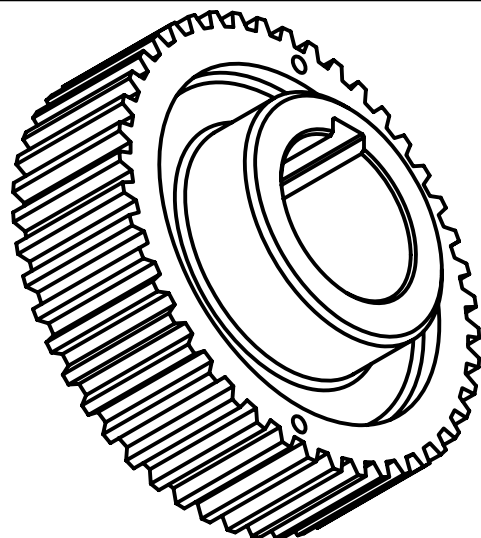
ŠTÍT3

Číslo dokumentu

4-RMAT2C-031

List 2/ 3

Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	44

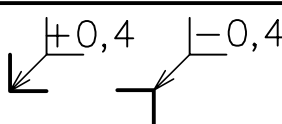


NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ = $1 \times 45^\circ$

Struktura povrchu:



Hrany:



ISO 13715

Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mH

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál EN-AW-6061

Polotovár 44-5M-15 (TEA TECHNIKS.r.o)

Hmotnost 0,159 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES

Kreslil POPELKA

Schválil

Datum vydání 14.03.2008

Název

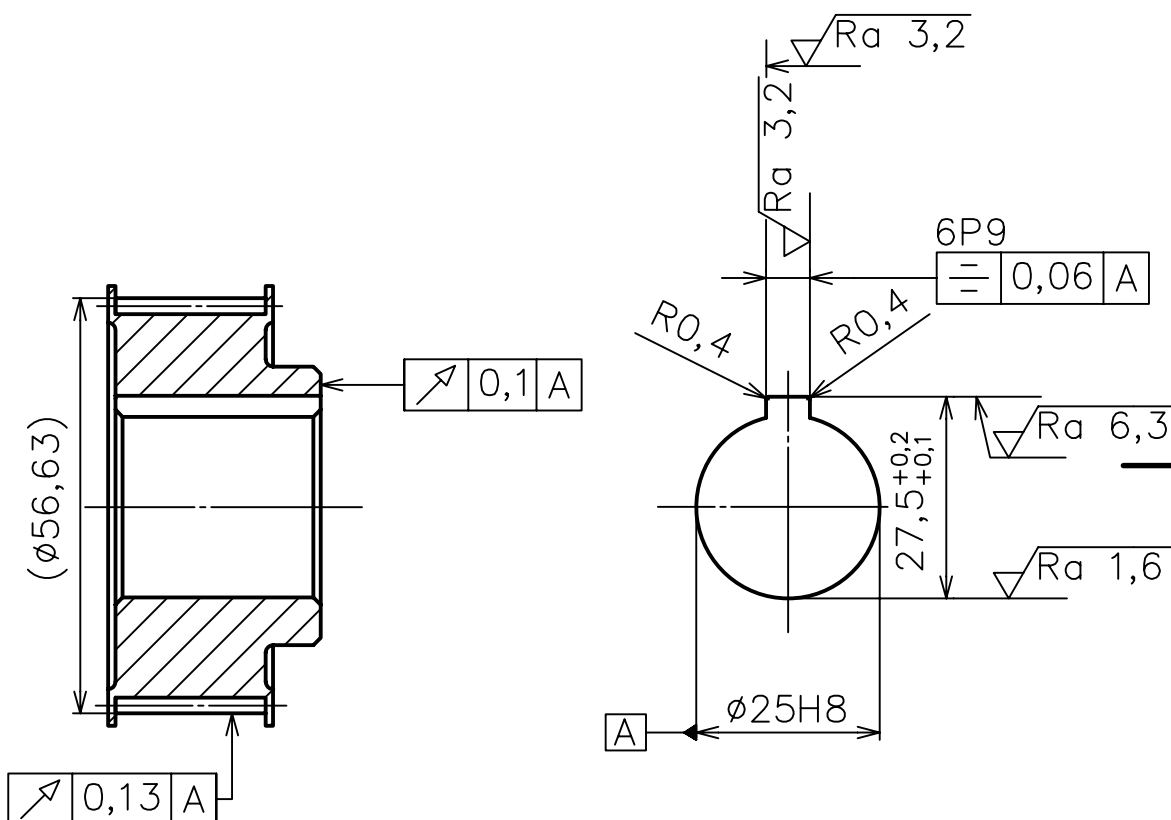
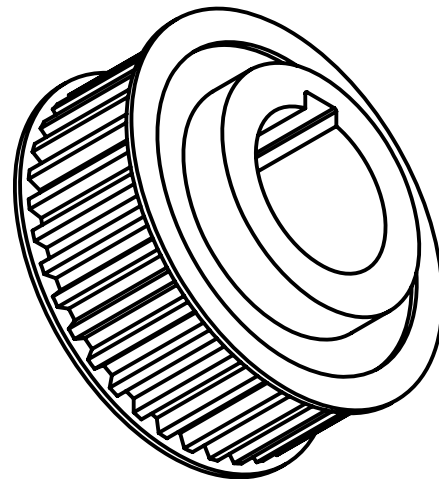
ŘEMENICE 44z

Číslo dokumentu

4-RMAT2C-032

List 3/ 3

Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	36



NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ = 1x45°

Struktura povrchu: 	Hrany: ISO 13715	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mH
			Tolerování ISO 8015
			Promítání

Materiál	C40	Polotovár	36-5M-15 (TEA TECHNIKS.r.o)	Hmotnost	0,343kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
----------	-----	-----------	-----------------------------	----------	---------	--------------------------



ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

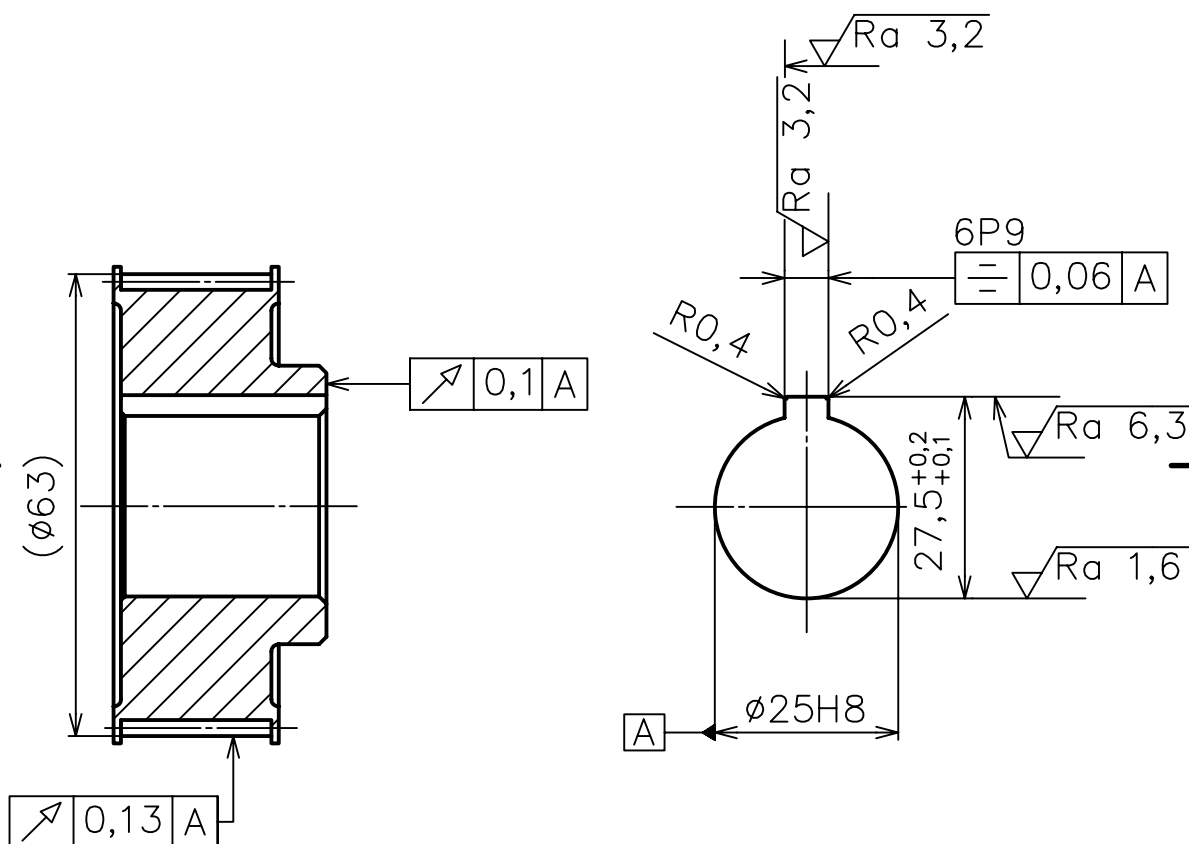
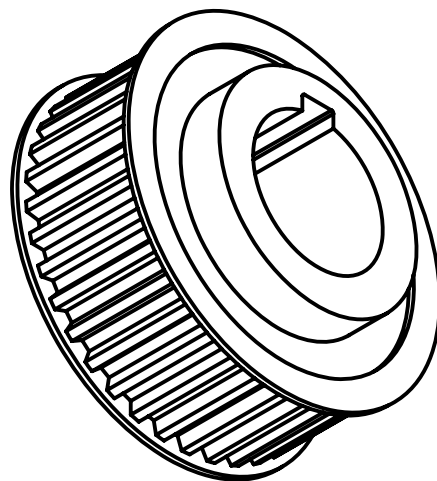
Druh dokumentu	VÝROBNÍ VÝKRES
Kreslil	POPELKA
Schválil	
Datum vydání	14.03.2008

Název
ŘEMENICE 36z

Číslo dokumentu
4-RMAT2C-041

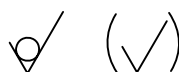
List 1 / 1

Ozubení	5M
Typ	HTD
Zubů	40

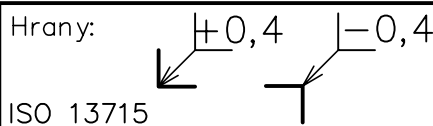


NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ = 1x45°

Struktura povrchu:



Hrany:



ISO 13715

Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mH

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál C40

Polotovár 40-5M-15 (TEA TECHNIKS.R.O)

Hmotnost 0,437kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES

Kreslil POPELKA

Schválil

Datum vydání 14.03.2008

Název

ŘEMENICE 40z

Číslo dokumentu

4-RMAT2C-042

List 1 / 1