



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**HODNOCENÍ MECHANISMŮ OPOTŘEBENÍ
VSTŘIKOVACÍHO ÚSTROJÍ**

ADHEZION WEAR MECHANISMS OF MOVING ENGINE PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Cahová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Studentka: **Kristýna Cahová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijníma zkušebními řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hodnocení mechanismů opotřebení vstřikovacího ústrojí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teoreticky popsat vznik a mechanismy adhezního opotřebení. S využitím dostupných experimentálních dat zhodnotit možné příčiny vzniku opotřebení na konkrétní součásti. Navrhnout a provést vhodné další experimentální postupy pro přesnější určení příčin poškození.

Cíle bakalářské práce:

Seznámit se a prokázat pochopení fyzikálních principů vzniku mechanického opotřebení.
Stanovit souvislosti materiálových vlastností s odolností proti opotřebení.
Provést syntézu dostupných experimentálních dat, na tomto základě navrhnout doplňková měření.
Zhodnotit možné příčiny a jejich podíl na vzniku pozorovaných poškození.

Seznam doporučené literatury:

BURAKOWSKI, T.; WIERZCHON, T. Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies. CRC press, 1998.

DEARNLEY, P. A. Introduction to surface engineering. Cambridge University Press, 2017.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. Engineering tribology. Butterworth-heinemann, 2013.

CALLISTER, W. D., et al. Fundamentals of materials science and engineering. London: Wiley, 2000.

SURYANARAYANA, Ch. Experimental techniques in materials and mechanics. Crc Press, 2011.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá popisem adhezního opotřebení na kontaktní ploše mezi Common railem a komponentou a vlivy, které ovlivňují vznik tohoto opotřebení. Cílem práce je seznámení se a pochopení fyzikálních principů adhezního opotřebení. Teoretická část práce se zabývá popisem vstřikovacího systému Common rail a následně se věnuje rešerši o samotném adhezním opotřebení. V experimentální části je nejprve provedeno shrnutí z dostupných dat z již provedených zkoušek a poté navazuje analýza mikrostruktury materiálů, které přichází během montáže do kontaktu a hrozí tak vznik adhezního opotřebení.

Klíčová slova

Adhezní opotřebení, Common rail, kontaktní plocha, mikrostruktura

Abstract

The thesis describes adhesion wear on a contact area between Common rail and the component and deals with various effects on this kind of wear. The aim of the thesis is to gain information about adhesion wear phenomena and to understand its physical principals. Theoretical part deals with description of Common rail and then it is focused on research of adhesion wear. Experimental part firstly summarizes available data from tests that have been already done and then continues with analysis of microstructure of materials which are in contact during assembling process and the formation of adhesion wear is increased there.

Keywords

Adhesion wear, Common rail, contact area, microstructure

CAHOVÁ, Kristýna. *Hodnocení mechanismů opotřebení vstřikovacího ústrojí* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142323>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Vít Jan.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Hodnocení mechanismů opotřebení vstříkovacího ústrojí vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu doc. Ing. Vítu Janovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a trpělivost při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala vývojovému oddělení společnosti Bosch Diesel s.r.o. zvláště pak Ing. Jaroslavu Pavlíčkovi a Ing. Ivu Dohnalovi, Ph.D., ale i dalším pracovníkům firmy za jejich rady a podněty. Poděkování patří i rodičům za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod.....	10
1 Teoretická část.....	11
1.1 Vznětový motor	11
1.2 Vstřikovací systém	11
1.3 Common rail	12
1.4 Vysokotlaká část.....	13
1.4.1 Vysokotlaké čerpadlo	13
1.4.2 Rail (vysokotlaký zásobník).....	13
1.4.3 Další komponenty Common railu	14
1.4.4 Základní funkce a požadavky kladené na vysokotlaký zásobník.....	16
1.5 Adhezní opotřebení.....	18
1.5.1 Mechanismus adheze.....	19
1.5.2 Vliv dvojice materiálů.....	19
1.5.3 Vliv tepelného režimu	20
1.5.4 Adhezní teorie tření	21
2 Experimentální část.....	23
2.1 Popis problému	23
2.2 Analýza provedených zkoušek	23
2.2.1 Povlakování a maziva.....	23
2.2.2 Rychlost utahování.....	24
2.2.3 Axiální síla a velikost komponenty	26
2.2.4 Tvrdost	28
2.2.5 Typ materiálu	29
2.3 Analýza struktury materiálů	30
2.3.1 Příprava vzorků	30
2.3.2 Adhezní opotřebení na součástkách	31
2.4 Výsledky experimentu	33
2.4.1 Materiál č. 1.....	33
2.4.2 Materiál č. 2.....	35
2.4.3 Materiál č. 3.....	37
2.4.4 Materiál č. 4.....	39
3 Zhodnocení výsledků	42

3.1	Diskuse analýzy provedených zkoušek	42
3.2	Diskuse analýzy struktury materiálů	42
4	Závěr.....	45
5	Použité informační zdroje	46
6	Seznam použitých zkratek.....	47

Úvod

I když v dnešní době začínají být vznětové motory v osobních automobilech vytlačovány nově se vyvíjejícími typy motorů, mají stále velké využití a jejich správná funkce je velmi důležitá. Pro správný chod vznětového motoru je mimo jiné klíčový jeho vstříkovací systém. Vstříkovací systém Common rail se vyznačuje přítomností vysokotlakého zásobníku, kde jednou z jeho hlavních funkcí je dostatečné těsnění vůči úniku nafty. Únik hořlavé kapaliny do motorového prostoru by z důvodu lokálních vysokých teplot mohl vést k dýmení nebo k rozvoji hoření s potenciálními následky na zdraví a majetek posádky vozidla, případně dalších účastníků silničního provozu.

Jedním z důvodů, proč by mohlo dojít ke špatnému těsnění je vznik adhezního opotřebení na těsnících plochách mezi vysokotlakým zásobníkem a komponentami. Proto se tato bakalářská práce zabývá analýzou různých podmínek ovlivňujících tvorbu adhezního opotřebení a následně se věnuje zkoumání mikrostruktury materiálů, ze kterých se vyrábí vysokotlaký zásobník a komponenty. Cílem práce potom je na základě provedené rešerše a dat získaných během experimentu stanovit souvislosti mezi materiálovými vlastnostmi a adhezním opotřebením, určit možné příčiny vzniku opotřebení a případně navrhnout doplňková měření, která by dále pomohla v řešení této problematiky.

1 Teoretická část

Teoretická část bakalářské práce se zabývá zavedením základních pojmů, které jsou potřeba pro úvod do problematiky a k jejímu pochopení. Nejprve je proto obecně popsáno konstrukční řešení Common railu a jeho komponent, kde materiály těchto součástí jsou analyzovány v experimentální části. Během testování vhodných dvojic materiálů rail-komponent ve firmě Bosch docházelo k pozorování poklesu těsnosti railu v důsledku vzniku adhezního opotřebení. Proto je část teorie věnovaná vysvětlení mechanismu adhezního opotřebení a faktorům, které jeho vznik ovlivňují.

1.1 Vznětový motor

Vznětový motor se řadí mezi spalovací motory, tudíž se vyznačuje přeměnou chemické energie na energii tepelnou a mechanickou. Získaná energie se používá na pohon jiných strojů. U vznětových motorů dochází pomocí pístu ke stlačování vzduchu ve válci na vysoký tlak a teplotu. Následně je do válce vstříknuto malé množství paliva, které se díky vysoké teplotě stlačeného vzduchu samo vznítí. Vznícením paliva a následnou expanzí dochází k uvolnění energie, která je v palivu uložena. [1]

Vstřík paliva do válce může probíhat více způsoby, přičemž se rozlišují dva základní typy, a to systém čerpadlo-tryska a systém Common rail. [1] V dnešní době je využívanější systém Common rail, jehož hlavní výhodou je variabilita vytváření vstřikovacího tlaku a časového okamžiku vstříku. Variabilitu zajišťuje oddělení vysokotlaké části railu od vstřikování. Díky více možnostem v oblasti vstřikování (především se využívá vstříku více malých a přesnějších dávek paliva) se dá dosáhnout vyššího měrného výkonu, snížení spotřeby paliva a rovněž snížení hluchnosti a emisí škodlivých látek. [2]

1.2 Vstřikovací systém

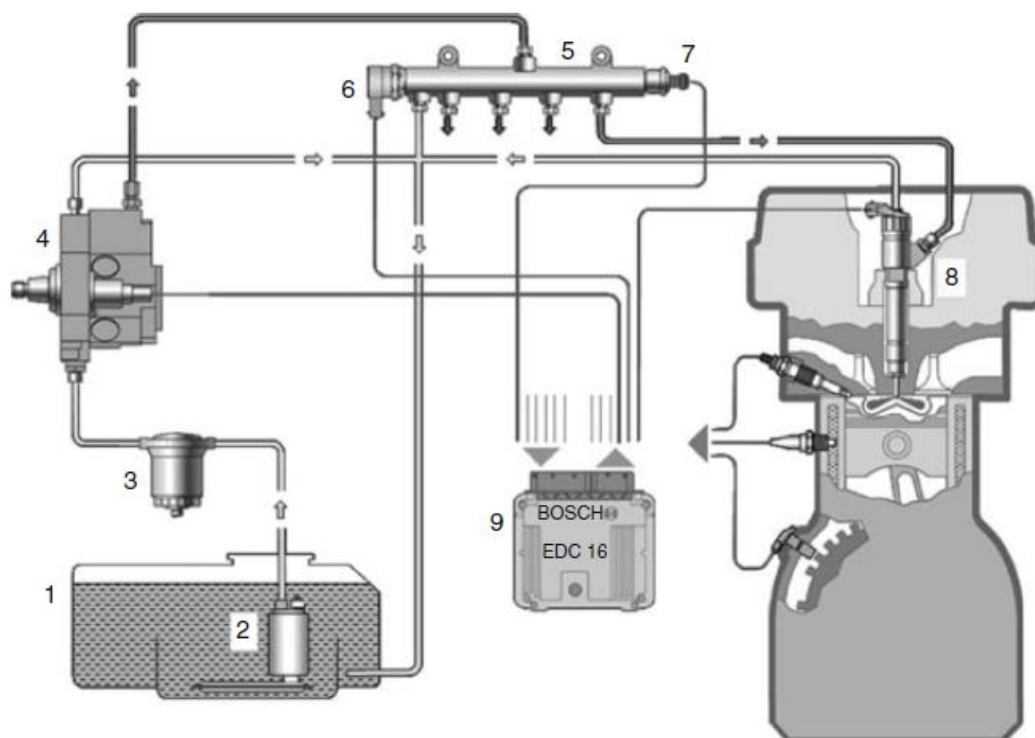
Obecně se vstřikovací systém vznětového motoru dá rozdělit na dvě hlavní části. První z nich je nízkotlaká část, která zajišťuje zásobování palivem a jeho odvod zpět do nádrže. Dochází zde k filtraci paliva a následnému nepřetržitému dodávání paliva pod určitým tlakem do další části systému, kterou je vysokotlaká část. Nízkotlaká část se skládá z palivové nádrže, která slouží k uchování paliva, palivového filtru, resp. předřadného palivového filtru, který zachycuje nečistoty v palivu, a palivového podávacího čerpadla, jež zajišťuje dopravu paliva přes potrubí do vysokotlakého čerpadla. Sběrné potrubí odvádějící přebytečné palivo od vstřikovačů a dalších komponent zpět do nádrže spadá také do nízkotlakého okruhu. Dalšími možnými komponentami mohou být chladič paliva, chladič řídicí jednotky či podávací čerpadlo. [3]

Po nízkotlaké části navazuje vysokotlaká část, kde je palivo stlačeno na vysoký tlak a pomocí vysokotlakého vedení dodáváno do dalších částí vstřikovacího systému. Součástí vysokotlaké části je vysokotlaké čerpadlo, vstřikovače a v závislosti na typu systému je přítomný zásobník. Pro řízení průtoku paliva a jeho tlaku jsou v systému umístěny různé typy ventilů. Hlavní funkcí vstřikovacího systému je správné dávkování paliva do spalovací komory v závislosti na otáčkách motoru. [2]

1.3 Common rail

Vstřikovací systém Common rail se vyznačuje přítomností vysokotlakého zásobníku, který se nachází ve vysokotlaké části systému, a schopností řídit a regulovat tlak v systému elektronicky – přes akční členy (např. vstřikovací ventily), snímač tlaku a řídicí jednotku. Kombinace těchto komponent dává možnost akumulovat tlak ve vysokotlakém zásobníku nezávisle na otáčkách motoru, což umožňuje vstřikování právě takového množství paliva, které je potřeba v jakýkoliv čas dle momentálních potřeb motoru s ohledem na jeho otáčky, zatížení apod. [2] Pro systém Common rail je také typické, že do každého válce vede jeden vstřikovač a vysokotlaká vedení spojující zásobník a válce jsou stejně dlouhá, aby během vedení paliva do válců nedocházelo v potrubích k rozdílným ztrátám tlaku, a tudíž rozdílným v průtoku.

Hlavními částmi systému Common rail jsou tedy vysokotlaké čerpadlo, vysokotlaký zásobník – rail, elektricky ovládané vstřikovače, podpůrné komponenty řízení a v neposlední řadě vysokotlaká palivová vedení. Dochází zde k vytváření potřebného tlaku, k jeho udržování na požadované hodnotě a k řízení množství paliva přes vstřikovací čas. [2] Obr. 1 zobrazuje schéma systému Common rail včetně nízkotlaké části, která se v případě systému Common rail neliší od obecné definice nízkotlaké části vstřikovacích systémů. Podrobnějšímu popisu jednotlivých částí Common railu je věnována samostatná podkapitola.



Obr. 1 Schéma vstřikovacího systému Common rail [3]

1 – palivová nádrž, 2 – předřadný filtr, 3- palivový filtr, 4 – vysokotlaké čerpadlo, 5 – rail, 6 – regulační tlakový ventil, 7 – snímač tlaku, 8 – vstřikovač, 9 – řídicí jednotka

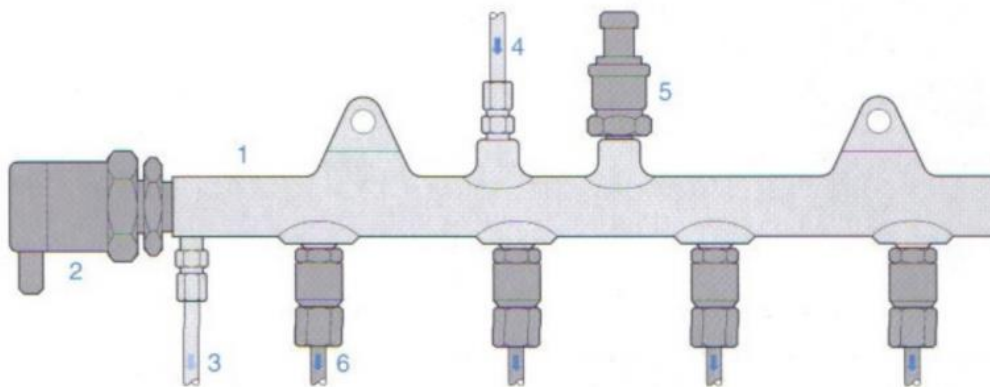
1.4 Vysokotlaká část

1.4.1 Vysokotlaké čerpadlo

První důležitou komponentou systému Common Rail je vysokotlaké čerpadlo, které je řízeno elektronicky. Čerpadlo tvoří přechod mezi nízkotlakou a vysokotlakou částí systému a má za úkol stlačování paliva na potřebný tlak. Dále pak musí dodávat dostatek stlačeného paliva do zásobníku. Navíc čerpadlo obsahuje rezervu paliva, která se využívá pro rychlejší nastartování a rychlý nárůst tlaku v zásobníku. [2]

1.4.2 Rail (vysokotlaký zásobník)

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, do railu přichází z vysokotlakého čerpadla palivo. Uvnitř railu pak dochází k hromadění tohoto paliva pod vysokým tlakem. Kromě akumulace paliva je však jednou z hlavních funkcí také udržování hodnoty potřebného tlaku uvnitř railu bez nežádoucích oscilací, a to i při různých otáčkách vysokotlakého čerpadla nebo při různých dávkách vstříkovaného paliva. Rail (*Obr. 2*) má podélný tvar a jeho konstrukce se může lišit v závislosti na konkrétních montážních podmínkách a systémových požadavcích. Stlačené palivo je z railu odváděno pomocí vysokotlakého potrubí do vstříkovačů. [2][3]



Obr. 2 Vysokotlaký zásobník (rail) [2]

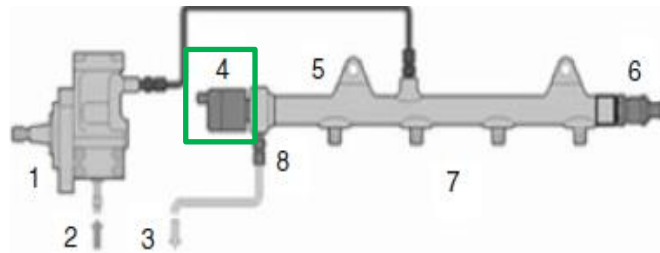
1 – vysokotlaký zásobník, 2 – regulační tlakový ventil, 3 – zpětné vedení od zásobníku k palivové nádrži, 4 – přívod od vysokotlakého čerpadla, 5 – snímač tlaku, 6 – vedení ke vstříkovači

Velmi důležité je, aby všechny vstupy a výstupy railu byly dostatečně utěsněny vůči vysokému tlaku, aby nedocházelo k externí netěsnosti a samovolnému snižování tlaku uvnitř zásobníku. Tlak v systému se pohybuje v rozmezí 350 barů při volnoběhu až 2700 barů pro nejvíce zatížené produkty. [2]

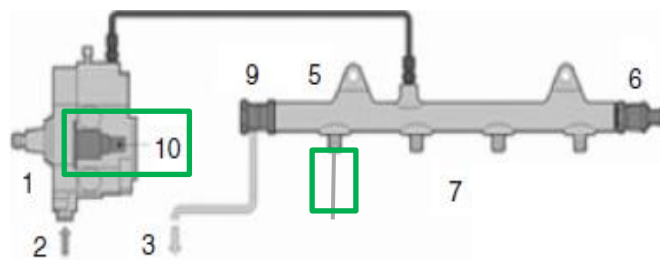
1.4.3 Další komponenty Common railu

Tlak uvnitř systému může být regulován více způsoby a na základě zvoleného způsobu se volí vhodné komponenty přispívající k udržování tlaku a dostatečnému těsnění vůči úniku paliva. Příklady některých způsobů regulace systému Common railu zobrazuje Obr. 3. [3]

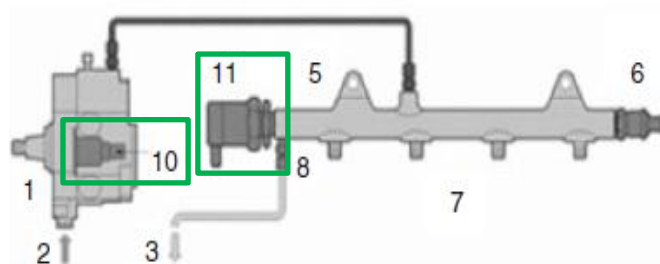
a – Regulace tlaku na straně vysokého tlaku s regulačním tlakovým ventilem



b – Regulace tlaku na sací straně s dávkovací jednotkou uchycenou pomocí příruby vysokotlakého čerpadla a další regulací na straně vstřikovačů



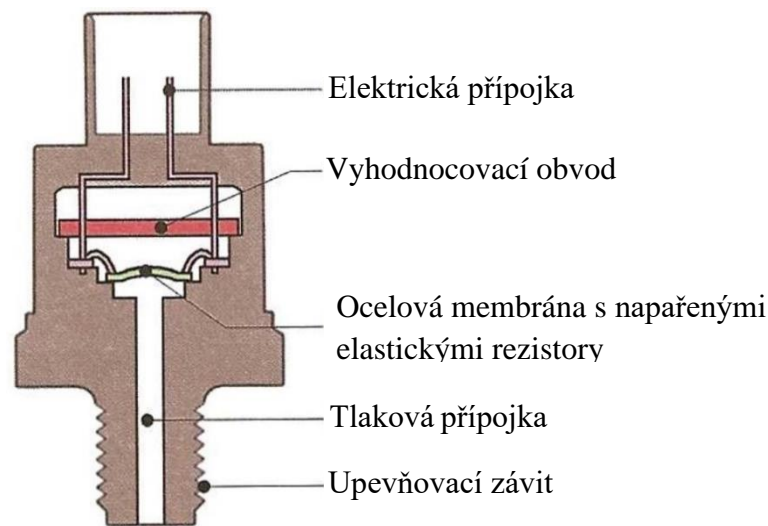
c – Regulace tlaku na sací straně s dávkovací jednotkou a přidavnou regulací pomocí regulačního tlakového ventilu



Obr. 3 Příklady vysokotlaké regulace systémů Common rail [2][3]

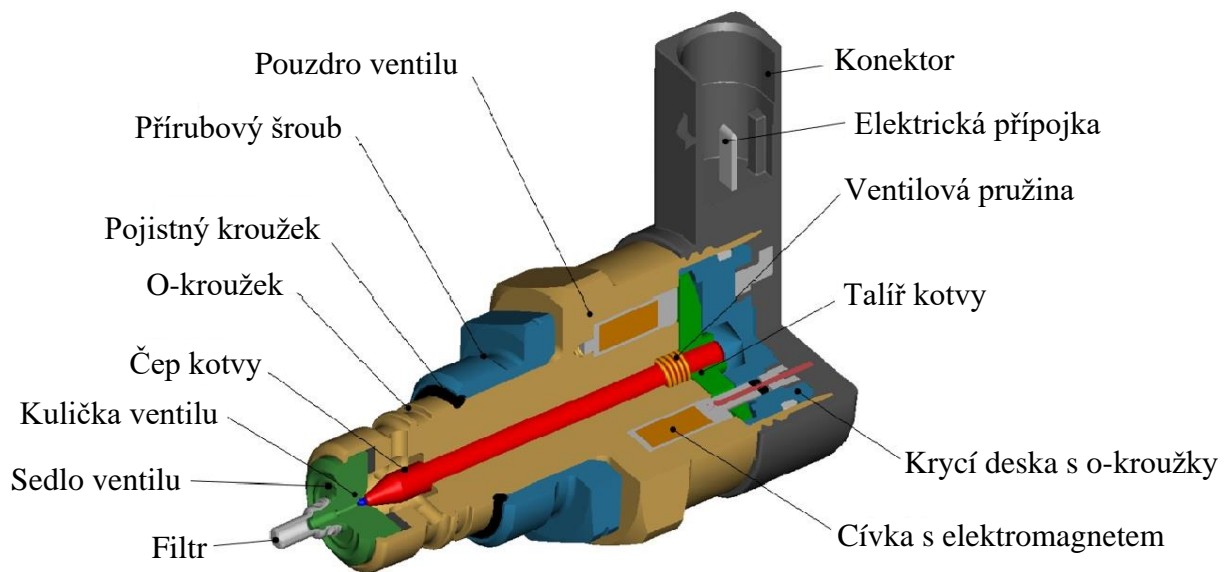
1- vysokotlaké čerpadlo, 2 – přívod paliva, 3 – zpětné palivové potrubí, 4 – regulační tlakový ventil, 5 – rail, 6 – snímač tlaku, 7 – přípojky ke vstřikovačům, 8 – přípojka zpětného palivového potrubí, 9 – omezovací tlakový ventil, 10 – dávkovací jednotka, 11 – regulační tlakový ventil

Jak je patrné z *Obr. 3* jedna strana railu je vždy utěsněna snímačem tlaku – RPS (Rail pressure sensor) (*Obr. 4*), jehož úkolem, mimo dostatečné těsnění railu, je měření okamžitého tlaku uvnitř zásobníku a předání této informace řídicí jednotce. Na opačné straně railu se použitá komponenta může lišit v závislosti na konkrétním způsobu regulace. Pokud regulace probíhá stejným způsobem jako zobrazuje případ *a* nebo *c*, využívá se komponenty zvané regulační tlakový ventil. V případě *b* se používá tzv. omezovací tlakový ventil s dodatečnou regulací na vstřikovačích. [3]



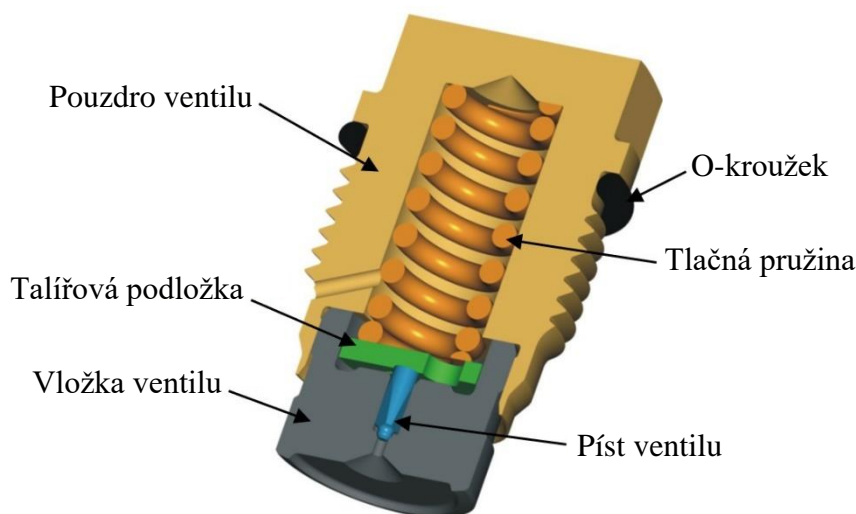
Obr. 4 Snímač tlaku paliva (RPS) [2] [4]

Regulační tlakový ventil – PCV (Pressure control valve) (*Obr. 5*) reguluje tlak v railu – pokud je potřeba tlak snížit, ventil se otevře a pokud je potřeba tlak zvýšit, ventil se uzavře. [2] [3]



Obr. 5 Regulační tlakový ventil (PCV) [5]

Oproti tomu omezovací tlakový ventil – PLV (Pressure limiting valve) (*Obr. 6*) v normálním provozu pouze limituje maximální hodnotu tlaku v zásobníku, aby nedošlo k překročení její hodnoty, která je určena tuhostí pružiny uložené v PLV komponentě a nastavením ventilu. Jedná se o nežádoucí stav systému, kdy vlivem poruchy a s tím spojeným navýšením tlaku, dojde k otevření ventilu a průtoku přebytečného paliva ze zásobníku zpět přes nízkotlaké vedení do nádrže. Jedná se tedy o pojišťovací ventil v případě poškození systému, kdy tlak dosáhne nepřiměřených hodnot. PLV není schopné zvyšovat tlak v railu. [2] V případě otevření ventilu však přebírá tato komponenta regulaci systému, kdy snižuje hodnotu tlaku asi na 2/3 tak, aby vozidlo mohlo bezpečně dojet do servisu k potřebné opravě a nemuselo tak dojít k okamžitému odstavení systému a následnému odtažení vozidla.



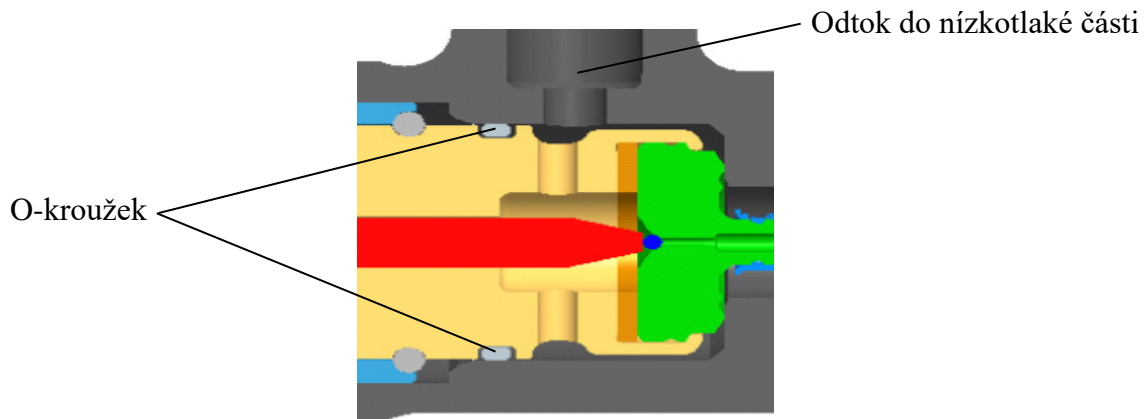
Obr. 6 Omezovací tlakový ventil (PLV) [5]

Poslední možnou komponentou, která může být použita pro utěsnění zásobníku je tzv. zátka. Zátka má pouze těsnicí funkci a používá se v případech, kdy je tlak v systému regulován vysokotlakým čerpadlem a injektory. Další použití zátky může být např. u vidlicových motorů, jako utěsnění technologické díry u railů, které neobsahují regulační členy.

Pro správnou funkci Common railu je velmi důležité, aby všechny zmíněné komponenty dobře těsnily a nedocházelo přes ně ke ztrátám tlaku.

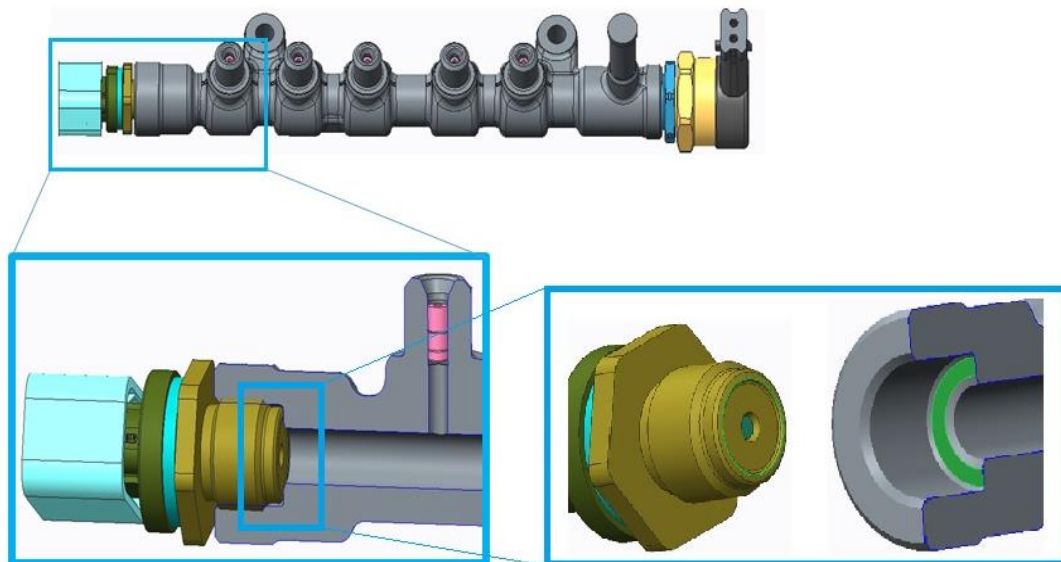
1.4.4 Základní funkce a požadavky kladené na vysokotlaký zásobník

Hlavními funkcemi railu jsou akumulace paliva pod potřebným tlakem, tlumení tlakových vln vyvolaných čerpadlem nebo vstřikovači a schopnost rozvádět palivo do dalších částí systému. S tím potom souvisí správné spojení railu s vysokotlakým vedením a zajištění dostatečného těsnění všech otvorů railu jak pro vysoký, tak pro nízký tlak. Těsnění nízkotlakého okruhu je potřebné především u regulačního a omezovacího ventilu, přes které palivo může odcházet do nízkotlaké části systému při regulaci tlaku. Toto těsnění zajišťuje o-kroužek znázorněný na *Obr. 7*. [5][4]



Obr. 7 Těsnění nízkotlaké části pomocí o-kroužku na PCV [5]

Vysokotlaké těsnění je důležité u všech komponent zmíněných v předešlé podkapitole. K tomuto těsnění se využívá konstrukčního prvku – tzv. zákusné hrany, která se nachází na kontaktní ploše komponenty s railem (*Obr. 8*). Těsnění probíhá na principu vytvoření kontaktního tlaku mezi plochami railu a komponenty. Při zašroubování komponenty dojde k penetraci zákusné hrany do railu (plastická deformace kontaktní plochy railu). Ke správné funkci tohoto typu těsnění je tedy potřeba, aby materiál, ze kterého je rail vyroben byl měkčí než materiál použité komponenty. Důležitá je rovněž vysoká přesnost výroby, aby na sebe plochy komponent a railu správně dosedly. [5]



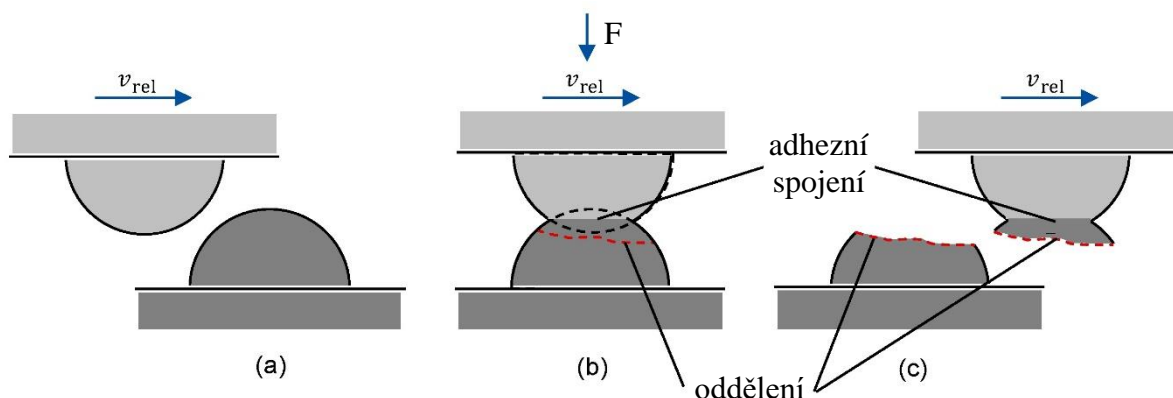
Obr. 8 Těsnění railu pomocí zákusné hrany [5]

Materiál railu musí rovněž odolávat náročným provozním podmínkám. Je totiž vystaven velkému rozmezí teplot a tlaků, různým enviromentálním vlivům (např. slané prostředí, vlhkost) a musí snášet vibrace pocházející od pohybu motoru a tlakových rázů, které jsou přenášeny vysokotlakým potrubím. [5]

Vnikáním zákusné hrany do railu může dojít ke spojení materiálu komponenty a railu. Následným utažením spoje se v této oblasti mohou objevit dutiny a dojde tak k poškození celistvosti spoje, lokálnímu snížení kontaktního tlaku a k externí netěsnosti přes vzniklé dutiny. Jedná se o projev adhezního opotřebení, které je nežádoucí a narušuje správnou funkci systému. Při vybírání vhodných materiálů pro vysokotlaký zásobník a jednotlivé komponenty je proto důležité brát v úvahu i jejich náchylnost k tvorbě adhezního opotřebení případně je ošetřit tak, aby k tomuto fenoménu nemohlo dojít.

1.5 Adhezní opotřebení

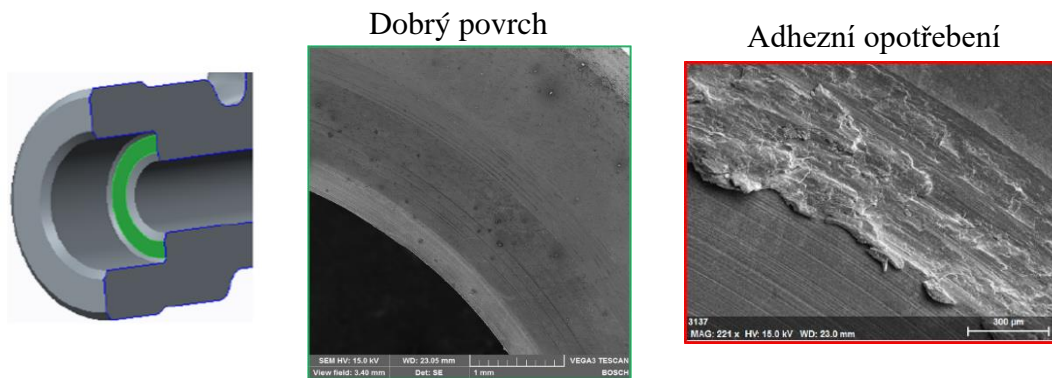
K adheznímu opotřebení dochází při kontaktu dvou povrchů materiálů, které jsou k sobě přitlačovány vnějším zatížením. Povrch materiálů obsahuje nerovnosti – výčnělky o různých velikostech. Tyto výčnělky přijdou do kontaktu jako první a nesou celé zatížení působící na přibližující se tělesa. Protože plocha výčnělků je velmi malá, zatížení, které nesou je reálně velmi vysoké a dojde k elastické a později i plastické deformaci. Vlivem působení zatížení na takto malých oblastech a následné plastické deformaci, dojde k vytvoření adhezních spojů mezi přitlačovanými materiály. Pokud se jeden z takto spojených povrchů vůči druhému posune dochází k oddělení materiálu, jak je zobrazeno na Obr. 9 a vzniklé opotřebení je označováno právě jako adhezní. [6]



Obr. 9 Oddělení materiálu při adhezním opotřebení [9]

a) před vytvořením adhezních spojů, b) vytvoření adhezních spojů, c) oddělení materiálu

Porovnání povrchu bez adhezního opotřebení a s adhezním opotřebením přímo na kontaktní ploše vysokotlakého zásobníku s komponentou zobrazuje Obr. 10.



Obr. 10 Adhezní opotřebení na vysokotlakém zásobníku [5]

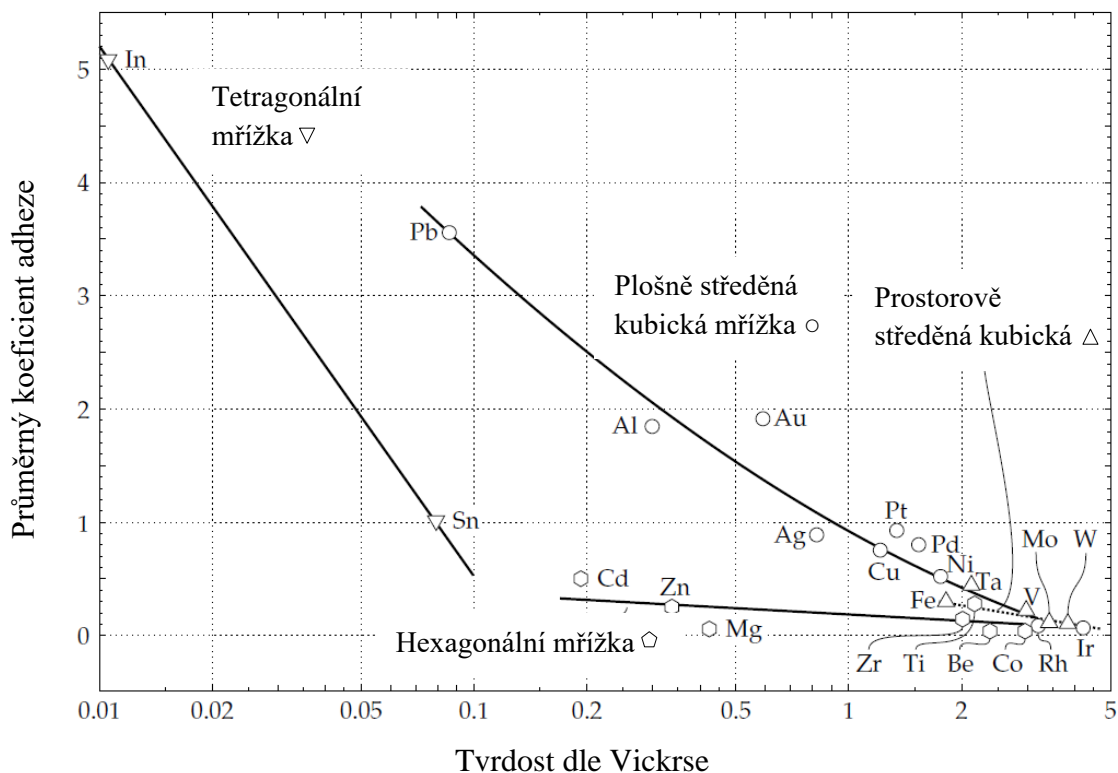
Samotná intenzita adhezního spojení je ovlivněna více faktory, přičemž hlavními jsou dvojice účastnících se materiálů a čistota jejich povrchů.

1.5.1 Mechanismus adheze

Mechanismus adheze se u kovů dá popsat pomocí pohybu volných elektronů. Za předpokladu, že vzdálenost mezi povrchy dvou kovových materiálů je dostatečně malá (menší než 1 nm) dochází mezi povrchy kovů k přemísťování volných elektronů. Díky přemísťování elektronů tak může dojít ke spojení dvou materiálů, které mají rozdílnou atomovou strukturu, přičemž elektrony poskytuje kov s větší elektronovou hustotou. [7]

1.5.2 Vliv dvojice materiálů

Vznik silného adhezního spojení ovlivňuje sklon dvojice materiálů tvořit spolu tuhé roztoky, což znamená, že jsou účastníci se materiály rozpustné (nebo alespoň částečně rozpustné) i v tuhém stavu. Dvojice materiálů tvořící tuhé roztoky mají větší sklon ke vzniku adhezního opotřebení oproti dvojicím materiálů, které jsou vzájemně nerozpustné. U nerozpustných dvojic totiž neprobíhá tak snadno difuze v oblasti adhezních spojů a jednotlivé atomy tak hůře přechází z jednoho materiálu do druhého. Adheznímu opotřebení také snáz podlehnou prvky, které vykazují větší chemickou reaktivitu. Co se samotné krystalové struktury týče, bylo zjištěno, že podstatně více podléhají adheznímu opotřebení materiály s plošně středěnou kubickou mřížkou (FCC – face-centred cubic) a s prostorově středěnou kubickou mřížkou (BCC – body-centred cubic) oproti materiálům s hexagonální mřížkou (HCP – hexagonal close packed). [6][7] Náchylnost některých prvků s různými krystalickými mřížkami k tvorbě adhezního opotřebení je zobrazena na Obr. 11.



Obr. 11 Graf zobrazující náchylnost některých prvků k tvorbě adhezního opotřebení s ohledem na jejich krystalickou mřížku a tvrdost [7]

Významný vliv má také tvrdost materiálů a mez kluzu, přičemž s rostoucí tvrdostí klesá velikost adhezního opotřebení. Pokud ovšem během opotřebení dochází současně i ke strukturním změnám na povrchu materiálů, tvrdost nehraje tak významnou roli. [6]

Velikost adhezního spojení mezi materiály se dá určit pomocí experimentů měřících velikost adhezní síly, která je potřeba k porušení adhezního spojení. Čím větší adhezní síla je potřeba k oddělení materiálů, tím silnější adhezní spojení tato dvojice materiálů tvoří. Během experimentu měřícího velikost adhezní síly různých kovů vůči železu prováděného mezi čistými povrchy materiálů a ve vakuu bylo zjištěno, že největší adhezní síla čili nejsilnější adhezní spojení, a tudíž i adhezní opotřebení, se objevuje mezi materiály, které si jsou podobné (podobné vlastnosti, krystalická mřížka apod.) nebo jsou dokonce stejné (železo a železo). [7]

1.5.3 Vliv tepelného režimu

Při kontaktu stykových ploch, jejich plastické deformaci a relativnímu pohybu je povrch materiálů tepelně ovlivněn. Teplota se může přiblížit až teplotě tání kovů s nízkou teplotou tání. Vyšší teplota usnadňuje difuzi, ke které může dojít na povrchu součástí. Vzrůstá také reaktivita povrchů a dochází k chemickým reakcím povrchů s okolním prostředím či mazivem. Vzniklé sloučeniny mohou mít pozitivní efekt a zabraňovat tvorbě adhezního opotřebení. Příkladem příznivě působící sloučeniny je vznik oxidického povlaku $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, který působí jako ochranná vrstva nebo mazivo. Pozitivní vliv na minimalizaci adhezního opotřebení má také přítomnost síry, která působí příznivě zejména při vysokých teplotách. Avšak některé sloučeniny mají opačný efekt a opotřebení můžou zhoršit nebo dokonce změnit jeho charakter. Mezi tyto

sloučeniny patří zejména tvrdé oxidy kovů, které se mohou chovat jako abrazivní částice a zapříčinit tak změnu opotřebení z adhezního na abrazivní. [6]

S vysokou teplotou může dojít rovněž ke změně některých mechanických vlastností povrchových vrstev materiálů – především tvrdosti a modulu pružnosti, přičemž změnami těchto parametrů dojde ke změně velikosti kontaktní plochy mezi materiály. Tento faktor pak může výrazně ovlivnit odolnost materiálu vůči adheznímu opotřebení. Pokud dojde ke kombinaci rychlého zvýšení teploty a následného ochlazení můžou na povrchu nastat i strukturní změny. U ocelí většinou dojde k tvorbě martenzitu, případně k nitridaci vzdušným dusíkem. Pokud jsou povrchy materiálů v kontaktu s mazivem může reakcí maziva s povrchem materiálu vzniknout fáze bohatá na karbidy železa. Protože všechny zmíněné strukturní změny znamenají zvýšení tvrdosti povrchů materiálů, zvyšují tak i odolnost vůči adheznímu opotřebení. [6]

1.5.4 Adhezní teorie tření

Jinak označována také jako Bowden – Taborova teorie adhezního tření. Popisuje tření, resp. součinitel tření, při kontaktu dvou kovových povrchů. Bowden – Taborova teorie vychází z toho, že tření závisí na skutečné stykové ploše, tzn. na kontaktu jednotlivých výčnělků povrchů přicházejících do kontaktu.

První předpoklad, ze kterého vycházel je, že při kontaktu dvou povrchů průměrný tlak plastické deformace měkčího materiálu lze vyjádřit jako tvrdost určenou vnikáním zkušebního tělíska do povrchu měřeného vzorku. Pro skutečnou stykovou plochu S_r potom platí vztah vyjádřený rovnicí (1). Kde F_n představuje normálovou sílu a p_m průměrný stykový tlak vycházející právě z tvrdosti vnikajícího tělíska. [6]

$$S_r = \frac{F_n}{p_m} \quad (1)$$

Druhá použitá rovnice (2) vychází z obecného vyjádření, že třecí síla F_t je rovna součtu smykové síly F_s a rycí síly F_R . Ovšem rycí síla se uplatňuje především u abrazivního opotřebení a u adhezního ji lze zanedbat. Proto pro třecí sílu platí následující vztah, kde τ_p je průměrné smykové napětí, které je u ocelí rovno přibližně polovině meze kluzu R_e . [6]

$$F_t = F_s + F_R \approx F_s = \tau_p \cdot S_r \quad (2)$$

Pro ideálně plastické těleso platí, že průměrný stykový tlak p_m je rovný přibližně trojnásobku meze kluzu R_e . Pokud budeme uvažovat kontakt ocele na ocel, pak získáme vztah pro adhezní součinitel tření (3). Výsledná hodnota přibližně odpovídá součiniteli tření pro ocel na ocel. [6]

$$f_a = \frac{F_t}{F_n} = \frac{S_r \cdot 0,5R_e}{S_r \cdot 3R_e} = \frac{1}{6} \quad (3)$$

Z odvozených vztahů plyne, že velikost tření lze ovlivňovat nejen volbou materiálových dvojic o různé tvrdosti, různých krystalických mřížkách apod., ale důležitou roli hraje rovněž velikost meze kluzu R_e . [6][8]

2 Experimentální část

2.1 Popis problému

Kvůli požadavku jednoho ze zákazníků na vysokotlaký zásobník náchylný k adheznímu opotřebením došlo ke zkoumání možných řešení, jak tomuto problému s adhezním opotřebením předejít. Technologie předcházející nanesení ZnNi vrstvy, která se používá v kombinaci s tímto zásobníkem, totiž snižuje únavové vlastnosti railu a při jejím odstranění dochází u komponenty RPS a railu k tvorbě adhezního opotřebením a problému s těsností. V rámci řešení tohoto problému se firma Bosch zabývala různými faktory ovlivňujícími proces adhezního opotřebením. První polovina experimentální části se proto věnuje analýze dostupných dat z provedených testů a druhá polovina zkoumá již konkrétně vliv mikrostruktury na adhezní opotřebením.

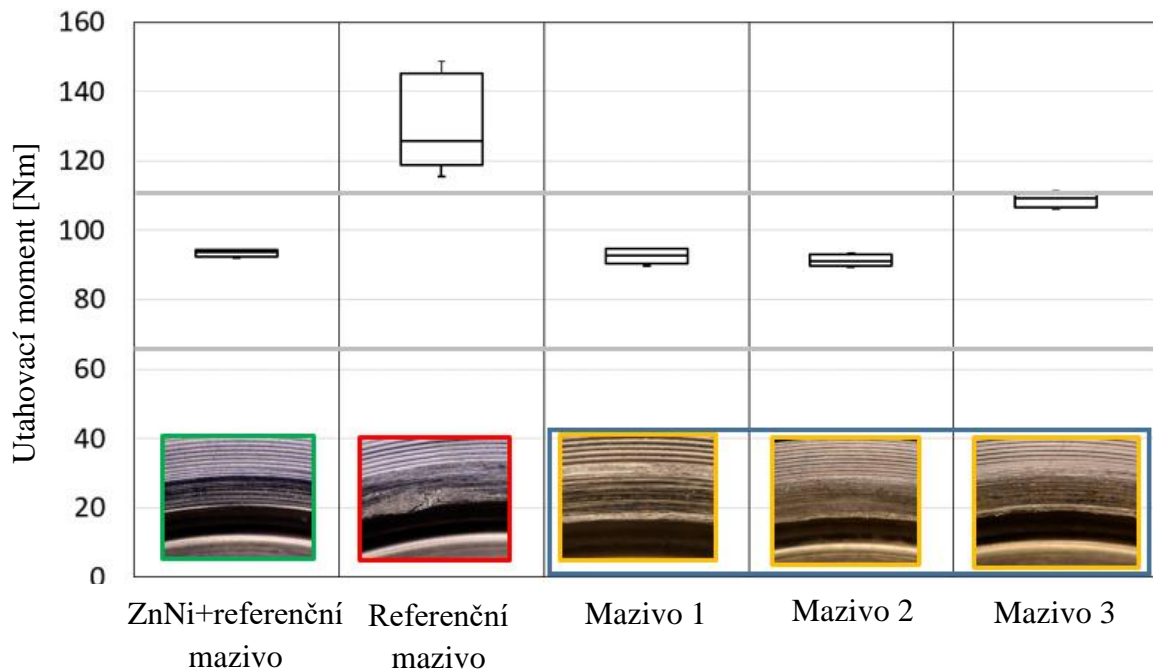
2.2 Analýza provedených zkoušek

U všech zkoušek byla použita kombinace materiálů standardní RPS a standardní rail HFR. V některých případech se testovaly i jiné druhy materiálů, pokud tomu tak bylo, budou jednotlivé materiály uvedeny v popisu zkoušky v konkrétní kapitole. Všechny výsledky se porovnávaly s dvojicí materiálů standardní RPS a standardní rail HFR s povlakem ZnNi a referenčním mazivem, kde se adhezní opotřebením neobjevuje.

Hlavním kritériem těchto testů byla zvolena změna utahovacího momentu jako kontrolního parametru při utažení na úhel, protože právě tento parametr v sobě ukrývá informaci o změně poměrů tření a spojení mezi komponentami. Změna je pak tvořena právě vznikem adhezní vazby, protože referenční řešení (tzn. rail s povlakem ZnNi a referenčním mazivem) adhezní vazbu netvoří. Čím větší rozdíl kontrolního momentu se objevil oproti standardnímu řešení, tím silnější adhezní spojení se usuzuje. Navíc pro každou zkoušku proběhlo porovnání s pozorováním kvality dosedacích ploch po utažení. Například u testů různých lubrikantů, může totiž dojít k navýšení utahovacího momentu kvůli ovlivnění koeficientu tření, který není v tomto případě spojený s adhezí. Tyto případy je potom nutné od ostatních oddělit.

2.2.1 Povlakování a maziva

Jedna z prvních provedených zkoušek se zabývala porovnáváním různých typů maziv, která by zajistila oddělení povrchů kontaktních ploch a zabránila tak adhezí. Porovnávaly se 4 druhy maziva: referenční mazivo, mazivo 1, mazivo 2 a mazivo 3. Výsledky zkoušky jsou uvedeny na *Obr. 12*.

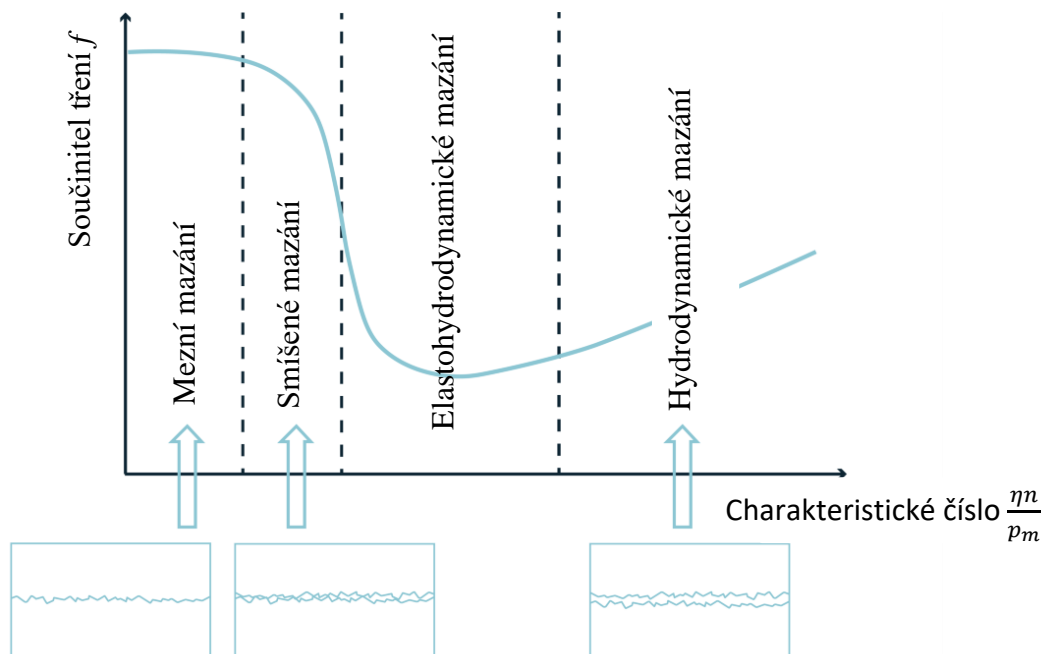


Obr. 12 Výsledky porovnávání různých druhů maziv na velikost adhezního opotřebení [5]

Nejhorší výsledky v oblasti adhezního opotřebení vykazuje referenční mazivo, což je mazivo, které fungovalo v kombinaci s povlakem ZnNi bez problému. Ovšem při absenci povlaku je samotné mazivo nedostačující pro ochranu před adhezním opotřebením. Při použití tohoto maziva je potřebný rovněž největší utahovací moment. Pro další typy maziv jsou výsledky srovnatelné, adhezní opotřebení se u všech objevilo hlavně na okrajích zákusné hrany, kde ale velká oblast zákusné hrany neprojevila žádné známky adhezního opotřebení, což je pro správnou funkci dostačující. Malému adheznímu opotřebení v těchto případech nasvědčuje i fakt, že nedošlo k velkým změnám hodnot utahovacího momentu. U maziva 3 došlo k navýšení momentu z důvodu změny samotného koeficientu tření nikoliv vlivem adhezního opotřebení, což bylo prokázáno dalšími analýzami, kterým se ve své práci nevěnuji.

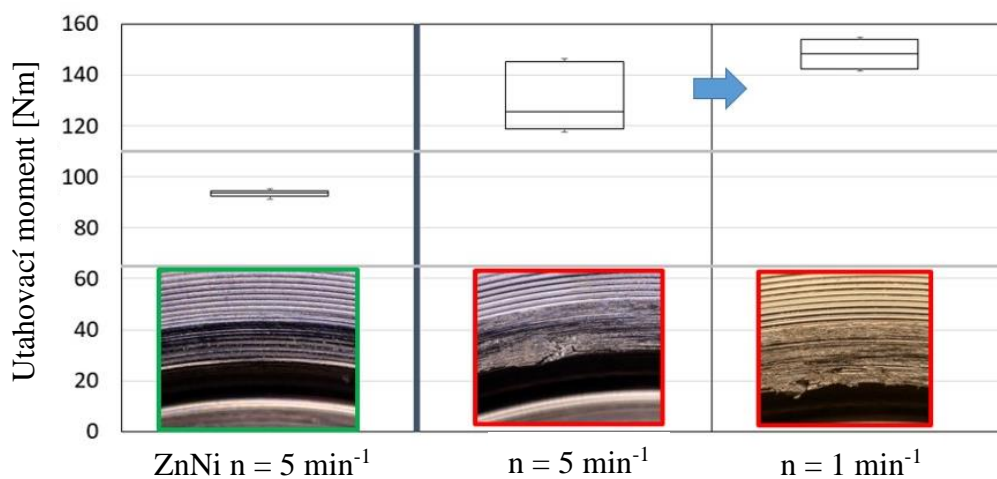
2.2.2 Rychlost utahování

V jednom z testů se zkoumal vliv rychlosti utahování komponenty do railu na tvorbu adhezního opotřebení. Platí, že čím pomaleji probíhá utahování, tím více času mají jednotlivé atomy v materiálech na difuzi a difuze tak bude intenzivnější a adhezní opotřebení tím pádem větší. Očekává se tedy, že s pomalejším utahováním bude potřebný i větší utahovací moment, aby přerušil vzniklé adhezní spoje. Samotná velikost utahovacího momentu však kromě intenzity adhezního opotřebení je ovlivněná i velikostí součinitele tření, který je stejně jako adhezní opotřebení závislý na rychlosti utahování, přičemž tato závislost je popsána Stribeckovou křivkou (Obr. 13). Testované otáčky se pohybují dle Stribeckovy křivky v oblasti mezního mazání, kde nedochází k výrazným změnám součinitele tření v závislosti na otáčkách. Lze tedy uvažovat, že nárůst utahovacího momentu je v případě tohoto testu způsoben především vznikem adhezního opotřebení.



Obr. 13 Stribeckova křivka [10]
Graf zobrazuje rovněž vhodné typy mazání pro jednotlivé režimy

Výsledky testu vlivu rychlosti utahování jsou zobrazeny na Obr. 14. Rychlost utahování během testu byla nastavována pomocí otáček, přičemž nejprve utahování probíhalo pro 5 otáček za minutu a poté pro 1 otáčku za minutu.



Obr. 14 Výsledky testu rychlosti utahování [5]

Z Obr. 14 je zřejmé, že v případě, kdy na railu a komponentně není vrstva ZnNi povlaku dochází k poměrně výraznému adheznímu opotřebení, které doprovází i zvýšení utahovacího momentu. Čím nižší otáčky byly při testu použity, tím větší se projevil adhezní opotřebení

a tím víc se zvýšil utahovací moment. Během testu se tedy potvrdila závislost utahovacího momentu na rychlosti utahování, kde pro menší rychlost utahování byl potřebný větší utahovací moment.

Při zkoušce byly zkoumány pouze pomalejší rychlosti utahování, přičemž by mohly být vyzkoušeny i vyšší rychlosti, např. pro $n = 15 \text{ min}^{-1}$, aby se konkrétně zjistilo, jak významný mají vliv na tvorbu adhezního opotřebení. V sériové výrobě však otáčky při utahování nemohou mít, s ohledem na použitou techniku a rychlost řízení, diametrálně odlišné utahovací parametry od referenčního stavu. Z tohoto důvodu byl tento test proveden pouze pro informaci a bez velké ambice změnu v případě pozitivního výsledku zavést do výroby.

2.2.3 Axiální síla a velikost komponenty

Dalším důležitým parametrem, který má vliv na intenzitu adhezního opotřebení je velikost axiální síly působící během přibližování kontaktních ploch materiálů k sobě. Působící síly jsou znázorněny na *Obr. 15*.

Čím větší axiální silou na komponentu působíme, tím blíže k sobě jsou kontaktní plochy a je tak větší riziko adhezního opotřebení. Z této závislosti vyplývá, že s axiální silou se bude zvětšovat i velikost třecí síly a utahovacího momentu, který musí překonávat vzniklé adhezní spoje. Stejná závislost je patrná i ze vztahu pro výpočet axiální síly, který byl během testu použit (rovnice (4)).

$$F_{ax} = \frac{2 \cdot M}{d_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot f \cdot d_2 + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot P_h}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \pi \cdot d_2 - f \cdot P_h} \right) + d \cdot f} \quad (4)$$

M utahovací moment

P_h stoupání závitu

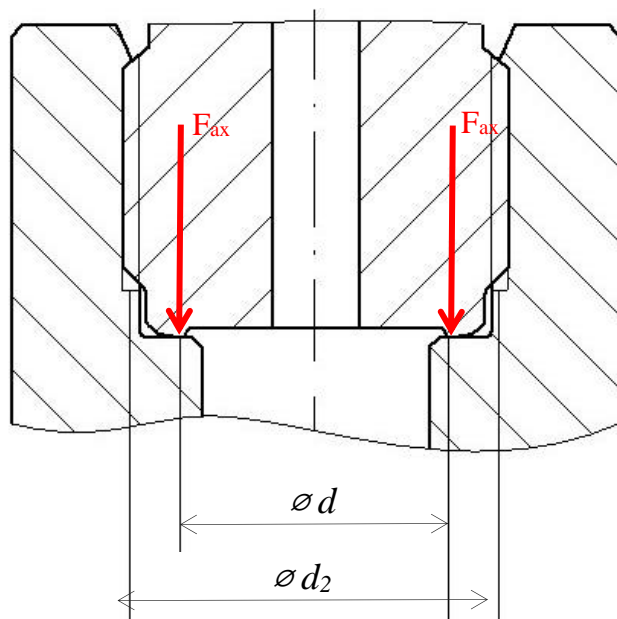
d_2 střední průměr závitu

α úhel profilu závitu

f součinitel tření

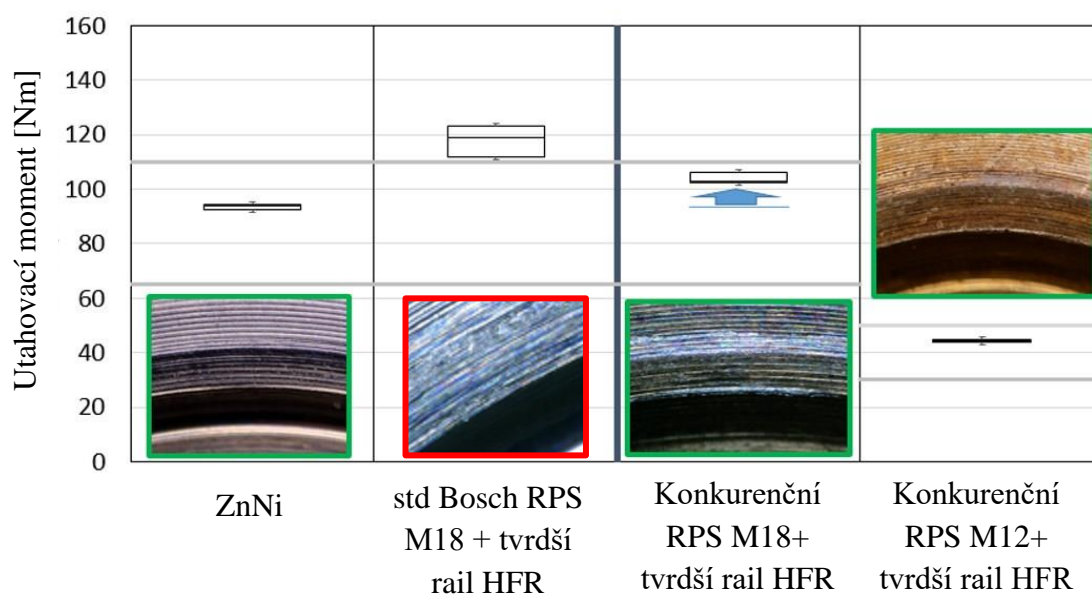
d střední průměr vzdálenosti zákusné hrany

Průměry použité ve výpočtu jsou znázorněny na *Obr. 15*.



Obr. 15 Síly působící na kontaktní ploše

Zkouška byla prováděna pomocí měřícího zařízení, které bylo schopné změřit velikost působící axiální síly a příslušného momentu, přičemž velikost momentu se odvíjí i od ramene, na kterém síla působí, a tak hraje vliv i velikost, respektive průměr použité komponenty (M18 nebo M12). Což vyplývá i ze zmíněného vzorce pro výpočet axiální síly. Velikost adhezního opotřebení se nejlépe hodnotila pomocí závislosti celkového součinitele tření na axiální síle nebo utahovacím momentu. Pokud při zvyšování axiální síly, respektive momentu došlo k nárůstu součinitele tření, indikoval tento růst přítomnost adhezního opotřebení. Na Obr. 16 jsou výsledky zkoušky uvedené opět v závislosti na utahovacím momentu.



Obr. 16 Výsledky testování vlivu axiální síly a velikosti komponenty [5]

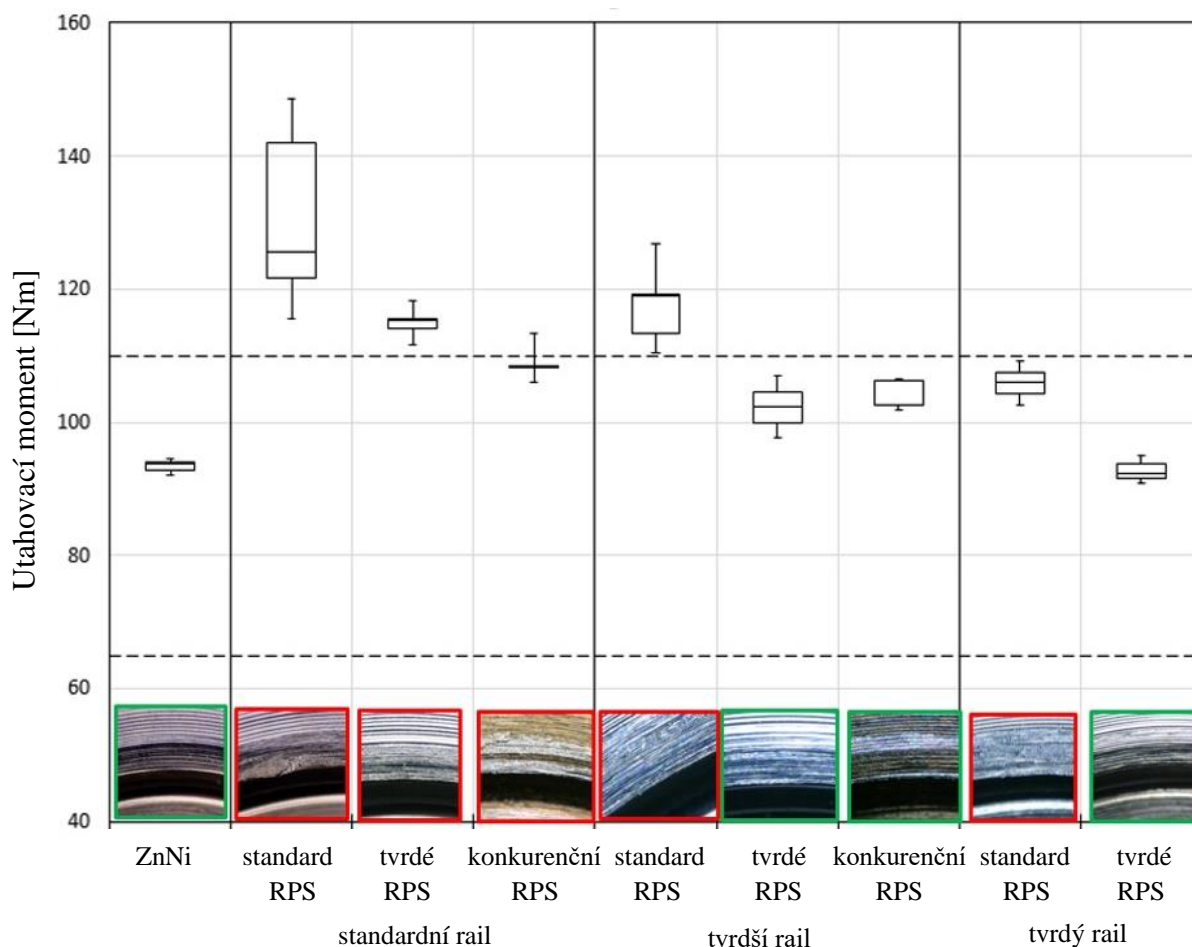
V tomto testu se kromě standardní komponenty RPS vyráběné firmou Bosch použila pro porovnání podobná komponenta – vyráběná konkurentem firmy Bosch. Stejně jako v předešlých zkouškách, i zde se výsledky porovnávaly s dvojicí materiálů standardní RPS a standardní rail HFR s povlakem ZnNi. U dalších materiálů byla použita kombinace tvrdšího railu HFR a příslušné komponenty. Pro velikost komponent M18, což je standardní RPS a dodávanou M18 od konkurence, došlo k nárůstu utahovacího momentu a v případě komponenty standardní RPS i ke vzniku adhezního opotřebení. Adhezní opotřebení v případě konkurenčního RPS nebylo výrazné. Důvod, proč je adhezní opotřebení při použití dílu od konkurence menší, než při použití RPS je ten, že materiál, ze kterého je tato komponenta vyrobena má vyšší tvrdost než materiál komponenty standardní Bosch RPS.

Pro komponentu konkurenční RPS M12, která má menší průměr než zbylé zkoušené komponenty, došlo k výraznému poklesu utahovacího momentu oproti dalším případům, což je způsobeno právě menším ramenem, na kterém působí axiální síla. Současně došlo i ke snížení adhezního chování, což je kromě velikosti komponenty přisuzováno také velikosti axiální síly (resp. třecí síly), která byla menší než u ostatních zkoumaných komponent a menší dráze, kterou urazí komponenta s menším průměrem po kontaktní ploše oproti komponentě s větším průměrem při stejných utahovacích parametrech.

Kombinace rozdílných tvrdostí a velikostí komponent, která byla v tomto testu použita znesnadňuje interpretaci výsledků, nicméně Bosch varianta s menší velikostí a odpovídající tvrdostí nebyla v tu dobu k dispozici, a proto tento test se stejným materiálem nemohl být proveden.

2.2.4 Tvrdost

Další zkoumanou charakteristikou na tvorbu adhezního opotřebení byl vliv tvrdosti. Při tomto testu byly použity tři různé tvrdosti railu HFR – označované jako standardní rail (100 % tvrdosti HBW), tvrdší rail (103,5 % HBW) a tvrdý rail (105,5 % HBW). Použila se komponenta standardní RPS (118 % HBW), tvrdá RPS (140,5 % HBW) a konkurenční RPS M18 (140,5 % HBW) a zkouška se prováděla pro různé kombinace těchto materiálů. Její výsledky uvádí *Obr. 17*.

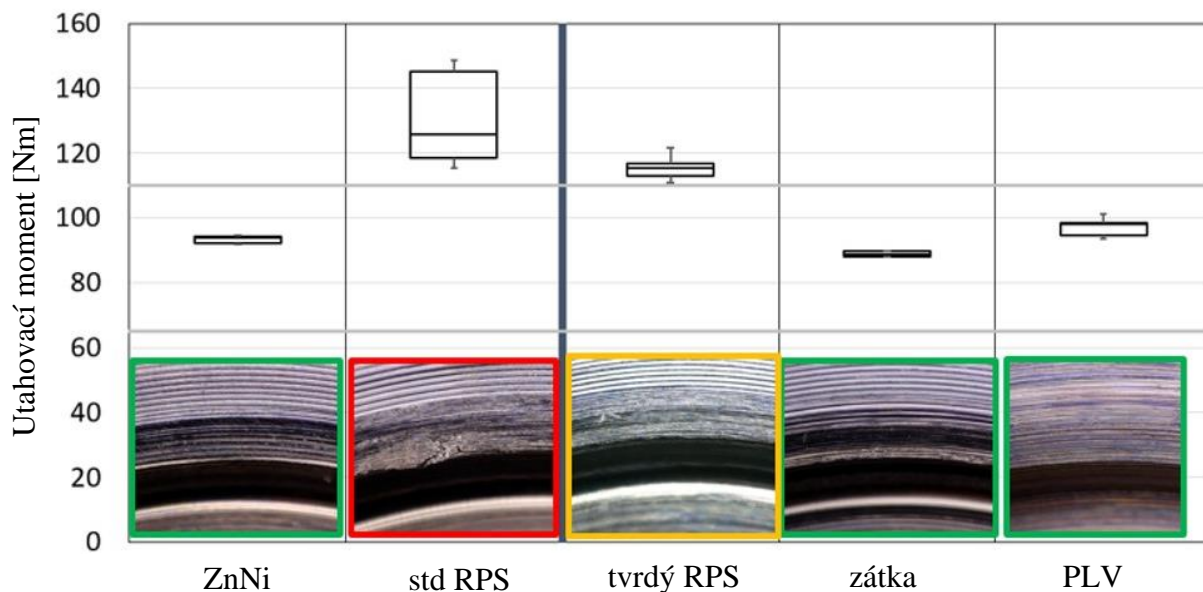


Obr. 17 Výsledky pro různé kombinace tvrdostí materiálů [5]

Z uvedených výsledků je patrné, že při tomto experimentu se potvrdila teorie, která uvádí, že čím je materiál tvrdší, tím méně podléhá adheznímu opotřebení. Pro tvrdší materiály došlo k výraznému zlepšení v oblasti adhezního opotřebení, i když toto opotřebení by z pohledu hodnocení funkce stále nespĺnilo požadavky na stabilní chování v sériové výrobě. Je také vidět, že pro redukci adhezního opotřebení by bylo potřeba použít tvrdší varianty obou účastnících se materiálů. To by vedlo ke změně tepelného zpracování obou materiálů, což by znamenalo vyšší náklady na výrobu, a proto byl tento směr z pohledu vlivu na funkce a ekonomičnost produktu zastaven.

2.2.5 Typ materiálu

Důležitou roli při tvorbě adhezního opotřebení hraje i samotný typ materiálu. V tomto testu byly použity různé druhy komponent vyráběné firmou Bosch, které mají stejnou geometrii zákusné hrany jako komponenta RPS, v kombinaci se standardním railem HFR. Konkrétně se jednalo o komponenty: standardní RPS, tvrdé RPS, zátka a PLV. Každá komponenta má jiné složení oceli. Porovnání jednotlivých typů materiálů je zobrazeno na Obr. 18 níže.



Obr. 18 Výsledky vlivu typu materiálu na adhezní opotřebení [5]

I když se ve všech případech jedná o ocel, během testu se dosáhlo odlišných výsledků a velký vliv typu materiálu je zde tedy patrný. Nejvíce podléhá adheznímu opotřebení kombinace komponenty standardní RPS a standardní rail bez povlaku ZnNi. Na druhou stranu zátka, která má asi o 11 % menší tvrdost než tvrdé RPS, vykazovala znatelně lepší chování a téměř žádné adhezní opotřebení což ukazuje, že materiál ovlivňuje tvorbu adhezního opotřebení velmi výrazně, a proto by bylo na místě se tomuto problému více věnovat. Z tohoto důvodu jsem se rozhodla ve své bakalářské práci přiblížit právě mikrostrukturu těchto již zkoumaných materiálů a poskytnout tak nová data pro případné další řešení tohoto problému.

2.3 Analýza struktury materiálů

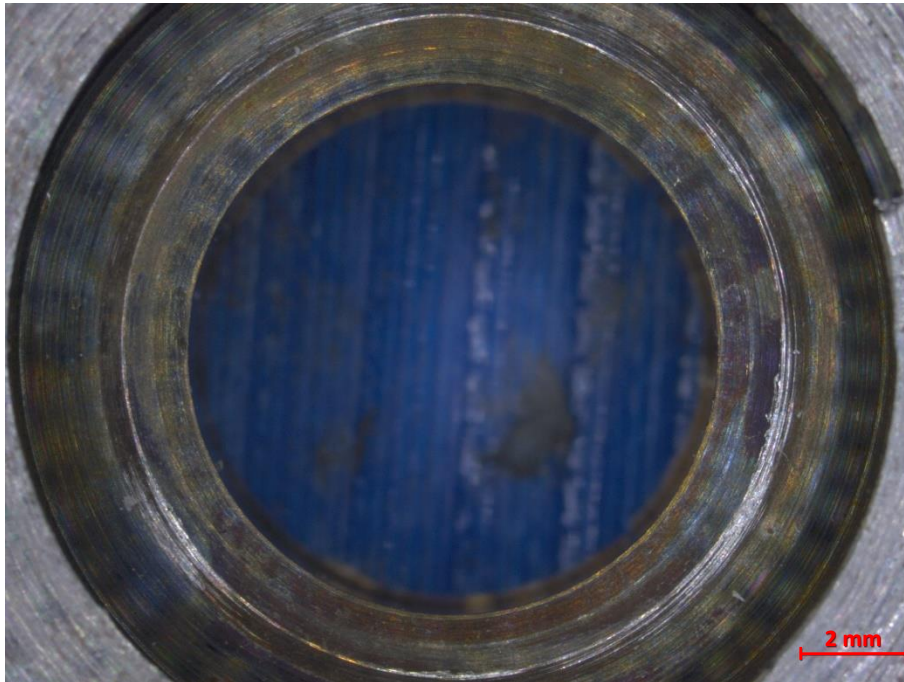
2.3.1 Příprava vzorků

Vzorky pro metalografickou analýzu byly odebrány z jednotlivých součástí zmíněných v teoretické části bakalářské práce. Konkrétně se jednalo o materiály komponent – PLV, RPS a zátka – a jeden druh materiálu vysokotlakého zásobníku.

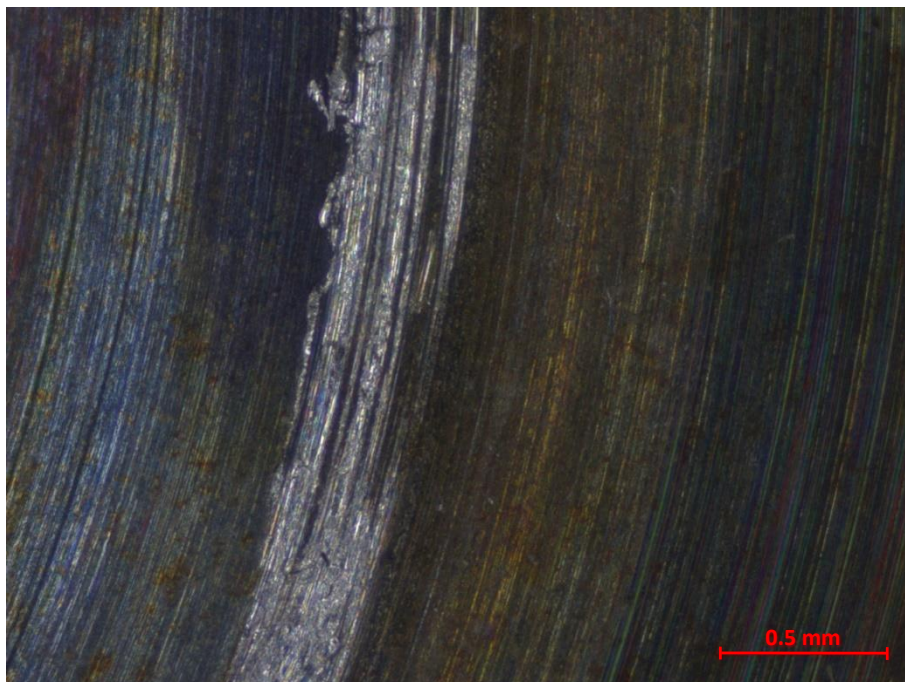
Nejdříve bylo zapotřebí rozřezat součástky, jejichž struktura byla později zkoumána a porovnávána. Řezání proběhlo na stolní řezací pile Brillant 230. Vzorky byly připraveny standardním postupem a to tak, že rozřezané díly byly vyčištěny, zalisovány, vybroušeny a mechanicky vyleštěny diamantovou pastou. Podle druhu materiálu proběhlo jejich naleptání vhodným leptacím činidlem – až na jeden vzorek bylo pro všechny vzorky použito stejné leptadlo Nital 2 %. Pro leptání zbývajícího vzorku se použilo leptadlo Vilella. K pozorování struktury materiálů byl použit vertikální metalografický mikroskop.

2.3.2 Adhezní opotřebení na součástkách

V rámci experimentu bylo rovněž zdokumentováno (*Obr. 19, Obr. 20*) adhezní opotřebení vzniklé po zašroubování součástek vykazujících nejvyšší riziko tvorby adhezního opotřebení, což se týká railu HFR a komponenty RPS. Fotky byly vyfoceny na optickém mikroskopu. Z přiložených fotografií se dá odhadnout i velikost kontaktní plochy, která má šířku přibližně 0,5 mm.

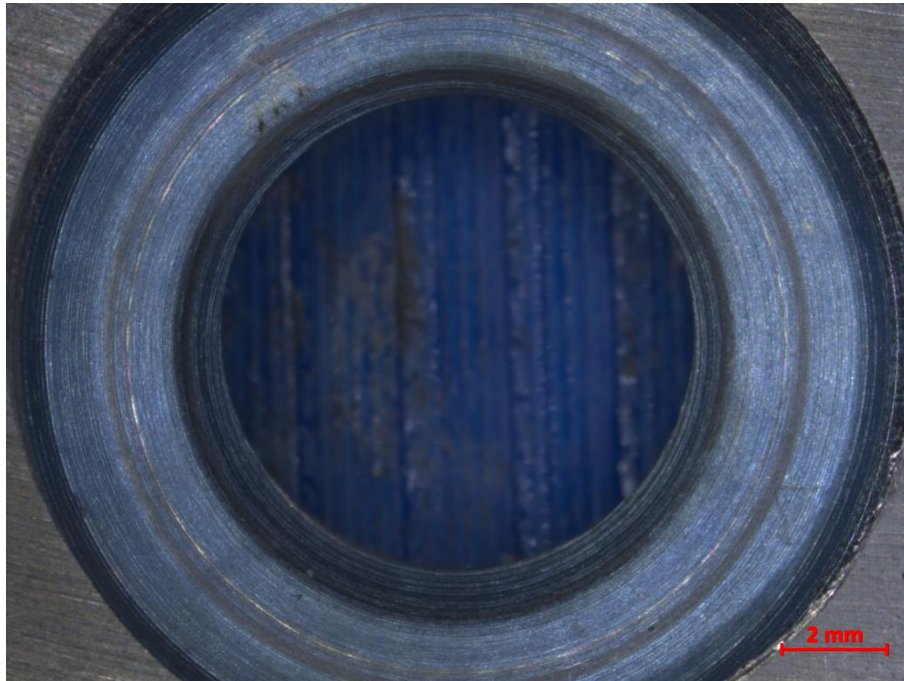


Obr. 19 Adhezní opotřebení na vysokotlakém zásobníku HFR

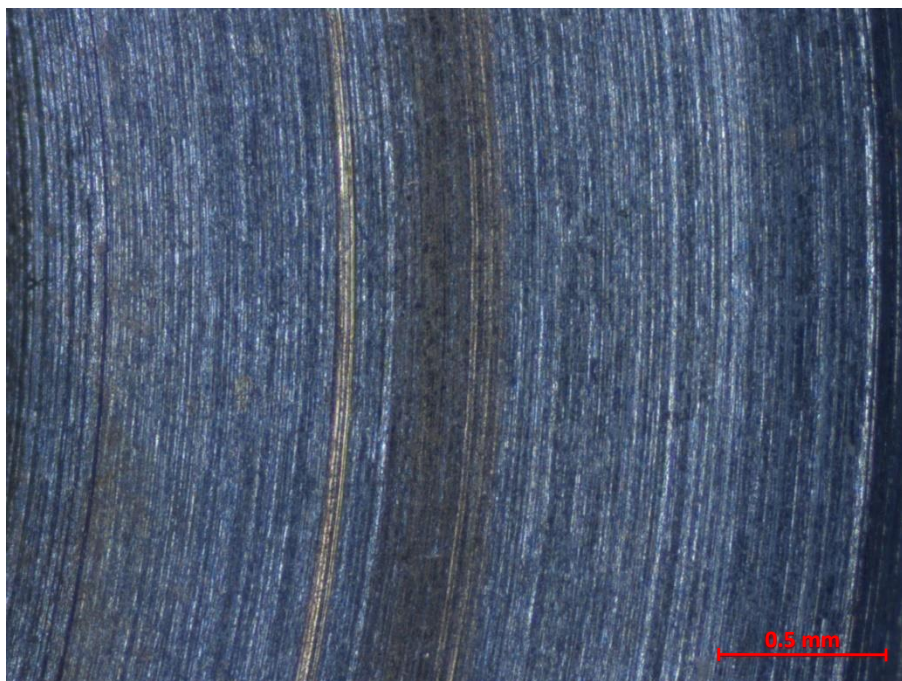


Obr. 20 Detail adhezního opotřebení na vysokotlakém zásobníku

K porovnání povrchu s adhezním opotřebením a povrchu bez opotřebení byl vyfocen vysokotlaký zásobník s povlakem ZnNi, kde se adhezní opotřebení po zašroubování neprojevuje (Obr. 21, Obr. 22). Povlak má díky přítomnosti zinku hexagonální krystalickou mřížku, která má obecně pozitivní efekt na snížení náchylnosti k tvorbě adhezního opotřebení.

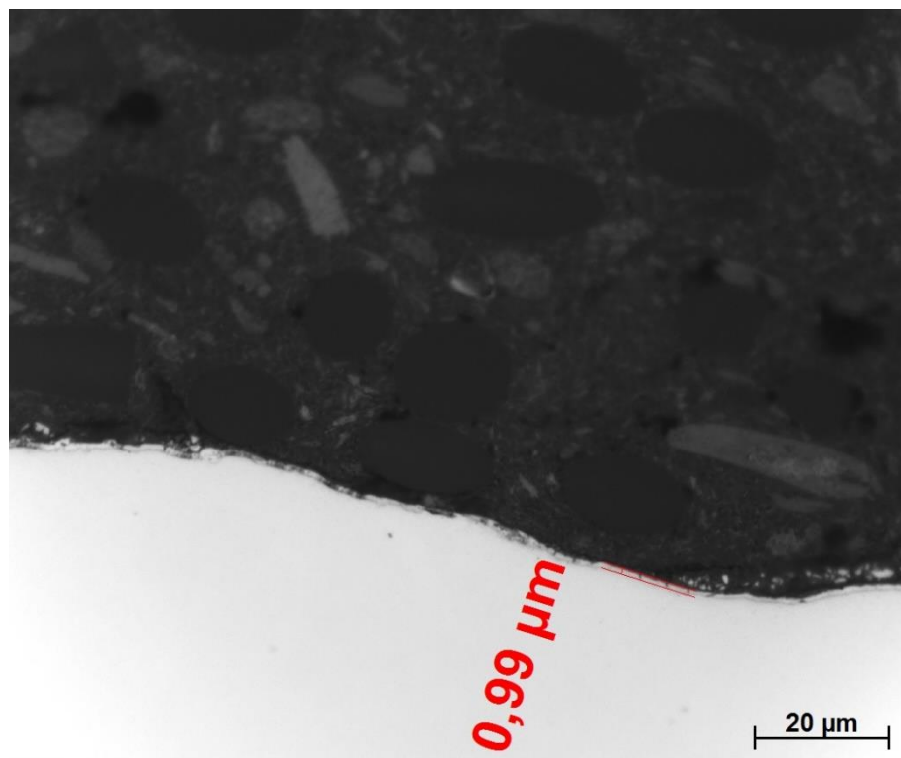


Obr. 21 Povrch railu HFR s povlakem ZnNi bez adhezního opotřebení



Obr. 22 Detail povrchu railu HFR s povlakem ZnNi bez adhezního opotřebení

Na *Obr. 23* je tloušťka ZnNi povlaku na kontaktní ploše. Povlak zde v podstatě slouží jako bariéra mezi kontaktními povrchy součástí, kterým zabraňuje ve vzájemném dotyku a tím i pohybu atomů z jednoho materiálu do druhého a následnému spojení materiálů. Tloušťka vrstvy navíc během kontaktu povrchů zůstává konstantní. Proto slouží dobře jako ochrana vůči tvorbě adhezního opotřebení.



Obr. 23 Tloušťka ZnNi vrstvy na railu HFR [5]

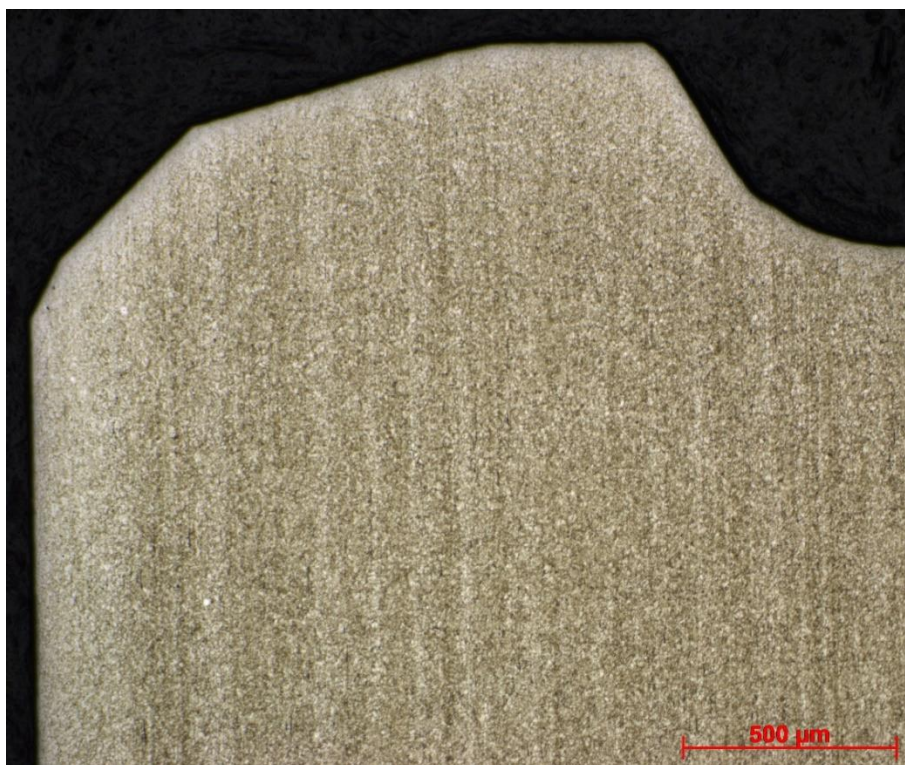
2.4 Výsledky experimentu

2.4.1 Materiál č. 1

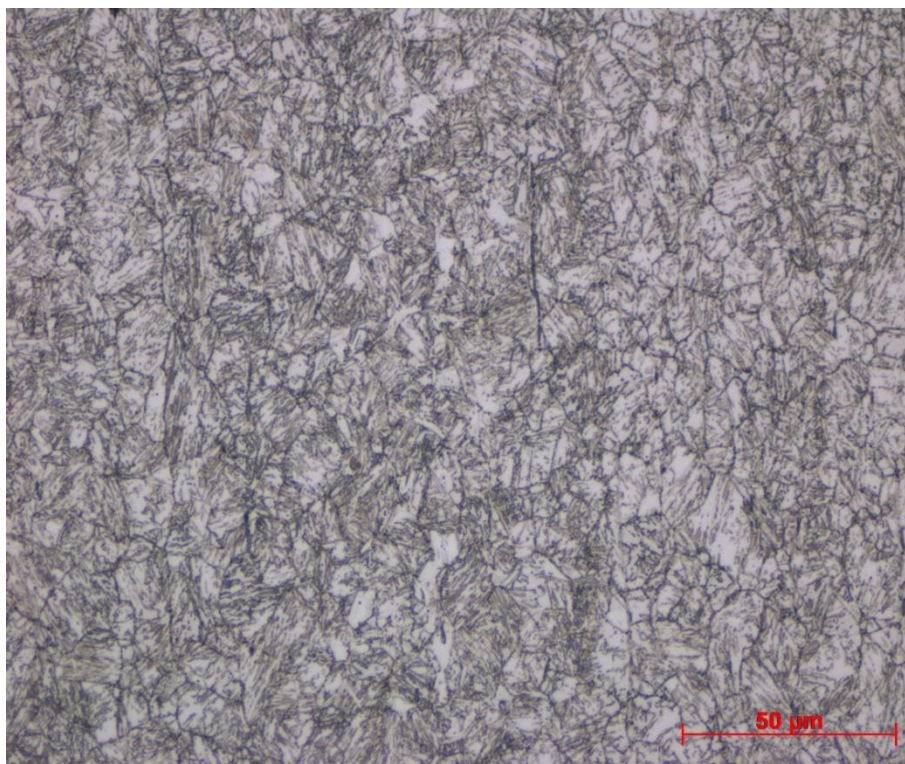
Prvním zkoumaným materiálem je nízkouhlíková precipitačně vytvrditelná korozivzdorná ocel legovaná chromem, niklem, mědí a niobem, která je vlivem nízkého obsahu uhlíku (max 0,07 hm. %) vhodná ke svařování. Na *Obr. 24* je struktura tohoto materiálu focena objektivem se zvětšením 5x. Fotka je pořízena v oblasti zákusné hrany. Z obrázku je viditelná heterogenní struktura materiálu, přičemž dochází k pravidelnému střídání tmavších a světlejších míst. Světlá místa jsou také na povrchu celé součásti. Heterogenní struktura vznikla v důsledku použité technologie při výrobě součásti, kterou bylo válcování původní lící struktury. Z *Obr. 24* je viditelný i směr válcování. Materiál má jemnozrnnou strukturu a při daném zvětšení nejsou patrné žádné defekty.

Struktura materiálu při větším zvětšení (objektiv se zvětšením 50x) je zobrazena na *Obr. 25*. Jsou dobře viditelná původní austenitická zrna, jejichž velikost se dá odhadnout přibližně na 15 μm. V případě tohoto materiálu proběhlo rozpouštěcí žihání na teplotě 1000 °C a následovalo ochlazování materiálu na vzduchu. Pro dosažení požadované tvrdosti je nutné precipitační vytvrzení, které probíhá na teplotě 450 °C a precipitáty jsou v tomto případě

tvořeny karbidy niobu. Samotná výsledná struktura je popuštěný martenzit.



Obr. 24 Vzorek materiálu č. 1 v okolí zákusné hrany



Obr. 25 Materiál č. 1

Světlá místa na povrchu součásti mohla vzniknout během leptání při přípravě vzorku, eventuálně se může jednat o oduhlíčenou oblast, což by mohlo v tomto případě znamenat pokles tvrdosti materiálu. Pokles tvrdosti a menší podíl popuštěné martenzitické struktury v místě zákusné hrany by pak pravděpodobně měl vliv na tvorbu adhezního opotřebení. Na základě tohoto podnětu bylo provedeno měření tvrdosti po obvodu součástky v hloubce 0,1 mm a uprostřed materiálu, aby se odhalil případný rozdíl v tvrdostech. K měření byla zvolena zkouška dle Vickerse. Měření tvrdosti na povrchu součástky bylo provedeno na šesti různých místech, aby výsledky nebyly zkreslené. Změřené tvrdosti jsou uvedené v *Tab. 1*.

Tab. 1 Výsledky měření tvrdosti na povrchu materiálu č. 1

Měření	Tvrdost HV1 [%]
1	101
2	104
3	101
4	100
5	103
6	103

Pro jádro materiálu č. 1 byla naměřená hodnota tvrdosti 103 % HV1 tudíž lze ze získaných informací z měření usoudit, že světlá místa po obvodu součásti nejsou způsobena oduhlíčením, protože tvrdosti materiálu jsou na povrchu i uprostřed součásti stejné.

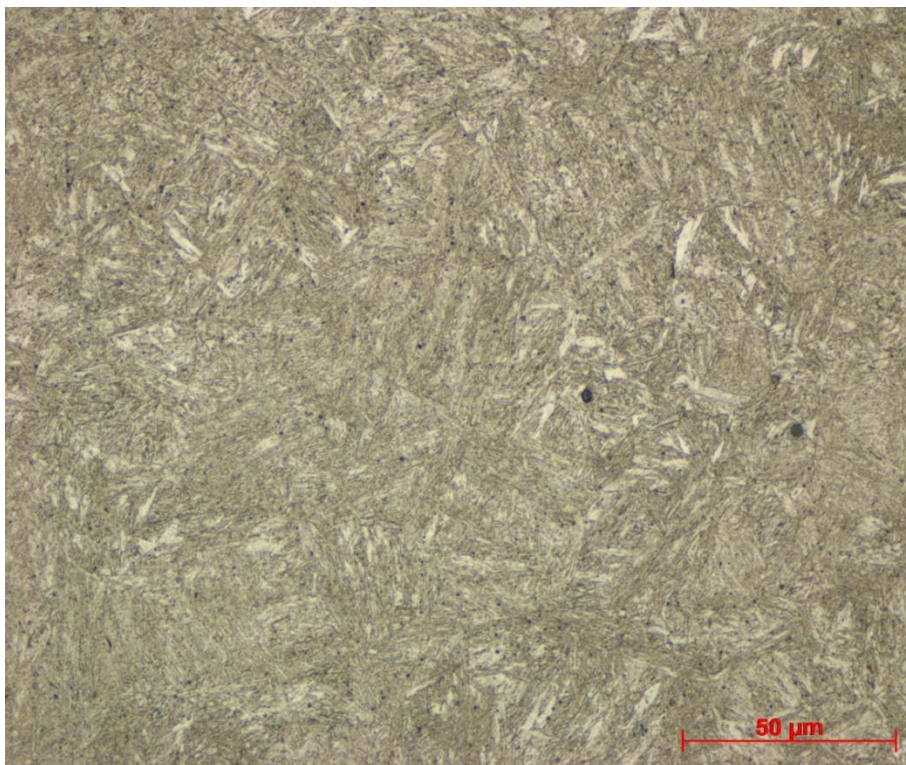
2.4.2 Materiál č. 2

Materiál č. 2 je uhlíková nelegovaná ocel s obsahem uhlíku 0,35 hm. % s nízkým obsahem bóru (0,003 hm. %). Z *Obr. 26* lze říct, že materiál má homogenní strukturu, i když uprostřed součástky má struktura hrubší zrna než na okrajích. Rovněž je vidět, že by materiál mohl obsahovat defekty nebo nečistoty, avšak může se jednat i o oxidy nebo sulfidy. K bližšímu určení je potřeba strukturu materiálu zobrazit při větším zvětšení. Směr válcování v případě této struktury není patrný, což je způsobeno tím, že materiál neobsahuje legury a během válcování tak neproběhla žádná segregace. Stejně jako v případě materiálu č. 1 je struktura materiálu vyfocena v oblasti zákusné hrany.

Na *Obr. 27*, který je focen objektivem se zvětšením 50x lze rozeznat, že struktura neobsahuje nečistoty, ale jedná se o oxidy. Původní austenitická zrna nejsou tak viditelná jako u materiálu č. 1, ale také se dají rozeznat. Struktura je v tomto případě hrubší, než má materiál č. 1 a původní velikost zrn je přibližně 25 μm . Struktura je martenzitická ovšem nedá se říct, zda bílé části na *Obr. 27* jsou zbytkový austenit nebo martenzit zbrošený v jiném směru. Možné jsou obě varianty. Martenzitické struktury se dosáhlo kalením z teploty 860 °C a ochlazováním ve vodě či oleji. Po kalení následovalo popuštění na teplotě 600 °C pro snížení podílu zbytkového austenitu a přeměny tetragonálního martenzitu na kubický. Přeměnou se dosáhne menších vnitřních pnutí uvnitř materiálu.



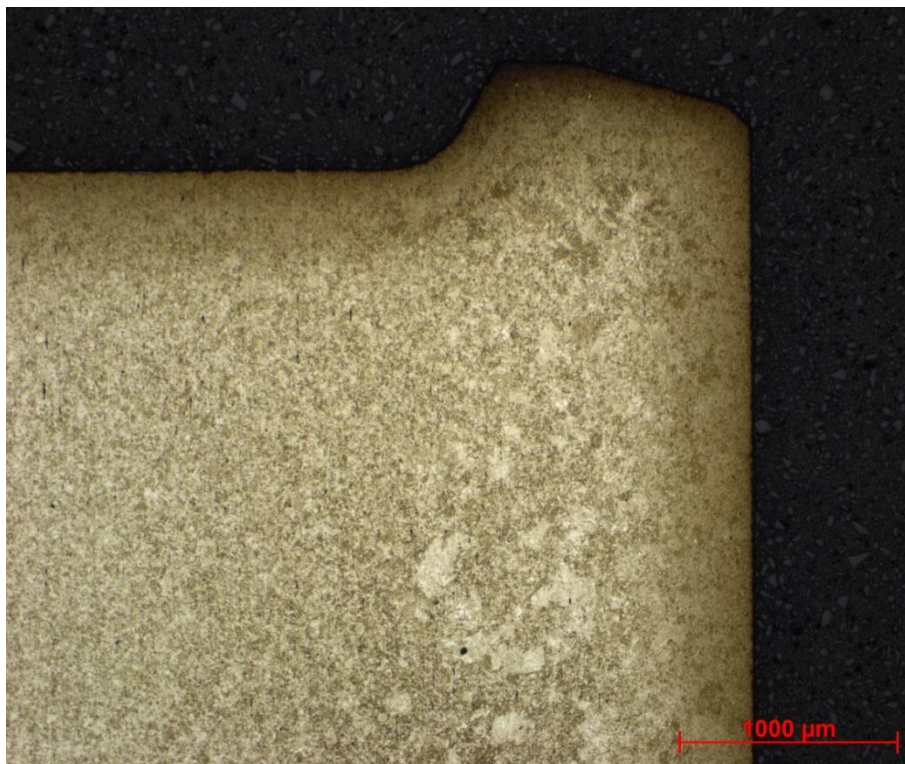
Obr. 26 Vzorek materiálu č. 2 v okolí zákusné hrany



Obr. 27 Materiál č. 2 větší přiblížení

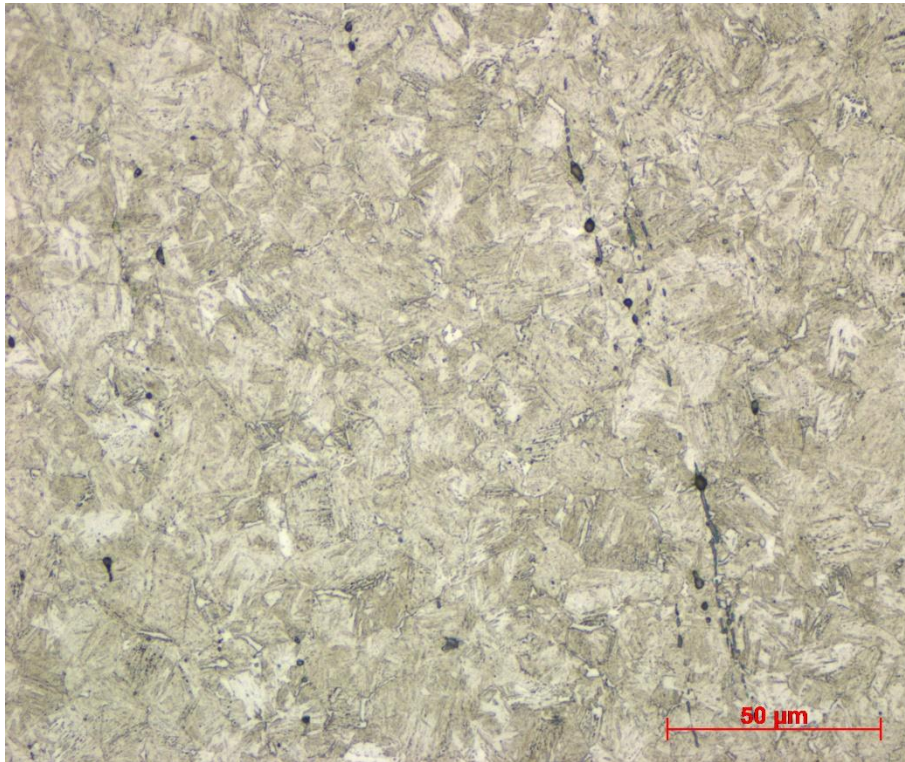
2.4.3 Materiál č. 3

Poslední materiál, ze kterého se vyrábí komponenty je ocel k cementování legovaná manganem a chromem s obsahem uhlíku 0,17 hm. %. Cementová vrstva je vidět na *Obr. 28*. Z tohoto obrázku lze také pozorovat, že materiál č. 3 má heterogenní strukturu. Defekty při zvětšení objektivu 2,5x nejsou patrné. Už při tomto zvětšení se však dá odhadnout, že struktura obsahuje rozválcované sulfidy, podle kterých se dá určit směr válcování. Fotografie je opět pořízena v oblasti zákusné hrany. Protože se jedná o materiál, u kterého proběhla cementace, k bližšímu popisu struktury je potřeba uvést fotografii z prostřední části součástky (*Obr. 29*) a druhou z oblasti cementované vrstvy (*Obr. 30*) – což je i oblast zákusné hrany.

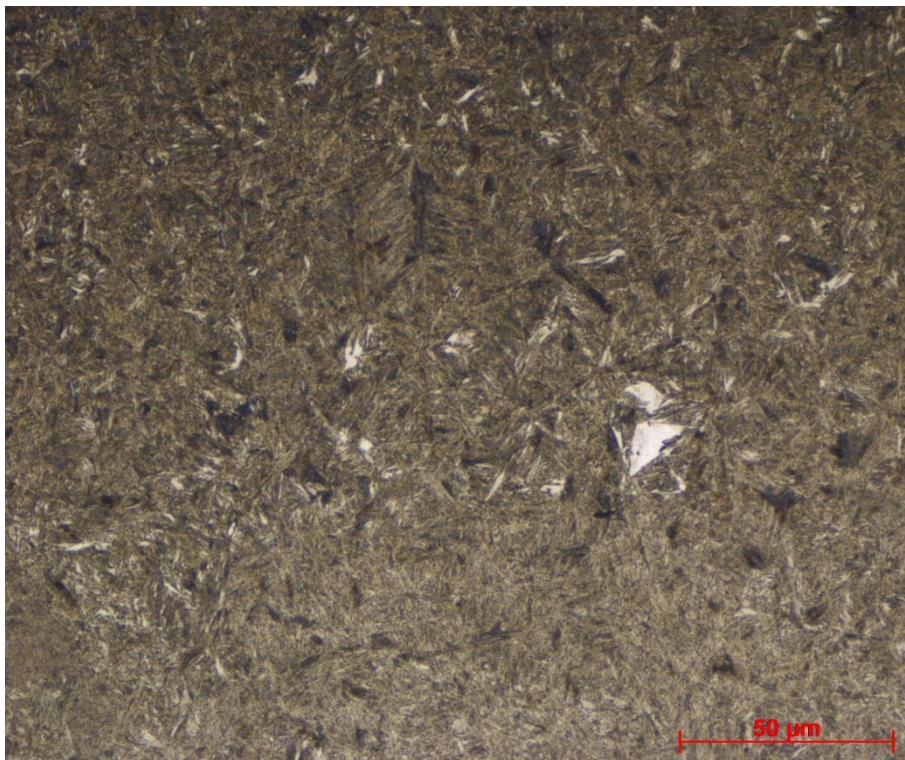


Obr. 28 Vzorek materiálu č. 3 v okolí zákusné hrany

Díky cementaci je na povrchu materiálu zvýšený obsah uhlíku a po zakalení tak na povrchu vznikne větší podíl martenzitu a povrch má tím pádem větší tvrdost. Směrem k jádru naopak klesá tvrdost a narůstá houževnatost materiálu, s čímž souvisí nižší podíl martenzitu a narůstající podíl feritické struktury. Tato struktura je pozorovatelná na *Obr. 29*, kde je vidět martenzitická struktura s bílými místy, která představují ferit. Místy se u feritu objevuje Widmannstättenova struktura (bílé jehlice) vzniklá větším přechlazením. Na této fotografii jsou rovněž dobře viditelné rozválcované sulfidy, přičemž částice, které zůstaly kulaté a nejsou rozválcované jsou oxidy. Podle *Obr. 29* je také poznat, že se jedná o materiál s jemnými zrny. Po kalení u materiálu č. 3 probíhá nízkoteplotní popouštění na teplotě 220 °C.



Obr. 29 Materiál č. 3 – jádro



Obr. 30 Materiál č. 3 – cementovaná vrstva

Struktura materiálu v oblasti cementované vrstvy je zobrazena na *Obr. 30* a díky cementaci a tím navýšením obsahu uhlíku lze v tomto případě pozorovat podobný druh struktury jako v případě materiálu č. 2. Jedná se tedy rovněž o martenzitickou strukturu. Struktura v oblasti cementované vrstvy je trochu přepletaná, což je pravděpodobně způsobeno tím, že má materiál heterogenní strukturu, která na leptací činidlo reagovala rozdílně.

Protože materiál č. 3 obsahuje cementovanou vrstvu, bylo u něj provedeno navíc měření tvrdosti pro demonstraci poklesu tvrdosti směrem od jeho povrchu k jádru. K měření byla zvolena zkouška tvrdosti podle Vickerse a výsledky jsou uvedeny v *Tab. 2*. Hodnoty tvrdosti dle očekávání směrem k jádru výrazně klesají.

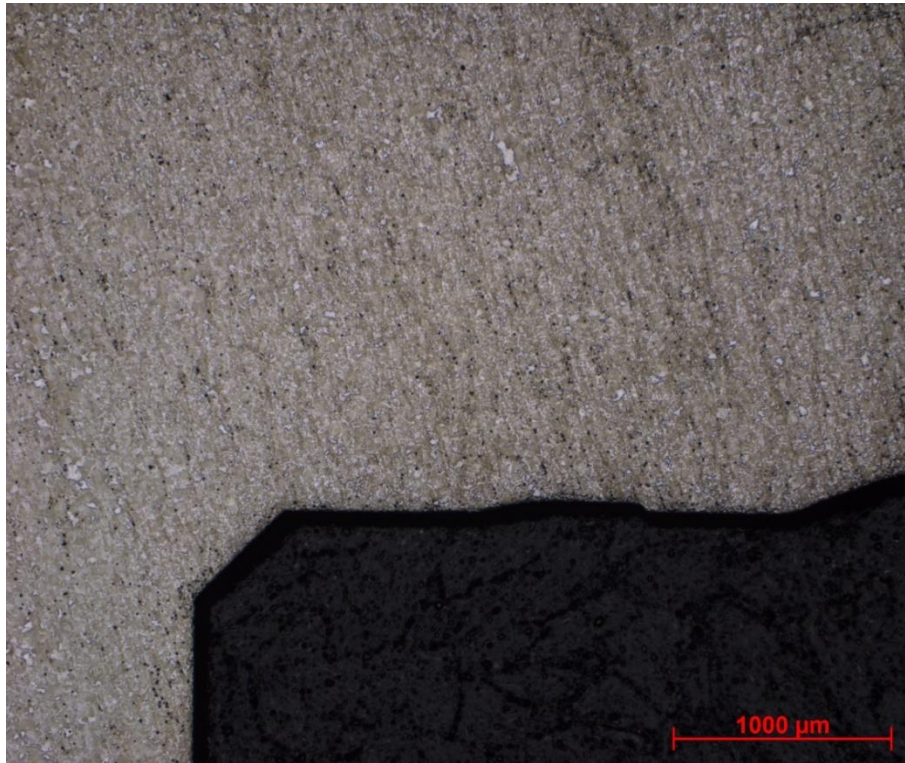
Tab. 2 Výsledky měření tvrdosti materiálu č. 3

Měření	Tvrdost HV1 [%]	Hloubka pod povrchem [mm]
1	176	0,1
2	167	0,2
3	153	0,3
4	126	0,5
5	106	1,0
6	100	3,0

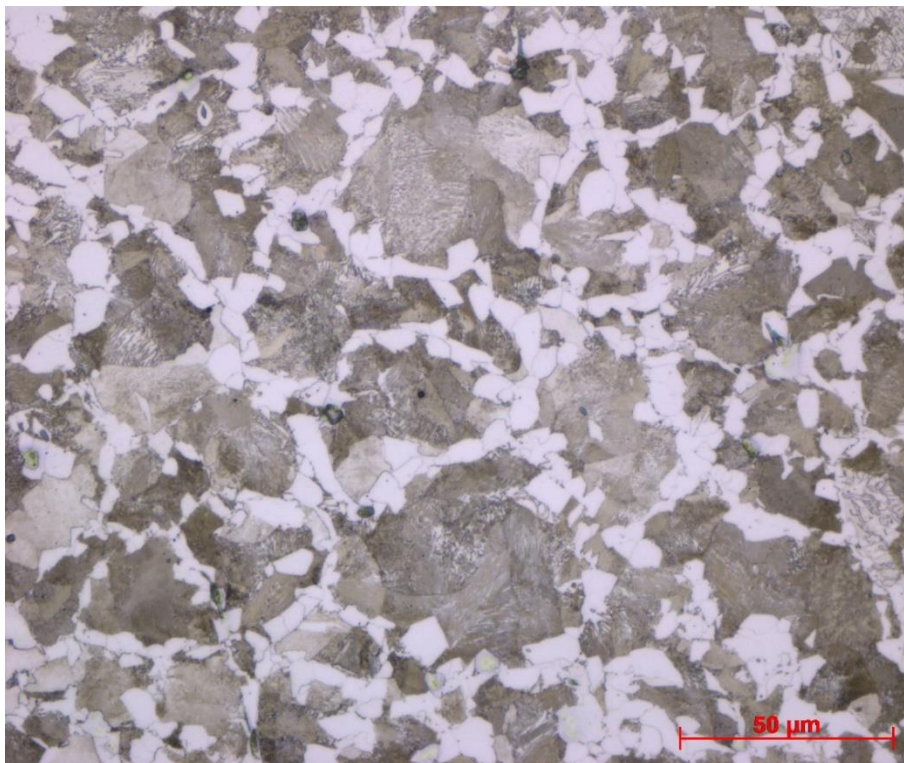
2.4.4 Materiál č. 4

Z tohoto materiálu je vyroben jeden z typů railů a jedná se o ušlechtilou ocel legovanou manganem a vanadem s obsahem uhlíku 0,37 hm. %. Struktura materiálu č. 4 je jemnozrná a homogenní a je zobrazena na *Obr. 31*. V tomto případě je fotografie pořízena v oblasti dosednutí zákusné hrany.

Podle *Obr. 32*, na kterém je struktura materiálu focena objektivem se zvětšením 50x, má materiál č. 4 feriticko-perlitickou strukturu, kde bílá zrna jsou ferit a hnědá perlit. Na některých místech je vidět jemnější feriticko-karbidická směs, která se blíží bainitické struktuře. Jsou zde také viditelné oxidy a sulfidy. Struktura odpovídá provedenému tepelnému zpracování, kde probíhá z teploty 1100 °C řízené ochlazování na vzduchu až na teplotu 500 °C. Přibližně na teplotě 900 °C se začínají vylučovat karbidy vanadu, díky kterým proběhne precipitační zpevnění. V tomto případě není žádoucí vznik martenzitické struktury.

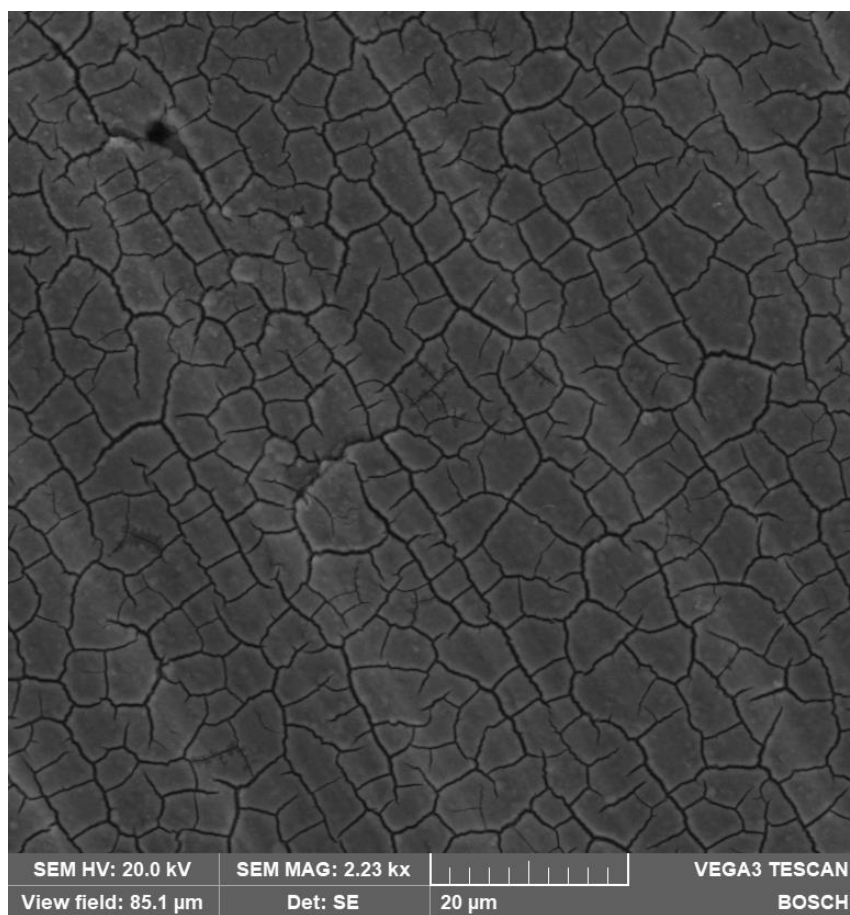


Obr. 31 Vzorek materiálu č.4 v okolí došedací plochy



Obr. 32 Materiál č. 4

Materiál č. 4 se používá v kombinaci se ZnNi povlakem. Detail tohoto povlaku je zobrazen na fotografii (*Obr. 33*), která byla vyfocena na elektronovém mikroskopu.



Obr. 33 Detail ZnNi povlaku

3 Zhodnocení výsledků

Adhezní opotřebení je nejintenzivnější mezi materiály komponenty RPS a railu HFR. Tyto dva materiály mají nejnižší tvrdost ze všech používaných materiálů, což na základě teorie potvrzuje tvrzení, že u materiálů s vysokými tvrdostmi je riziko vzniku tohoto opotřebení nižší. Není to však jediný důvod, což ukazuje fakt, že zátka, která má tvrdost asi o 7,5 % větší než standardní RPS a o 11 % menší než tvrdé RPS, se v obou srovnáních chovala podstatně lépe.

3.1 Diskuse analýzy provedených zkoušek

Z výsledků dat získaných z již provedených zkoušek se dá říct, že nejjednodušším způsobem, jak zabránit tvorbě adhezního opotřebení bez ovlivnění jiných funkcí produktu je použitím vhodnějšího maziva. I když k mírnému adheznímu opotřebení docházelo s každým zkoušeným typem maziva, adheze se projevovала pouze na okrajích zákusné hrany, a tudíž vyřešení tvorby adhezního opotřebení v místech hlavního kontaktního tlaku pomocí maziva je dostačující. Všechna tři zkoušená maziva dosahovala podobných výsledků v oblasti adhezního opotřebení. Mazivo 3 má oproti zbylým mazivům 1 a 2 vyšší utahovací moment, což by znamenalo určité zásahy do specifikace utahovacích parametrů, a tak konečné rozhodnutí o tom, jaké mazivo je nejvhodnější, probíhalo mezi mazivem 1 a 2, která vykazují velmi podobné vlastnosti.

Ostatní testy ukázaly, že problém by se dal vyřešit i jinými způsoby, například zvýšením tvrdosti účastnících se materiálů, drobného zlepšení by šlo dosáhnout i změnou rychlosti utahování, případně změnou průměru zákusné hrany a s tím spojeného snížení axiální síly, ale všechny by nějakým způsobem ovlivnily ekonomičnost produktu railu, případně by vytvořily nové varianty komponent což není žádoucí. Zvýšení tvrdosti materiálu by vyžadovalo pravděpodobně změnu v rámci tepelného zpracování daného materiálu nebo úplnou změnu základního materiálu, což by sebou neslo kompletní revalidaci stávající komponenty, vyšší cenové náklady, horší management dílců ve výrobních atd. Podobně by na tom bylo i řešení pomocí zvýšení rychlosti utahování, kdy výroba momentálně neumožňuje použít při utahování vyšší otáčky než 10 otáček za minutu, a tím pádem by tato změna znamenala výměnu montážních zařízení a změnu montážního procesu, což rovněž není žádoucí. Navíc by bylo potřeba provést testy pro vyšší rychlosti než 10 otáček za minutu, aby bylo jasné, jak velký vliv na tvorbu adheze rychlost utahování má.

3.2 Diskuse analýzy struktury materiálů

V rámci analýzy struktury materiálů bylo zjištěno, že tepelná zpracování jednotlivých materiálů probíhají v pořádku, jelikož struktury neobsahovaly defekty a případná heterogenita není nijak výrazná a neovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Provedeným tepelným zpracováním odpovídá i struktura jednotlivých materiálů. Doplnkové měření tvrdosti potvrdilo správnost provedených tepelných zpracování i u materiálu č. 1, kde nebylo původně jasné, zda nedošlo k oduhličení povrchu materiálu. Měření tvrdostí u materiálu č. 3 poskytlo přehled o průběhu tvrdosti v cementované vrstvě materiálu, přičemž od hloubky 1 mm od povrchu již nedošlo k výraznému poklesu tvrdosti.

V Tab. 3 jsou shrnuty výsledky analýzy struktury, které mají nebo by mohly mít vliv na tvorbu adhezního opotřebení. Materiály v zeleně vyznačených sloupcích vykazují v kombinaci s referenčním mazivem bezproblémový provoz, tzn. že i při absenci ZnNi povlaku na materiálu č. 4 u těchto materiálů nedochází ke vzniku adhezního opotřebení. Při kombinaci materiálů v červených sloupcích se naopak adhezní opotřebení na kontaktních plochách vyskytuje.

Tab. 3 Výsledky analýzy struktury materiálů

	Teorie	Praxe				
		Komponenty			Rail	
		Mat.1	Mat.2	Mat.3	Mat.4	Mat.4+Zn Ni
Struktura	Martenzit – ↓ adheze	Popuštěný martenzit	Martenzit	Martenzit	Ferit-perlit	Ferit-perlit+ZnNi
Krystalická mřížka	HCP – ↓ adheze	BCC	BCC	BCC	BCC	BCC+HCP
Množství uhlíku [hm. %]	-	0,07	0,35	0,17	0,37	0,37
Legující prvky [hm. %]	-	Cr – 16 Ni – 4 Cu – 4 Nb – 0,4	-	Mn – 1,2 Cr – 1	Mn – 1,4 V – 0,15	Mn – 1,4 V – 0,15
Obsah síry [hm. %]	↑ síra – ↓ adheze	0,015	0,015	0,03	0,04	0,04
Tvrdość [%]	↑ tvrdost – ↓ adheze	118	129	212	100	132 (platí pro ZnNi)

Na bezproblémový chod při použití materiálu č. 4 s povlakem ZnNi s kterýmkoliv dalším materiálem má bezpochyby velký vliv hexagonální mřížka ZnNi povlaku, kde platí, že prvky s hexagonální mřížkou mají obecně vysokou odolnost vůči adheznímu opotřebení.[7] K odolnosti vůči adheznímu opotřebení u cementovaného materiálu č. 3 přispívá vysoká tvrdost a martenzitická struktura na povrchu tohoto materiálu. Dle teorie oba tyto aspekty snižují náchylnost k tvorbě adhezního opotřebení. Martenzitická struktura materiálu č. 2 je velmi podobná struktuře materiálu č. 3 a v odolnosti vůči adheznímu opotřebení hraje pravděpodobně největší roli. Oba materiály také obsahují výrazně větší obsah uhlíku než materiál č. 1, u kterého se problém s adhezí objevuje, což může být další důležitý faktor. Oproti tomu materiál č. 2 nemá tak velkou tvrdost jako v případě cementační oceli a neobsahuje ani žádné legující prvky.

Protože materiál č. 4 vykazuje problém s adhezí pouze při kombinaci s materiálem č. 1 a s ostatními je jeho fungování v pořádku, zhodnocení se bude soustředit na materiál č. 1. Zušlechtný materiál č. 1 má popuštěnou martenzitickou strukturu, která se liší od struktur zbylých dvou materiálů komponent. Rovněž obsahuje výrazně menší množství uhlíku, má nejnižší tvrdost a největší množství legujících prvků. Podle teorie tvorbu adhezního opotřebení snižuje i přítomnost síry, která je v materiálu č. 1 a 2 obsažena v nejmenším množství oproti

zbylým zkoumaným materiálům. Ovšem rozdíl v obsahu síry mezi materiály není výrazný a ve všech případech je obsah síry malý a na vznik adhezního opotřebení pravděpodobně nebude mít velký vliv. Navíc je síra v ocelích nežádoucí, jelikož způsobuje jejich křehkost. Její obsah by proto měl být co možná nejmenší. Výsledná náchylnost k adheznímu opotřebení materiálu č. 1 je tedy kombinací všech výše zmíněných faktorů. Z dosažených výsledků navíc vyplývá, že struktura materiálu, obsah uhlíku a případně i přítomnost legur mají větší vliv na tvorbu adhezního opotřebení než samotná tvrdost materiálu. Který faktor má největší vliv by však vyžadovalo podrobnější zkoumání a další zkoušky.

Pro správnou funkci vysokotlakého těsnění pomocí zákusné hrany je důležité, aby měl materiál railu nižší tvrdost než materiál komponenty. Protože materiál č. 4 má převážně feriticko-perlitickou strukturu, která obecně dosahuje nižších hodnot tvrdostí než martenzitické struktury, pak struktura tohoto materiálu sama o sobě nasvědčuje tomu, že tato podmínka pro správnou funkci systému je splněna.

Vyřešení problému s adhezním opotřebením změnou materiálu je možné, jedná se však o poměrně komplikovaný problém, který by byl řešitelný volbou materiálové dvojice, která adhezní spojení netvoří. V tomto případě by se jako jedna z možností nabízela kombinace materiálu railu s materiálem a odpovídajícím tepelným zpracováním, které je použito u komponenty PLV. Tato komponenta totiž vykazuje bezproblémový chod za všech okolností.

4 Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na rešerši vzniku adhezního opotřebení a porovnání této teorie s doposud provedenými analýzami ve smyslu toho, zda je pozorované chování v souladu s teoretickými poznatky. Z doposud známých výsledků lze potvrdit, že provedené zkoušky se s teorií o adhezi shodují. Z informací získaných během vypracovávání rešerše a na základě provedených experimentů a analýzy dostupných dat bylo zjištěno, že adhezní opotřebení mezi komponentou a vysokotlakým zásobníkem závisí na velkém množství faktorů. Některé faktory nesouvisí přímo s druhem samotného materiálu jako např. velikost přitlačné síly, rychlost šroubování nebo přítomnost maziva. Z vlivů, které se pak dají ovlivnit změnou materiálu hraje významnou roli tvrdost účastnících se materiálů, jejich krystalická mřížka, struktura a přesné složení materiálu.

Provedené materiálové analýzy a další výzkum by mohly v budoucnu pomoci nastavit pravidla volby materiálově kompatibilních dvojic i bez použití ZnNi povlaku nebo by mohlo dojít k okamžité identifikaci případného rizika, které by se vyřešilo jiným způsobem než volbou vhodného materiálu. Tento postup je možné uplatnit především u nově se vyvíjejících platforem, jelikož u stávajících produktů se momentálně vyplatí více jiné řešení, a to volba vhodných lubrikantů, které umí adhezi velmi dobře potlačit. Hlavním důvodem, proč se jedná o vhodnější řešení, je kvůli sdílení komponent jako je RPS mezi různými produkty a pro různá paliva, kde by změna RPS mohla ovlivnit design a životnost jiných produktů, což je momentálně nechtěné. Vývoj nového materiálu pro RPS v kombinaci s Common railem rovněž není žádoucí kvůli současnému životnímu cyklu produktu, managementu rozdílných komponent v sériové výrobě a nákladů spojených s náročnou validací komponenty, přičemž materiál by ovlivnil všechny funkce komponenty.

Pokud se pominou netechnické aspekty, plyne z materiálové analýzy komponent závěr, že by se další výzkum mohl zaměřit na analýzu sensitivity množství uhlíku v materiálu v blízkosti kontaktní plochy. Tato analýza by pak mohla dát jednoznačnou informaci o tom, od kdy tato dosedací plocha začne plnit požadavek produktu a kdy je množství uhlíku v materiálu stále nedostatečné a hrozí riziko adhezního opotřebení a následného úniku paliva.

V případě nerezových ocelí může být vyšší procento uhlíku nežádoucí s ohledem na tvorbu karbidů uhlíku a chromu a s tím spojené lokální snížení podílu chromu ve struktuře a následná koroze. Jelikož se však nerezové oceli řadí mezi vysoce legované materiály, stál by za podrobnější analýzu spíše vliv různých legujících prvků na adhezní opotřebení.

5 Použité informační zdroje

- [1] Spalovací motory – zážehové versus vznětové motory – ČEKUJVEDU.CZ. *ČEKUJVEDU.CZ – O vědě a inovacích pro mladé lidi* [online]. Copyright © 2019 Výzkumný ústav pro podnikání a inovace, z.ú. při Hospodářské komoře ČR [cit. 14.02.2022]. Dostupné z: <http://cekujvedu.cz/nove-objevy/spalovaci-motory-zazehove-versus-vznetove-motory/>
- [2] LANDHÄUSSER, Felix. *Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory*. Praha: Robert Bosch, 2005. Technické vzdělávání. ISBN 80-903-1327-2.
- [3] MOLLENHAUER, Klaus; TSCHÖKE, Helmut (ed.). *Handbook of diesel engines*. Berlin: Springer, 2010.
- [4] Jan Z., Ždánský B. : *Automobily 4: Příslušenství*; Druhé vydání, Brno 2003
- [5] Interní materiály firmy Bosch Diesel s.r.o.
- [6] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. Řada strojírenské literatury.
- [7] STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 2nd edition. Boston: Butterworth, c2001. ISBN 07-506-7304-4.
- [8] UW Departments Web Server. *UW Departments Web Server* [online]. Copyright © 2010 University of Washington [cit. 15.02.2022]. Dostupné z: <http://www.depts.washington.edu/nanolab/ChemE554/Summaries%20ChemE%20554/Introduction%20Tribology.htm>
- [9] Lubricants | Free Full-Text | Energy-Based Modelling of Adhesive Wear in the Mixed Lubrication Regime. *MDPI - Publisher of Open Access Journals* [online]. Copyright © 1996 [cit. 22.04.2022]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4442/8/2/16>
- [10] Stribeck Curve. *Re-data Solutions* [online]. Dostupné z: <https://www.re-data.eu/blogs/nieuws-tribologie/stribeck-curve/>

6 Seznam použitých zkratk

apod. – a podobně

RPS – snímač tlaku

PCV – regulační tlakový ventil

PLV – omezovací tlakový ventil

FCC – kubická plošně středěná krystalická mřížka

HCP – šesterečná krystalická mřížka

HFR – kovaný rail

LWR – svařovaný rail

FCC – face-centered cubic

HCP – hexagonal close-packed

BCC – body-centered cubic

tzn. – to znamená

HBW – tvrdost dle Brinella

HV1 – tvrdost dle Vikrese