



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## HODNOCENÍ ADHEZIVNÍ PEVNOSTI ZNNI POVLAKU SVAŘOVANÉHO RAILU

LASER WELDED RAIL ZNNI COATING ADHESIVE STRENGTH EVALUATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Flieger

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Ramík

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

|                   |  |
|-------------------|--|
| Ústav:            | Ústav automobilního a dopravního inženýrství |
| Student:          | <b>Vít Flieger</b>                           |
| Studijní program: | Strojírenství                                |
| Studijní obor:    | Stavba strojů a zařízení                     |
| Vedoucí práce:    | <b>Ing. Pavel Ramík</b>                      |
| Akademický rok:   | 2016/17                                      |

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

## **Hodnocení adhezivní pevnosti ZnNi povlaku svařovaného railu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Náplní práce je návrh metodiky hodnocení adhezivní pevnosti ZnNi povlaku svařovaného railu (LWR), její ověření a zhodnocení.

### **Cíle bakalářské práce:**

Zpracovat rešerši problematiky konstrukce laserově svařovaných railů vstřikovacího systému Common Rail se zaměřením na ochranu jejich povrchů a možnosti hodnocení jejich adhezivní pevnosti.

Zpracovat požadavky na korozivní odolnost LWR a faktory ovlivňující adhezivní pevnost ZnNi povlaku.

Navrhnout metody pro hodnocení adhezivní pevnosti ZnNi povlaků LWR.

Provést ověření zvolené metody a navrhnete specifikaci zkoušek adhezivní pevnosti,

Provést zhodnocení zvolené metody a dosažených výsledků.

### **Seznam doporučené literatury:**

BILLITER, Jean. Galvanotechnik. Springer-Verlag Wien: Springer, 2014. 442 s. ISBN 3709131162.

HOFMANN, Hansgeorg a SPINDLER, Jürgen. Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik. München: Hanser, 2010. 284 s. ISBN 978-3-446-42378-7.

KANANI, Nasser. Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice. Oxford: Elsevier, 2004. 354 s. ISBN 1856174514.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je navrhnutí a otestování metod pro zkoušení adhezivní pevnosti povlaku ZnNi na svařovaném railu. V jednotlivých částech je stručně popsána funkce Common-Rail systému se zaměřením na vysokotlaký zásobník – rail. Dále je uvedeno několik metod pro zkoušení adhezivní pevnosti, z nichž jsou vybrány tři metody pro testování na railu. V experimentální části jsou popsány výsledky těchto testů spolu s možnými modifikacemi pro dosažení lepších výsledků. V poslední řadě je vybrána metoda s nejlepšími výsledky a je pro ni sestavena návrhová specifikace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

LWR, Common rail systém, adhezivní pevnost, Bosch Diesel

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is drafting and testing of methods for evaluation of adhesive strength ZnNi coating on laser welded rail. In individual parts is described function of common rail system focusing on high pressure tray – rail. Then are described several methods for evaluation of adhesive strength. Theree methods are selected to testing on rail. The experimental part describe the results of this tests and modifications for better results. In the last is chosen one method with best results and is complied draft of specification for this method.

## KEYWORDS

LWR, Common rail system, adhesive strength, Bosch Diesel

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

FLIEGER, V. *Hodnocení adhezivní pevnosti ZnNi povlaku svařovaného railu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Ramík.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Ramíka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Vít Flieger

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Ramíkovi za cenné rady a připomínky při vedení mé bakalářské práce. Další mé díky patří firmě Bosch Diesel s.r.o., konkrétně všem mým kolegům z oddělení ERR za poskytnutí veškerých materiálů a rad.

## OBSAH

|  |    |
|--|----|
| Úvod .....                                     | 10 |
| 1 Common Rail systém .....                     | 11 |
| 1.1 Historie.....                              | 11 |
| 1.2 Popis funkce.....                          | 11 |
| 1.3 Hlavní části .....                         | 12 |
| 1.3.1 Palivová nádrž .....                     | 12 |
| 1.3.2 Podávací čerpadlo.....                   | 12 |
| 1.3.3 Palivový filtr.....                      | 14 |
| 1.3.4 Vysokotlaké čerpadlo .....               | 14 |
| 1.3.5 Vstřikovač.....                          | 15 |
| 1.3.6 Vysokotlaký zásobník (Rail).....         | 15 |
| 2 ZnNi povlak na LWR .....                     | 17 |
| 2.1 Požadavky na protikorozní ochranu LWR..... | 17 |
| 2.1.1 Vliv teploty.....                        | 17 |
| 2.1.2 Vliv vibrací.....                        | 18 |
| 2.1.3 Chemické vlivy.....                      | 20 |
| 2.2 Volba galvanické vrstvy .....              | 22 |
| 2.3 Proces galvanického pokovení ZnNi .....    | 24 |
| 3 Použitelné testovací metody .....            | 27 |
| 3.1 Odtrhávací zkouška.....                    | 27 |
| 3.2 Vrypová zkouška .....                      | 28 |
| 3.3 Vnikací zkouška.....                       | 28 |
| 3.4 Mřížková zkouška.....                      | 29 |
| 3.5 Zkouška tepelným rázem .....               | 29 |
| 3.6 Zkouška pájením.....                       | 29 |
| 3.7 Zkouška ohybem.....                        | 30 |
| 3.8 Volba testovacích metod.....               | 31 |
| 4 Experimentální část .....                    | 32 |
| 4.1 Vnikací zkouška.....                       | 32 |
| 4.1.1 Metoda Rockwell.....                     | 32 |
| 4.1.2 Metoda Brinell.....                      | 33 |
| 4.2 Odtrhávací zkouška.....                    | 36 |
| 4.3 Mřížková zkouška.....                      | 39 |
| Závěr.....                                     | 42 |
| Použité informační zdroje.....                 | 43 |

---

|  |    |
|--|----|
| Seznam použitých zkratek a symbolů ..... | 45 |
| Seznam příloh .....                      | 46 |

## ÚVOD

Když v roce 1993 přišla první norma limitující hodnoty škodlivých látek ve výfukových plynech EURO I, bylo všem automobilovým konstruktérům jasné, že je zapotřebí investovat do vývoje vstřikovacích systémů, a tak v roce 1997 vyjely první osobní automobily opatřené systémem common rail. Po 17 letech, když se v roce 2014 stala platnou norma EURO VI, byl už tento systém natolik zdokonalený, že byl schopen plnit její požadavky už s předstihem. Dnes je tento systém nejpoužívanějším vstřikovacím systémem pro osobní i nákladní automobily.

V dnešní době, kdy je kladen stále větší důraz na životnost automobilů a jejich nájezd se mnohdy počítá v milionech kilometrů, je zapotřebí klást také větší důraz na životnost jednotlivých systémů v automobilu. Vyjimkou není ani common rail systém. Podobně jako samotný motor, jsou i prvky common rail systému během své životnosti vystaveny mnoha nepříznivým vlivům, které by časem mohly ovlivnit jejich funkci. Proto je nutné je proti těmto vlivům chránit příslušnými prostředky.

Tato bakalářská práce se zabývá protikorozní ochranou laserově svařovaného railu (angl. zkratka LWR), jenž je součástí systému common rail. Různé typy těchto railů jsou chráněny proti korozi různými povlaky, z nichž jeden je povlak ZnNi. Cílem této práce je testování adhezivní pevnosti právě povlaku ZnNi.

Má být navrženo několik metod pro testování adhezivní pevnosti, a z nich vybráno několik vhodných k použití na LWR. Pro metodu s nejlepšími výsledky má být sestaven návrh specifikace, který by popsal proces testování.

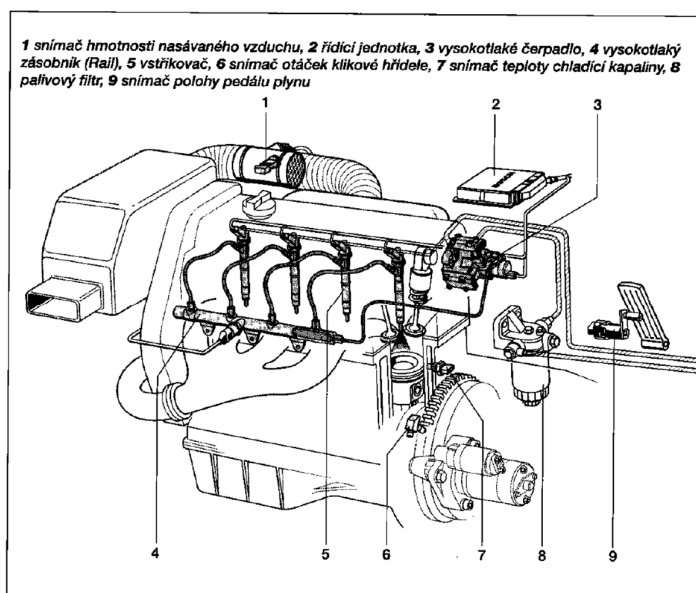
# 1 COMMON RAIL SYSTÉM

## 1.1 HISTORIE

První prototyp Common Rail systému byl vyvinut Švýcarem Robertem Huberem již v 60. letech dvacátého století. Vývoj poté pokračoval na Spolkové vysoké technické škole v Curychu. Systém Common Rail byl původně vyvíjen pro motory nákladních automobilů, případně pro motory lokomotiv. První Common Rail systém použitý v automobilu nesl označení ECD-U2 a byl vyvinut japonskou firmou Denso Corporation. Tento systém byl použit v nákladním automobilu Hino Ranger. Další vývoj Common Rail systému pokračoval ve firmách Magneti Marelli, Centro Ricerche Fiat a Elasis. Poté firma Robert Bosch GmbH zakoupila všechny patenty na tento systém a pokračovala ve vývoji systému pro sériovou výrobu. V roce 1997 vyjely první osobní automobily osazené motorem se vstřikovacím systémem Common Rail, byly to Alfa Romeo 156 2.4 JTD a Mercedes-Benz W202. Od té doby prošel systém řadou úprav a dnes se běžně používá v motorech nákladních i osobních automobilů. [4] [12]

## 1.2 POPIS FUNKCE

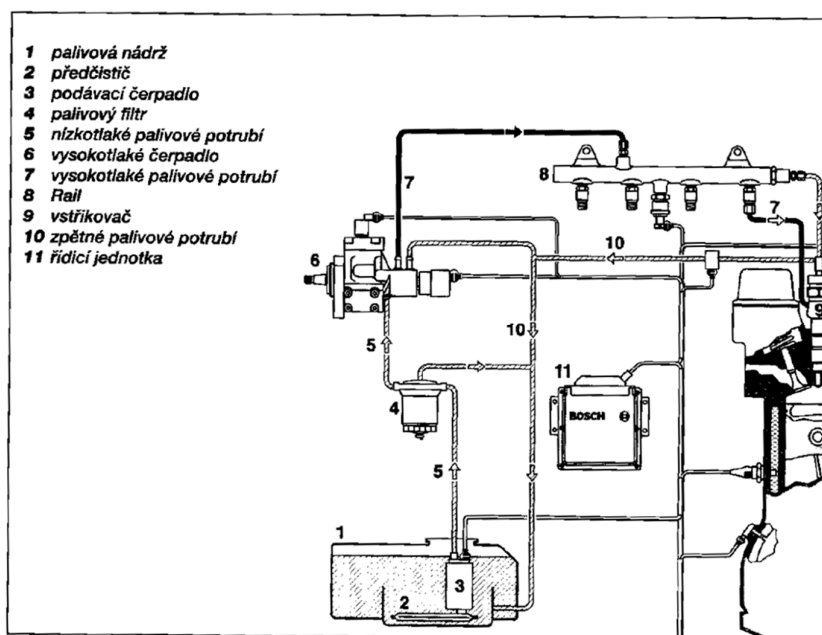
Systém Common Rail je oddělené vytváření tlaku a vstřikování. Palivo se připravuje pro vstřik ve vysokotlakém zásobníku zvaném rail. V tomto zásobníku je tlak paliva vytvářen nezávisle na otáčkách motoru a na vstřikovací dávce. Vstřikovací dávka je určena polohou plynového pedálu a vstřikovací tlak spolu s okamžikem vstřiku je vypočten řídicí jednotkou na základě údajů ze snímačů. Samotný vstřik je poté realizován vstřikovačem každého válce pomocí řízeného magnetického ventilu. Systém dokáže během jednoho vstřikovacího cyklu provést úvodní, hlavní a následný vstřik. Díky tomu dokáže systém Common Rail výrazně snížit emise. [1] [3]



Obrázek 1 Schéma vstřikovacího systému Common Rail [3]

### 1.3 HLAVNÍ ČÁSTI

Systém můžeme rozdělit na nízkotlakou a vysokotlakou část. Nízkotlaká část umožňuje uskladnění paliva, jeho filtrování a dodávání do vysokotlaké části. Do nízkotlaké části řadíme palivovou nádrž, předčistič, podávací čerpadlo, palivový filtr a nízkotlaké palivové potrubí. Vysokotlaká část umožňuje vytvoření vstřikovacího tlaku a dodávku paliva do jednotlivých válců. Do vysokotlaké části řadíme vysokotlaké čerpadlo, vysokotlaký zásobník (rail) a vstřikovače. [3]



Obrázek 2 Hlavní části Common Rail systému [3]

#### 1.3.1 PALIVOVÁ NÁDRŽ

Palivová nádrž představuje zásobník paliva pro podávací čerpadlo. Musí být korozi odolná a těsná i při dvojnásobku provozního přetlaku. Vznikající přetlak musí unikat bezpečnostním ventilem. Palivo nesmí z nádrže vytékat a to ani při jízdě zatáčkou nebo při nárazech. Dále musí být umístěna tak, aby při nehodě nedošlo ke vznícení paliva. [1] [3]

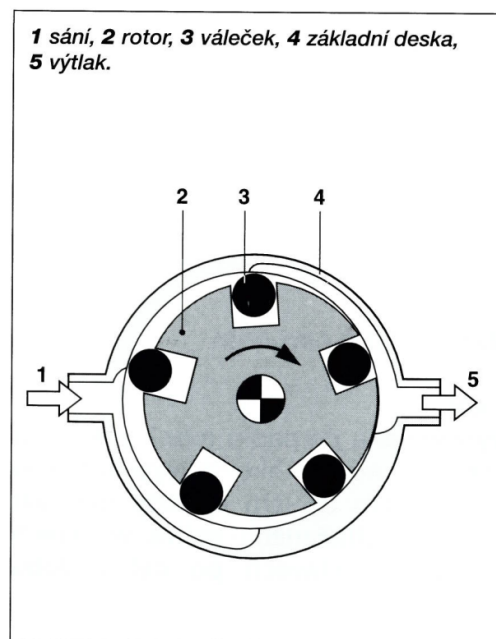
#### 1.3.2 PODÁVACÍ ČERPADLO

Podávací čerpadlo zásobuje vysokotlaké čerpadlo dostatkem paliva a potřebným tlakem v každém provozním stavu. Používají se dva druhy podávacích čerpadel: elektrické válečkové a mechanicky poháněné zubové čerpadlo.

##### ELEKTRICKÉ VÁLEČKOVÉ ČERPADLO

Tento druh čerpadla se používá pouze u osobních a lehkých užitkových vozidel. Kromě zásobování vysokotlakého čerpadla palivem má navíc za úkol přerušit dodávku paliva v případě potřeby. Čerpadlo běží nepřetržitě bez ohledu na otáčky motoru. Palivo tedy dodává kontinuálně, přebytečné palivo je odváděno přepadovým ventilem zpět do nádrže. Při zapnutí zapalování a stojícím motoru znemožní bezpečnostní obvod dodávku paliva. Čerpadlo může být umístěno přímo do nádrže nebo do palivového potrubí mezi nádrží a palivovým filtrem. Čerpadlo sestává z excentricky uspořádané komory. V této komoře rotuje

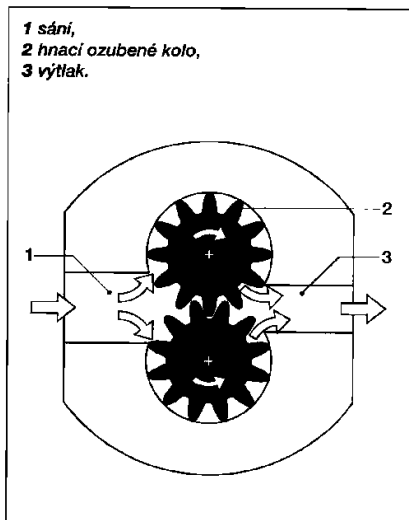
drážkový kotouč poháněný elektromotorem, v jehož drážkách jsou umístěny volně vedené válečky. Tyto válečky působí jako rotující těsnění. Mezi každými válečky vzniká oddělená komora, která se kontinuálně zmenšuje, čímž vzniká čerpací účinek. [3]



Obrázek 3 Schéma elektrického válečkového čerpadla [3]

#### ZUBOVÉ ČERPADLO

Zubové palivové čerpadlo se používá u osobních, užitkových a zemědělských vozidel. Většinou bývá integrováno do vysokotlakého čerpadla a má s ním společný náhon. Může být ale i přímo na motoru s vlastním pohonem. Pohon je realizován ozubenými koly nebo ozubeným řemenem. Hlavními částmi zubového čerpadla jsou dvě ozubená kola, která jsou v záběru, viz Obrázek 4. Průměry hlavových kružnic obou kol těsní mezi sací a výtlačnou stranou. Čerpacího účinku je dosaženo unášením paliva v zubových mezerách obou kol. Množství dopravovaného paliva je přibližně úměrné otáčkám motoru, musí být tedy prováděna regulace škrcením na sací straně nebo obtokovým ventilem na straně výtlačné. [3]



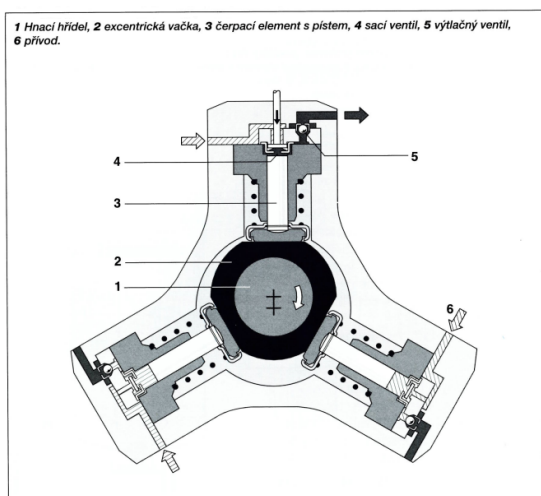
Obrázek 4 Princip funkce zubového čerpadla [3]

### 1.3.3 PALIVOVÝ FILTR

Palivový filtr je umístěn mezi podávací a vysokotlaké čerpadlo. Jeho účel je zachycení nečistot v palivu a odloučení vody z paliva. Voda musí být z palivového filtru odpouštěna v příslušných intervalech. [3]

### 1.3.4 VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO

Úkolem vysokotlakého čerpadla je za všech provozních stavů dodávat dostatek stlačeného paliva a to po celou životnost motoru. Vysokotlaké čerpadlo vytváří tlak pro rail. Palivo tedy nemusí být stlačeno pro každý vstřik zvlášť. Umístění vysokotlakého čerpadla je stejné jako u rotačního vstřikovacího čerpadla a pohon je realizován ozubeným kolem, řetězem nebo ozubeným řemenem. Mazáno je samotným palivem. Stlačování paliva probíhá pomocí tří radiálně uspořádaných pístů vzájemně přesazených o  $120^\circ$ , kterými hýbe hnací hřídel s excentrickou vačkou. Pro nákladní automobily může být čerpadlo konstruováno jako dvoupístové řadové, tento typ je mazaný olejem. V současnosti existuje několik generací vysokotlakých čerpadel odlišujících se jak konstrukcí, tak systémovým tlakem. [1] [3]



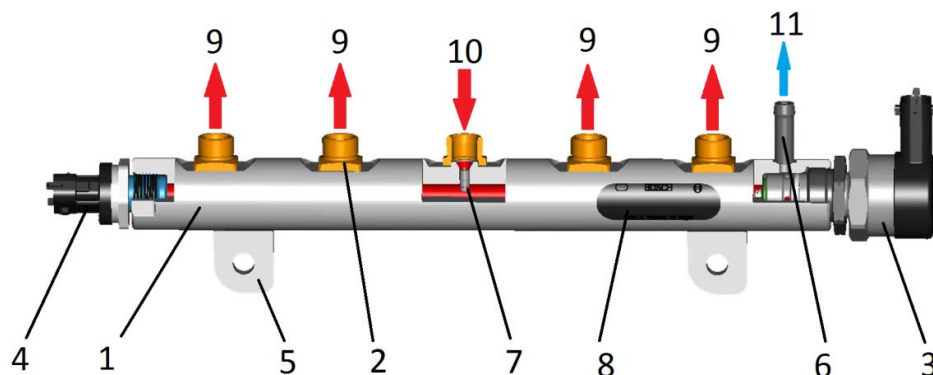
Obrázek 5 Schéma vysokotlakého čerpadla [3]

### 1.3.5 VSTŘIKOVAČ

Vstříkovač je spojen s vysokotlakým zásobníkem pomocí vysokotlakého palivového potrubí. Jeho úkolem je vstříknout přesné množství paliva do válce spalovacího motoru. Dále je vstříkovačem nastavován počátek vstříku, který je důležitý pro snížení emisí NO<sub>x</sub>. Odchýlení počátku vstříku o pouhé 2° může vést ke zvýšení teploty výfuku až o 20°C, proto musí vstříkovač pracovat velmi přesně. Součástí vstříkovače systému Common Rail je také otvorová tryska, která určuje tvar a počet paprsků, zajišťuje těsnění vůči spalovacímu prostoru a podílí se na době vstříku. Podle způsobu otevírání otvorové trysky dělíme vstříkovače na elektromagnetické a piezoelektrické. Piezoelektrické vstříkovače jsou stále používanější díky jejich schopnosti vícenásobného vstříku s pružnými prodlevami. [1] [3]

### 1.3.6 VYSOKOTLAKÝ ZÁSObNÍK (RAIL)

Vysokotlaký zásobník funguje jako akumulátor stlačeného paliva, navíc svým objemem tlumí tlakové kmity vzniklé čerpáním paliva a jeho vstříkáním. Tím zůstává při otevření vstříkovače vstříkovací tlak konstantní. U některých typů se vyskytují i takzvané tlumiče, které jsou vlisované do vývodů ke vstříkovačům a mají za úkol tlumit tlakové kmity. Vnitřní objem vysokotlakého zásobníku musí být dost velký na to, aby umožnil tlumení tlakových kmitů, ale na druhé straně dost malý pro umožnění prudkého nárůstu tlaku. Hodnoty tlaku závisí na otáčkách motoru a na zatížení. Rail je osazen snímačem tlaku, pojistným ventilem a regulačním ventilem tlaku. Dále je k railu připojeno potrubí pro přívod paliva ke vstříkovačům a potrubí pro zpětný odvod přebytečného paliva do nádrže. Samotný rail má tvar trubky, podle způsobu výroby se dělí na kované a svařovaný. [3]



Obrázek 6 Konstrukce LWR: 1 - těleso LWR, 2 - vysokotlaká přípojka, 3 - regulační ventil tlaku, 4 - snímač tlaku, 5 - úchyt pro připojení k motoru, 6 - nízkotlaká přípojka, 7 - tlumič tlakových kmitů, 8 - označení, 9 - palivo pro vstřikovače, 10 - palivo od čerpadla, 11 – přebytečné palivo [2]

#### REGULAČNÍ VENTIL TLAKU

Regulační ventil nastavuje a drží tlak v railu závisle na zatížení motoru. Při příliš vysokém tlaku regulační ventil otevírá a odvádí část paliva zpětným potrubím zpět do nádrže, při malém tlaku zavírá a utěšňuje vysokotlakou část vůči nízkotlaké. Pokud není regulátor aktivován, těsní pouze silou pružiny, která je navržena tak, aby udržela tlak v railu kolem 100 barů. Při aktivaci regulátoru se k síle pružiny přidává síla elektromagnetu, regulátor tak těsní větší silou a nastavuje tlak v railu na vyšší hodnotu. [3] [6]

#### POJISTNÝ VENTIL

Úkolem pojistného ventilu je chránit systém před destrukcí způsobenou velkým vzrůstem tlaku. Při překročení maximálního tlaku ventil otevře a vypustí natlakované palivo do zpětného potrubí. Maximální tlak je dán pouze tuhostí pružiny, ventil je tedy čistě mechanický. [3] [4]

#### SNÍMAČ TLAKU

Pro přesné nastavení tlaku v railu je nutné, aby snímač tlaku měřil tlak s vyhovující přesností a v odpovídajícím čase. Používá se snímač tlaku se snímací membránou. Tato membrána je vybavena polovodičovým prvkem, který při deformaci membrány vytváří elektrický signál. Tento signál je poté posílán řídicí jednotce. [3]

Z celého Common Rail systému je rail nejviditelnější komponentou a častokrát bývá designovým prvkem motoru. Navíc těleso railu není chráněné ničím jiným než kapotou, popřípadě krytem motoru. Proto je zapotřebí, aby byl na vysokotlakém zásobníku takový ochranný povlak, který vyhoví všem požadavkům na protikorozi odolnost a vydržel na railu po celou dobu životnosti motoru při uchování dobrého vzhledu.

## 2 ZNĚNÍ POVLAK NA LWR

### 2.1 POŽADAVKY NA PROTIKOROZNÍ OCHRANU LWR

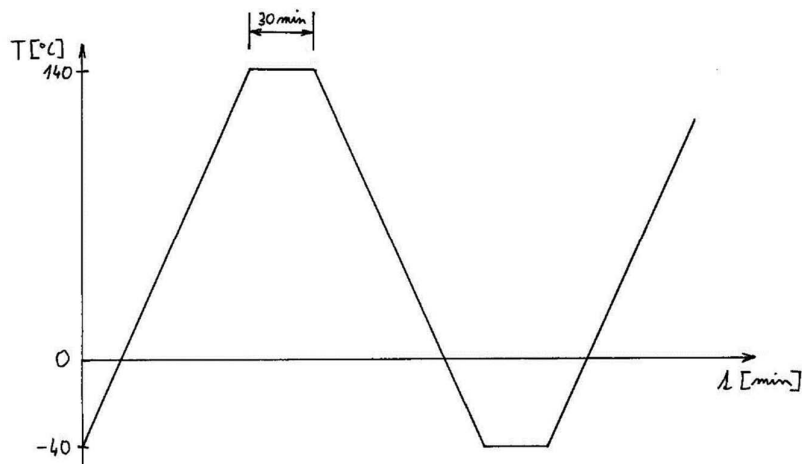
Při běžném provozu automobilu je motor a tím i všechny jeho komponenty včetně vstřikovacího systému vystaven celé řadě nepříznivých vlivů. Tyto nepříznivé účinky jsou způsobeny jak prostředím, ve kterém motor pracuje, tak i samotným během motoru. Mezi nejdůležitější nepříznivé účinky působící na motor patří vliv teploty, vliv vibrací, chemické vlivy a vliv vlhkosti vyskytující se v atmosféře. Aby bylo možné zohlednit tyto vlivy při návrhu jednotlivých komponent a jejich protikorozních ochranných povlaků, je třeba provést řadu testů simulujících běžný provoz automobilu, v nichž musí protikorozní ochrana LWR obstát.

#### 2.1.1 VLIV TEPLoty

Pro testování vlivu teploty je v první řadě třeba zohlednit různá podnebí, ve kterých se automobil může pohybovat. Komponenty motoru jsou navrhovány stejně, nezávisle na tom, ve kterých klimatických podmínkách se budou pohybovat. Je tedy třeba vzít v potaz extrémní podmínky jednotlivých zemí. Například v Rusku se teploty pohybují běžně až kolem  $-40^{\circ}\text{C}$ , v Africe kolem  $+40^{\circ}\text{C}$ . Dále se při běžném provozu motor automobilu zahřívá a působí tak vysokou teplotou na komponenty v jeho okolí, v případě vysokotlakého zásobníku to může být až kolem  $140^{\circ}\text{C}$ . Vlivem všech těchto teplotních extrémů a času, po který různé teploty na jednotlivé komponenty působí, dochází ke snížení napětí v předepjatých spojích, tento jev se nazývá relaxace napětí. Na vysokotlakých komponentech může relaxace napětí způsobit netěsnost šroubových spojů a tím i snížení tlaku v systému. Působení těchto teplot a jejich změna způsobuje stárnutí povlaku LWR a vznik smykových napětí v povrchové vrstvě povlaku přispívajících ke snížení adhezivní přilnavosti. Pro testování vlivu teploty se používá test klimatického zatížení (ISO 16750-4) a Thermal shock test (ISO 2819).

#### TEST KLIMATICKÉHO ZATÍŽENÍ (ISO 16750-4):

Těleso rail s jeho komponenty se zahřívá a ochlazuje v rozsahu hodnot  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $140^{\circ}\text{C}$ , přičemž každý z extrémů je držen po určitý čas viz Obrázek 7, proces zahřátí a ochlazení se opakuje 50x. Dále je rail vystaven  $10^6$  pulsům systémového tlaku. Po skončení testu musí rail udržet daný minimální tlak paliva. [8]



Obrázek 7 Průběh teplotní zkoušky [2]

#### THERMAL SHOCK TEST (ISO 2819):

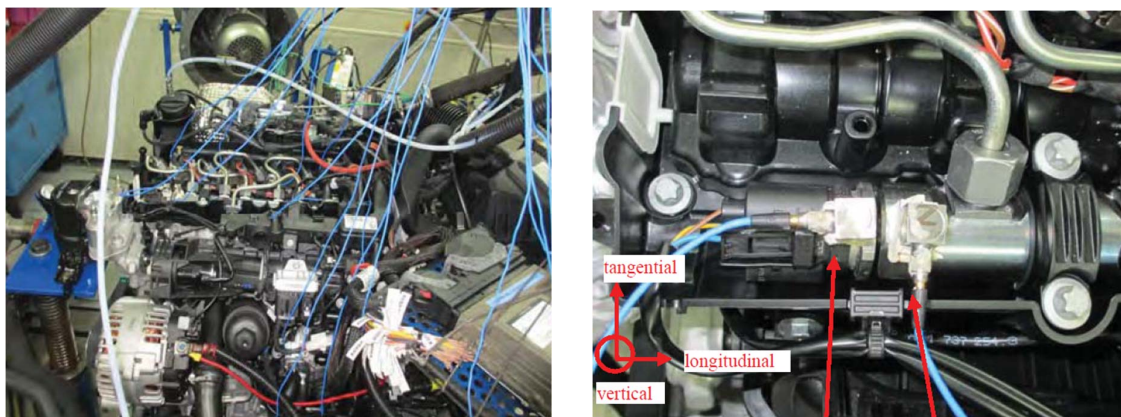
Princip tohoto testu spočívá v rozdílné roztažnosti povlaku a základního materiálu. Test je založen na prudké změně teplot, která způsobí rozdíl ve zvětšení nebo smrštění povlaku vůči základnímu kovu. Tento rozdíl může vést k porušení povlaku.

Průběh testu spočívá v zahřátí railu v peci na teplotu stanovenou normou (pro kombinaci ocel/ZnNi je tato teplota  $300 \pm 10^\circ\text{C}$ ) a následně jeho prudkém ochlazení. Ochlazení probíhá ve vodě při pokojové teplotě. Na povrchu railu nesmí dojít k žádnému poškození povlaku, jako je například výskyt puchýřů nebo odlupování povlaku od základního materiálu. [7]

#### 2.1.2 VLIV VIBRACÍ

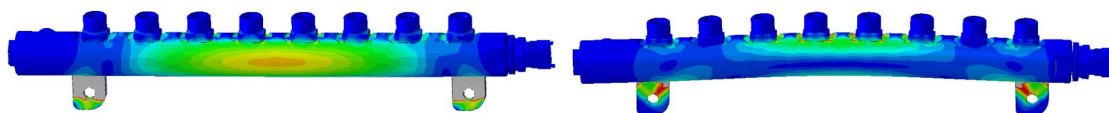
Dalším nepříznivým vlivem působícím na motor a jeho komponenty jsou vibrace. Tyto vibrace vznikají především chodem motoru, kmitání vzniklé nerovností vozovky je utlumeno odpružením a uložením motoru natolik, že je proti kmitání samotného motoru zanedbatelné. Komponenty vstřikovacího systému se mohou vlivem vibrací ohýbat a tím může vzniknout napětí v povrchové vrstvě vedoucí k poškození povlaku.

Ve vibračním testu je tedy nutné simulovat kompletní spektrum otáček motoru a sledovat zatížení komponent po celou dobu testu. Zatížení se během testu sleduje pomocí vibrometrů přilepených přímo na povrch jednotlivých komponent. Maximální povolené zatížení se odvíjí od našroubovaných komponent, protože vydrží menší zatížení než tuhé těleso railu. Hodnota tohoto dovoleného zatížení se pohybuje okolo 40g.



Obrázek 8 Měření vibrací na motoru [2]

Samotný rail je vlivem kmitání ohýbán. Tím, že bývá upevněn k motoru většinou na dvou místech na jeho koncích, největší ohyb vznikne přibližně v jeho polovině. Tímto ohybem vzniká velké namáhání povrchové vrstvy. Protikorozní ochrana LWR musí tomuto namáhání bez problémů odolávat. [2]



Obrázek 9 Kritická místa ohybu LWR [2]

### 2.1.3 CHEMICKÉ VLIVY

Mezi nepříznivé vlivy působící na motor a jeho komponenty patří také vliv chemických látek vyskytujících se v motorovém prostoru. Do motorového prostoru se může dostat celá řada látek z okolních systémů motoru. Mezi tyto látky patří například: palivo, různé druhy olejů a vazelin, brzdová kapalina, kapalina ostříkovačů, kyselina z baterie a mnoho dalších látek. Tyto látky mohou způsobit různá poškození povlaku LWR, v extrémních případech až rozpuštění povlaku.

Samotný rail, jakožto zařízení s elektronickými komponenty se testuje podle normy ISO 16750-5. Tato norma udává seznam látek, které se mají při testu použít, za jaké teploty se mají nanášet, způsob jejich nanášení a dobu jejich působení. Následně se výsledek testu porovnává s normou ISO 16750-1, která udává stupně poškození, nebo s požadavky zákazníka. [2]



Obrázek 10 Těleso railu po testu chemické zátěže [2]

Další látkou, která se může dostat do motorového prostoru, je sůl. Sůl působí velmi nepříznivě na komponenty motoru a jejich protikorozní ochrany. Vliv působení soli se zkouší zkouškou v solné mlze a Cyclic corrosion testem.

#### ZKOUŠKA V SOLNÉ MLZE:

Zkouška v solné mlze se používá hlavně pro svou jednoduchost a možnost použití v laboratoři. Zkouška umožňuje snadné porovnání různých povlaků. Nevýhodou je, že zkouška nezahrnuje většinu vlivů, které na LWR v poli působí, proto slouží spíše jako informace pro zákazníka. Existují tři varianty provedení: zkouška v neutrální solné mlze (metoda NSS), zkouška v okyselené solné mlze (metoda AASS) a zkouška okyselenou solnou mlhou s přísadkou chloridu měďnatého (metoda CASS). Pro testování LWR používáme metodu NSS. Samotná zkouška (podle vnitropodnikové normy) se provádí tak, že se zavěsí těleso railu do solné komory pomocí závěsu z nekovového materiálu. Následně se na těleso railu nechá působit 5% roztok soli o pH 6,5 – 7,2 při teplotě  $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Rozprašování tohoto roztoku se děje pomocí stlačeného vzduchu o tlaku 70 – 170 kPa zbaveného nečistot. V testu rozlišujeme korozi povlaku – bílá koroze (označení K, viz Obrázek 11) a korozi základního kovu – červená koroze (označení Ri, viz Obrázek 12). Vznik bílé koroze představuje pouze estetické poškození povlaku a nemá žádný vliv na korozní odolnost LWR. Červená koroze se začne objevovat až poté, co dojde k prokorodování povlaku a představuje poškození základního materiálu. Jako první nastává bílá koroze, která se vyhodnocuje po 96 hodinách, následuje tvorba červené koroze, která se vyhodnocuje po 144 hodinách. Vyhodnotí se plocha

v procentech, která je napadena korozí a následně se podle tabulky přiřadí stupeň poničení povrchové úpravy. [2]



*Obrázek 11 Bílá koroze na LWR po testu v solné mlze*



*Obrázek 12 Počátek červené koroze na LWR po testu v solné mlze*

#### **CYCLIC CORROSION TEST (CCT):**

Tento test (dle normy SAE J 2334) na rozdíl od zkoušky v solné mlze více simuluje prostředí, ve kterém se motor a jeho komponenty během své životnosti pohybují. Test se skládá ze tří fází, které se opakují v daných časových intervalech.

#### První fáze – vlhčení

- provádí se při 100% relativní vlhkosti a teplotě  $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
- vzorky musí být na pohled mokré
- trvání 6 hodin

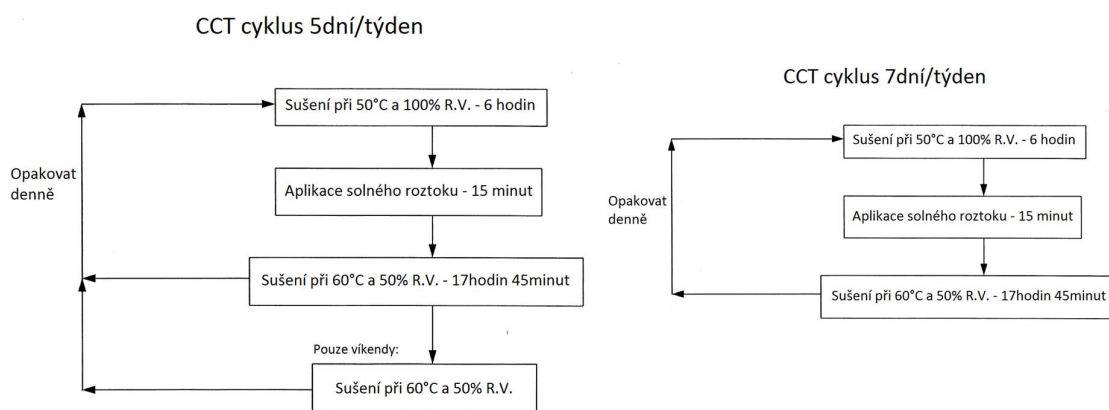
### Druhá fáze – aplikace solného roztoku

- vzorky jsou vystaveny roztoku o složení 0.5% NaCl, 0.1% CaCl<sub>2</sub>, 0.075% NaHCO<sub>3</sub>
- vzorky mohou být v roztoku ponořeny, nebo na ně může být roztok nanášen v podobě mlhy
- trvání 15 minut

### Třetí fáze – sušení

- provádí se při 50% ± 5% relativní vlhkosti a teplotě 60°C ± 2°C
- musí být zajištěna dostatečná cirkulace, aby nedošlo k rozvrstvení teploty
- trvání 17 hodin 45 minut

Po skončení třetí fáze se cyklus opakuje. Průběh testu může být nastaven na automatický nebo manuální provoz, viz Obrázek 13. Běžný test má 60 cyklů. [2]



Obrázek 13 Cykly CCT testu [2]

## 2.2 VOLBA GALVANICKÉ VRSTVY

S ohledem na všechny protikorozní požadavky vyvstává otázka, jestli je povlak ZnNi na LWR vhodnou volbou. Ve firmě Bosch existuje řada povlaků, které se běžně používají, a které by bylo teoreticky možné použít i na LWR. Mezi tyto povlaky patří kadmium, chrom, zinek, Zn-Ni a kataforetický povlak KTL. Hlavními faktory při porovnání těchto materiálů jsou chemická a korozní odolnost, vliv povlaku na životní prostředí, adhezivní pevnost, vzhled a v neposlední řadě cena povlaku.

Zinkový povlak:

Povlak zinku je hojně používán pro své antikorozi vlastnosti a cenu. Povrch se zinkovým povlakem je chráněn hlavně elektrochemickým postavením železa a zinku, kdy zinek

(elektrodotový potenciál -0.76 V) funguje jako anoda, a železo (elektrodotový potenciál 0.44 V) jako katoda. Díky tomuto postavení je povrch chráněn i v místech porušení povlaku. Korozní odolnost čistého zinku je však poměrně malá (96h v solné mlze). Největší úbytek zinku bývá kolem  $4\div 19\mu\text{m}$  ročně v průmyslovém prostředí. Zinek může být nanášen galvanicky nebo žárově. [9] [2]

Kadmiový povlak:

Kadmiové povlaky mají obdobné vlastnosti jako zinkové. Avšak na rozdíl od zinkových povlaků mají kadmiové povlaky v atmosféře průmyslového prostředí větší úbytek – až kolem  $30\mu\text{m}$ . Hlavní nevýhodou kadmia je toxicita jeho korozních produktů a par, proto se produkty s kadmiovými povlaky nesmějí používat tam, kde by byly vystaveny vysokým teplotám. Jeho použití na LWR tedy nepřichází v úvahu. [9]

Chromový povlak:

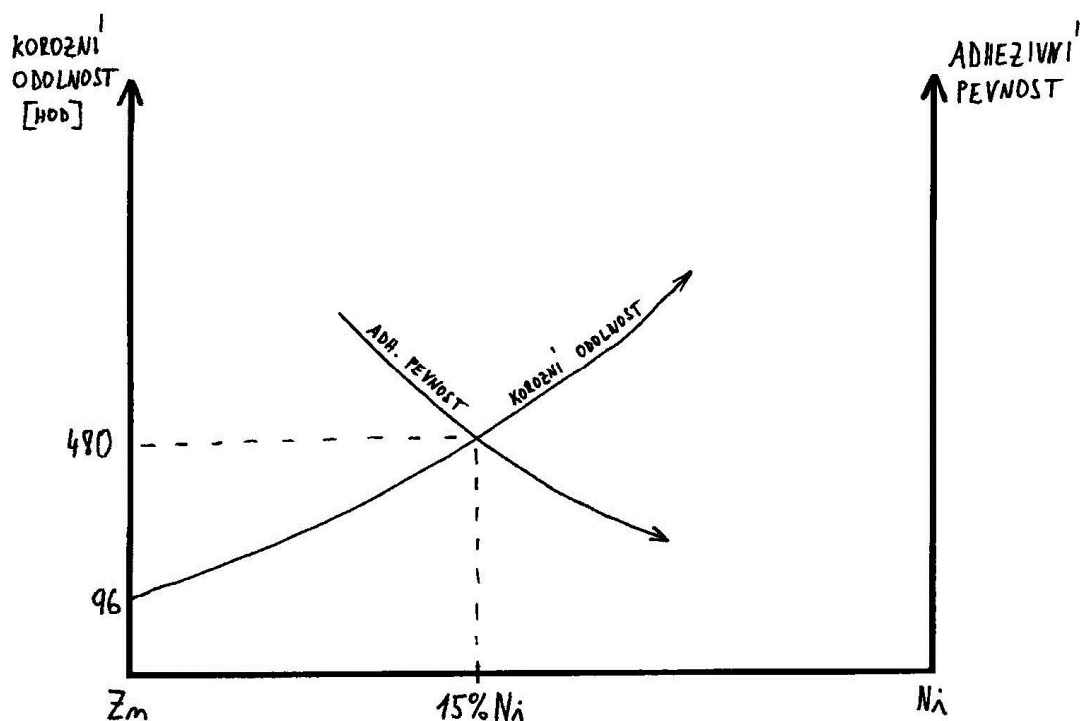
Chromové povlaky lze rozdělit do dvou skupin: dekorativní a tvrdé. Dekorativní povlaky mají velmi malou tloušťku (kolem  $1\div 2\mu\text{m}$ ) a jsou velmi pórovité, tudíž neposkytují téměř žádnou protikorozní ochranu. Oproti tomu tvrdé povlaky s tloušťkou až několik milimetrů se používají pro svou vysokou tvrdost. Používají se například na pístech a pístních kroužcích, dřících ventilů, funkčních plochách měřidel a podobně. Hlavní nevýhodou chromování je výskyt šestimocného chromu  $\text{Cr}^{\text{VI}+}$ , který zvyšuje riziko onemocnění dýchacích cest a pokožky u dělníků pracujících v znečištěném ovzduší. Použití šestimocného chromu je zakázáno evropskou směrnicí. [9] [10]

Kataforetický povlak KTL:

KTL je vysoce ekologický a hospodárný způsob lakování. Může se používat jak základ nebo častěji jako finální povrchová úprava. Používá se hojně v automobilovém průmyslu, ale i pro domácí spotřebiče, elektroniku, nábytek a další. Hlavními výhodami kataforetického povlaku je vysoká adhezivní pevnost, vysoká korozní odolnost (480h v solné mlze) a rovnoměrná tloušťka povlaku (kolem  $15\div 30\mu\text{m}$ ). Hlavní nevýhodou kataforetického povlaku je, že se působením většího smykového a tlakového namáhání odlupuje. KTL tedy nesmí být použit na závitech LWR, což je jeho hlavní nevýhodou. Absence KTL na závitech výrazně snižuje celkovou korozní odolnost LWR. [2] [21]

Zn-Ni povlak:

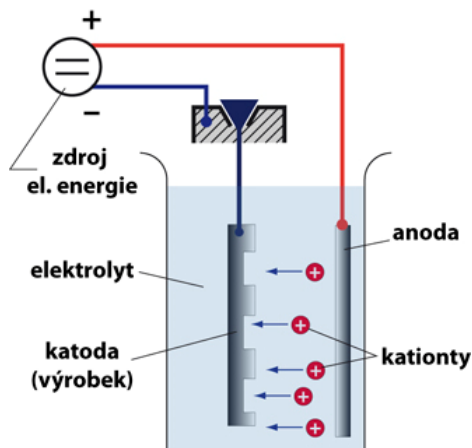
Slitinový povlak Zn-Ni má oproti zinkovému povlaku výrazně vyšší korozní odolnost (480h v solné mlze), což je způsobeno právě obsahem niklu. Přítomnost niklu v povlaku však také způsobuje menší adhezivní pevnost oproti samotnému zinku, viz Obrázek 14. Jako ideální se jeví obsah cca 15% zinku v Zn-Ni povlaku, kdy je podíl zinku dostatečný ke zvýšení korozní odolnosti a adhezivní pevnost snižuje v přijatelné míře. Navzdory výborným antikoročním vlastnostem tohoto povlaku je jeho použití limitováno vysokou nanášecí cenou, avšak pro splnění požadavků na některé komponenty z hlediska korozní odolnosti je Zn-Ni jediným povlakem vyhovujícím požadavkům zákazníků. [2]



Obrázek 14 Schématické znázornění vlivu zinku v Zn-Ni povlaku [2]

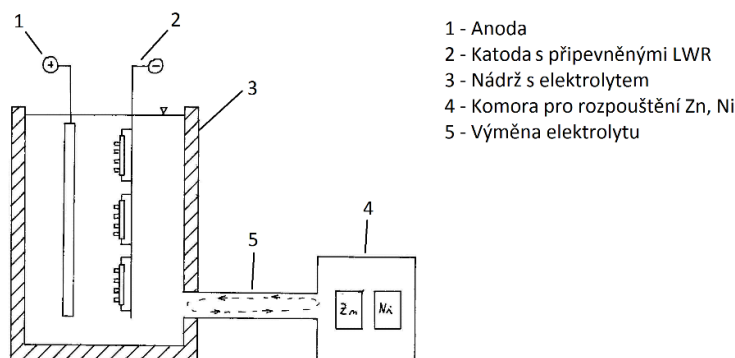
## 2.3 PROCES GALVANICKÉHO POKOVENÍ ZNNI

Proces galvanického pokovování spočívá v přestupu iontů mezi dvěma elektrodami. Pro umožnění přestupu iontů musí být tyto elektrody ponořeny v elektrolytu a připojeny na stejnosměrný proud. Kladnou elektrodu nazýváme anoda, zápornou katoda. Katodou je samotný výrobek, který chceme pokovit. Působením stejnosměrného proudu dochází k uvolňování a transportu iontů k elektrodám. Kladně nabité ionty, které nazýváme kationty, se pohybují směrem k anodě. Záporně nabité ionty, které nazýváme anionty, se naopak pohybují směrem ke katodě. Tímto procesem dochází k pokovení katody materiálem anody. [17]



Obrázek 15 Princip galvanického pokovování [18]

Při pokovování je nutné vzít v potaz to, že se v průběhu odevzdávání aniontů anoda zmenšuje, a tím klesá i počet uvolněných aniontů. Proto se při pokovování LWR používá metoda, kdy se materiál povlaku (konkrétně zinek a nikl) rozpouští v elektrolytu zvlášť v oddělené komoře, a tento elektrolyt je poté dopravován k samotným elektrodám. Tím se zajistí rovnoměrné pokovení. [19]



Obrázek 16 Princip galvanického pokovení LWR

#### FÁZE GALVANICKÉHO POKOVENÍ LWR:

Vlastnosti povlaku, zejména jeho adhezivní pevnost a protikorozní ochrana, závisí na čistotě materiálu, na který je povlak nanášen. Z toho důvodu je nutné povrch materiálu zbavit nečistot a mastnoty, aby nedocházelo k odlupování povlaku. Před pokovením tedy provádíme odmaštění, moření a elektrolytické odmaštění. Špatné provedení těchto operací může vést k vytvoření slabého, špatně ulpívajícího povlaku nebo v extrémním případě i k nevytvoření žádného povlaku.

- **Odmaštění:**  
Mastnota je hlavním důvodem usazování nečistot na povrchu základního materiálu. Při odmašťování je důležitý výběr odmašťovacího přípravku, nejvíce se používají alkalické lázně. Při špatné volbě odmašťovacího přípravku může dojít i ke korozi odmašťovaného materiálu. Teplota při odmašťování je cca 70°C. Po odmaštění následuje oplach ve vodě. [2] [5]
- **Moření:**  
Provádí se pro odstranění okují a produktů vzniklých oxidací povrchové vrstvy materiálu. Moření se provádí v anorganických kyselinách. Při špatné volbě koncentrace kyseliny nebo teploty moření může dojít i k rozpouštění části základního kovu. Teplota při moření je cca 20°C. Po moření následuje oplach ve vodě. [2] [20]
- **Elektrolytické odmaštění:**  
Je to poslední čistící operace před galvanickým pokovením. Před elektrolytickým odmaštěním je povrch znečištěn již pouze velmi tenkými vrstvami mastnot. Tyto mastnoty se uvolňují vlivem vzniku plynů (vodík, kyslík). Po elektrolytickém odmaštění následuje oplach ve vodě.
- **Elektrolytické pokovení –** popsáno výše, následuje oplach ve vodě

- Pasivace:  
Pasivační vrstva je velmi tenká vrstva vzniklá reakcí oxidačních látek s povlakem. Tato vrstva zvyšuje korozní odolnost povlaku a působí také jako ochrana při přepravě a skladování. Jako pasivace se používají chromátové vrstvy, přičemž je zapotřebí se vyhnout šestimocnému chromu  $\text{Cr}^{\text{VI}+}$ , který je klasifikován jako karcinogen. Po pasivaci následuje oplach vodou a sušení při 60-100°C [9]

Nesprávné provedení galvanického pokovení spojené s působením všech vlivů, kterým je rail v motoru vystaven, může vést k narušení adhezivní pevnosti jeho povlaku. Toto narušení by mohlo výrazně zhoršit antikorozi ochranu railu a tím způsobit poškození vzhledu, v kritickém případě až ovlivnění celé funkce vysokotlakého zásobníku. Proto je zapotřebí nalézt metodu, která by otestovala adhezivní pevnost ZnNi povlaku pro zjištění, zda bylo galvanické pokovení provedeno správně a zda působení okolních vlivů nemá zásadní dopad na kvalitu povlaku. Tato metoda by měla určit výsledek v co nejkratším čase a testování by nemělo být příliš finančně nákladné, v nejlepším případě nedestruktivní.

### 3 POUŽITELNÉ TESTOVACÍ METODY

#### 3.1 ODTRHÁVACÍ ZKOUŠKA

Při odtrhávací zkoušce je povlak zatěžován tahově pomocí tzv. odtrhávací panenky. Tato panenka je k povlaku přilepena lepidlem a povlak v okolí panenky je rozrušen pomocí řezáku (většinou korunkový vrták) viz Obrázek 17. Lepidlo musí mít větší pevnost než je pevnost spoje povlak – základní materiál. Pomocí trhacího stroje je panenka spolu s povlakem odtržena od základního materiálu a je změřena síla odtržení. Tato síla se následně porovná s kritickou silou, která se zjistí testováním hraničních vzorků. Pokud je síla odtržení větší nebo rovna síle kritické, lze prohlásit adhezi vzorku za dobrou, bez ohledu na to, ve které vrstvě došlo k odtrhnutí. Pokud je síla odtržení menší než síla kritická, je nutné dále vyhodnotit, zda nedošlo k selhání lepidla a tedy k odtržení v přechodové vrstvě (mezi povlakem a panenkou). Při odtržení v přechodové vrstvě je test nutné zopakovat, při odtržení vrstvy povlaku lze prohlásit adhezi vzorku za špatnou. [13][14][15]



Obrázek 17 Princip odtrhávací zkoušky [15]

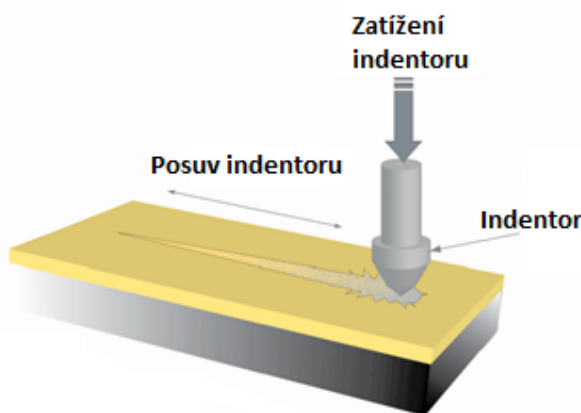
#### POUŽITELNOST NA LWR:

Jelikož je zkouška určena hlavně pro nátěry na rovinných plochách, použití na LWR by vyžadovalo její modifikaci. Povlak v okolí panenky by kvůli nerovnému povrchu nemohl být nařezán korunkovým vrtákem, ale vhodným rydlem, nebo by nebyl nařezán vůbec. Dále by bylo třeba vzít v potaz vyšší adhezivní pevnost ZnNi oproti nátěrům, což by vyžadovalo použití velmi pevného lepidla.

Hlavními nevýhodami použití odtrhávací zkoušky na LWR je její časová náročnost (dlouhý čas vytvrzení lepidla) a její destruktivnost (odtržení velké části povlaku) a s tím související vyšší cena testu. Výhody spočívají ve využití stávajícího vybavení a jednoduchém vyhodnocení.

### 3.2 VRYPOVÁ ZKOUŠKA

Podstatou vrypové zkoušky je vytvoření vrypu v povlaku vzorku a vyhodnocení míry odloupení povlaku v okolí tohoto vrypu. K vytvoření vrypu se nejčastěji používá diamantový kužel Rockwell C. Tento kužel se vůči vzorku pohybuje a zároveň je do něj vtlačován, čímž dochází k porušování povlaku až do jeho oddělení od základního materiálu při kritickém zatížení. Hodnota kritického zatížení charakterizuje adhezivní pevnost povlaku. Zatěžování kuželu může být konstantní, skokové, nebo plynule narůstající. Při konstantním zatěžování je nutné vytvoření více vrypů o různém zatížení kuželu, kritické zatížení se poté určí podle vrypu, ve kterém došlo k oddělení povlaku. Při skokovém nebo plynule narůstajícím zatěžování se vytváří pouze jeden vryp a sleduje se poloha oddělení povlaku od materiálu a poté se určuje hodnota kritického zatížení z rychlosti zatěžování kužele. [5] [14]



Obrázek 18 Princip vrypové zkoušky [15]

#### POUŽITELNOST NA LWR:

Vrypová zkouška by se při provedení v ose LWR dala bez větších problémů použít. Hlavní nevýhodou metody je však nedostupnost zkušebního zařízení a tím velmi vysoká investice do počátečního vybavení.

### 3.3 VNIKACÍ ZKOUŠKA

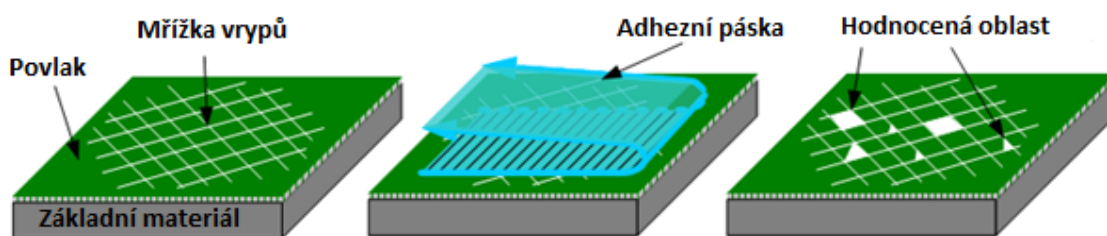
Spočívá ve vtlačování indentoru do vzorku známou silou pomocí tvrdoměru. Jako indentor se nejčastěji používá diamantový kužel Rockwell C. Diamantový kužel se používá hlavně kvůli stejnému úhlu zalomení povlaku při různých tvrdostech materiálu. Pro testování vzorků se stejnou tvrdostí je možné použití jiného indentoru (například kulička Brinell). Po vtlačení vznikne na povrchu vzorku vtisk. Vlivem velkého pnutí na okraji vtisku vzniknou trhliny v povlakové vrstvě, v krajních případech až úplné odloupení povlaku kolem vtisku. Na mikroskopu se poté vyhodnocuje tvar a četnost prasklin a porovnává se s tabulkou poškození. [15]

#### POUŽITELNOST NA LWR:

Vnikací zkouška je určena pro rovinné povrchy, avšak její použití na zaoblený povrch LWR by při provádění v ose railu bylo možné. Nevýhodou zkoušky je nutnost pořízení přípravku, umožňujícího provádění v ose railu. Hlavní výhodou je využití stávajícího vybavení a časová nenáročnost.

### 3.4 MŘÍŽKOVÁ ZKOUŠKA

Mřížková zkouška (dle normy ISO 2409) je vhodná pro rovinné povrchy. Používá se ke zkoušení adhezivní pevnosti barev a laků, ale i kovových povlaků. Spočívá ve vytvoření několika řezů v povlaku, které zasahují až do základního materiálu. Tyto řezy jsou na sebe kolmé a vytváří tak mřížku. Nástrojem pro vytvoření řezů je speciální řezák, který má různý počet břitů o různé rozteči pro různé druhy povlaků (podle jejich tloušťky). Vzniklá mřížka vrypů se očistí štětcem a následně se hodnotí míra odloupení povlaku v okolí mřížky. Vyhodnocení probíhá na mikroskopu a hodnotí se procento chybějícího povlaku nebo se vzorek přímo srovnává s tabulkou poškození. Pro testování povlaků s větší adhezivní pevností (hlavně kovových) by se mohlo stát, že i po vytvoření mřížky se povlak neodloupne, proto se běžně zkouška doplňuje použitím adhezivní pásky. Tato páska se nalepí přes mřížku vrypů a po vytvrnutí lepidla se odtrhne a ulpí na ní narušený povlak. [15]



Obrázek 19 Princip mřížkové zkoušky [15]

#### POUŽITELNOST NA LWR:

Kvůli zaoblenému povrchu LWR by se při použití řezáku musela zkouška omezit na vytvoření několika vrypů po obvodu railu, nikoli na vytvoření mřížky. Mřížka by se dala vytvořit pouze pomocí rydla. Nevýhodou zkoušky je její destruktivnost. Mezi výhody patří časová nenáročnost, jednoduché vyhodnocení a nízká investice do vybavení.

### 3.5 ZKOUŠKA TEPELNÝM RÁZEM

Zkouška tepelným rázem využívá různou tepelnou roztažnost povlaku a základního materiálu. Vzorek se ohřeje v peci na vysokou teplotu (běžně až 300°C). Pro povlaky náchylné na oxidaci je třeba dbát na vhodném zvolení zahřívacího prostředí (např. inertní atmosféry nebo vhodné kapaliny). Ohřátý vzorek se poté ponoří do vody o pokojové teplotě. Výskyt puchýřků nebo odloupení povlaku signalizuje nedostatečnou adhezivní pevnost povlaku. [11]

Tato zkouška se na LWR v současnosti používá, avšak pro zjišťování adhezivní pevnosti ZnNi nestačí.

### 3.6 ZKOUŠKA PÁJENÍM

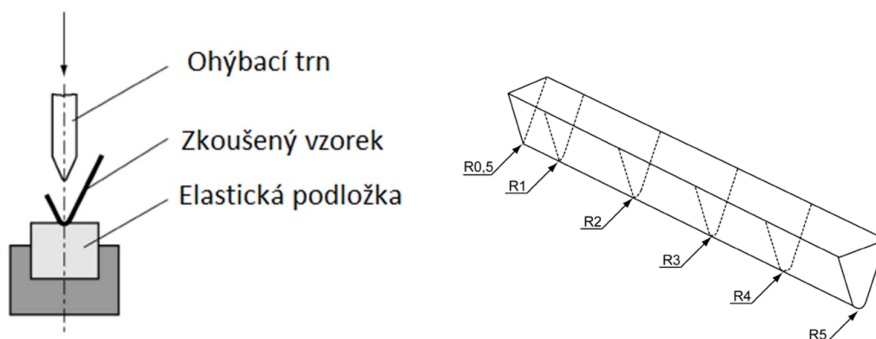
Tato metoda je podobná zkoušce odtrhvací. Jako odtrhvací panenka se používá měděná tyčka, která se připájí k povlaku pomocí nízkotavitelné pájky. Pevnost pájeného spoje musí být větší než pevnost spoje povlak – základní materiál. Dále se panenka odtrhne na trhacím stroji, kde se měří síla odtržení. Nevýhodou metody je teplotní ovlivnění materiálu povlaku. [11]

**POUŽITELNOST NA LWR:**

Kvůli vysoké teplotě, při které se zkouška provádí, je zkouška pájením naprosto nevhodná pro použití na LWR. Při jejím použití by se v okolí připájené tyčky změnila vlastnost povlaku ZnNi natolik, že by to výrazně ovlivnilo jeho adhezivní vlastnosti.

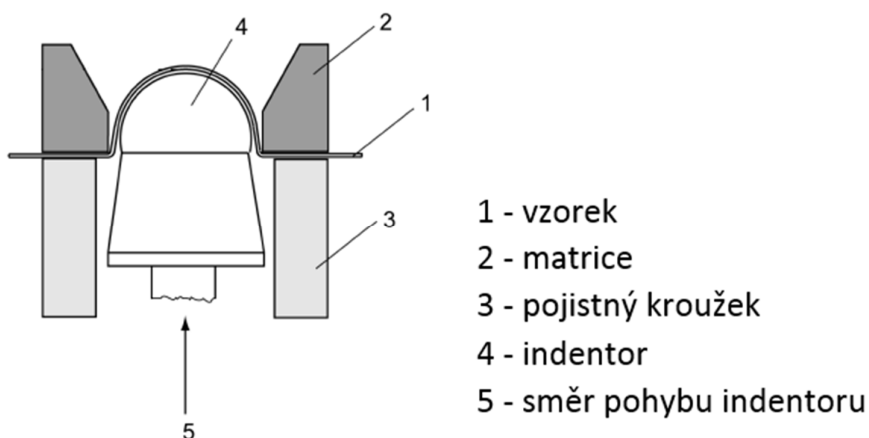
**3.7 ZKOUŠKA OHYBEM**

Je určena pro plechové součásti. Vzorek se ohne pomocí ohýbacího trnu se speciální geometrií. Na výsledném výlisku dojde k porušení povlaku, jehož velikost je závislá na poloměru ohnutí. Vyhodnocuje se nejmenší poloměr, při kterém nedošlo k poškození povlaku. [11] [24]



Obrázek 20 Princip ohýbací zkoušky s geometrií trnu [24]

Další variantou zkoušky ohybem je test hloubením. Při tomto testu je vzorek sevřen mezi maticí a pojistným kroužkem. Ze strany, kde není povlak, na vzorek tlačí razník, který vzorek zdeformuje do kulovitého tvaru. Hodnotí se odloupení povlaku na straně proti razníku. [24]



Obrázek 21 Test hloubením [24]

**POUŽITELNOST NA LWR:**

Geometrie railu a jeho tuhost zamezuje veškerému použití ohýbacích zkoušek.

### 3.8 VOLBA TESTOVACÍCH METOD

Z výše uvedeného vyplývá, že pro testování adhezivní pevnosti ZnNi na LWR nejsou vhodné zkoušky pájením a ohybem. Další vyřazenou metodou je zkouška tepelným rázem, které se již používá a neposkytuje dostatečné výsledky. K dispozici jsou tedy zkoušky odtrhávací, vnikací, mřížková a vrypová, z nichž každá by se bez většího problému dala použít na povrch LWR. Pro vrypovou zkoušku však není k dispozici takové vybavení, které by umožnilo pohyb indentoru ve dvou osách a měření zatěžovací síly. Proto jsou pro experimentální část vybrány zkoušky odtrhávací, mřížková a vnikací.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimentální část bylo použito 94 kusů LWR. Tyto kusy se od sebe lišily kvalitou ZnNi povlaku. Kusy s dobrou kvalitou byly rozděleny do dvou tříd a to podle typu railu, nesly označení OK1 a OK2. Dále byly k dispozici kusy se špatnou kvalitou, které byly rozděleny do tří tříd NOK1, NOK2 a NOK3, přičemž vyšší číslo znamenalo horší kvalitu povrchu. Z kusů NOK3 se ZnNi povlak loupal po pouhém škrábnutí nehtem.

### 4.1 VNIKACÍ ZKOUŠKA

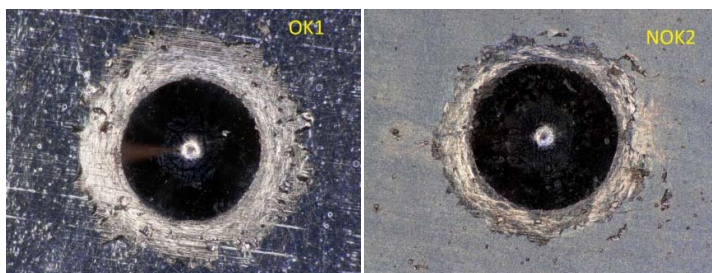
Pro vnikací zkoušku byl použit tvrdoměr Instron Wolpert. Vnikací indentor a jeho zatížení bylo použito podle normy pro měření tvrdosti ISO 6506. Jako vzorky byly použity válcové části LWR, které byly nařezány na délku cca 3cm. Kvůli válcovému tvaru railu bylo nutné vyhotovit prizmatickou podložku, která se ukotvila na pracovní stůl tvrdoměru a zajistila ustálení vzorku a jeho souosost s indentorem.



Obrázek 22 Ustálení vzorku pro vnikací zkoušku

#### 4.1.1 METODA ROCKWELL

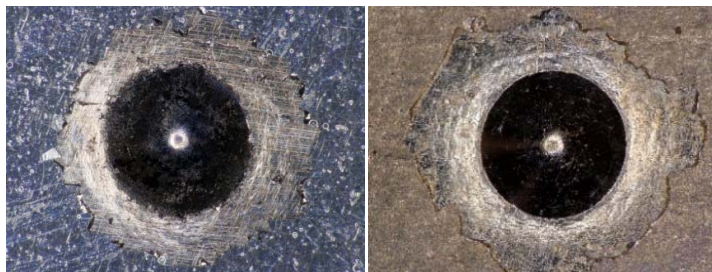
První testování probíhalo tak, že se přímo po vtisku vzorek nafotil na mikroskopu. Odloupení povlaku však bylo tak malé, že se u některých vzorků nedalo přesně určit, jestli se jedná o vzorek s dobrou nebo špatnou adhezí, viz Obrázek 23.



Obrázek 23 Vzorek OK1 vs vzorek NOK2 přímo po vtisku

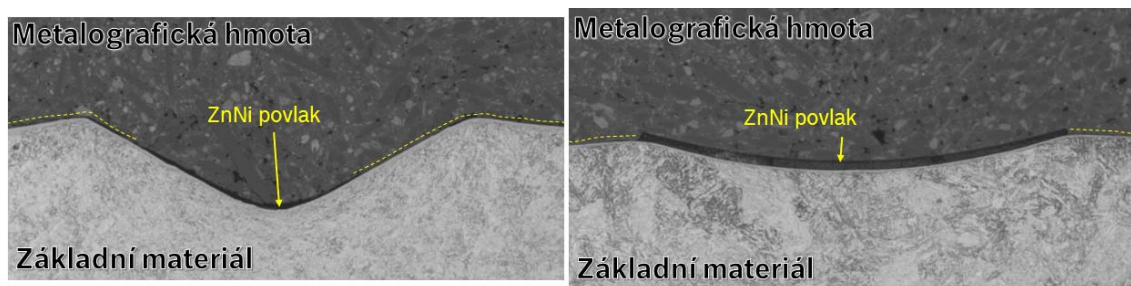
Metodu bylo tedy nutné modifikovat tak, aby se po vtisku odloupnulo co nejvíce povlaku. K tomu byl nejprve použit mosazný kartáč, kterým se vzorky po vtisku důkladně očistily. Toto očištění sice napomohlo k dalšímu odloupení povlaku, stále však u některých vzorků OK1 docházelo ke stejnému nebo většímu poškození než u vzorků NOK2. Dalším krokem

bylo ponoření vzorku po vtisku do ultrazvukové čističky, problém však stále setrval. Poslední zkoušenou variantou bylo nalepení a stržení adhezni pásky dle normy ISO 2409. Ani použití této pásky ale nedokázalo rozlišit některé vzorky, viz Obrázek 24.



Obrázek 24 Vzorek třídy OK1 vs vzorek NOK1 po stržení adhezni pásky

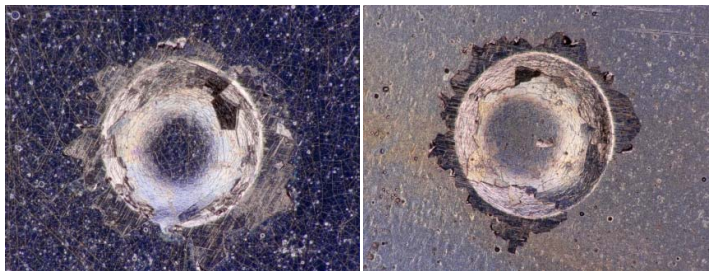
Výsledky testů tedy nasvědčovaly tomu, že úhel vtisku ( $30^\circ$ ) je moc velký a zapříčiňuje nadměrné pnutí na okraji vtisku, jehož následkem je povrchová vrstva vzorku zničena u špatných i dobrých vzorků velmi podobně. U metody Rockwell nejde úhel vtisku změnit (je definován geometrií indentoru), proto byla tato metoda označena za nevhodnou a pro další testování byla použita metoda Brinell HB s kalenou kuličkou. Tato metoda by měla vytvářet menší úhel vtisku a tím menší napětí v povlaku než metoda Rockwell. Další výsledky vnikací zkoušky metodou Rockwell jsou uvedeny v příloze 2.



Obrázek 25 Poškození povrchové vrstvy metodou Rockwell a Brinell (chybějící povlak naznačen čárkovanou čarou), leptadlo nital 1%

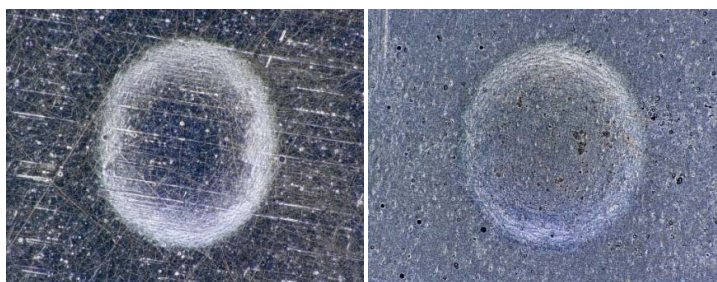
#### 4.1.2 METODA BRINELL

Pro testování byla zprvu použita kalená ocelová kulička s průměrem 2.5mm a zatížením 1839N. Po prvních testech bylo zřejmé, že u některých vzorků se vyskuteje stejný problém jako při použití metody Rockwell. I po použití adhezni pásky se ZnNi povlak odlupoval podobně u dobrých i špatných kusů, viz Obrázek 26. Úhel vtisku byl pro tuto konfiguraci moc velký.



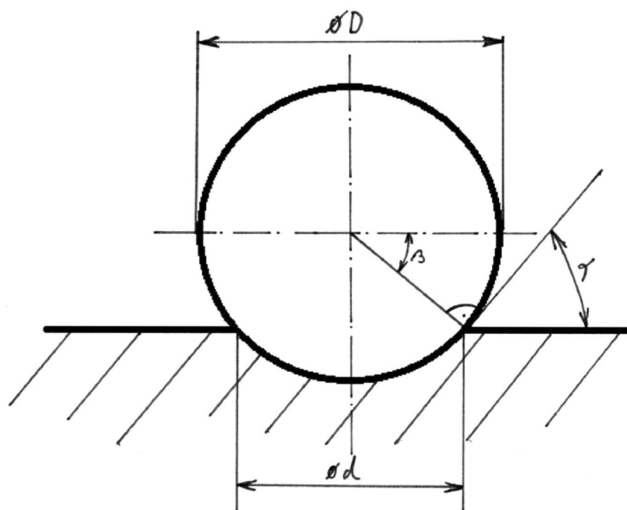
Obrázek 26 Vzorek OK1 vs vzorek NOK2 po použití 2.5mm kuličky zatížené 1839N

Pro dosažení nižšího úhlu byla zvolena 5mm kulička zatížená 2459N. Při použití této konfigurace nastal opačný problém. U vzorků s dobrou i špatnou adhezí nedošlo k odloupenutí povlaku a to ani po použití adhezni pásky. Úhel vtisku byl tedy moc malý.



Obrázek 27 Vzorek OK1 vs vzorek NOK2 po použití 5mm kuličky zatížené 2452N

Pro správnou funkci této metody bylo nutné určit takový úhel vtisku, který by porušil povlak na špatných kusech při zachování povlaku na dobrých kusech. Z obrázku 28 je patrné, že úhel vtisku  $\alpha$  lze vypočítat podle vzorce (2). Tento úhel by měl potom ležet mezi úhly vtisku kuličky 2.5mm zatížené 1839N –  $\alpha_{\max}$  a kuličky 5mm zatížené 2452N –  $\alpha_{\min}$ .



Obrázek 28 Úhel vtisku metody Brinell

$$\beta = \arccos\left(\frac{d}{D}\right) [^\circ] \quad (1)$$

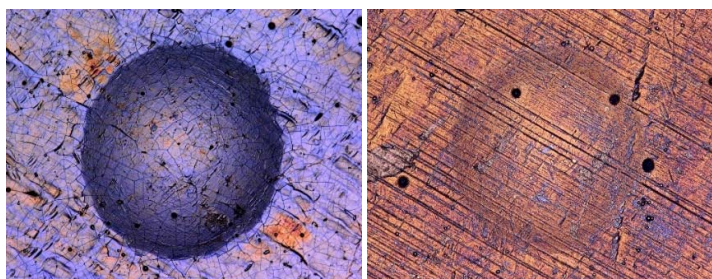
$$\alpha = 90 - \beta [^\circ] \quad (2)$$

Dále byla sestavena tabulka s vypočtenými úhly vtisku pro jednotlivé průměry kuliček a jejich zatížení. Hodnoty těchto průměrů a zatížení jsou pevně dané podle normy ISO 6506, podle které je nastaven i měřicí program tvrdoměru. Z tabulky vyplývá, že jediné úhly, které leží mezi  $\alpha_{\max}$  a  $\alpha_{\min}$ , jsou úhly  $\alpha_{2.5/612.9}$  a  $\alpha_{1/294.2}$ .

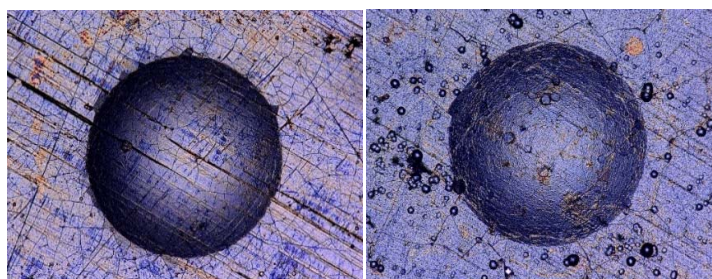
Tabulka 1 Úhly vtisku jednotlivých nastavení tvrdoměru

| Průměr kuličky [mm] | Zatížení kuličky [N] | Průměr vtisku [mm] | Úhel vtisku [°]                                |
|---------------------|----------------------|--------------------|--|
| 1                   | 98,07                | 0,18               | $\alpha_{1/98.07} = 10,37$                     |
| <b>1</b>            | <b>294,2</b>         | <b>0,315</b>       | <b><math>\alpha_{1/294.2} = 18,36</math></b>   |
| 2,5                 | 306,5                | 0,35               | $\alpha_{2.5/306.5} = 8,05$                    |
| <b>2,5</b>          | <b>612,9</b>         | <b>0,48</b>        | <b><math>\alpha_{2.5/612.9} = 11,07</math></b> |
| 2,5                 | 1839                 | 0,8                | $\alpha_{\max} = 18,66$                        |
| 5                   | 2452                 | 0,95               | $\alpha_{\min} = 10,95$                        |

Pro další testy byla tedy použita kulička 2.5mm zatížená 612.9N a kulička 1mm zatížená 294.2N. Obě tyto kuličky nebyly schopné narušit povlak v okolí vtisku u vzorků s dobrou i špatnou adhezí.



Obrázek 29 Vzorek OK1 vs vzorek NOK1 po použití 2.5mm kuličky zatížené 612.9N



Obrázek 30 Vzorek OK1 vs vzorek NOK2 po použití 1mm kuličky zatížené 294.2N

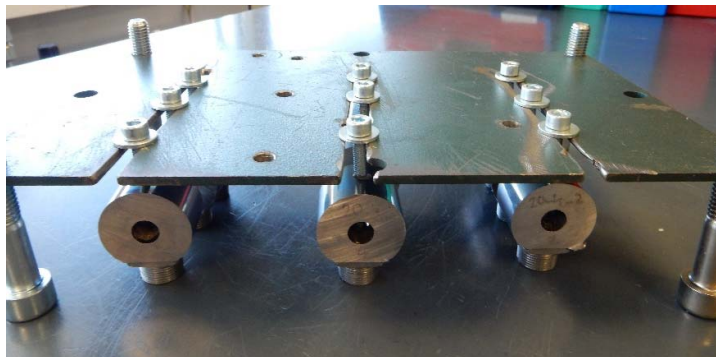
Je patrné, že norma ISO 6506 neumožňuje takovou kombinaci průměru kuličky a jejího zatížení, která by narušila povlak LWR tak, aby bylo možné jednoduše určit, zda se jedná o

kus s dobrou nebo špatnou adhezí ZnNi povlaku. Další výsledky vnikací zkoušky metodou Brinell jsou uvedeny v příloze 2.

Pokud by měla být k posuzování adhezivní pevnosti ZnNi na LWR použita vnikací metoda, musela by se modifikovat. Zkušební tvrdoměr by musel mít volně nastavitelné zatížení kuličky nebo by se místo tvrdoměru použil lis, ve kterém by byl upnut indentor. Jako indentor by se dala použít kulička s průměrem 2.5mm, jejíž zatížení by muselo být mezi 1839N a 612.9N.

## 4.2 ODTRHÁVACÍ ZKOUŠKA

Pro odtrhávací zkoušku byl použit trhací stroj Instron Bluehill, pro který byl vytvořen program na odtrhávání. Jako vzorky byly použity nařezané části LWR s vysokotlakou přípojkou, která umožnila ustavení vzorku do roviny. Funkci odtrhávací panenky plnily šrouby M5 se zbrošeným koncem. Povrch vzorku spolu se s broušenými konci šroubů byl očištěn pomocí technického lihu a odmašťovače Rapid od firmy Würth. Dále byly tyto šrouby umístěny do přípravku se stavitelnou výškou, viz Obrázek 31. Pod každý šroub se umístil vzorek a přes kalibrační papírek se nastavila vůle mezi šroubem a vzorkem (cca 0.1mm). Poté se na každý z šroubů nanasla vrstva lepidla a šroub byl ustaven zpátky do přípravku, který zajistil kolmost osy šroubu na osu railu po celou dobu vytvrzování lepidla.



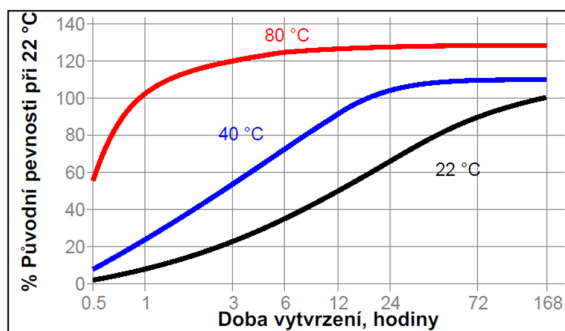
*Obrázek 31 Vzorky v přípravku*

Po vytvrzení lepidla byl vzorek spolu se šroubem upnut pomocí speciálního přípravku do odtrhávací hlavice, viz Obrázek 32. Po odtržení šroubu z povrchu vzorku se odečetla síla odtržení a na mikroskopu se vyhodnotila vrstva, ve které došlo k odtržení.



Obrázek 32 Upnutí vzorku do odtrhávací hlavy

Pro první testování bylo použito lepidlo Loctite EA 3450. Toto lepidlo dosáhne při pokojové teplotě pevnosti ve smyku až 21MPa při aplikaci na nízkouhlikatou ocel. Tato pevnost se dá zvýšit o dalších 20% - na 25.2MPa díky vytvrzování při 80°C po dobu 3 hodin. Pevnost v tahu výrobce pro toto lepidlo neuvádí. Pro vytvrzení byla tedy využita horkovzdušná trouba.



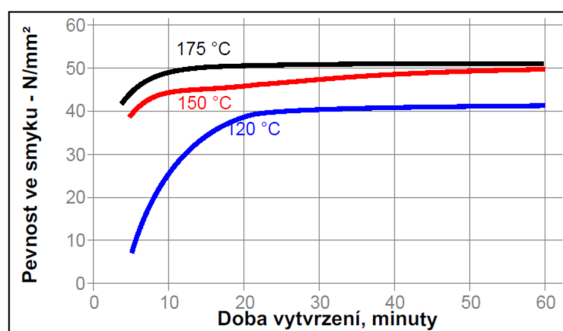
Obrázek 33 Rychlost vytvrzení v závislosti na teplotě pro lepidlo Loctite EA 3450 [22]

K testu byly připraveny všechny třídy vzorků. Po odtržení se ukázalo, že jedinou třídou, kde se podařilo odtrhnout celou plochu povlaku ZnNi byla třída NOK3, tedy třída s nejmenší kvalitou povrchové vrstvy. U ostatních vzorků došlo k odtržení v přechodové vrstvě nebo k odtržení pouze nepatrné části povlaku, nebylo tedy možné určit, o jakou třídu vzorku se jedná. Pro odtržení vrstvy povlaku by bylo tedy zapotřebí lepidla s vyšší pevností.



Obrázek 34 Vzorky LWR po odtržení lepidla, zleva: OK2, NOK2, NOK3

Pro další testování bylo použito lepidlo Loctite EA 9514, které bylo k tomuto účelu doporučeno firmou Loctite. Vytvrzování tohoto lepidla probíhá pouze za vysoké teploty. Při ohřevu na 180°C se po 20 minutách vytvrdí na pevnost ve smyku 50MPa. Pevnost v tahu takto vytvrzeného lepidla je 44MPa. Pro vytvrzení byla opět použita horkovzdušná trouba.



Obrázek 35 Rychlost vytvrzení v závislosti na teplotě pro lepidlo Loctite EA 9514 [23]

I přes vysokou pevnost lepidla se podobně jako u předchozího testu podařilo odtrhnout povlak pouze od vzorků NOK3, u ostatních vzorků došlo k odtrhu opět pouze v přechodové vrstvě, nebo byla odtržena pouze nepatrná část povlaku, viz Obrázek 36. Ani použití pevnějšího lepidla tedy neumožnilo rozpoznání dobré a špatné adheze povlaku.



Obrázek 36 Vzorky OK2 a NOK2 po použití lepidla Loctite EA 9514

Největší naměřená síla odtržení byla  $F = 974.5\text{N}$ , při této síle došlo k odtrhu na ploše  $S = 13.23\text{mm}^2$ . Podle rovnice (3) pro výpočet napětí v tahu bylo vypočteno tahové napětí  $\sigma = 73.66\text{MPa}$ . Pevnost tohoto spoje byla tedy vyšší, než je pevnost udávaná výrobcem. Přesto se nepodařilo odtrhnout povlak ZnNi.

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa] \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{974,5}{13,23} = 73,66 \text{ MPa}$$

Odtrhávací metoda tedy není vhodná pro hodnocení adhezivní pevnosti ZnNi na LWR. Pro dosažení lepších výsledků této metody by bylo nutné použití lepidla s pevností v tahu o mnoho vyšší než 73.66MPa, takové lepidlo není běžně dostupné. Dalším krokem by mohlo být narušení povlaku v okolí odtrhávací panenky pomocí vhodného řezáku. Toto nařezání se běžně používá u rovinných ploch, ovšem použití na válcové ploše LWR je obtížné. Další výsledky odtrhávací zkoušky jsou uvedeny v příloze 3.

### 4.3 MŘÍŽKOVÁ ZKOUŠKA

Pro mřížkovou zkoušku byla jako vzorky použita celá tělesa LWR, což zkoušku zkrátilo o čas potřebný k dělení materiálu. V prvním, předběžném, testu byly vytvořeny jednotlivé vrypy na povrchu railů pro zjištění, zda bude patrný rozdíl mezi jednotlivými třídami vzorků. Vrypy se vytvářely pomocí rydla Ticom s karbidovým hrotem, určeným pro kovy s tvrdostí do 60HRC. Na obrázku 37 je vidět, že i pouhé jednoduché vrypy dokázaly celkem přijatelně rozlišovat rozdíly mezi vzorky s dobrou a špatnou adhezí.



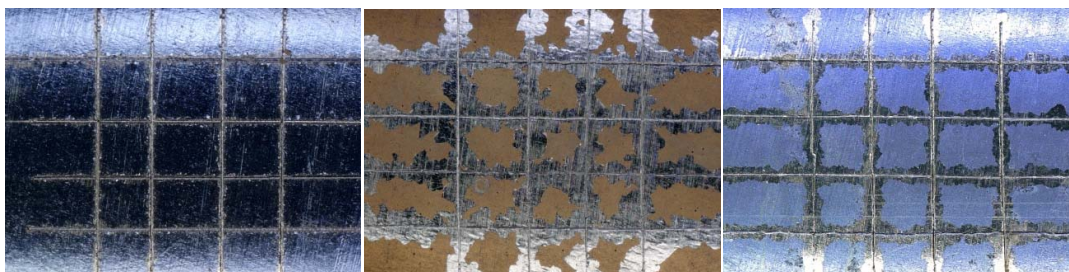
Obrázek 37 Vzorky OK1, NOK1 a NOK3 po předběžném vrypu

K dalšímu testu byla zakoupena sada pro mřížkovou zkoušku CC1000 podléhající normě ISO 2409. Součástí této sady byl řezák pro tvorbu mřížek a adhezivní páska. Podle normy byl vybrán šestibřítý řezák s roztečí 1mm pro kovové povlaky. Tato sada je primárně určena pro nátěrové povlaky na rovinných plochách. Na válcovém tvaru railu je velmi obtížné s tímto řezákem vytvořit mřížku, proto se vrypy vytvářely pouze po obvodu tělesa railu. Dalším nedostatkem při použití řezáku je malá tloušťka ZnNi povlaku, řezák se tedy neměl do čeho zaříznout a tím pádem se vrypy dělaly obtížně a nerovnoměrně. Výsledkem toho byl vznik tří až čtyř vrypů po obvodu railu, které byly rovnoběžné, ale netvořily mřížku. Takto vzniklé vrypy sice narušily povlak podobně jako předběžný test, ale pro vyhodnocování adhezivní pevnosti to nestačilo. Některé špatné kusy vykazovaly stejné výsledky jako kusy dobré, viz Obrázek 38.



Obrázek 38 Vzorky OK1, NOK1 a NOK2 po použití šestibřitého řezáku

Výsledky předchozích testů ukazovaly, že pro správnou funkci mřížkové zkoušky je zapotřebí narušit povrch více, než jsou schopny jednotlivé vrypů. K tomu bylo nutné udělat na povrchu mřížky vrypů. Kvůli nedostupným technologiím, které by tento proces zautomatizovaly, bylo použito opět rydlo Ticom, jako u předběžného testu. K tomu bylo zapotřebí dvou plechových pravítek, jedno ohnuté přibližně do poloměru railu a druhé rovné. Pomocí těchto pravítek se poté vytvořila mřížka v povlaku pomocí čtyř vrypů vzdálených od sebe cca 1mm. Takto připravená mřížka se dále odmastila odmašťovačem Rapid a nalepila se na ní adhezivní páska podléhající normě ISO 2409. Po stržení pásky bylo na první pohled zřejmé, že tato metoda je schopná rozeznat jednotlivé třídy vzorků. Pro lepší zviditelnění ploch s odtrženým povlakem byla zkoušená plocha nabarvena černým permanentním popisovačem, v tomto případě probíhalo odmašťování povrchu před tvorbou mřížky.





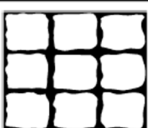

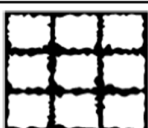
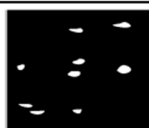
Obrázek 39 Mřížky vytvořené rydlem na vzorcích OK1, NOK1 a NOK2



Obrázek 40 Zviditelněné plochy odtržení na vzorcích OK1, NOK1 a NOK2

Z výsledků testů byla dále sestavena tabulka poškození, viz Tabulka 2. Pro sestavení této tabulky byl použit program Autocad, pomocí něhož se obkreslily tvary poškození vzorků pro jednotlivé stupně poškození. Pro výpočet procent chybějícího povlaku byl použit program Paint.NET.

Tabulka 2 Tabulka poškození pro mřížkovou zkoušku

| Stupeň poškození | Procento chybějícího povlaku | Tvar poškození  | Stupeň poškození | Procento chybějícího povlaku | Tvar poškození  |
|------------------|------------------------------|---|------------------|------------------------------|---|
| 1A               | < 10%                        |  | 1B               | 30 - 50%                     |  |
| 2A               | 10 - 20%                     |  | 2B               | 50 - 85%                     |  |
| 3A               | 20 - 30%                     |  | 3B               | > 85%                        |  |

První část tabulky ukazuje poškození, které se vyskytovalo na vzorcích OK1 a OK2, tedy s dobrou adhezí. Stupně 1A, 2A a 3A tedy charakterizují poškození povlaku s dobrou adhezí. Druhá část tabulky vychází z tvaru poškození vzorků NOK1, NOK2 a NOK3, tedy vzorků se špatnou adhezí. Stupně 1B, 2B a 3B charakterizují poškození povlaku se špatnou adhezí. Z tabulky vyplývá, že mezní odloupenutí povlaku pro vzorek s dobrou adhezí je 30%, po překročení této hodnoty je již vzorek označen za nevyhovující. Další výsledky měření jsou uvedeny v příloze 4.

Z testů vyplynulo, že mřížková metoda je vhodnou zkouškou pro hodnocení adhezivní pevnosti ZnNi povlaku na LWR. U všech testovaných vzorků bylo možné určit jejich adhezi podle tabulky poškození. Byl tedy vytvořen návrh specifikace pro mřížkovou zkoušku, viz příloha 5, který popisuje postup a použité vybavení, které má být při zkoušce použito.

Současné provádění zkoušky má však řadu nedostatků, kvůli kterým lze zkoušku použít pouze pro předběžné zjištění adhezivní pevnosti povlaku ZnNi. Pokud by se zkouška měla používat na vstupní kontrole firmy Bosch, musela by se plně zautomatizovat. To znamená, že by se musel použít takový stroj, který by umožnil tvorbu vrypů o přesné rozteči 1mm. Síla, kterou se jednotlivé vrypy vytvářejí, by musela být také stále stejně velká. Dále by se použití adhezivní pásky, která navzdory tomu, že podléhá normě ISO 2409, nemá definované adhezivní vlastnosti, mohlo nahradit použitím ultrazvukové myčky. Další modifikací, která by umožnila lepší vypovídací schopnost zkoušky, by bylo vytvoření takového procesu, který by umožnil přesné změření plochy odtrženého povlaku. Po těchto úpravách by se zkouška dala zařadit mezi hlavní testy běžně prováděné na LWR.

## ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce bylo navrženo několik metod pro hodnocení adhezivní pevnosti. Tyto metody byly zhodnoceny podle jejich složitosti, ceny, časové náročnosti a hlavně použitelnosti na railu. Podle těchto kritérií byly vybrány tři metody k testování. Těmito metodami byly vnikací, odtrhávací a mřížková zkouška.

Pro vnikací zkoušku byly použity nařezané části LWR, které se ukotvily do prizmatické podložky. Testování probíhalo na tvrdoměru. Jako první byla otestována metoda Rockwell. Tato metoda vykazovala příliš velké poškození povlaku u kusů s dobrou i špatnou kvalitou ZnNi povlaku. Proto byla doplněna o použití adhezivní pásky. Ani po použití adhezivní pásky však nebylo možné rozeznat dobré kusy od špatných. Výsledky ukázaly, že metoda Rockwell není vhodná pro použití na LWR. Další použitou metodou byla metoda Brinell. Tato metoda umožnila měnit vnikací úhel díky různým konfiguracím průměrů kuliček a jejich zatížení. Norma pro zkoušení tvrdosti však neobsahuje takovou konfiguraci, která by bezpečně určila rozdíl mezi dobrými a špatnými kusy a to ani při použití adhezivní pásky. Z výsledků vyplynulo, že metoda Brinell, prováděná podle normy pro zkoušení tvrdosti, není vhodná pro použití na LWR. Lepších výsledků by se dalo dosáhnout použitím nenormalizovaného zatížení kuličky, kterého by se dosáhlo pomocí lisu. Při použití kuličky o průměru 2.5mm by hodnota tohoto zatížení ležela mezi 1938N a 612.9N

Pro odtrhávací zkoušku byly použity nařezané části LWR, obdobně jako pro vnikací zkoušku. Na tyto vzorky byly pomocí přípravku přilepeny šrouby se zbrošenými konci, které byly po vytvrzení lepidla odtrženy na trhacím stroji. Jako první bylo použito lepidlo Loctite EA 3450. Toto lepidlo však umožnilo odtržení povlaku pouze u kusů s nejhorší kvalitou povlaku. U ostatních vzorků došlo k otržení ve vrstvě lepidla a nebylo tak možné určit kvalitu jejich povlaku. Pevnost tohoto lepidla byla příliš malá. Další použité lepidlo bylo Loctite EA 9514. Toto lepidlo bylo doporučeno firmou Loctite jako lepidlo s velmi vysokou pevností v tahu. Výsledky byly však obdobné jako při použití předchozího lepidla. Pevnost lepidla byla příliš malá. Tyto výsledky ukázaly, že odtrhávací zkouška není vhodná pro použití na LWR. Pro lepší výsledky by se muselo použít o mnoho pevnější lepidlo. Takové lepidlo však není běžně dostupné.

U mřížkové zkoušky byl použit šestibřítý řezák a adhezivní páska podle normy pro mřížkovou zkoušku. Válcový povrch railu však znemožnil vytvoření mřížky pomocí tohoto řezáku. Byla tak vytvořena pouze řada rovnoběžných vrypů po obvodu railu a to navíc velmi obtížně. Pomocí těchto vrypů se nedala rozeznat kvalita povlaku jednotlivých vzorků a to ani při použití adhezivní pásky. Pro další testování bylo tedy použito Rydlo s karbidovým hrotem, kterým se pomocí pravítka vytvořila mřížka vrypů na povlaku. Na tuto mřížku se nalepila adhezivní páska. Po odtržení pásky bylo zřejmé, že tato metoda je schopna rozeznat jednotlivé stupně kvality povlaků. Byla vypracována tabulka poškození, podle které se hodnotí kvalita povlaku. Dále byl vytvořen návrh specifikace zkoušky. Zkouška provedená podle tohoto návrhu dokáže bezpečně určit kvalitu povlaku ZnNi.

Tato zkouška má však řadu nedostatků a pro její použití na vstupní kontrole by bylo zapotřebí provést několik změn. Proces provádění zkoušky by musel být zautomatizován. Vrypy by musely být dělány stejnou silou a stejně daleko od sebe. Místo porovnávání tvaru poškození s tabulkou by bylo nutné změřit oblast poškození. Po těchto úpravách by bylo možné používat tuto zkoušku k testování adhezivní pevnosti ZnNi povlaku ve firmě Bosch i v galvanovně.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

### LITERATURA:

- [1] LANDHÄUBER, Felix. *Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory*. Přeložil Stanislav HANÁK. Praha: Robert Bosch, 2005. Technické vzdělávání. ISBN 80-903132-7-2.
- [2] Interní materiály firmy Bosch Diesel s.r.o.
- [3] KULL, H., Ulrich ADLER, Joachim KAISER, Berthold GAUDER a Ralf ISENBURG. *Systém vstřikování nafty s tlakovým zásobníkem Common Rail*. Praha: Robert Bosch, 1999. Elektronické řízení vznětových motorů. ISBN 80-902585-6-5.
- [4] HORNÍČEK, P. *Vstřikovací systémy užitkových automobilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- [5] KATRENIÁK, Pavel. *Adhesivní pevnost zinkových povlaků*. Mendelova univerzita v Brně, 2011, 52 s. Vedoucí práce Doc. Ing. Michal Černý, CSc.
- [6] SKRUTEK, I. *Seal plugs Design for Common-Rail System Pressure Reservoir High-Cyclic Fatigue Testing*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 100s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík
- [7] *Metallic coatings on metallic substrates - Electrodeposited and chemically deposited coatings - Review of methods available for testing adhesion*. 2. vydání. Švýcarsko: International organization for standartization, 1980.
- [8] *Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Climatic loads*. 3. vydání. Švýcarsko: International organization for standartization, 2010.
- [9] RUML, Vladimír a Miloslav SOUKUP. *Galvanické pokovování*. Praha: SNTL, 1981.
- [10] TOMAN, J. *Povrchové úpravy součástí spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 49s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Maršálek.
- [11] PRŮŠEK, Jaroslav. *Hodnocení jakosti a účinnosti protikorozních ochranných strojírenských výrobků*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.

### INTERNET:

- [12] *Common rail*, [online]. [cit. 2017-17-02] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Common\\_rail](https://cs.wikipedia.org/wiki/Common_rail)
- [13] *Pull-off Adhesion Testing Of Coatings*, [online]. [cit. 2017-05-02] Dostupné z: <http://www.elcometer.com/en/pull-off-adhesion.html>
- [14] *Adhesion testing methods*, [online]. [cit. 2017-07-01] Dostupné z: [http://www.defelsko.com/technotes/adhesion\\_methods.htm](http://www.defelsko.com/technotes/adhesion_methods.htm)

- [15] *Adhesion tests*, [online]. [cit. 2017-07-01] Dostupné z:  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesion\\_tests](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesion_tests)
- [16] *Vlastnosti a zkoušení materiálů*, [online]. [cit. 2016-26-12] Dostupné z:  
[https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM9\\_creep.pdf](https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM9_creep.pdf)
- [17] *KOVOVÉ POVLAKY VYLUČOVANÉ ELEKTROLYTICKY A CHEMICKY* [online].  
Praha: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2012 [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: <http://www.oos-data.army.cz/cos/cos/999904.pdf>
- [18] *Galvanické pokovení*, [online]. [cit. 2017-07-01] Dostupné z:  
<http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/pokoveni.html>
- [19] *Vstup do technologie povrchových úprav*, [online]. [cit. 2017-15-01] Dostupné z:  
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62015/vstup-do-technologie-povrchovych-uprav.html>
- [20] *Moření kovů z pohledu ekologie*, [online]. [cit. 2017-28-02] Dostupné z:  
<http://www.konstrukce.cz/clanek/moreni-kovu-z-pohledu-ekologie/>
- [21] *Kataforetické lakování. Povrchové úpravy* [online]. 2005,  
<http://www.povrchoveupravy.cz/2005-04-clanek01.htm> [cit. 2017-03-02].
- [22] Technical data sheet – Loctite EA 3450, [online]. [cit. 2017-07-05] Dostupné z:  
<http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%203450-CS?pid=EA%203450&format=MTR&subformat=REAC&language=CS&plant=WERCS>
- [23] Technical data sheet – Loctite EA 9514, [online]. [cit. 2017-07-05] Dostupné z:  
<http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209514-CS?pid=EA%209514&format=MTR&subformat=HYS&language=CS&plant=WERCS>
- [24] *Pin and collar, Adhesion Strength and Scratch test*, [online]. [cit. 2017-07-04]  
Dostupné z:  
<http://www.adhesivestoolkit.com/Docs/test/MECHANICAL%20TEST%20METHOD%201%20-%20Continued.xtp>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|                        |                    |   |
|------------------------|--------------------|---|
| CaCl <sub>2</sub>      |                    | Chlorid vápenatý                                |
| CCT                    |                    | Cyclic corrosion test                           |
| Cr <sup>VI+</sup>      |                    | Šestimocný chrom                                |
| F                      | [N]                | Síla odtržení                                   |
| KTL                    |                    | Kataforetické lakování                          |
| LWR                    |                    | Laser welded rail (laserově svařovaný rail)     |
| NO <sub>x</sub>        |                    | Oxidy dusíku                                    |
| NaCl                   |                    | Chlorid sodný                                   |
| NaHCO <sub>3</sub>     |                    | Hydrogenuhličitan sodný                         |
| S                      | [mm <sup>2</sup> ] | Plocha održeného lepidla                        |
| α                      | [°]                | Úhel vtisku                                     |
| α <sub>max</sub>       | [°]                | Maximální úhel vtisku                           |
| α <sub>min</sub>       | [°]                | Minimální úhel vtisku                           |
| α <sub>1/98.07</sub>   | [°]                | Úhel vtisku pro kuličku ø1mm zatíženou 98.07N   |
| α <sub>1/294.2</sub>   | [°]                | Úhel vtisku pro kuličku ø1mm zatíženou 294.2N   |
| α <sub>2.5/306.5</sub> | [°]                | Úhel vtisku pro kuličku ø2.5mm zatíženou 306.5N |
| α <sub>2.5/612.9</sub> | [°]                | Úhel vtisku pro kuličku ø2.5mm zatíženou 612.9N |
| β                      | [°]                | Pomocný úhel                                    |
| σ                      | [MPa]              | Tahové napětí                                   |

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1      Výsledky vnikací zkoušky metodou Rockwell
- Příloha 2      Výsledky vnikací zkoušky metodou Brinell
- Příloha 3      Výsledky odtrhávací zkoušky
- Příloha 4      Výsledky mřížkové zkoušky
- Příloha 5      Návrh specifikace mřížkové zkoušky