



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ÚPRAVA PROCESU VÝROBY TLAKOVÝCH ZÁSOBNÍKŮ

MODIFYING THE PROCESS OF PRODUCTION OF PRESSURE CONTAINERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Petruška

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jakub Petruška**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok: 2015/16

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 diplomové práce:

Úprava procesu výroby tlakových zásobníků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor firemního systému Common rail.
3. Zpřehlednění současného stavu.
4. Návrh variant řešení.
5. Volba výhodných opatření.
6. Technicko-ekonomické vyhodnocení dle požadavků firmy.
7. Diskuze.
8. Závěr.

Cíle diplomové práce:

Podrobným rozбором stávající situace spojeným s využitím moderních způsobů sledování a řízení výroby dosáhnout výhodnějšího stavu v produkci konkrétního výrobku.

Seznam literatury:

- Imai, M. (2004): Kaizen. Computer Press, a. s., Brno.
- Jurová, M. (2011): Řízení výroby. CERM, s. r. o., Brno.
- Píška, M. et al. (2009): Speciální technologie obrábění. CERM, s. r. o., Brno.
- Pernikář, J. a Tykal, M. (2006): Strojírenská metrologie II. CERM, s. r. o., Brno.
- Karpíšek, Z. (2007): Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. CERM, s. r. o., Olomučany.

Kolektiv autorů. (1997): Příručka obrábění, kniha pro praktiky. Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., Praha.

Leiveber, J. a Vávra, P. (2006): Strojnické tabulky. ALBRA, Úvaly.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na úpravu procesu vrtání vysokotlakého radiálního vývodu z tlakového zásobníku systému Common Rail. Úvodní část se zabývá teoretickým rozбором systému z hlediska historického a technologického. Následuje podrobně rozebraný návrh validací pro zadaný problém, na který navazuje jeho řešení v praxi. Práci uzavírá zhodnocení z ekonomického hlediska.

Klíčová slova

Common Rail, tlakový zásobník, rail, validace

ABSTRACT

These diploma thesis is focussed on process modifying of radial outlet drilling of Common Rail System. Introductory part concern with theoretical system analysis from the point of historical and technical view. It follow elaborate validation plan for assigned problem. Next point is Practically elaborate solution. Final part include evaluation from the point of economical view.

Key words

Common Rail, pressure tank, rail, validation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PETRUŠKA, Jakub. *Úprava procesu výroby tlakových zásobníků*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 59 s. 1 příloh. Vedoucí práce. Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Úprava procesu výroby tlakových zásobníků** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jakub Petruška

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady při vedení diplomové práce.

Děkuji také panu Ing. Jaroslavu Tunovi, konzultantovi diplomové práce za firmu Bosch Diesel s. r. o., za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Děkuji také panu Ing. Ivo Skrutkovi, zaměstnanci firmy Bosch Diesel s. r. o., za pomoc při vypracování validačního plánu pro tuto diplomovou práci.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	8
1 TEORETICKÝ ROZBOR	9
1.1 Historie.....	9
1.2 Systém Common Rail	11
2 VYTVOŘENÍ VALIDAČNÍHO PLÁNU	19
2.1 Rozbor současného stavu.....	20
2.2 Výroba vzorků se zpětným odjehlením	20
2.3 Vzorky bez zpětného odjehlení.....	20
2.4 Měření rozměrů a geometrických tolerancí	21
2.5 Metalografická analýza radiálního vrtání	23
2.6 Měření zbytkového napětí	24
2.7 Měření railů pro výrobu tlumičů.....	27
2.8 Zalisování tlumičů	27
2.10 Test robustnosti tlumičů.....	28
2.11 Vysokotlaká pulzační zkouška.....	29
3 ROZBOR SOUČASNÉ VÝROBY RAILU	30
3.1 Rozbor materiálu.....	30
3.2 Postup výroby	31
3.3 Původní sled operací a použité nástroje.....	34
3.4 Měření rozměrů a tolerancí	35
3.5 Kritické oblasti vysokotlakého vývodu	37
4 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ	38
4.1 Varianta číslo I - aplikovaná.....	38
4.2 Varianta číslo II - náhradní	39
5 VOLBA NEJVHODNĚJŠÍHO OPATŘENÍ	41
5.1 Měření rozměrů a geometrických tolerancí	42
5.2 Měření zbytkového napětí	43
5.3 Metalografická analýza radiálního vrtání	47
6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	49
7 DISKUZE	52

7.1 Cíle.....	52
7.2 Navržené varianty	52
7.3 Přínos	52
7.4 Problémy.....	52
7.5 Výsledky měření	52
ZÁVĚR	54
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
SEZNAM PŘÍLOH.....	59

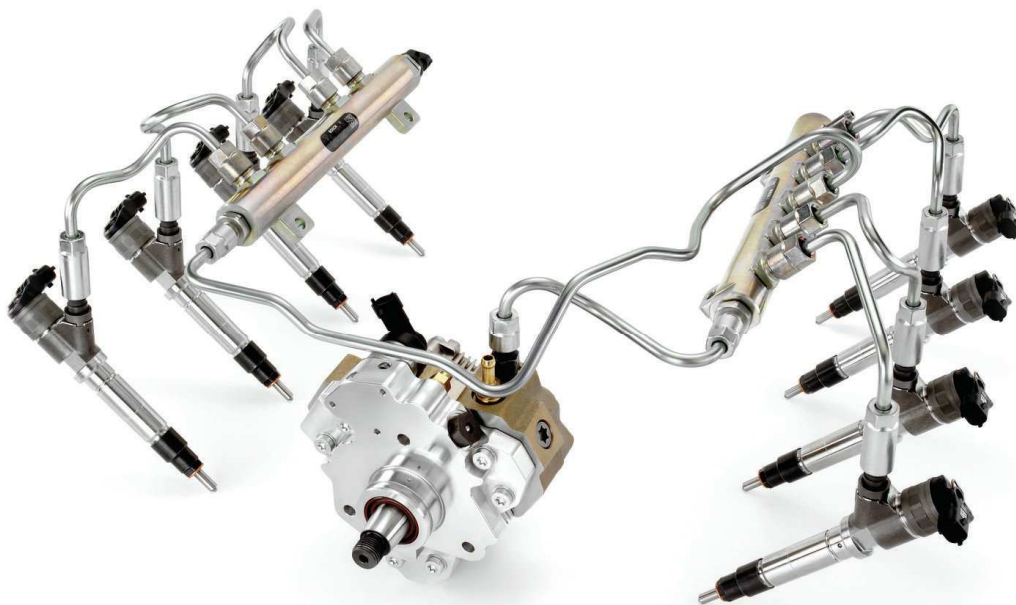
ÚVOD

V současné době je kladen vysoký důraz na nízkou spotřebu paliva a minimální obsah škodlivin ve spalinách. Toho může být docíleno co nejjemnějším rozptýlením paliva v trysce, přesným dávkováním a specifickým průběhem vstřikování. Systém splňující tyto požadavky se nazývá Common Rail (obr. 1). Od ostatních systémů se liší hlavně tím, že palivo ve vysokotlakém zásobníku je stále připraveno ke vstřikování.

Hlavní výhoda Common Rail systému tkví ve velkých možnostech variability při tvorbě vstřikovacího tlaku a určení okamžiku vstřiku. To umožňuje oddělení vysokotlakého čerpadla a vstřikovače. K tomu slouží vysokotlaký zásobník zvaný „rail“.

Systém Common Rail s přímým vstřikováním paliva pro vznětové motory se využívá ve velkém množství dopravních prostředků. Je možné jej nalézt u malých osobních vozidel s objemem motoru 0,8 l a výkonem 30 kW, kde dopomáhá ke spotřebě kolem 3,5 l. Vyskytuje se ale také u užitkových vozidel, těžkých nákladních vozidel, lokomotiv a dokonce i u lodí s výkonem kolem 200 kW na jeden válec. Dnes je to nejčastěji používaný vstřikovací systém pro rychloběžné motory s přímým vstřikem.

Tato práce má za cíl zjednodušit a urychlit výrobu komponenty systému zvané rail. Byla zvolena možnost úpravy procesu vrtání radiálního vývodu, kterým je palivo pod vysokým tlakem dodáváno ke vstřikovačům a dále do jednotlivých válců motoru.



Obr. 1 Systém Common Rail s přímým vstřikováním paliva¹

1 TEORETICKÝ ROZBOR

Výrobní proces je složitý mechanismus a jakýkoliv zásah do něj musí být pečlivě promyšlen a prostudován. Před zavedením inovace do sériové výroby je nutné projít velké množství informací o daném výrobku, o procesu jeho vytvoření, o použitých strojích, nástrojích a provozních podmínkách, o limitech možných inovací a další. Také je třeba provést řadu testů a měření zda je ta či ona inovace funkční a efektivní. A v neposlední řadě je vhodné provést důkladnou analýzu ušetřených nákladů a návratnosti financí investovaných do inovačního procesu.

1.1 Historie

Dne 15. listopadu 1886 byla Robertem Boschem založena ve Stuttgartu „Dílna pro jemnou mechaniku a elektrotechniku“. Byl tak položen základ pro Mezinárodní společnost Robert Bosch GmbH. Prvním velkým úspěchem bylo nízkonapěťové magnetoelektrické zapalovací zařízení, umístěné na motorovém vozidle, tříkolce De Dion-Bouton (obr. 2). Přelomové zde bylo i odlehčení armatury, které umožňovalo fungování zapalovacího zařízení ve vysokých rychlostech².



Obr. 2 Tříkolka De Dion-Bouton z roku 1897²

Roku 1898 přesáhla firma Roberta Bosche hranice Německa. První zahraniční pobočkou se stala „prodejní kancelář pro výrobky Bosch ve Velké Británii“. Již v roce 1905 také otevírá První výrobní závod ve Francii a rok na to expanduje i do Spojených států Amerických².

Po pěti letech vývoje začala 30. listopadu 1927 sériová výroba vstřikovacích čerpadel. Následně se firma rozmáhá i v jiných oblastech. Vyrábí plynové vytápěcí systémy a systémy pro ohřev vody, elektrické nářadí, domácí spotřebiče, hydraulickou techniku, ABS, ESP, navigace a spoustu dalšího².

Bosch Diesel v Jihlavě

Roku 1993 byla založena společnost Bosch Diesel s.r.o. v Jihlavě (obr. 3). O rok později zde pracuje prvních 160 zaměstnanců. Z počátku se zde vyrábí jednoválcová čerpadla PFM a vstřikovače. Od roku 1994 se do Jihlavy přesouvá výroba řadových čerpadel. Ta je nakonec roku 1999 nahrazena výrobou balících strojů a čerpadel PDM. Následně je rozšířena o opravu rotačních čerpadel a vstřikovačů. Roku 2003 byla výroba PDM a PFM čerpadel přesunuta do Indie. Na krátkou dobu se firma stala sídlem výroby světlometů. Ta se následně oddělila jako nová firma Automotive Lighting s. r. o.^{2,3}.

Od roku 1999 se na Pávově začíná s výrobou komponent systému Common Rail, který je v současnosti nejrozšířenějším výrobním artiklem v Jihlavě. První verze čerpadel systému Common Rail pro vznětové motory, pumpa CP1, se vyrábí do roku 2004. V průběhu času je nahrazována novějšími verzemi, jako jsou CP3, CP4 a CP1H. Také díky tomu se počet zaměstnanců mezi roky 2000 a 2001 zvýšil počet zaměstnanců z jednoho tisíce na téměř 4500. Od roku 2003 se do Jihlavy přesouvá výroba regulačních tlakových ventilů³.

V současnosti firma zaměstnává přes 4400 lidí. Do budoucna se však chystá rozšíření výroby. Do Jihlavy se přesune výroba vstřikovačů a zpětného vedení paliva³.



Obr. 3 Bosch Diesel Jihlava – Pavov³

Generace systému

Roku 1997 byla uvedena na trh první generace s elektromagneticky ovládanými injektory, která dosahovala tlaků kolem 140 MPa. Regulace tlaku byla u osobních aut řešena regulačním ventilem na straně vysokého tlaku a u nákladních aut dvěma elektromagnetickými ventily na straně sání^{2,3}.

Druhá a třetí generace pro osobní auta dosahovala shodně 160 MPa. Injektory, které jsou u druhé generace ovládané elektromagneticky, byly ve třetí generaci vyměněny za piezoelektrické. Tyto injektory jsou až čtyřikrát rychlejší. V nákladní dopravě se vstřikovací tlak třetí generace vyšplhal na 200 MPa².

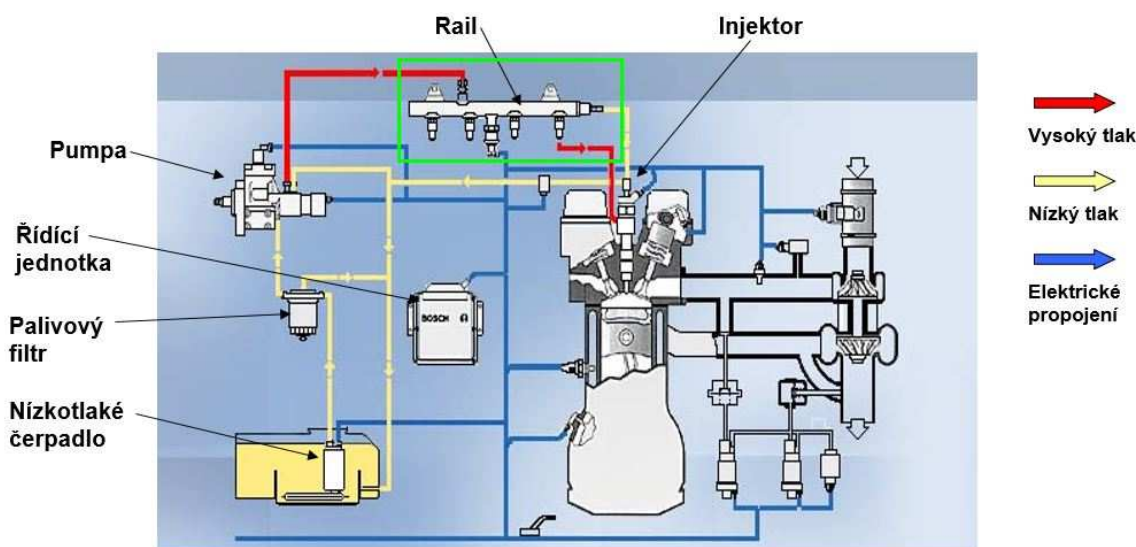
Ve čtvrté generaci je v injektoru použit „hydraulický násobič tlaku“. Tím se tlak navyšuje ze 135 MPa v zásobníku až na 250 MPa přímo v injektoru. Navíc dochází ke vstřikování se zvyšujícím se tlakem, tím dochází k lepší přípravě směsi^{2,3}.

1.2 Systém Common Rail

Jedná se o vysokotlaký systém s přímým vstřikováním paliva určený pro vznětové motory (obr. 4). Tlak až 250 MPa vytváří vysokotlaké čerpadlo, které vhání palivo potrubím do vysokotlakého zásobníku neboli railu. Z toho také pochází vlastní název „Common Rail“ neboli „společná přípojnice“. Z railu je palivo dále přiváděno do injektorů a následně do válců motoru^{4,5}.

Tento systém je v oblibě hlavně pro svoji variabilitu, schopnost tvorby velmi vysokých tlaků a tím i větší účinnost spalování a snížení množství emisí. Systém je speciální tím, že odděluje část vytváření tlaku od vstřikovací části. Vlastní vstřikovací tlak není závislý na otáčkách motoru ani na dávce vstřiku. Dávka je regulována řidičem a potřebný vstřikovací tlak je spolu s okamžikem vstřiku vypočten elektronickou řídicí jednotkou, která ovládá jejich realizaci za pomoci vstřikovače. Řídicí jednotka získává proměnné pro své výpočty z mnoha snímačů⁵:

- snímač polohy pedálu (potenciometr),
- snímače otáček klikového a vačkového hřídele,
- snímače tlaku v zásobníku a plnicího tlaku,
- snímač teploty chladicí kapaliny,
- snímač hmotnosti nasávaného vzduchu.

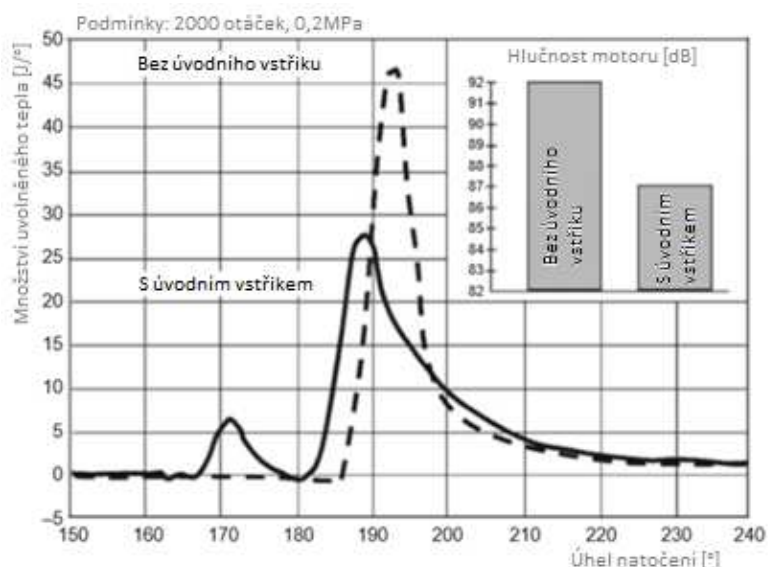


Obr. 4 Systém Common Rail⁵

Například snímač polohy pedálu přenáší do řídicí jednotky požadavek na velikost točivého momentu. Díky těmto informacím může jednotka kontrolovat vozidlo a zejména motor^{4,5}.

Krom těchto základních funkcí má řídicí jednotka i funkce přídatné. Ty mohou sloužit ke snížení emisí a spotřeby či zvýšení komfortu. Toho je možné docílit například tempomatem, recirkulací výfukových plynů či regulací plnicího tlaku⁴.

Systém Common Rail se odlišuje od jiných systémů také průběhem vstřikování (obr. 5). Oproti konvenčním systémům se vstřik dělí na úvodní (před-vstřik) a hlavní vstřik. U konvenčních systémů stoupá vstřikovací tlak se vstřikovanou dávkou a s rostoucími otáčkami. Během vlastního vstřiku také není konstantní, což ovlivňuje kvalitu tvorby směsi ve spalovacím prostoru. Úvodní vstřik Common Rail systému způsobuje „před-kondicionování“ spalovacího prostoru, čímž zlepšuje účinnost spalování, urychluje vznícení hlavního vstřiku, zvyšuje kompresní tlak a snižuje špičkový spalovací tlak^{5,6}.



Obr. 5 Průběh teploty a množství hluku při/bez použití úvodního vstřiku⁵

Systém Common Rail je možno rozdělit na část nízkotlakou, vysokotlakou a regulační. Nízkotlaká část slouží pro uchování paliva, jeho čištění a dodávku k vysokotlakému čerpadlu. Jednou z důležitých prací nízkotlaké oblasti je odfiltrování pevných částic, které by mohly poškodit následující komponenty. Vysokotlaká část slouží primárně pro natlakování paliva a jeho dodávku do prostoru motoru. Veškeré procesy jsou ovládány regulační částí shrnující vstupní data a určující potřebné výstupy⁷.

Tabulka 1 Rozdělení systému dodávky paliva^{5,6,7}

Část nízkotlaká	Část vysokotlaká	Část regulační
- palivová nádrž	- vysokotlaké čerpadlo	- regulační tlakový ventil
- předřadný filtr	- vysokotlaké palivové vedení	- snímač tlaku v railu
- chladič řídicí jednotky	- vysokotlaký zásobník	- omezovací tlakový ventil
- podávací čerpadlo	- vstřikovač	- řídicí jednotka
- palivový filtr		- ovladač recirkulace
- palivové čerpadlo		- ovládací jednotka žhavení
- chladič paliva		- nastavovač plnicího tlaku
- nízkotlaké palivové vedení		

Palivová nádrž

Palivová nádrž musí odolávat korozi a alespoň dvojnásobku provozního přetlaku, minimálně však přetlaku 0,03 MPa. Nádrž musí být těsná a palivo nesmí vytékat plnicím uzávěrem či zařízením pro vyrovnání tlaku ani v případech velkých náklonů. Musí být také vzdálena od motoru tak, aby v případě nehody nedošlo ke vznícení paliva uvnitř nádrže⁴.

Palivové potrubí

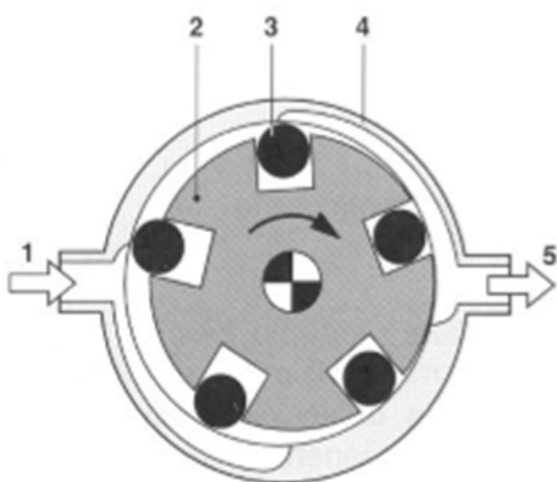
Palivové potrubí pro nízký tlak může být, mimo ocelových trubek, tvořeno také pružným vedením vyztuženým ocelovým pletivem. Je koncipováno tak aby bylo minimálně vystaveno mechanickým namáháním a tím i poškozením, což snižuje nebezpečí úniku paliva a jeho následnému vznícení. Potrubí musí být též chráněno před provozním teplem. Palivo též nesmí být přiváděno vlivem gravitace^{4,5}.

Podávací čerpadlo

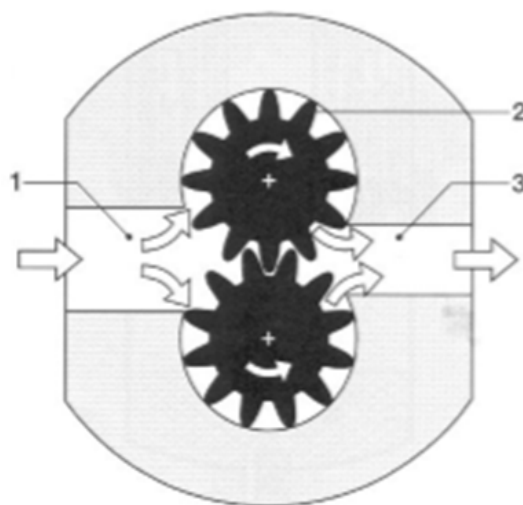
Podávací čerpadlo přivádí palivo do vysokotlakého čerpadla potřebným tlakem po celou dobu životnosti v každém provozním stavu. Čerpadlo může být buď mechanicky poháněné zubové, nebo elektrické – válečkové lamelové (obr. 6)⁸.

Elektrické čerpadlo se využívá spíše pro osobní či lehká užitková vozidla. Dalším smyslem čerpadla je kontrola a případné přerušení dodávky paliva. Při spuštění motoru běží elektrické čerpadlo nepřetržitě a nezávisle na otáčkách motoru. Palivo je díky tomu vedeno nepřetržitě z nádrže skrze palivový filtr do vysokotlakého čerpadla. Přebytečné palivo se vrací přepadovým ventilem zpět. Čerpadlo může být instalováno buď v potrubí, nebo přímo v nádrži^{6,8}.

Zubové čerpadlo (obr. 7) je součástí zásobování systému Common Rail pro osobní, užitková a zemědělská vozidla. Může být buď součástí vysokotlakého čerpadla, nebo přímo na motoru opatřené vlastním pohonem – obvykle spojkou, ozubeným kolem či ozubeným řemenem. Výhodou zubového čerpadla je jeho bezúdržbovost. Při prvním startu se pro odvodušnění systému používá přídavné ruční čerpadlo^{4,5,6}.



Obr. 6 Válečkové lamelové čerpadlo⁵



Obr. 7 Zubové čerpadlo⁵

Palivový filtr

Nečistoty z paliva separuje palivový filtr. Zabraňuje tím škodám na součástech čerpadla, tlakových ventilech a vstřikovačích. Nebezpečím je také voda ve formě emulze nebo kondenzátu způsobující korozi vstřikovacího systému. Proto je filtr opatřen sběrnou nádobkou na vodu a také automatickým hlásičem vody. Ten pomocí kontrolky hlásí nutnost vypuštění nádobky s vodou⁴.

Vysokotlaké čerpadlo

Čerpadlo od sebe odděluje nízkotlakou a vysokotlakou část systému. „Jeho úkolem je dodávat dostatek paliva pod tlakem do všech provozních oblastí po celou dobu životnosti vozidla. Obsahuje rezervu paliva, která je nutná pro rychlejší nastartování a pro rychlý nárůst tlaku v zásobníku Rail. Vysokotlaké čerpadlo vytváří trvale, nezávisle na vstřikování, systémový tlak pro vysokotlaký zásobník (Rail). Palivo proto nemusí být - na rozdíl od běžných vstřikovacích systémů - v průběhu vstřikování stlačováno“^{4,6}.

Palivo je dodáváno skrze filtr a odlučovač vody ke škrticímu otvoru pojistného ventilu. Tím prochází do mazacího a chladicího okruhu čerpadla. Hnací hřídel mění pomocí excentrické vačky vlastní rotační pohyb na pohyb přímočarý vratný a přenáší ho na tři písty čerpadla³.

Pokud podávací tlak překročí hodnotu 0,05 – 0,15 MPa, přetlačí podávací čerpadlo skrz ventil palivo do válce nacházejícího se v sacím zdvihu. Po překročení dolní úvratě pístu čerpadla se sací ventil uzavře, čímž zamezí dalšímu unikání paliva v prostoru válce. Palivo pak může být pouze stlačováno nad podávací tlak až na konstruktivní tlak, který otevře výtláčový ventil. Palivo se poté dostává do vysokotlakého okruhu. Při volnoběhu nebo částečném zatížení motoru dochází k přebytku stlačeného paliva. Ten je přes regulační ventil odváděn zpět do palivové nádrže⁴.

Rotační vstřikovací čerpadlo s radiálními písty CP1 se využívá pro malé, rychloběžné vznětové motory osobních a menších užitkových vozidel. Je možné je použít i pro tahače ve formě stacionárních motorů. Pohyb je nesen centrální hnací hřídelí, z níž se přes výstředník a vačku přenáší na radiálně umístěné písty⁶.

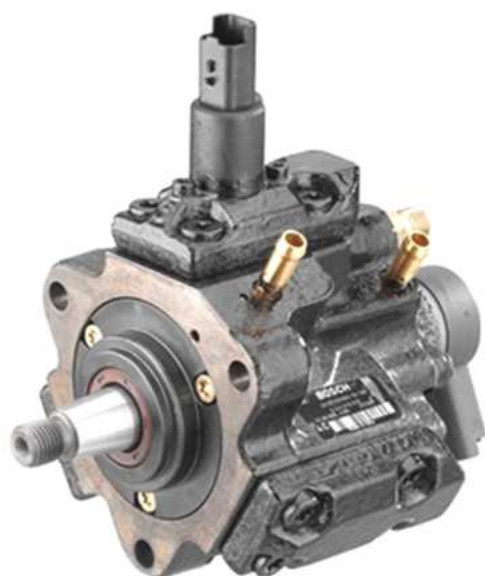
Čerpadlo CP2 je oproti ostatním verzím konstruováno jako řadové. Jednotlivé komponenty jsou mazány olejem. Váčková hřídel je prodloužená a přenáší sílu na dva písty umístěné v jedné řadě. Na prodloužené části váčkového hřídele, vystupující z těla čerpadla, je umístěno zubové čerpadlo, které přivádí palivo z nádrže do vysokotlaké pumpy. Díky vhodnému převodovému poměru je CP2 kompatibilní s ostatními řadovými čerpadly⁷.

Radiální pístové čerpadlo CP3 je první verzí pumpy s regulací množství paliva na straně sání. Čerpadlo CP3 funguje na stejném principu jako CP1 či CP1H. Liší se v konstrukci (monoblok), která snižuje množství netěsností v oblasti vysokého tlaku. Díky úpravě tzv. talířového zdvihátka působí síla nikoliv přímo na píst, ale na vlastní stěnu tělesa. Díky tomu lze využít tlaků až do hodnoty 180 MPa⁷.

Radiální pístové čerpadlo CP1H přináší zlepšení v oblasti energetické účinnosti za pomoci regulace na straně sání. Palivo dodávané do čerpadla je regulováno plynule regulovatelným elektromagnetickým ventilem. Tento postup byl vyvinut ve verzi CP3 a následně převzat verzi CP1H. Čerpadlo vytváří tlak až 160 MPa⁷.

Radiální pístové čerpadlo CP4 je v současnosti nejvíce vyráběnou komponentou tohoto typu v divizi dieselových systémů. Oproti předchozím verzím používá převodový poměr mezi otáčkami motoru a čerpadla 1:1 (dříve 2:3 či 1:2). Místo původní jednoduché vačky je použita vačka dvojitá, což umožňuje dva zdvihy pístu během jediné otáčky motoru. Čerpadlo je vyráběno ve variantách CP4.1 s jednou hlavou a CP4.2 s dvěma hlavami válců. Obě varianty jsou modulární, tedy lze bez problémů libovolně zaměňovat komponenty mezi variantami^{8,9}.

Tabulka 2 Vývojové varianty vysokotlakých čerpadel Bosch¹⁰



CP1H



CP2



CP3



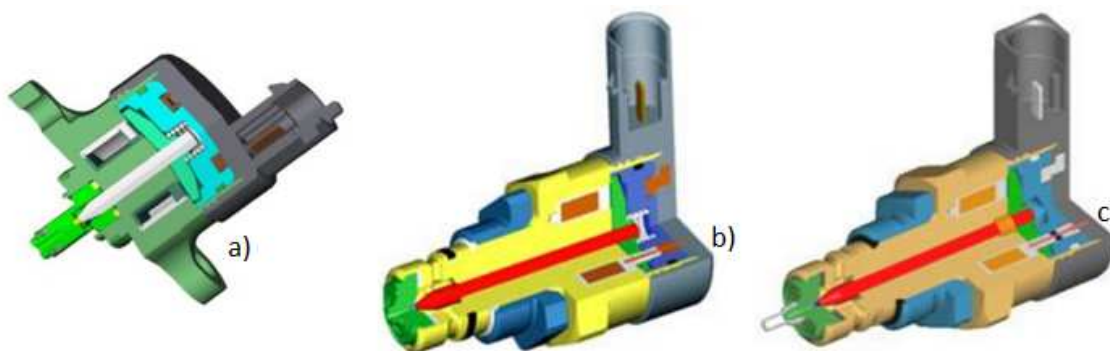
CP4

Regulační ventil

Úlohou regulačního ventilu je hlídat zatížení motoru a podle něj korigovat tlak v Railu. Ventil je připevněn k vysokotlakému čerpadlu pomocí příruby (může být též připevněn k Railu). Tlakový regulační ventil obsahuje dvě důležité části^{9,11}:

- elektrický regulační okruh nastavující střední hodnotu tlaku v Railu,
- mechanicko-hydraulický okruh pro vyrovnání vysokofrekvenčního tlakového kmitání.

Původní DRV1 (Druck Regel Ventil), používaný v první generaci, byl v dalších generacích nahrazen verzemi DRV2 nebo DRV3 s dávkovací jednotkou. Díky principu dvou regulátorů u nových verzí se palivo nepřehřívá a není nutné jej chladit. Na DRV2 a DRV3 byla oproti DRV1 přidána zářezná hrana pro tvrdé utěsnění vysokotlakého rozhraní, byl zde optimalizovaný obvod elektromagnetu pro menší spotřebu proudu a byly přidány flexibilní konce elektromagnetu pro volnou orientaci konektoru. Postupný vývoj je znázorněn na následujícím obrázku^{1,4,5,11}.



Obr. 8 Vývojové verze regulačního ventilu, a) DRV1, b) DRV2, c) DRV3¹¹

Vysokotlaký zásobník (rail)

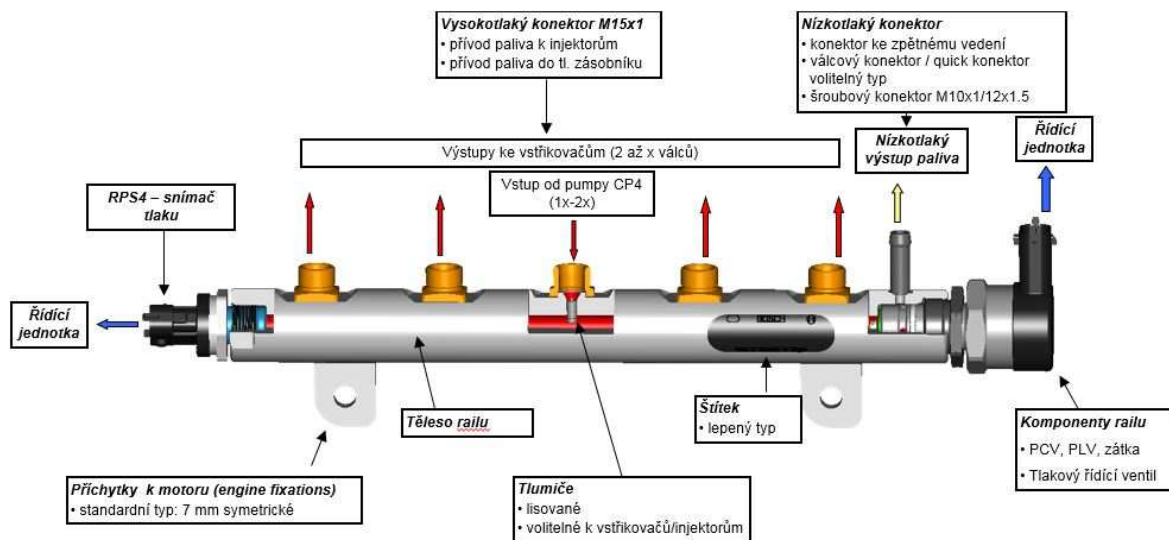
Vysokotlaký zásobník (obr. 9) akumuluje palivo a udržuje ho pod vysokým tlakem. Díky malým rozměrům dochází při nastartování k jeho velmi rychlému natlakování. Naopak je třeba, aby byl jeho vnitřní objem dostatečně velký pro tlumení tlakových kmitů vznikajících dodávkou paliva do railu a jeho odběrem vstřikovači. Díky neustálé dodávce paliva a jeho stlačitelnosti při vysokých tlacích zůstává tlak v railu téměř konstantní¹².

Palivo je přiváděno z vysokotlakého potrubí skrze přírodní otvor do hlavního těla ve tvaru trubky. Odtud je distribuováno vysokotlakými vývody do vysokotlakých potrubí vedoucích k jednotlivým vstřikovačům¹².

Snímač tlaku podává řídicí jednotce informaci o aktuální hodnotě tlaku v těle Railu ve formě napěťového signálu. Palivo tlačí na membránu snímače. Polovodičový prvek na membráně převádí tlak na elektrický signál, jenž putuje k vyhodnocovacímu obvodu. Zde je zesílen a předán řídicí jednotce⁴.

Pojistný ventil v okamžiku přesáhnutí kritické hodnoty systémového tlaku v Railu otevře odpadový otvor, který přebytečné palivo odvádí zpět do palivové nádrže⁴.

Omezovač průtoku uzavře při odebrání určitého množství paliva přívod ke vstřikovači. Omezovač funguje na principu pístu, který při nadměrném průtoku stlačí pružinu a ucpe těsnicí sedlo⁴.

Obr. 9 Svařovaný rail¹

Vstřikovač (injektor)

Injektor umožňuje dopravu paliva ze systému do prostoru spalování. Vlastní dodávka paliva se dělí na předstřik, několikanásobný vstřik a v některých případech i dostřik. Proces je tak optimalizován pro co nejúčinnější průběh spalování. V současnosti existují dva druhy vstřikovačů⁸:

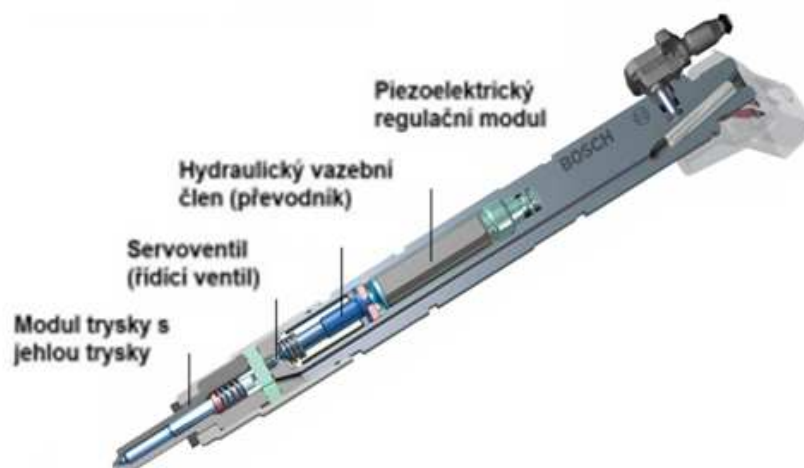
Elektromagnetický vstřikovač (obr. 10) se skládá z trysky, hydraulického servosystému a elektromagnetického ventilu. Z vysokotlaké palivové přípojky proudí palivo současně skrz přívodní kanál do vstřikovací trysky a skrze škrcení na přívodu k řídicímu ventilu^{8,11}.

Obr. 10 Elektromagnetický vstřikovač¹

Piezelektrický vstřikovač (obr. 11) oproti elektromagnetickému rychleji reaguje na budicí elektrické napětí. Odlišná konstrukce nabízí dosažení mnohem vyšší tuhosti v celé soustavě, což umožnilo zlepšení stability a redukci setrvačných hmot. Má také téměř o 50 % nižší hmotnost^{1,4,6}.

Zapojením piezoelektrického vstřikovače místo elektromagnetického bylo také docíleno těchto zlepšení¹¹:

- Snížení hlučnosti motoru – o 3 dB,
- Snížení spotřeby paliva – o 3 %,
- Omezení emisí – o 20 %,
- Zvýšení výkonu motoru – o 7 %.



Obr. 11 Piezoelektrický vstřikovač¹

Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je uzavřena v kovovém obalu. Ovládací členy, napájení a snímače jsou s jednotkou propojeny pomocí vícepólového konektoru. Obal má také funkci chlazení vnitřních prvků. Úkolem řídicí jednotky je vyhodnocení vstupních signálů z externích snímačů a omezení přípustné úrovně napětí. Přicházející informace jsou transformovány mikroprocesory na signály s časovým průběhem, které jsou synchronizovány s činností motoru. Koncové stupně jsou aktivovány pomocí výstupních signálů. Díky nim dosahují dostatečného výkonu pro akční členy regulace tlaku v railu, motorové funkce a různé pomocné funkce (např. Žhavení či klimatizace)^{1,9}.

Řídicí jednotka musí odolávat teplotám od -40 do 85 °C. Musí odolávat provozním hmotám, vzdušné vlhkosti a mechanickému namáhání (obr. 12)⁹.



Obr. 12 Řídicí jednotka Bosch¹

2 VYTVOŘENÍ VALIDAČNÍHO PLÁNU

Slovo validace by se do češtiny dalo přeložit jako ověření nebo prověření. Nejprve je třeba určit si validační parametry neboli informace o výrobku, které je třeba otestovat, aby bylo možné prokázat, že daný postup je vhodný pro zamýšlené použití¹⁴.

Validace, které je třeba provést, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3 Požadované validace

Č.	Validace	Oddělení	Odhadovaný čas [týdnů]	Stanovený min. počet vzorků[ks]
1	Rozbor současného stavu	Výroba	1	
2	Výroba vzorků pro výběr metody	Výroba	1	5 · počet metod
3	Vzorky bez zpětného odjehlení	Výroba	1	2 · počet metod
4	Měření rozměrů a geometrických tolerancí	Výroba	2	
5	Metalografická analýza radiálního vrtání v podpovrchové oblasti	Vývoj	1	2 · počet metod
6	Měření zbytkového napětí v radiálním otvoru	Výroba/Externí (TUL)	3	3 · počet metod
7	Měření railů pro výrobu tlumičů	Vývoj	2	7
8	Výroba tlumičů k zalisování	Vývoj	5	
9	Zalisování tlumičů	Vývoj	4	
10	Testování na přetlak	Výroba/Vývoj	1	
11	Robustest zalisovaných tlumičů	Vývoj/Kvalita	2	
12	Vysokotlaká pulzační zkouška	Vývoj	12	30

V této kapitole jsou teoreticky popsány důležité validace, jejichž praktické použití bude zmíněno v dalších kapitolách. Validace pro tento projekt byly navrženy vývojovým oddělením Bosch Diesel s.r.o. Firma nemá interní směrnici pro vlastní stanovení, jaké validace jsou v kterých případech nutné. Je tedy na zvážení projektového týmu a především platform-managera, jaký postup a které testy zvolit s ohledem na kvalitu a funkčnost výsledného produktu a rychlost zavedení inovace.

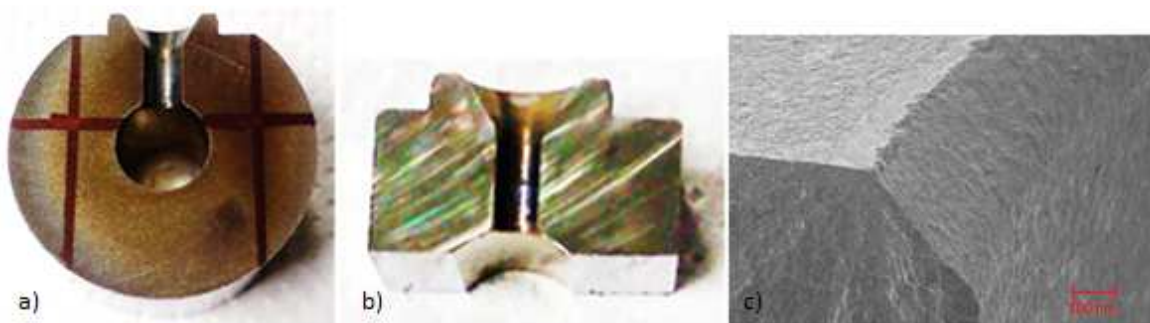
2.1 Rozbor současného stavu

V první řadě je třeba zjistit v jakém stavu je stávající výroba. Pro srovnání s navrhovanými změnami a pro větší informovanost při rozhodování je třeba provést rozbor:

- konstrukce – kritická místa,
- materiálu – vliv prvků na obrobiteľnosť,
- postupu výroby – důležité úseky,
- použité stroje, nástroje a parametry,
- vybrané validace pro stávající stav.

2.2 Výroba vzorků se zpětným odjehlením

Je nutné vyrobit dostatečné množství vzorků, aby bylo možné provést všechny požadované testy. Hodnotí se parametry pro celý průběh životnosti nástroje v každém možném uložení obrobku v obráběcím stroji. Pro výrobu vzorků vysokotlakého vývodu není potřeba přesná hodnota odstupu od předchozího otvoru, proto je možné do použité tyče vyvrtat velké množství těchto zkušebních otvorů. Tím se snižují náklady na materiál při testování inovací.



Obr. 13 Výroba vzorku: a) vzorek dodaný výrobou, b) upravený vzorek pro měření zbytkového pnutí, c) detail povrchu po zpětném odjehlení¹

2.3 Vzorky bez zpětného odjehlení

Při změně postupu vrtání se vyžaduje následná kontrola na otřepy oblasti výběhu vrtáku do hlavní dutiny railu. V případě, že jsou otřepy v dutině railu výrazně vyšší než u stávajícího stavu. Může docházet k problémům při jejich odstraňování v dalším kroku postupu.

Kontrola probíhá za pomoci endoskopu se záznamem obrazu. Vyhodnocuje se délka a množství otřepů. Pro endoskopickou zkoušku není nutné vzorkové tyče dělit. Vzorky je tedy možno následně odjehlit a použít pro další testy.

2.4 Měření rozměrů a geometrických tolerancí

Měření rozměrů je třeba provést u všech navrhovaných postupů. Je to hlavní rozhodovací parametr, který rozhoduje, zda vybraná metoda postoupí k dalšímu testování. U daného výrobku se měří:

- házení průměru,
- střední aritmetická úchylka profilu,
- válcovitost.

Házení průměru je nutné kontrolovat kvůli sériovosti výroby. Do vyrobeného otvoru se lisuje tlumič, který je vyráběn odděleně ve velkém množství nezávisle na odchylkách rozměrů otvoru railu. V praxi působí na zalisovaný tlumič pulzující tlak, který by při nedodržení rozměru mohl tlumič vytrhnout. S tím také souvisí válcovitost otvoru. Při vrtání otvoru dochází k postupnému zvětšování obrobeného průměru v závislosti na hloubce. Jelikož je tlumič následně lisován zvnějšku směrem k ose railu, tedy ve směru nežádoucího růstu průměru otvoru, může při nedodržení hodnot válcovitosti také hrozit vytržení tlumiče. Mimo tyto hodnoty se vizuálně kontroluje čistota obrobených ploch a případné otřepy. Také je třeba přímo při vlastním obrábění kontrolovat namotávání třísky na řezný nástroj a vlastní tvar třísky. Některé z použitých přístrojů jsou znázorněny v následující tabulce.

Tabulka 4 Přístroje oddělení vývoje používané pro měření rozměrů¹



MITUTOYO PJ-H3000F

Manuální provoz

Měření ve dvou osách

Měření: Délkové rozměry

Rádus

Úhly

Rozsah: X: 200

Y: 100



MAHR Perthometer Concep

Automatický režim měření

Manuální pozicování

Měření: Délkové rozměry

Drsnost*

Úhel, rádus

Rozsah: X: 200 (*20)

Y: 50 (*0,5)



MAHR Formtester kruhoměr

Možnost CNC režimu

Měření ve dvou osách

Měření: Úchylky tvaru

Úchylky polohy

Rozsah: X: 180

Z: 350

Získaný neroztříděný statistický soubor dat je třeba uspořádat, roztřídit a spočítat absolutní četnost. Absolutní četnost je počet prvků statistického souboru, jenž se nachází ve vybrané třídě. Třídou se rozumí vymezená část rozsahu hodnot, který mohou prvky nabývat. Její délku je možné spočítat jako¹⁵:

$$h = \frac{x_{(n)} - x_{(1)}}{\sqrt{n_s}} \quad (1)$$

Kde: x_1, x_n – hodnoty uspořádaného statistického souboru
 n_s – rozsah statistického souboru

Dále se určuje relativní četnost. Ta se vypočítá jako absolutní četnost podělená rozsahem statistického souboru dat¹⁵.

$$f_r = \frac{f_i}{n_s} \quad (2)$$

Kde: f_i – absolutní četnost

K vyhodnocení naměřených dat je důležité zjistit střední hodnotu souboru, rozptyl pro roztříděný statistický soubor a směrodatnou odchylku. Rozptyl se spočítá podle vzorce¹⁵:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} f_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

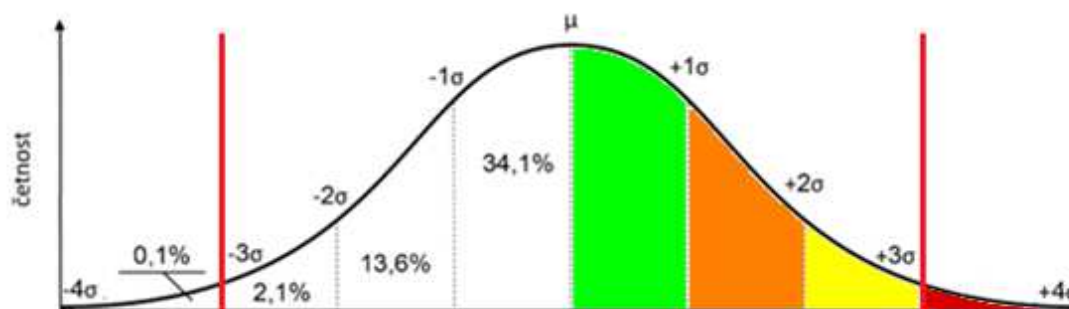
Směrodatná odchylka se vytvoří odmocněním rozptylu. Z vypočítaných hodnot je už možné vytvořit Gaussovo rozdělení¹⁴.

Při řízení jakosti výroby je často využito „pravidlo $\pm$ tři sigma“, které je založeno na předpokladu:

$$P(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) = F(\mu + 3\sigma) - F(\mu - 3\sigma) \quad (4)$$

$$= \Phi(3) - \Phi(-3) \approx 0,9973$$

To znamená, že při pozorování většího množství měřených veličin X Gaussova rozdělení (obr. 14) je možné usoudit, že přibližně 99,73% zkoumaných hodnot náleží intervalu $< \mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma >$ ¹⁵.



Obr. 14 Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti¹⁴

2.5 Metalografická analýza radiálního vrtání

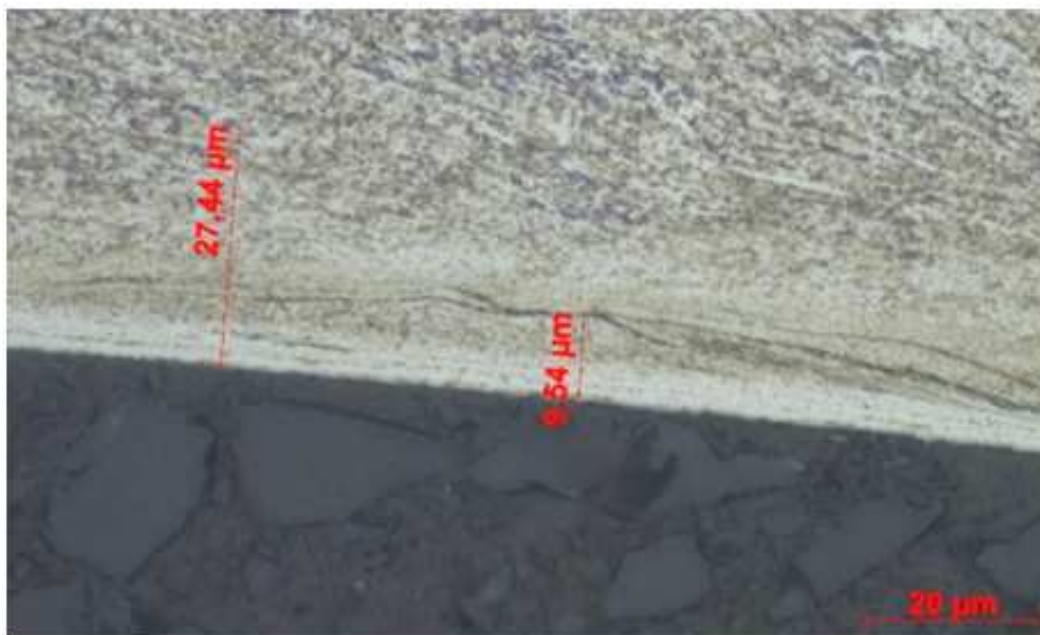
Důležitým aspektem dobře vyrobeného kusu je absence vad v materiálu. Případné vady mohou být různého původu, například:

- vady z nevhodné výroby tyčového materiálu,
- vady vzniklé při povrchové úpravě,
- vady ze špatných podmínek při skladování a manipulaci,
- vady vnesené vrtáním do materiálu.

V tomto případě se předpokládá, že první tři zmíněné typy vad byly eliminovány při dosavadním vývoji LWR. Je tedy třeba se zaměřit na poslední ze zmíněných vad – vady vnesené vrtáním do materiálu. Vrtání je invazivní proces, při kterém dochází k částečnému přetvoření povrchu vrtaného otvoru. V průběhu procesu může dojít k tvorbě trhlin viditelných na povrchu i prasklin podpovrchových.

Metoda zjišťování přítomnosti podpovrchových trhlin se nazývá metalografická analýza. Pro tuto metodu je třeba zkoumaný rail rozřezat a vytvořit z něj potřebné množství vzorků o požadovaných parametrech.

Vhodné místo pro tvorbu vzorku bylo již zobrazeno v kapitole 2.2 na obrázku číslo 13 a). Takto připravený vzorek se následně ořeže tak, aby zbyla jen velmi malá oblast v okolí vyvrtaného otvoru. Výsledný kus se zapeče do pryskyřice a následně leští pomocí diamantové pasty až na 3 μm . Následně se povrch očistí a pomocí lihu odmastí. Konečnou fází přípravy je naleptání povrchu speciálně namíchanou směsí. Vzorek je potom vizuálně zkoumán na metalografickém mikroskopu.



Obr. 15 Podpovrchové deformace¹

Na ilustračním obrázku 15 jsou vidět defekty, které se mohou v materiálu objevit po špatném obrobení. Jedná se o změnu struktury přetvořením do hloubky kolem 2 – 5 μm a o praskliny rovnoběžné s osou otvoru v hloubce 5 – 20 μm .

Podpovrchové trhliny nejsou zjistitelné, žádnou jinou metodou a mají markantní vliv na funkčnost a životnost soustavy. Obrobená plocha může mít dokonalý povrch s velmi dobrou strukturou, ale mohou se zde vyskytovat podpovrchové vady, které zapříčiní destrukci celé sestavy.

2.6 Měření zbytkového napětí

Před popisem vlastního měření je třeba charakterizovat některé proměnné.

Integrita povrchu označuje souhrn charakteristik popisujících závislost funkčních vlastností výrobku na stavu povrchové vrstvy. Je to víceméně volný soubor vlastností povrchové vrstvy, ovlivněný technologickým procesem, s vlivem na funkční vlastnosti zkoumaného výrobku. Nejčastěji se analyzují tyto faktory¹⁶:

- mikrogeometrie obrobeného povrchu,
- stupeň a hloubka zpevnění,
- strukturní, fázové a chemické změny,
- směr, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí.

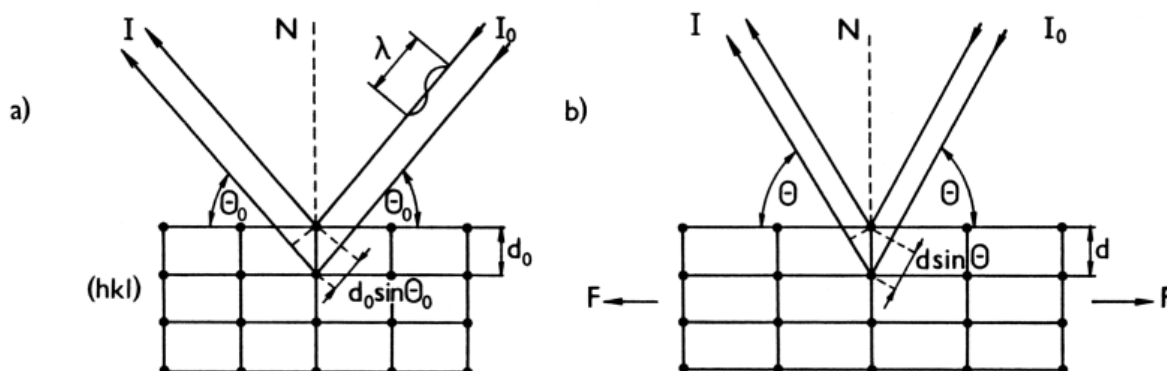
Stav napjatosti je charakterizován devíti složkami tenzoru druhého řádu, které se dají určit pomocí Hookova zákona z hodnot Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla¹⁶:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \right] \quad (5)$$

Zbytkové napětí je napětí, které zůstává v tělese po vymizení vnějších sil na něj působících. Je vždy důsledkem nehomogenních elastických či elastoplastických deformací. Mezi mechanismy vzniku se řadí¹⁶:

- Mechanické procesy deformující povrch materiálu (válečkování, leštění),
- Tepelné procesy (kalení, odlévání, sváření),
- Chemické procesy (galvanické pokovení, oxidace, koroze),
- Kombinované procesy (neideální podmínky výroby).

Tenzometrická měření mohou probíhat různými způsoby. Je možné *mechanicky* odebírat vrstvy vzorku při soustavném měření deformací. Zkoumá se závislost mezi napětím a *magnetickými* charakteristikami. Ze vstahu mezi napětím a rychlostí ultrazvukových vln vychází *ultrazvukové* měření. V tomto případě se však používá *rentgenová difrakční* tenzometrie. Ta stojí na předpokladu, že mřížkové deformace získané rentgenografickým měřením odpovídají deformacím dle teorie elasticity¹⁶.

Obr. 16 Deformace v klidovém stavu a při zatížení¹⁶

Měření zbytkových pnutí klasicky probíhá vnitropodnikově na pobočce ve Feuerbachu. Součástí tohoto projektu je prozkoumání možné spolupráce s Technickou Univerzitou v Liberci, proto byly testy prováděny na akademické půdě.

Difrakční měření byla prováděna za použití difraktometru PROTO iXRD COMBO v uspořádání χ – goniometru se zářením rentgenky s chromovou anodou při napětí 25 kV a proudu 4 mA. Analyzovány byly difrakční roviny $\{211\}$ fáze α -Fe, kterým při použití záření $\text{CrK}\alpha$ odpovídá difrakční maximum $2\Theta = 156,4$. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\Theta(\sin^2\psi)$ za předpokladu dvojosého stavu zbytkové napjatosti. Závislosti $2\Theta^{211}(\sin^2\psi)$ byly měřeny pouze ve směru tangenciálním – kolmo k ose měřeného otvoru⁴.

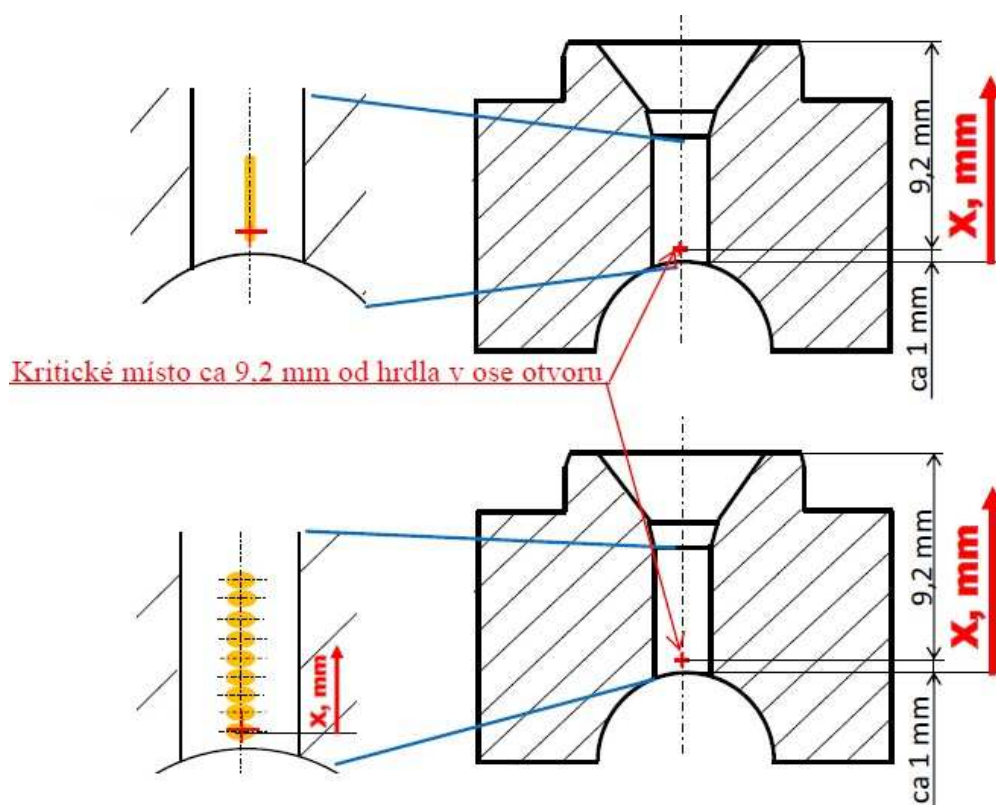
Difraktované záření (obr. 16) bylo zaznamenáváno dvěma lineárními detektory, které byly umístěny na obou stranách kolimátoru. Stanovení hodnot makroskopických zbytkových napětí bylo provedeno za pomoci softwaru XRD Win 2000. Změna difrakčního úhlu $2\Theta^{211}$ dubletu $\text{CrK}\alpha$ difraktovaného na mřížkových rovinách $\{211\}$ fáze α -Fe byla stanovena Gaussovou metodou. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5,75 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “¹.

Rentgenografické elastické konstanty lze získat z youngova modulu pružnosti E a poissonova čísla ν :

$$(S_1)^{rtg} = -\left(\frac{\nu}{E}\right)^{rtg}; \left(\frac{1}{2}S_2\right)^{rtg} = \left(\frac{\nu+1}{E}\right)^{rtg} \quad (6)$$

Hodnoty lze buď vypočítat teoreticky, nebo určit pomocí měření mřížkových deformací ve vzorcích vystavených tahu nebo ohybu¹⁶.

Bosch požaduje měření zbytkových napětí minimálně v oblasti zobrazené na obrázku číslo 17. Jedná se o kritickou oblast ve vzdálenosti 9,2 mm od hrdla vývodu. Technická univerzita v Liberci měření rozšířila (oranžová oblast) z důvodu kontroly přesnosti a reprodukovatelnosti měření.



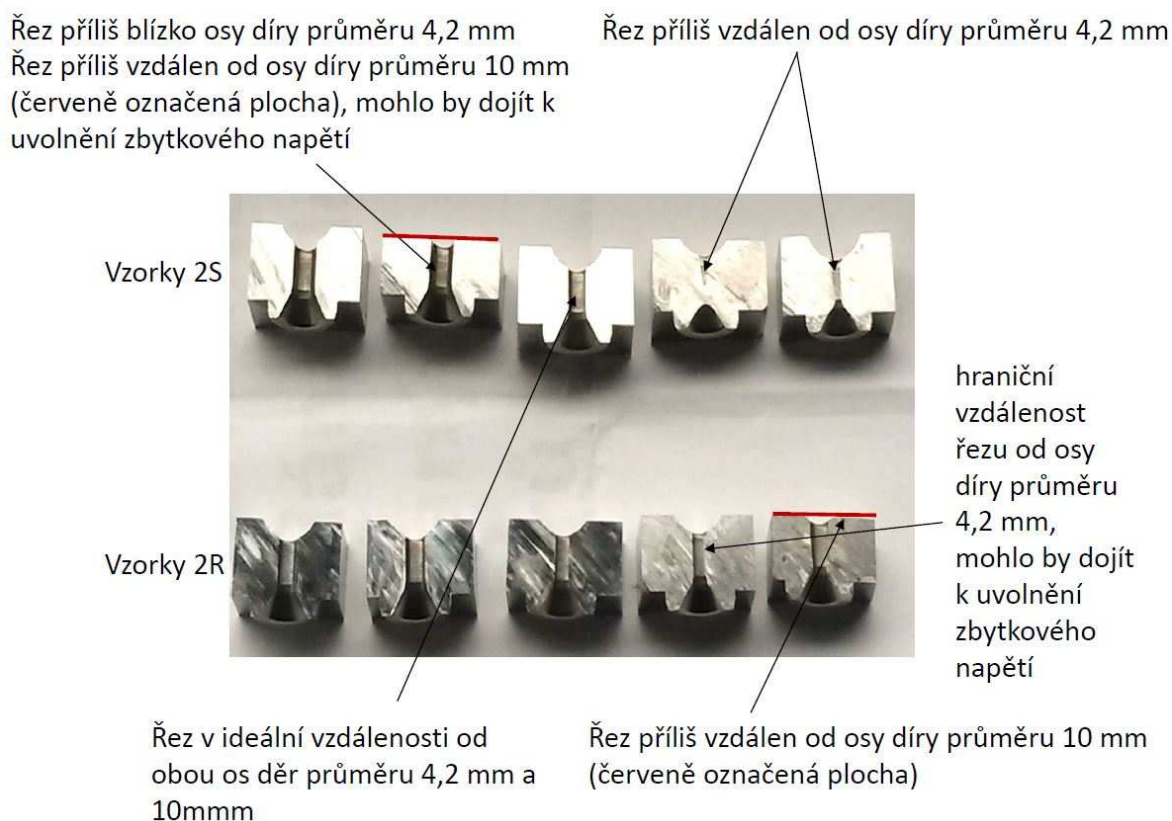
Obr. 17 Požadavek na měření v určené oblasti

Parametry měření:

- χ modifikovaná geometrie,
- doba expozice 1 s,
- 15 expozic na jedno naměřené ifrakční maximum,
- použití kolimátoru o rozměrech $0,5 \times 3 \text{ mm}^2$ a cylindrického kolimátoru $\varnothing 0,5 \text{ mm}$,
- oscilace rtg hlavy v rozsahu $\pm 3^\circ$,
- měřeno při 11 a 15 náklonech, tzn. celkem získáno 22 a 30 difrakčních maxim,
- maximální hodnota natočení rentgenky 35° .

Příprava vzorků pro měření

Vzorek radiálního otvoru byl rozdělen na půl podél osy otvoru. Poté z něj byla za pomoci přesné pily odebrána vrstva o tloušťce přibližně 0,5 mm aby byl usnadněn přístup měřidel k měřené oblasti. Tento postup je náročný, s nejistým výsledkem a pravděpodobně může ovlivnit měření. Na obrázku 18 jsou zobrazeny a popsány různé posunuté řezy vzorkem.



Obr. 18 Vybrané vzorky s upřesněním požadavků pro měření

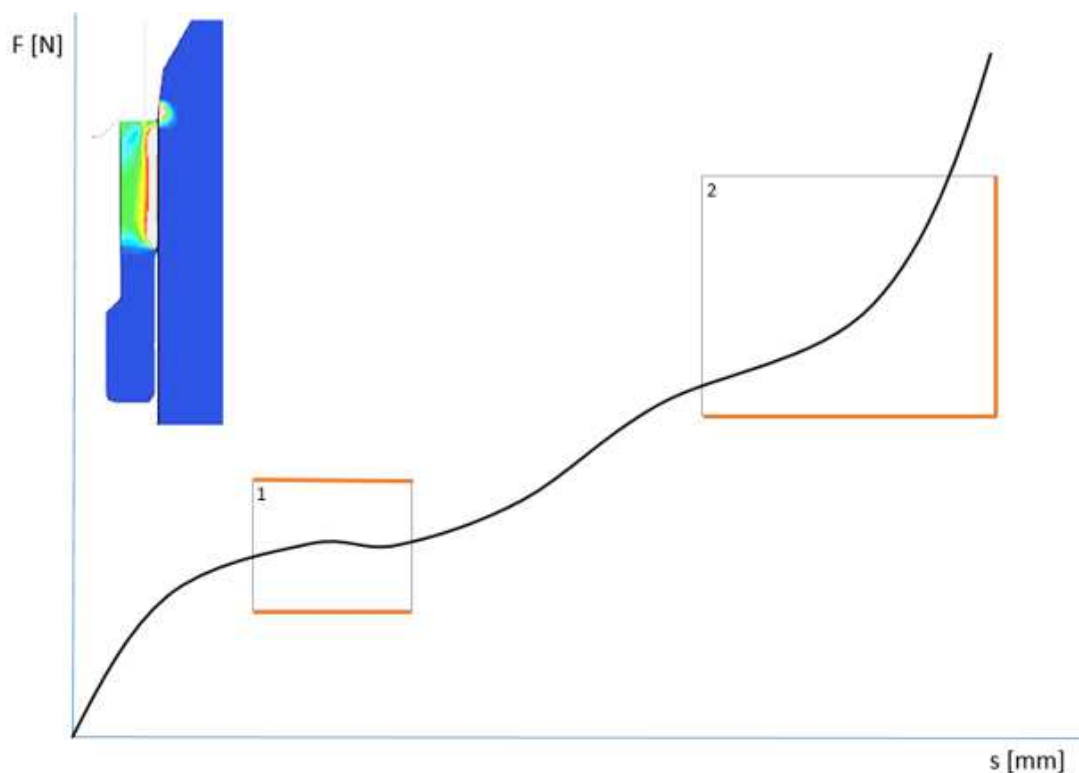
2.7 Měření railů pro výrobu tlumičů

Při vrtání radiálního otvoru vzniká takzvaná A-forma. To znamená, že se otvor se zvyšující se hloubkou rozšiřuje. Otvor se kontroluje ve dvou daných hloubkách d_0 a d_u , kde $d_u > d_0$. A jejich rozdíl nesmí být větší jak $3 \mu\text{m}$. Proměřit je třeba každý vzorek a k němu vyrobit tlumič na míru. Testují se kombinace maximálního a minimálního přípustného přesahu tlumiče v otvoru.

2.8 Zalisování tlumičů

Proces lisování tlumičů je kontrolován podle vnitropodnikové normy na takzvanou „definovanou sílu v kontrolních oknech“ (obr. 19). Křivka závislosti síly na proběhlé dráze musí projít nejprve oknem ohraničeným minimální a maximální hodnotou síly a dráhy tak, že do okna vstoupí skrze ΔF_1 při minimální dráze s_{1min} a vystoupí z něj skrze ΔF_1 při maximální dráze s_{1max} . Nesmí nastat jakýkoliv jiný stav protnutí okna než dva výše zmíněné. Druhým kontrolním oknem musí křivka projít tak, že protne nejprve svislou hodnotu ΔF_2 v oblasti dráhy s_{2min} a následně vodorovnou hodnotu Δs_2 při velikosti použité síly F_{2max} . Zbylé dvě strany okna nesmí být protnuty.

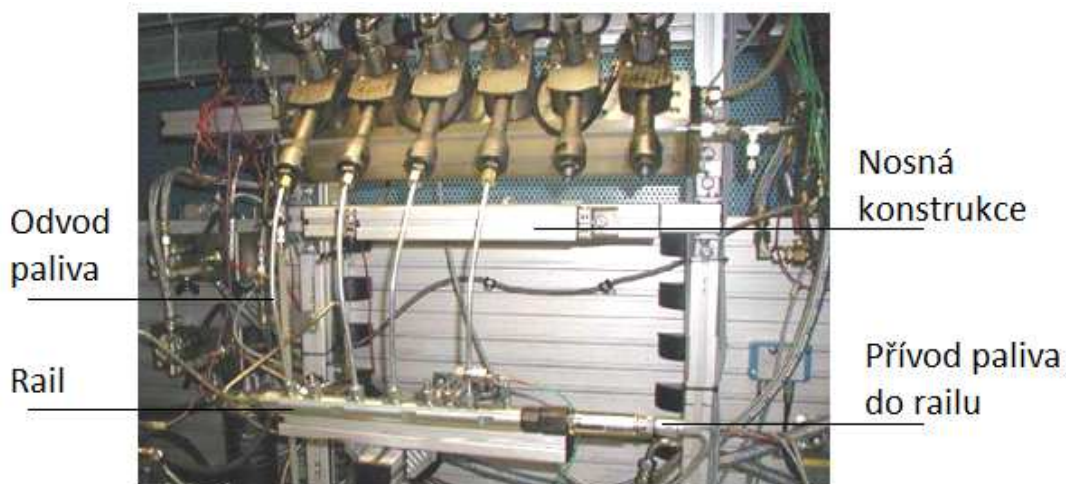
V sériové výrobě se kontroluje a ukládá každý lisovací proces pouze v oblasti výše zmíněných oken. Pro potřeby vývoje je však třeba zkoumat celý průběh křivky.



Obr. 19 Zobrazení normy „Definovaná síla v kontrolních oknech“ pro lisování tlumiče¹

2.10 Test robustnosti tlumičů

Test robustnosti zalisování tlumiče do radiálního otvoru se skládá z jednoho milionu cyklů otevření a uzavření vývodu směrem ke vstřikovači. Během jedné sekundy dojde dvacetpětkrát k vypuštění paliva a opětovnému natlakování potrubí. Tím dochází k silné pulzaci tlaku na straně vysokotlakého palivového vedení a ke slabé pulzaci tlaku uvnitř railu. Rozdíl tlaku před a za tlumičem generuje sílu, která se snaží tlumič vysunout z těla railu. Tímto testem se zkoumá upevnění tlumiče v těle railu.



Obr. 20 Upnutý rail připravený na robustest⁴

2.11 Vysokotlaká pulzační zkouška

Sestava na obrázku 21 je testována na únavovou pevnost v oblasti zalisování tlumiče. Minimální počet pulzů čítá dvacet milionů opakování. Jedná se o zatížení se sinusovým charakterem s konstantní amplitudou napětí. Tlak cyklicky přechází z minima do maxima a zpět. Hodnoty minima a maxima jsou konstantní. Stejně tak je konstantní i délka periody.

Vlastní únavový proces se dělí na tři stádia podle specifických změn v materiálu. V prvním stádiu dochází ke změnám v mikrostruktuře, které provází změny mechanických vlastností. V závislosti na typu materiálu může docházet ke zvýšení odporu materiálu vůči deformaci způsobené vnějšími vlivy, neboli nárůstu tvrdosti. Existují i materiály které cyklickým zatížením změkčují. K tomu dochází, jsou-li během zatížení oslabovány překážky bránící pohybu dislokací. Oba tyto jevy jsou ve větším měřítku nežádoucí²².

Druhým stádiem je nukleace únavové trhliny. Po určitém počtu cyklů může dojít ke změnám v materiálu způsobujícím iniciaci lomu. K tomu dochází v tzv. koncentrátorech napětí. Zásadní vliv na iniciaci lomu má stav povrchu obrobené plochy. K poslednímu stádiu, šíření trhliny, dochází bezprostředně po iniciaci trhliny²².

V praxi je druhé a třetí stádium nežádoucím jevem. Je požadováno, aby testovaný subjekt vydržel celou délku testu v oblasti bez únavového lomu, tedy v oblasti trvalé pevnosti podle Wöhlerova diagramu.



Obr. 21 Upnutí pěti railů pro pulzační zkoušku

3 ROZBOR SOUČASNÉ VÝROBY RAILU

Před vlastním rozbořem je vhodné zmínit, že výroba komponent pro diesellové motory se pyšní statistikou do maximálně 10 ppm, s potenciálem limitně se přiblížit k 0 ppm. To znamená, že se v jednom milionu výrobků aktuálně může vyskytnout 10 kusů se závadou. Tyto kusy jsou však vždy odchyceny v dalším průběhu – expedici, montáži na vozidle, testech funkčnosti.

3.1 Rozbor materiálu

Pro výrobu těla railu se používá materiál klasifikovaný normou ČSN jako ušlechtilá konstrukční slitinová ocel se zaručeným rozmezím maxima a minima obsahu chemických prvků, jako je například mangan, křemík a chrom. Přesné složení oceli, její vlastnosti a označení jsou obsahem vnitropodnikové směrnice a nemohou být v této práci zveřejněny.

Obrobitelnost

Pojmem obrobitelnost se rozumí výsledek vlivů fyzikálních vlastností a chemického složení na průběh obrábění, kvalitu a ekonomickou náročnost procesu. Obrobitelnost závisí na velkém množství faktorů, z nichž největší vliv má¹⁸:

- chemické složení obrobku,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obrobku,
- mikrostruktura, způsob výroby a tepelné zpracování obrobku,
- řezné podmínky, prostředí,
- geometrie a materiál nástroje,
- metoda obrábění.

Na obrobitelnost legovaných ocelí má vliv obsah legujících prvků. Obsah uhlíku má vliv na tvrdost. S jeho zvyšujícím se množstvím roste opotřebení otěrem. Naopak klesají negativní dopady, jako je sklon k adheznímu opotřebení nástroje tvorba nárůstku a problémy s dělením třísky^{13,17,18}.

Křemík, podobně jako hořčík a vápník, reaguje s kyslíkem a tvoří vměstky, které zvyšují rychlost abrazivního brusného otěru^{13,18}.

Přítomnost manganu zlepšuje rozpustnost uhlíku v tekutém stavu. Jeho vyšší koncentrace však může zhoršovat obrobitelnost kvůli zvýšení pevnosti a houževnatosti. Při více jak 12 % Mn se ocel stává austenitickou a je velmi špatně obrobitelná^{13,18}.

Síra má na obrobitelnost markantní vliv. Tvoří měkké inkluze sulfidu manganu, jež vytváří tenkou maznou vrstvu mezi nástrojem a odebíranou třískou, čím výrazně snižuje tření. Sloučeniny síry s manganem také umožňují lepší dělení třísky. Podobný vliv má kromě síry také olovo, čehož se využívá například u automatových ocelí. Síra má však velmi špatný vliv na svařování^{13,18}.

Karbidotvorné prvky, jako je chrom, molybden, titan, wolfram nebo niob, zvyšují opotřebení otěrem. A kyslík v reakci s ostatními prvky vytváří nekovové abrazivní vměstky^{13,18}.

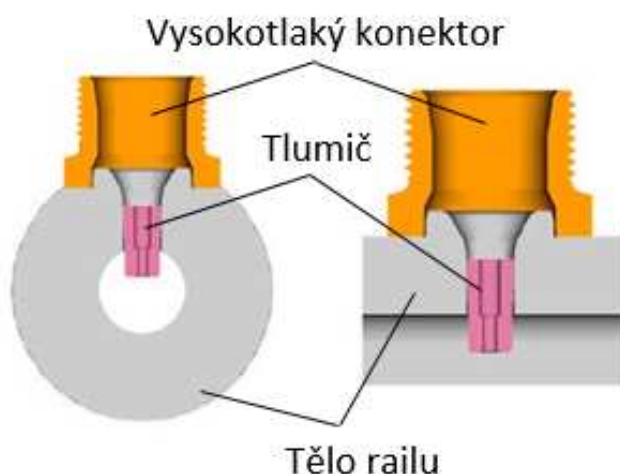
3.2 Postup výroby

Jako polotovár pro výrobu těla railu se používá tyč kruhového průřezu o průměru 30 nebo 33 mm v závislosti na požadovaném tlaku paliva uvnitř railu. Prvním krokem je hluboké vrtání otvoru po celé délce v ose railu. To je prováděno na šestivřetenové CNC vrtačce TBT s chlazením pomocí oleje. Nebezpečí vyosení vrtáku při hlubokém vrtání je sníženo díky využití rotace obrobku ve směru opačném k rotaci nástroje^{1,13,20}.

Následuje axiální a radiální obrábění vývodů. U axiálních vývodů se jedná o frézování, tj. zarovnání čela, vyfrézování potřebného vnitřního průměru a řezání závitu. Radiální nízkotlaký vývod se nejprve předvrtává, poté vystružuje a mechanicky odjehluje¹.

Výroba vysokotlakého vývodu (obr. 22) se skládá ze čtyř kroků¹⁹:

- vrtání kužele,
- vrtání otvoru nahrubo,
- vystružení otvoru,
- mechanické odjehlení.



Obr. 22 Vývod vysokotlakého zásobníku¹

Axiální a radiální obrábění probíhá na vícevřetenovém CNC obráběcím centru ELHA s pevnými vřeteny. Obrábění všech otvorů probíhá na jedno upnutí, což snižuje pravděpodobnost rozměrových nepřesností. Pro snížení časových ztrát jsou kusy označovány přímo ve stroji. Po obrábění je třeba odstranit zbylé otřepy. To probíhá pomocí tzv. praporku, což je vlastně obrobení hrany tvarovým nástrojem po zadané dráze. V případě kovaných (HFR) railů se používá i odjehlení pastou – Abrasive Flow Machining. Směs abraziva, pojiva a oleje prochází skrze tělo railu a samovolně vytéká ze všech vysokotlakých vývodů¹⁹.

Pro urychlení výroby se v jednom stroji pracuje s několika kusy najednou. Výsledný výrobek následně prochází procesem kartáčování a praní v kapalině obsahující detergenty a konzervanty. Následující výstupní kontrola se skládá z¹⁹:

- měření průměru pro tlumič za pomoci měřicího přístroje na bázi tlaku vzduchu,
- měření správnosti odjehlení pomocí endoskopu,
- vzhledová kontrola (povrch, těsnicí plochy).

U railů s nejvyššími požadavky na pevnost se provádí také autofretáž. Rail se utěsní a naplní speciálním olejem, skrze něj se díky jeho vlastnostem přetlakuje na tlak, kdy dochází k plastické deformaci vnitřního povrchu těla railu. Tento tlak způsobí v kritických oblastech takzvaný Crack Stop Effect. Dojde k zacelení případných mikrotrhlin a zabránění tvorby trhlin nových. Tento postup je účinnější u kovaných railů kvůli jejich měkkému materiálu. Rail po autofretáži vydrží až o polovinu vyšší provozní tlak a jeho životnost je až třicetkrát delší¹⁹.

Po výstupní kontrole či autofretáži směřuje polotovar do oddělení svařování. Zde se nejprve navaří nízkotlaký vývod pomocí odporového svařování. Následuje heftování vysokotlakých vývodů a úchytů. Jedná se o laserové svařování bez přídavného materiálu a bez ochranné atmosféry. Nakonec je provedeno laserové svaření vysokotlakých vývodů a úchytů s přídavným materiálem v ochranné atmosféře CO₂¹⁹.

Ve finále je třeba provést kontrolu kvality. Ta se skládá z metalografické a trhací zkoušky vybraných kusů a měření rozměrů každého kusu¹⁹.

Tabulka na následující stránce znázorňuje zjednodušený postup vybrané části výrobního procesu.

Tabulka 5 Postup výroby svařovaného railu – část obrábění¹⁹

1. Kusy jsou uskladněny v plastových přepravkách a ošetřeny protikorozním přípravkem.



2. Dopravník s kusy připravenými na hluboké vrtání. Ve stroji je upnuto najednou šest kusů.



3. Přípravek pro upnutí railů při obrábění radiálních a axiálních vstupů. V přípravku jsou upnuty dva kusy. Ve stroji je vždy jeden přípravek.



4. Značení každého kusu. Značení probíhá ve stejném přípravku jako předchozí operace obrábění. Jsou vždy značeny dva kusy zaráz.



5. Měření na měrovém středisku probíhá pomocí sond a optických přístrojů.



6. Dále prochází rail procesem kartáčování.



7. Následuje cca čtrnáctiminutový cyklus praní.



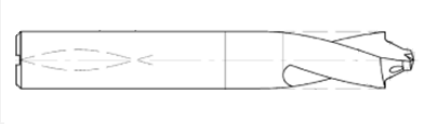
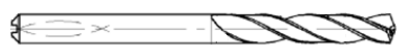
8. Nakonec prochází výrobek výstupní kontrolou.

3.3 Původní sled operaci a použité nástroje

„Moderní nástroje umožňují vrtání do plného materiálu v jedné operaci bez předcházejícího předvrtávání, nebo vrtání středících důlků – v takové jakosti vyvrtané díry, která činí následná obrábění, prováděná za účelem dosažení přesnosti rozměrů a dobré jakosti obrobeného povrchu – v mnoha případech zbytečnými“²⁰.

V prvním kroku se provádí vrtání tvarovým záhlubníkem. Akademicky se jedná o takzvané vrtání krátkých děr, které se vyznačuje relativně malým rozměrem $\frac{L}{D}$. Tvarový nástroj se zavrtává do plného materiálu do přibližné hloubky 4,6 mm, čímž vytvoří vstupní kužel včetně horního rádiusu. Následuje předvrtání otvoru na průměr 4 mm a poté vystružení na průměr 4,2 H8. Postup se základními informacemi je znázorněn v následující tabulce^{1,20}.

Tabulka 6 Stávající postup

Č.OP.	NÁSTROJ	POPIS OPERACE	NÁČRT
1	Kuželový záhlubník Bosch	Vrtání kužele 60° - Posuv 520 mm.min ⁻¹ - Otáčky 5200 min ⁻¹	
2	Vrták Bosch	Vrtání otvoru ø 4 mm - Posuv 520 mm.min ⁻¹ - Otáčky 5200 min ⁻¹	
3	Výstružník Bosch	Vystružení otvoru ø 4,2 H8 - Posuv 1560 mm.min ⁻¹ - Otáčky 5200 min ⁻¹	

Parametry procesu vrtání každým nástrojem se stanoví následovně. Řezná rychlost závisí na otáčkách vrtáku a jeho průměru¹³

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (7)$$

Průřez odebírané třísky pro vrtání do plného materiálu a při vystružování předvrtaného otvoru¹³

$$A_{D1} = \frac{D \cdot f}{4}; A_{D2} = \frac{(D - d) \cdot f}{4} \quad (8)$$

Jsou-li zuby postaveny symetricky vůči ose, vypočítá se řezná síla takto¹³

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} = f_c \cdot A_D \quad (9)$$

Následně se určí přibližný řezný výkon¹³

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{2.60 \cdot 10^3} \quad (10)$$

Případně je možné řezný výkon vypočítat za pomoci krouticího momentu k ose vrtáku¹³

$$M_c = C_M \cdot D^{x_M} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (11)$$

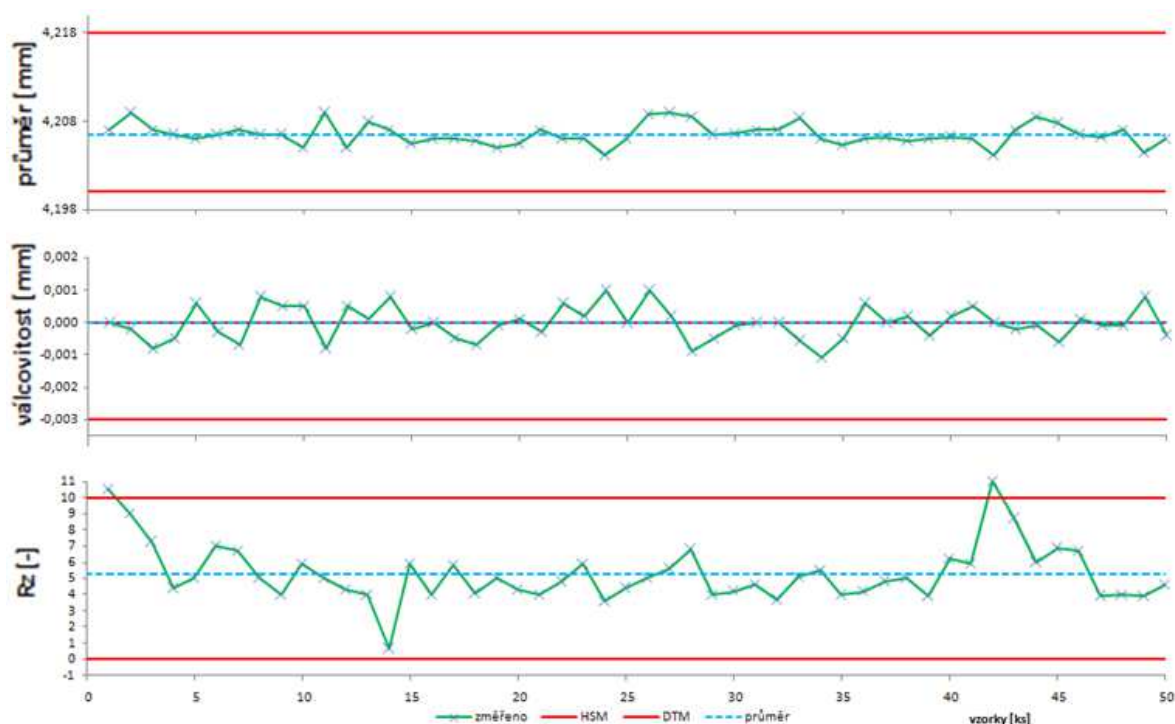
Tento výpočet se využívá díky jeho schopnosti oddělení vlivu vlastností jádra vrtáku a pasivních odporů¹³

$$P_c = \frac{M_c \cdot n}{9,55} \quad (12)$$

3.4 Měření rozměrů a tolerancí

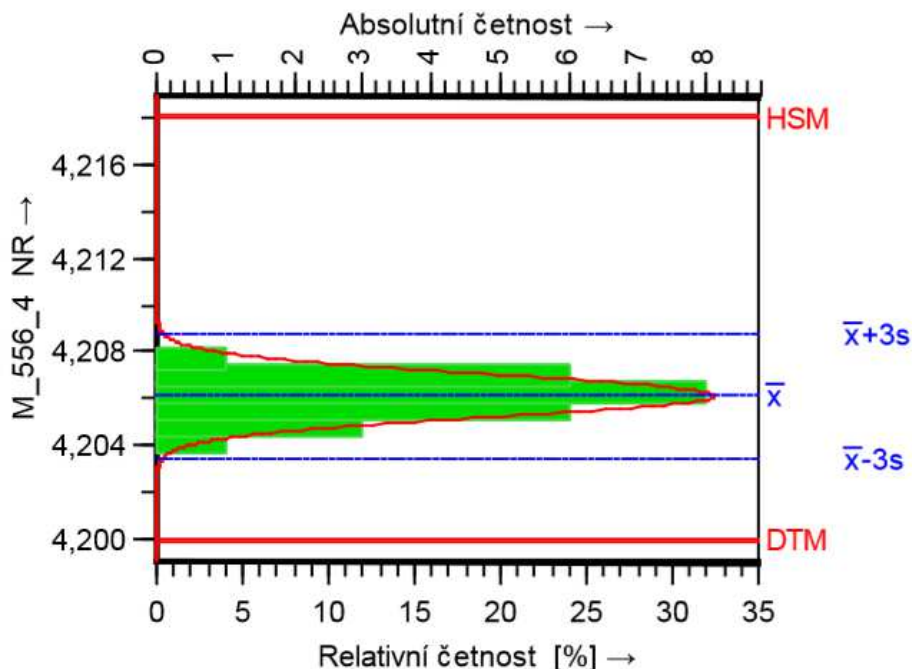
Pro srovnání navrhovaných úprav je nutné provést nejprve měření se stávajícími nástroji v původním procesu. Provádí se série obrábění po 25 vyvrtaných otvorech pro počátek, střed a konec životnosti nástroje. Vzorky jsou pak zkoumány dotykovými sondami, které měří odchylku průměru, válcovitost a střední aritmetickou úchylku profilu.

Tolerance H8 udává, že naměřená hodnota průměru otvoru se může vyskytovat v rozsahu $< 0 ; 0,018 >$. Rozsah hodnot pro kuželovitost je doporučen hodnotami $< -0,003 ; 0 >$. Střední aritmetická úchylka profilu může nabývat hodnot $< 0 ; 10 >$.



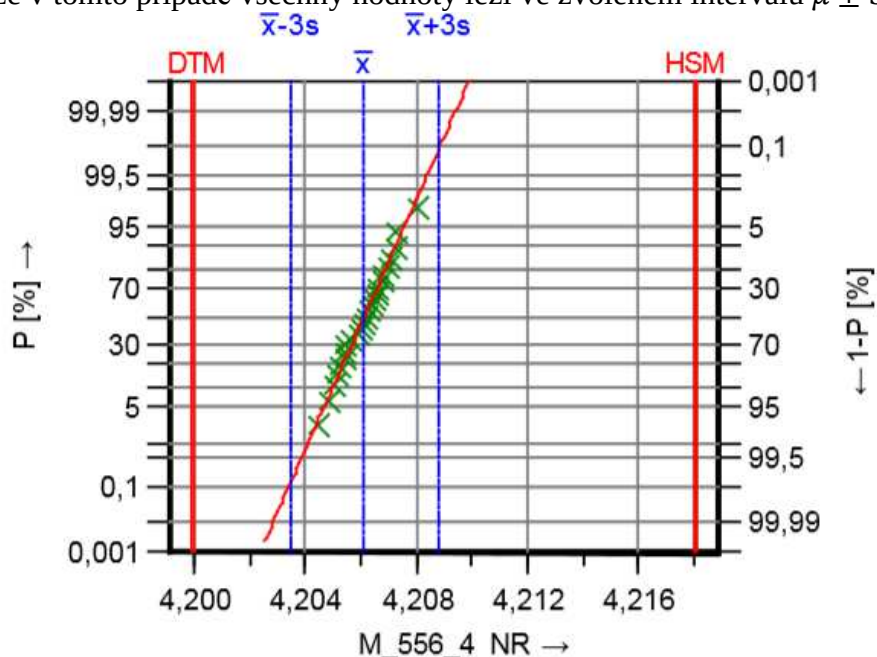
Obr. 23 Stávající stav obrábění otvoru vysokotlakého vývodu

Na následujícím histogramu je vidět rozložení výsledných hodnot z měření. V tomto případě rozložení přibližně odpovídá Gaussovu rozdělení. Případná disproporce by poukazovala na možné závady v procesu.



Obr. 24 Četnost výskytu hodnot při použití standardních nástrojů

Distribuční funkce zobrazuje pravděpodobnost výskytu naměřených hodnot. Je zřejmé, že v tomto případě všechny hodnoty leží ve zvoleném intervalu $\mu \pm 3\sigma$.

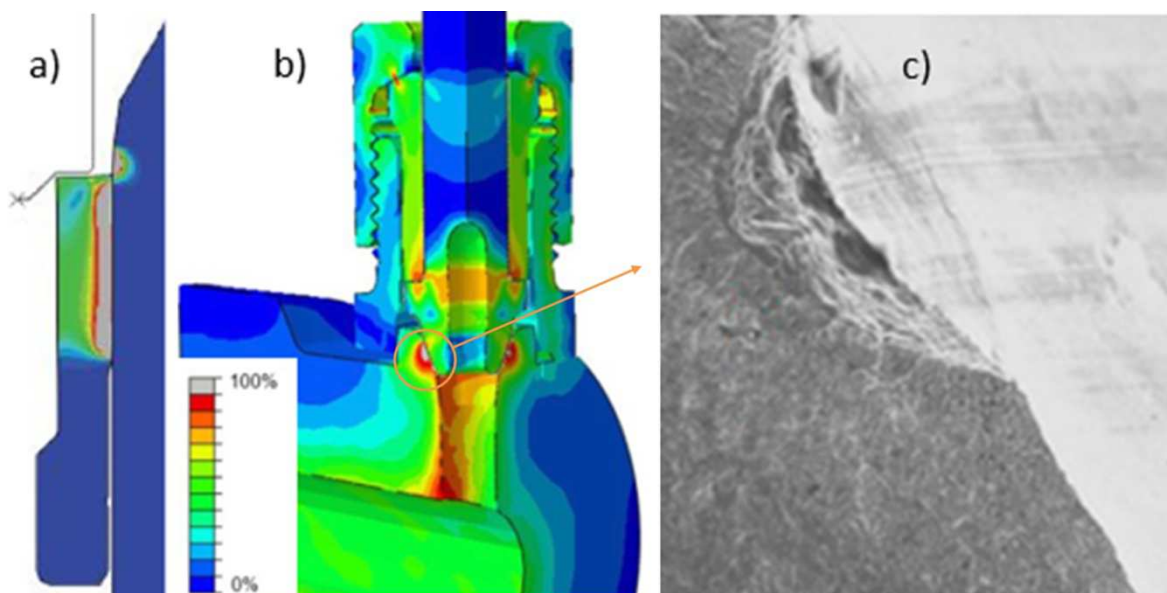


Obr. 25 Pravděpodobnost výskytu hodnot při použití standardních nástrojů

3.5 Kritické oblasti vysokotlakého vývodu

Ve vybrané části railu se z pohledu bezpečnosti nachází tři kritická místa:

- přechod mezi radiálním otvorem a dutinou railu,
- otvor pro zalisování railu,
- kuželová plocha v kontaktu s potrubím.



Obr. 26 Kritické oblasti railu: a) při lisování tlumiče b) při zatížení c) opotřebovaná oblast kontaktu s potrubím^{1,21}

Oblast přechodu do hlavní dutiny railu

Tato oblast je nejkritičtější místem celého railu. Při dlouhodobém cyklickém zatížení na tlak je právě průsečík dvou otvorů nejpravděpodobnějším místem iniciace trhliny. V této oblasti působí hned několik různých vlivů. Stěna railu je zúžená odfrézováním části povrchu, Stěna je též perforována vysokotlakým otvorem a povrchová vrstva je tepelně nerovnoměrně ovlivněna procesem svařování. Tato problematika je prakticky testována v kapitole 5.2.

Oblast kontaktu s vysokotlakým vedením

Tato část (obr. 26 c) je namáhána na otlacení či otěr. Nebezpečí hrozí hlavně v případě jednorázového extrémního zatížení při případné kolizi.

Oblast zalisování tlumiče

Je důležité, aby vnější povrch tlumiče a vnitřní povrch vývodu měl požadovanou jakost. Tlumič musí vydržet bez uvolnění po celou životnost systému. Lisovaný spoj tedy musí vydržet velké množství cyklů změny tlaku. U osobního dieselového auta s průměrnými otáčkami $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a průměrnou rychlostí $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ se může jednat až o 400 milionů cyklů.

4 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ

Po zpracování požadavků bylo navrženo několik konceptů řešení daného problému. Směry, kterými je možné se vydat, jsou:

- Úprava materiálu nástrojů,
- Snížení počtu operací,
- Úprava parametrů obrábění,
- Sjednocení nástrojů pod jednoho dodavatele.

4.1 Varianta číslo I - aplikovaná

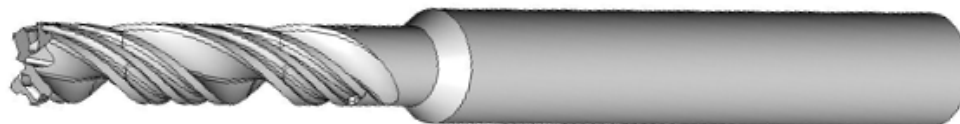
První testovanou variantou je snížení počtu operací. Namísto dvou původních nástrojů – vrtáku a výstružníku – se použije vrták pro přesné vrtání do plného materiálu.

Tabulka 7 Upravený postup dle první varianty

Č.OP.	NÁSTROJ	POPIS OPERACE	NÁČRT
1	Kuželový záhlubník Bosch	Vrtání kužele 3,4mm, 60° - Posuv 520 mm.min ⁻¹ - Otáčky 5200 min ⁻¹	
2	Vrtací výstružník	Vrtání otvoru nahotovo ø 4,2 H8 - Posuv 520 mm.min ⁻¹ - Otáčky 5200 min ⁻¹	

Dodané nástroje

První návrh vícebřitého nástroje pro přesné vrtání s vnitřním chlazením dodaný firmou Rotana. Po prvních měřeních byla tato firma vybrána jako hlavní kandidát na dodavatele potřebných nástrojů.



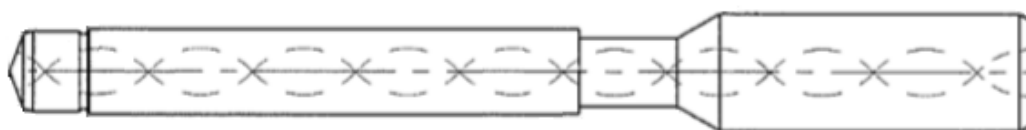
Obr. 27 První návrh nástroje firmy Rotana

Firma Guering, jejíž vrták byl pro zatím zkoumán jen základními testy, dodala obdobný nástroj.



Obr. 28 Návrh nástroje firmy Guering

Návrh nástroje firmy Hofmeister je unikátní v tom, že se skládá ze dvou navazujících částí s různými parametry. První část je klasický vrták navržený pro předvrtání otvoru. Druhá část je přesný výstružník. Tento nástroj prozatím nebyl testován.



Obr. 29 Návrh nástroje firmy Hofmeister

4.2 Varianta číslo II - náhradní

Druhá varianta počítá pouze s možností změny materiálu nástroje. Původní výstružník je vyroben z cermetu. Cermet je v tomto případě zbytečně drahý materiál, jehož přednosti nejsou při použitých podmínkách využitelné. Je nasnadě tedy použít jednodušší, levnější materiál nástroje pro vystružování. Vlastní úspora se v tomto případě omezí na rozdíl ceny nástrojů v závislosti na životnosti nástroje a možném počtu ostření.

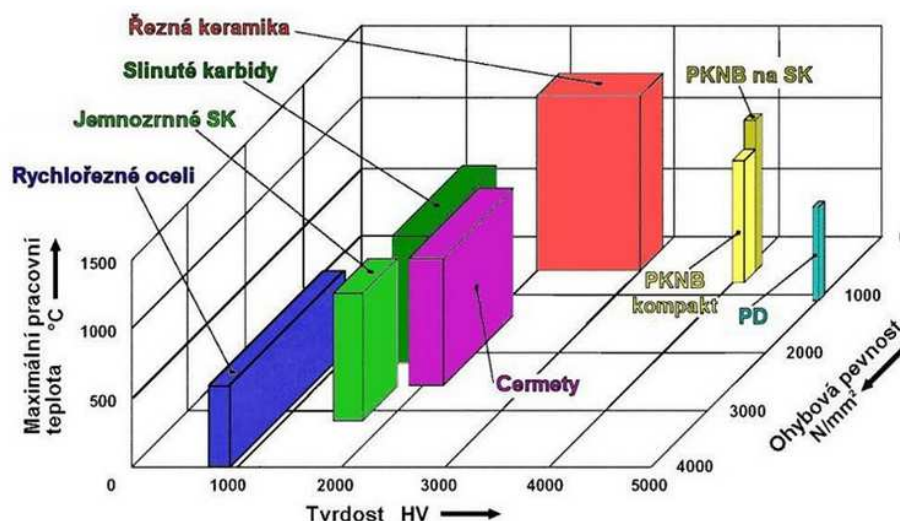
Tabulka 8 Upravený postup dle druhé varianty

Č.OP.	NÁSTROJ	POPIS OPERACE	NÁČRT
1	Kuželový záhlubník Bosch	Vrtání kužele 3,4mm, 60° - Posuv 520 mm.min ⁻¹ - Otáčky 5200 min ⁻¹	
2	Vrták Bosch	Vrtání otvoru ø 4 mm - Posuv 520 mm.min ⁻¹ - Otáčky 5200 min ⁻¹	
3	Výstružník	Vystružení otvoru ø 4,2 H8 - Posuv 1560 mm.min ⁻¹ - Otáčky 3000 min ⁻¹	

Návrh materiálu výstružníku

Obráběným materiálem je legovaná ocel s nízkým obsahem chromu a manganu. Pro dokončovací operaci vystružování jsou použitelné materiály (obr. 30), jako je:

- Rychlořezná ocel. Zde přichází v úvahu například HS 18-0-1 neboli 19824 podle ČSN. Jedná se o ocel pro běžné použití se zvýšenou houževnatostí, zejména pro nástroje s jemnými břitzy, které vyžadují velmi dobrou houževnatost. Je vhodné ji opatřit povlakem pomocí PVD technologie²²⁻²⁴.
- Nitrid boru (KNB). Je to uměle vyrobený materiál s velmi vysokou tvrdostí za vysokých teplot. Je využitelný pro dokončovací operace velmi tvrdých materiálů. Pro jeho vysokou cenu se vyrábí pouze špička, která je připájena na břitovou destičku²³.
- Syntetický diamant má podobné vlastnosti přírodnímu diamantu. Výhodou je vysoká tvrdost, odolnost proti abrazi a vysoká tepelná vodivost. Nevýhodami jsou: křehkost, afinita ke slitinám železa či niklu a nízká tepelná odolnost (do 700 °C)²³.
- Řezná keramika, jejímž základem je Al_2O_3 neboli umělý korund. Dle ČSN ISO 513 se dělí na čistou (99 % Al_2O_3), směsnou (20 - 40 % TiC, TiN), nitridovou a povlakovanou²⁴.
- Slinutý karbid (SK) je tuhý roztok karbidů v pojivové látce - kobaltu. Pro Ocel s plynulou dlouhou třískou je vhodné využít SK ze skupiny P (dle ČSN ISO). Příkladem může být SK firmy Pramet označen jako 6640 využitelný pro oblast P20 až P40²⁴.



Obr. 30 Vlastnosti materiálů řezných nástrojů²⁵

Z důvodu malých rozměrů nástroje a potřebné přesnosti nepřichází v úvahu využití vyměnitelných břitových destiček. Je tedy třeba, aby buďto špička nebo celá řezná část nástroje byla z vybraného materiálu. Z tohoto důvodu je možné zamítnout materiály jako je syntetický diamant a nitrid boru pro jejich velkou cenu.

5 VOLBA NEJVHODNĚJŠÍHO OPATŘENÍ

Před zavedením zvolené metody do sériové výroby je nutné otestovat, zda její parametry splňují požadované podmínky a provést potřebné validace teoreticky popsané ve třetí kapitole.

Ačkoliv je varianta číslo dvě snazší a má větší pravděpodobnost úspěchu, dává firma přednost první variantě s přesným vrtáním namísto operace s předvrtáním a následným vystružením pro její větší potencionální přínos.

První typ nástroje dodaný firmou Rotana má úhel sklonu šroubovice 30°. Při vrtání tímto nástrojem dochází k velkému namotávání třísek na nástroj (obr. 31). To by mohlo způsobit horší kvalitu obráběného povrchu a také poškození povrchu v okolí vrtání. Také by pravděpodobně časem začalo narůstat zatížení motoru stroje z důvodu zacpávání odchodných prostor odpadním materiálem. V horších případech by mohlo dojít i k zadření a zalamování nástrojů ve vrtaných otvorech.

Jako pokus o odstranění tohoto problému byla navýšena řezná rychlost. Ukázalo se však, že ta nemá na namotávání třísek na nástroj nijak významný vliv. Má však negativní vliv na přesnost vrtání a kvalitu povrchu.



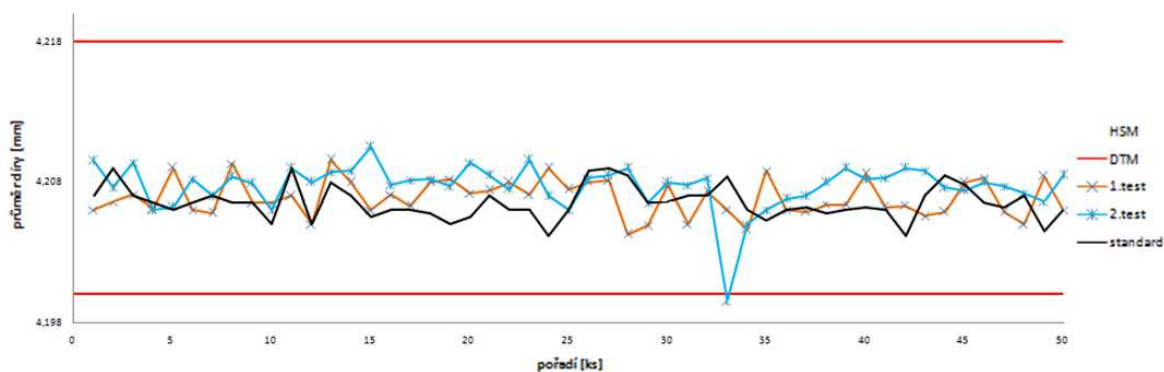
Obr. 31 Problém namotávání třísky na nástroj

Další navržená možnost byla snížit úhel sklonu šroubovice na 15°. V tomto případě nastal problém již při prvním obráběcím cyklu. Dodaný testovací nástroj byl nedostatečně naostřený, což způsobilo nadměrné vibrace a tím i špatný povrch vyvrtaného otvoru. Dalším nedostatkem byl větší rozměr takto vyvrtaného otvoru. Tyto nástroje byly z výše zmíněných důvodů reklamovány.

V případě neúspěchu u zmíněných úprav je v záloze využití motoru s reverzací chodu. V jiných případech se reverzace chodu vřetena s úspěchem využívá pro odstranění zbytků třísek z nástroje. Další možností je program přerušovaného vrtání, kdy přerušením zavrtávání do materiálu dojde k ustřižení třísky.

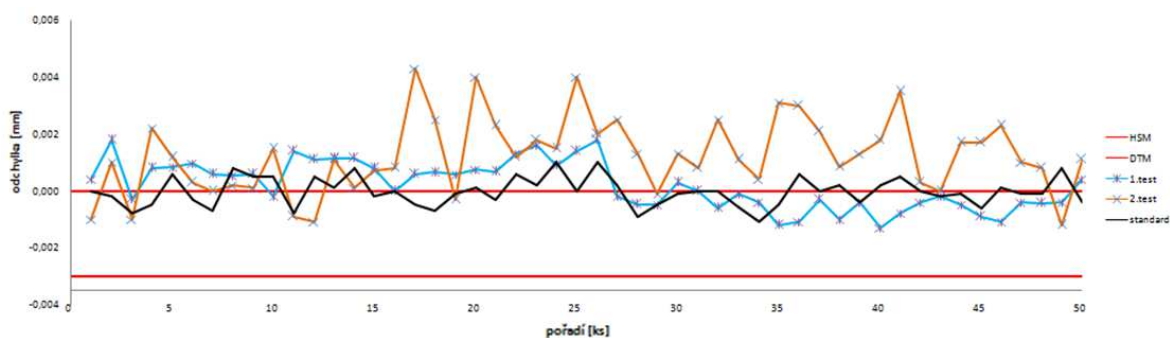
5.1 Měření rozměrů a geometrických tolerancí

Pro otestování správnosti rozměrů bylo vyrobeno každým dodaným nástrojem dvacet pět otvorů, které byly následně měřeny dotykovými sondami. V následujícím grafu je znázorněno padesát naměřených hodnot pro průměr otvoru vrtaného standardně používaným nástrojem - označeno černou barvou. Oranžově je označen první test nástroje firmy Rotana, při standardní řezné rychlosti. Modrá barva značí test nástroje Rotana při zvýšené řezné rychlosti. Hranice HSM a DTM značí limit stanovený výrobou pro daná měření.



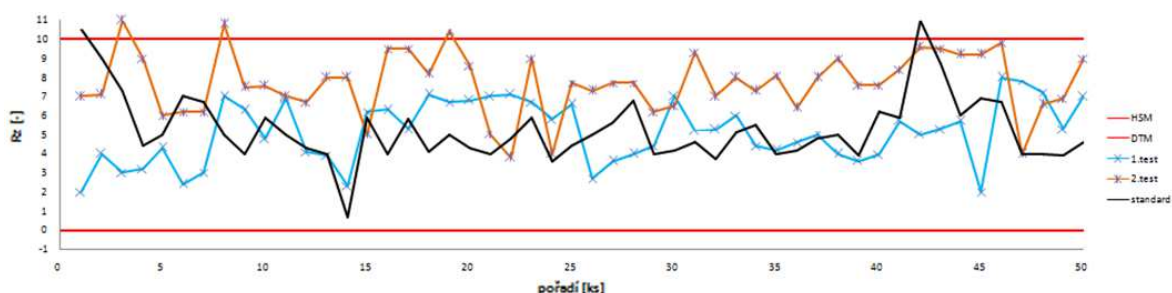
Obr. 32 Měření průměru vrtaných otvorů.

Z grafu je zřejmé. Že průměry otvorů vrtané nástrojem Rotana jsou obdobné výsledkům od standardního nástroje. Při zvýšené řezné rychlosti se přesnost vrtaného průměru také nemění. Vyskytla se zde však jedna anomálie a je nutné zjistit její původ. Může se jednat o chybu měření, ale také může jít o závadu vnesenou změnami podmínkami.



Obr. 33 Měření střední arytmetické úchylky profilu.

Na dalším grafu (obr. 33) se nachází měření úchylky profilu otvoru. Ta je při daných podmínkách srovnatelná u obou typů nástrojů. Při zvýšení řezné rychlosti dochází k velkému rozptylu naměřených hodnot mezi jednotlivými za sebou jdoucími otvory. Navíc je zřejmé, že i v případě standardního nástroje je zde prostor pro zlepšení.



Obr. 34 Měření výšky nerovnosti profilu.

Tento graf znázorňuje výšku nerovností profilu. U standardního nástroje dochází k občasným extrémům. Při obrábění nástrojem Rotana za stejných podmínek jsou výsledky příznivější, ale při zvýšení řezné rychlosti se hodnoty dostávají mimo zvolenou oblast.

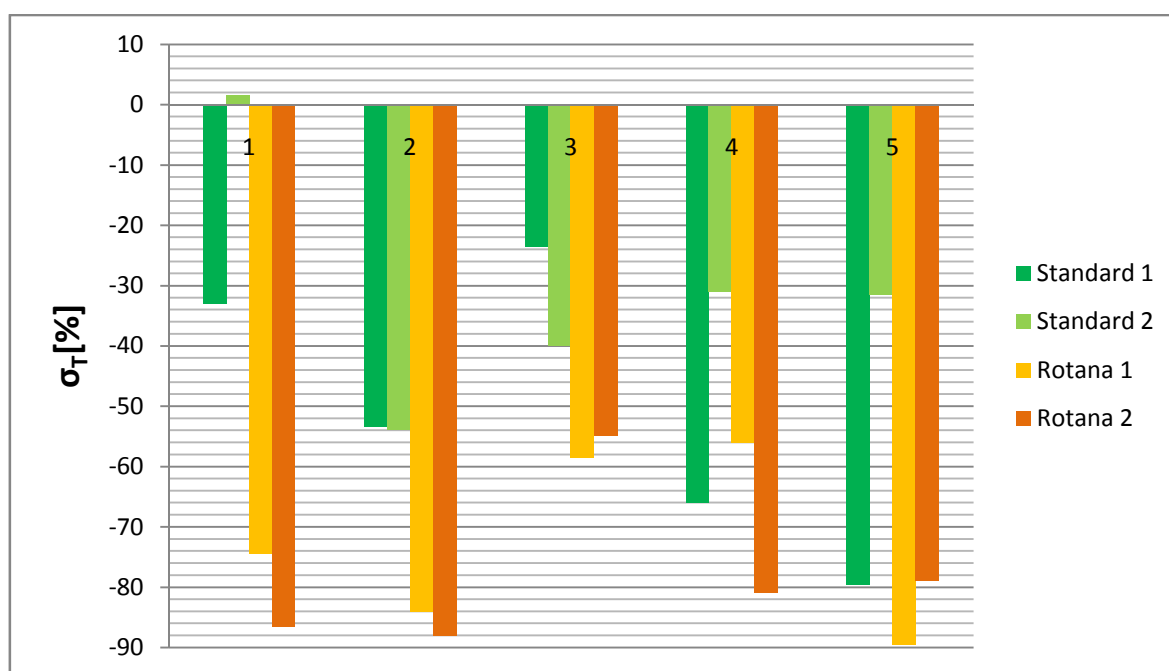
5.2 Měření zbytkového napětí

Jako první proběhlo na Technické univerzitě v Liberci měření kolimátorem o rozměrech 0,5 x 3 mm. Výsledky měření spolu s popisem nástrojů a pozic jsou v následující tabulce. Z důvodu utajení firemních informací jsou naměřené hodnoty přepočítány na procenta. Přesné hodnoty jsou obsaženy v kompletní zprávě pro firmu.

Tabulka 9 Měření zbytkového napětí oválným kolimátorem v TUL

Použití kolimátoru o rozměrech 0,5 x 3 mm

První měření					
Nástroje:	Standard		Pozice ve stroji:		
Vzorek	1	2	3	4	5
σ_T [%]	-33	-53,4	-23,6	-66	-79,6
$\Delta\sigma_T$ [%]	1,7	1,8	1,1	1,3	1,7
Druhé měření					
Nástroje:	Standard		Pozice ve stroji:		
Vzorek	1	2	3	4	5
σ_T [%]	1,6	-54	-40	-31	-31,5
$\Delta\sigma_T$ [%]	16	17	20	7	17
Třetí měření					
Nástroje:	Rotana		Pozice ve stroji:		
Vzorek	1	2	3	4	5
σ_T [%]	-74,5	-84	-58,6	-56	-89,5
$\Delta\sigma_T$ [%]	1,3	2,1	2,6	1,2	1,3
Čtvrté měření					
Nástroje:	Rotana		Pozice ve stroji:		
Vzorek	1	2	3	4	5
σ_T [%]	-86,5	-88	-55	-81	-79
$\Delta\sigma_T$ [%]	1,2	0,9	1,2	2	1,1



Obr. 35 Tangenciální zbytkové napětí po prvním měření

Na obrázku 35 je znázorněn graf prvního typu měření. Odstíny zelené jsou označeny výsledky pro standardní nástroj a uložení v pozici jedna a dvě. Odstíny oranžové značí nástroj firmy Rotana. Je vidět, že při testování nového nástroje byly zjištěny vyšší hodnoty tlakového napětí, v průměru téměř dvojnásobné.

Následně bylo pro kontrolu získaných hodnot provedeno měření na čtyřech vybraných vzorcích menším, cylindrickým kolimátorem, viz následující tabulka.

Tabulka 10 Měření zbytkového napětí cylindrickým kolimátorem v TUL

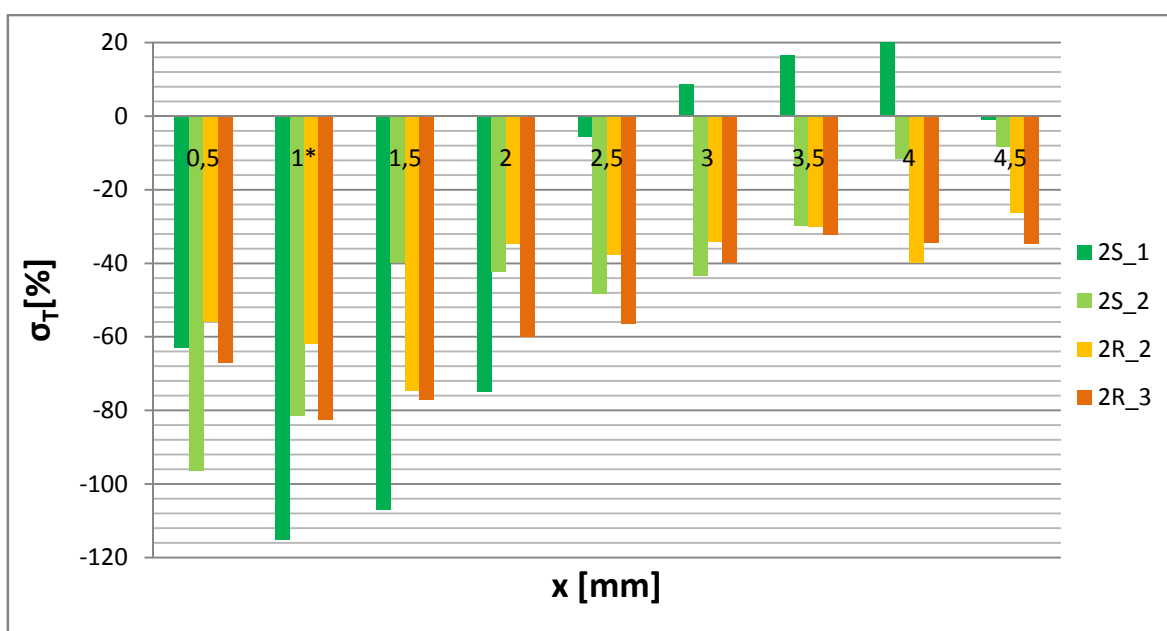
Použití cylindrického kolimátoru o průměru 0,5 mm

2S_1			2S_2		
x [mm]	σ_T [%]	$\Delta\sigma_T$ [%]	x [mm]	σ_T [%]	$\Delta\sigma_T$ [%]
0,5	-63	5	0,5	-96,3	2,4
1*	-115	3,5	1	-81,5	3
1,5	-107	3	1,5	-40	1,5
2	-75	2,7	2	-42,4	2,7
2,5	-5,6	2,6	2,5	-48	1,3
3	8,6	3,4	3	-43,4	1,4
3,5	16,6	2,8	3,5	-30	2,6
4	21	2,2	4	-12	2,5
4,5	-1,1	2,8	4,5	-8,4	1,1

2R_2			2R_3		
x [mm]	σ_T [%]	$\Delta\sigma_T$ [%]	x [mm]	σ_T [%]	$\Delta\sigma_T$ [%]
0,5	-56	2,4	0,5	-67	1,8
1*	-62	2,6	1	-82,5	3
1,5	-74,6	2,2	1,5	-77	2,1
2	-34,7	2,1	2	-60	1,6
2,5	-37,7	1,5	2,5	-56,5	1,5
3	-34	1,3	3	-40	1,2
3,5	-30	1,5	3,5	-32	2
4	-40	3,3	4	-34,4	2,1
4,5	-26,3	2,5	4,5	-34,6	1,6

*kritická oblast ve vzdálenosti 1 mm od vnitřní hrany otvoru

Následující graf ukazuje, že v kritické oblasti je tangenciální zbytkové napětí obdobné u obou variant. S přibývajícím vzdáleností od osy railu se však tlakové napětí při použití standardního nástroje snižuje. V některých případech se mění na napětí tahové, což je pro další využití méně vhodné. Naopak po použití nového nástroje vychází zbytková napětí přibližně konstantní v celém průřezu.



Obr. 36 Tangenciální zbytkové napětí při kontrolním měření

Na základě výsledků difrakční tenzometrické analýzy vnitřních povrchů dodaných segmentů radiálních otvorů lze konstatovat následující.

Ve všech analyzovaných případech mimo vzorek 2S_1 byla zjištěna ve vyšetřovaném tangenciálním směru tlaková zbytková napětí.

Mezi hodnotami tlakových zbytkových napětí získaných rentgenografickou tenzometrickou analýzou vybraných povrchových oblastí je významný rozptyl vždy mezi vzorky jedné série tj. 1S, 2S i 1R, 2R. Tento efekt je pravděpodobně zapříčiněn dvěma aspekty:

- Příprava vzorků nevhodná pro tento typ měření. Vzorky se liší rovinou řezu jak v ose analyzovaného povrchu, tak u druhého kolmého otvoru. U segmentů s rozdílnými rozměry poté dochází k odlišnému uvolnění zbytkových napětí a tím i jejich rozdílné konečné superpozici.
- Případný silný vliv gradientů povrchových zbytkových napětí, jimiž je ovlivněn výsledek, který je integrální hodnotou ozářené oblasti o rozměrech cca 0,5 x 3 mm.

Na základě výsledků získaných měření povrchů v oblasti kritického místa s menším kolimátorem o průměru 0,5 mm lze odhadovat, že vzorky série 1S a 2S vykazují větší gradienty povrchové distribuce zbytkových napětí v porovnání se vzorky série 1R a 2R. Na základě tohoto zjištění lze učinit tato doporučení:

- Vždy měřit danou oblast kolimátorem 0,5 x 3 mm a mít integrální hodnotu, která je vždy v rámci chyby měření opakovatelná
- Zvolit pracnější mapování povrchu pomocí kolimátoru o průměru 0,5 mm, kde však při opakování experimentu nemůže být vždy zaručen totožný výsledek a to díky problematickému přesnému zaměřování dané ozářené oblasti, jež v tomto případě činí pouze 0,2 mm².

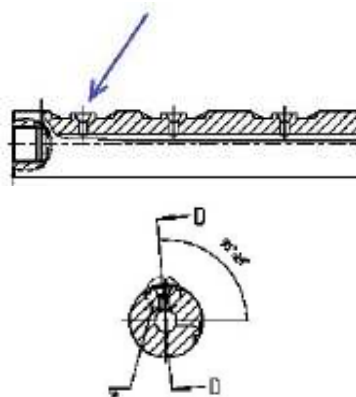
I přes zmíněné aspekty lze na základě výsledků říci, že otvory vyrobené nástrojem Rotana vykazují vyšší hodnoty povrchových makroskopických zbytkových napětí.

5.3 Metalografická analýza radiálního vrtání

Byla provedena analýza mikrostruktury materiálu v oblasti obrábění radiálního otvoru 4,2 H8 z hlediska deformace a případného zpevnění materiálu, které může vzniknout při procesu vrtání tohoto otvoru. Údaje o vzorku jsou vypsány v následující tabulce. Z důvodu utajení jsou zvětšeny rozsahy hodnot tvrdosti a pevnosti.

Tabulka 11 Základní údaje

V.č.	F00R L00 874
Průměr	33h9
Tvrdost	250 – 400 HB
Pevnost	850 – 1200 MPa
Počet vzorků	10
Pozn.: S – standard; R - Rotana	



Pro snímkování byl využit optický mikroskop Axioplan2.

Tabulka 12 Použití standardního nástroje, pozice 1 a 2



Vzorek 1S_A

Zvětšení 100x

Leptáno Nital

Zředění 1 %

Vzorek 1S_B

Zvětšení 500x

Leptáno Nital

Zředění 1 %

Vzorek 2S_B

Zvětšení 500x

Leptáno Nital

Zředění 1 %

V tabulkách 12 a 13 je znázorněna struktura materiálu poblíž otvoru vysokotlakého vývodu. Hlavní sledovanou částí je povrchová vrstva (přechod mezi světlou a černou plochou) kde se mohou vyskytovat defekty.

Tabulka 13 Použití nového nástroje



Vzorek 1R_A

Zvětšení 500x

Leptáno Nital

Zředění 1 %



Vzorek 1R_B

Zvětšení 100x

Leptáno Nital

Zředění 1 %



Vzorek 2R_C

Zvětšení 500x

Leptáno Nital

Zředění 1 %

Tabulka 14 Průchozí podélný průměr



Zvětšení 1000x

Šipky ukazují deformaci struktury, která vzniká při vrtání hlavního otvoru. Jedná se o velmi malou deformaci, která je standardní a ničím neobvyklá.

Výsledky měření:

Případná deformace struktury při daném způsobu obrábění nebyla prakticky zaregistrována. Jediný rozdíl mezi vzorky „S“ a „R“ je v drsnosti povrchu. Při obrábění nástrojem „R“ nejsou patrné při větším zvětšení prakticky žádné prohlubně. Zvýšená plastická deformace struktury nebyla zachycena ani na hlavním podélném otvoru, kde je tento jev celkem běžný. Deformace struktury v průchozím podélném průměru, viz tabulka 14, je minimální.

6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Nyní je třeba vyhodnotit, jak jsou dané úpravy přínosné. Využitelný časový fond udává počet využitelných pracovních hodin za kalendářní rok:

$$VČF = (51 - odst.) \cdot S \cdot H \quad (13)$$

$$VČF = (51 - 1) \cdot 20 \cdot 7,5 = 7500 \text{ h}$$

Kde: odst. – počet týdnů odstávky na stroj za rok

S – počet směn za týden

H – odpracovaných hodin za směnu

Potřebný čas pro výrobu 1,8 mil.ks.:

$$T_i = \frac{(Q \cdot Takt_i)}{3600} \quad (14)$$

$$T_s = \frac{(1800000 \cdot 76)}{3600} = 38000 \text{ h}$$

$$T_R = \frac{(1800000 \cdot 71)}{3600} = 35500 \text{ h}$$

Kde: Q – předpokládaný objem výroby za rok

$Takt_i$ – takt stroje při vybraném postupu

Potřebný počet strojů:

$$P_i = \frac{T_i}{VČF} \quad (15)$$

$$P_s = \frac{38000}{7500} = 5,06 \approx 6 \text{ ks}$$

$$P_R = \frac{35500}{7500} = 4,73 \approx 5 \text{ ks}$$

Z výpočtů je patrné, že při stávající situaci je nynější počet 7 strojů pro vrtání kovaných railů nadbytečný. Vyšší počet strojů je použitelný v případě nárazové výroby větších objemů. Po zavedení inovace bude při konstantní výrobě stačit pouze pět strojů.

Využití nástroje:

$$N_i = \frac{Z}{O_{ks}} \cdot (ost_i + 1) \quad (16)$$

$$N_s = \frac{4000}{8} \cdot 3 = 1500 \text{ ks}$$

$$N_R = \frac{3000}{8} \cdot 3 = 1125 \text{ ks}$$

Kde: N_i – počet vyrobených railů na jeden nástroj

Z – teoretická životnost nástroje

O_{ks} – počet vyvrtaných otvorů v jednom railu

ost_i – počet ostření daného nástroje

Vliv ceny nástroje dává do souvislosti vnesené částky za pořízení a ostření nástrojů a počet railů obrobených za životnost nástroje:

$$C_i = \frac{A_i + ost_i \cdot A_{ost_i}}{N_i} \quad (17)$$

$$C_s = \frac{791 + 2 \cdot 196}{1500} + \frac{1422 + 2 \cdot 307}{1500} = 2,146 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

$$C_R = \frac{1000 + 2 \cdot 307}{1125} = 1,435 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

Kde: A_i – cena nástroje

A_{ost_i} – cena ostření daného nástroje

Roční úspora:

$$U = (C_s - C_R) \cdot Q \quad (18)$$

$$U = (2,146 - 1,435) \cdot 1800000 = 1\,280\,400 \text{ Kč} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Na nákladech spojených s využitím nástroje je možné při předpokládané výrobě ušetřit skoro 1,3 mil. Kč ročně. Další úspory plynou ze snížení nákladů při využití menšího počtu strojů a z uspořené času na obsluhu stroje.

Návratnost inovace se vypočítá jako součet vnesených nákladů na inovaci podělený ročním výnosem ze zlepšení:

$$NI = \frac{Pt + Zn + Ma + Vz}{U} \quad (19)$$

$$NI = \frac{1000000 + 84000 + 30000 + 80000}{1280400} = 0,9 \text{ let}$$

Kde: Pt – pulzní testy

Zn – testy zbytkového napětí

Ma – metalografická analýza

Vz – výroba potřebných vzorků

Úspora při využití testování zbytkového napětí na Technické univerzitě v Liberci při předpokladu 20 testů ročně pro jihlavské závody:

$$TUL = (C_F - C_{TUL}) \cdot Q_m \quad (20)$$

$$TUL = (115000 - 84000) \cdot 20 = 620000 \text{ Kč} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Kde: C_F – cena testů na pobočce Feuerbach

C_{TUL} – cena testů na Technické univerzitě v Liberci

Q_m – předpokládaný počet objednaných testů za rok

7 DISKUZE

7.1 Cíle

Cílem vlastní práce bylo navrhnout řešení problému finančně a časově náročné části výroby, Popsat potřebný postup pro zavedení vybraného řešení a provést v rámci časových možností některé testy.

Firmou byl navíc stanoven cíl prozkoumat možnou spolupráci při některých testech s akademickou půdou.

A autor si navíc vzal za cíl vytvořit dokument zobecňující proces začlenění inovace do výroby, který by zjednodušil a případně i urychlil možné budoucí inovace.

7.2 Navržené varianty

Pro řešení zadaného problému byly sepsány dvě nejvhodnější varianty. První varianta, zjednodušení výrobního postupu, je dle dosavadních výsledků aplikovatelná a přináší zlepšení ve více oblastech. Tato varianta projde v budoucnu ještě několika testy a bude pravděpodobně aplikována.

Druhá varianta nabízí jednodušší řešení – úpravu materiálu nástroje při zachování stávajících postupů. Zde se nabízí mnoho různých materiálů. Některé, jako je nitrid boru, byly vyřazeny kvůli problémům s aplikovatelností na nástroj o tak malém průměru (viz kapitola 4.2). Tato varianta byla zvolena jako náhradní v případě neúspěchu první varianty.

7.3 Přínos

V ekonomickém zhodnocení je vyjádřen přínos z hlediska finančních úspor na pořízení nástroje. Dále je zde uveden přínos ve formě využití menšího počtu strojů. Finanční přínos tohoto zlepšení zde uveden není, protože hodnoty k němu jdoucí se řadí mezi důvěrné informace firmy. Ze stejného důvodu zde nejsou uvedeny i některé další úspory.

Spolupráce s Technickou univerzitou v Liberci je pro firmu také přínosná nejen finančně, ale i rychlostí zpracování a dodání dat. Do budoucna je možná spolupráce v oboru testování radiálních zbytkových napětí i s Vysokým učením technickým v Brně.

7.4 Problémy

Hlavním problémem v praxi bylo namotávání třisek na nástroj. Jedním z řešení je zapojení reverzace chodu pohonu nástroje po odjetí obrobku. Tato možnost vyžaduje inovaci pohonu. Dalším řešením by byl program přerušovaného řezu. Ten by problém vyřešil, ale způsobil by navýšení času taktu stroje, což je pro velkosériovou výrobu nepříjemné.

V současné době je v plánu konzultace s firmou Seco, která mimo jiné nabízí speciální postupy ostření nástrojů, které by tento problém mohly vyřešit.

7.5 Výsledky měření

Měření rozměrů a úchylky profilu

Průměr otvoru naměřený u vzorků vrtaných novým nástrojem se výrazně neliší od standardních. Střední aritmetická úchylka profilu je u nového nástroje hraniční ale při těchto hodnotách nijak výrazně neovlivňuje funkčnost výrobku. Drsnost povrchu otvoru se také nachází ve stanovené oblasti.

Měření zbytkového napětí

Měření tangenciálních zbytkových napětí poukazuje na fakt, že v kritické oblasti je napětí v obou případech tlakové. Při použití nového nástroje je napětí vyšší a stabilnější. Tlakové napětí pomáhá v tomto případě s prevencí případných trhlin, nebo s uzavíráním již vzniklých trhlin.

Metalografická analýza

Z analýzy vyplývá, že struktura podpovrchové oblasti v blízkosti vrtaného otvoru není nijak markantně přetvořená a neobsahuje žádné viditelné trhliny. Tyto výsledky odpovídají výsledkům testů se standardními nástroji.

Kromě zde diskutovaných variant řešení byly navrženy i další. Ty však byly zamítnuty z důvodu náročnosti provedení nebo nevhodnosti pro danou výrobu.

Ačkoliv je výroba svařovaných railů na ústupu, stále je zde prostor pro určitý vývoj a finanční úspory.

ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce byla úprava procesu výroby vysokotlakého radiálního vývodu tlakového zásobníku systému Common Rail.

Základním kamenem rozebíraným v této práci je vytvoření validací k danému procesu. Nejprve byl vytvořen validační plán, který obsahuje všechny potřebné kroky k prověření aplikovatelnosti inovace. Následuje rozbor validačního plánu. Na něj navazují jednotlivé varianty řešení doplněné o nabídky nástrojů z několika firem. Dále je vybrána metoda zlepšení a vybraný nástroj zkoumán potřebnými testy dle časových možností projektu. Další testy budou probíhat nezávisle i po ukončení této diplomové práce.

Zvolenou metodou je sjednocení procesu vrtání a vystružení. Byl vybrán nástroj pro přesné vrtání od firmy Rotana.

Vybraná metoda je při daných podmínkách dle doposud provedených testů funkční a aplikovatelná. Drobné problémy, které změnu provázejí, jsou řešitelné a nemají velký vliv na její aplikaci. V budoucnu bude provedeno následující:

- odstranění problému namotávání třísek na nástroj,
- výroba a zalisování tlumičů,
- přetlakové testy,
- zkouška robustnosti tlumičů,
- vysokotlaká pulzační zkouška,
- odstranění případných dalších problémů,
- začlenění do sériové výroby.

Pokud vzorky projdou zbývajícími testy a dosud zaznamenané nedostatky budou odstraněny, bude možné začlenit inovaci do sériové výroby. Samotná tato inovace přinese úsporu minimálně 1,2 milionu korun ročně za předpokladu objemu výroby o 1,8 mil. kusů LWR. Do úspor nejsou započítány náklady na provoz strojů a náklady na obsluhu. Reálná úspora tedy bude ještě vyšší.

Nad rámec zadání práce byla zkoumána možnost spolupráce s Technickou univerzitou v Liberci a její možné přínosy. Výsledkem je úspora až 31000 Kč na jedno měření, rychlejší dodání výsledků a celkově obsáhlejší zpráva o měření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1 Bosch Diesel Jihlava spol. s.r.o. Firemní a školicí materiály
- 2 Historie společnosti. *Bosch Česká republika* [online]. 2015 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.bosch.cz/cs/cz/our_company_7/history_7/history.html
- 3 Historie firmy BOSCH DIESEL s.r.o. *Bosch Česká republika* [online]. 2015 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.bosch.cz/cs/cz/our_company_7/locations_7/jihlava_menu/jihlava_menu_historie/jihlava_historie.html
- 4 KULL, H a Ralf ISENBURG. *Systém vstřikování nafty s tlakovým zásobníkem Common Rail*. 1. české vyd. Praha: Robert Bosch, 1999, 49 s. Elektronické řízení vznětových motorů. ISBN 80-902-5856-5.
- 5 EDITED BY KLAUS MOLLENHAUER, Helmut Tschoke a translated by Krister G.E. JOHNSON. *Handbook of diesel engines*. Online-Ausg. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-354-0890-836.
- 6 *Rotační čerpadlo s radiálními písty*. 1. české vyd. Praha: Robert Bosch, 1998, 56 s. Technická příručka. ISBN 80-902585-7-3.
- 7 PACOVSKÝ, T. *Aplikace vstřikovacího systému s tlakovým zásobníkem na vznětový šestiválcový motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- 8 KLEPETKO, D. *Optimalizace kovaných vysokotlakých elementů zásobníku paliva systému common rail*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.
- 9 BRHEL, Š. *Systém common rail pro čtyřválcový vznětový motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- 10 DIESEL SYSTEM KRAVAŘE S.R.O. *Dieselové systémy* [online]. 2015 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.dieselsystems.cz/>
- 11 VYSKOČIL, L. *Laserově svařovaný tlakový zásobník systému Common Rail*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík
- 12 Bosch Media Service [online]. Dostupné z: <http://www.bosch-presse.de/presseforum/>.
- 13 FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- 14 ISO 9001. *Certifikace systémů managementu*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- 15 KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV*. Brno: CERM, 2002, 169 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2055-3.
- 16 GANEV, Nikolaj. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí*. 1. Praha, 1995. Učební texty vysokých škol.

- 17 ISO P Oceli. *Sandvik Coromant* [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_p_steel/pages/default.aspx?Country=cz
- 18 Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí. *Tumlikovo* [online]. 2011 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vliv-jednotlivych-prvku-na-vlastnosti-oceli/>
- 19 ROBERT BOSCH GMBH. *Závodní škola LWR*. Jihlava, 2007
- 20 *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- 21 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. 93 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík
- 22 PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- 23 *Tepelné zpracování oceli ČSN 19 824* [online]. Bučovice, 2010 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://jkz.cz/node/180>
- 24 *CVUT: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie* [online]. Praha, 2013 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://utopm.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_1_Nastrojove_materialy.pdf
- 25 HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
A_{D1}, A_{D2}	$[mm^2]$	průřez třísky
A_i	$[Kč]$	cena nástroje
A_{osti}	$[Kč]$	cena ostření
C_f	$[Kč]$	cena testů na pobočce Feuerbach
C_i	$[Kč.ks^{-1}]$	vliv ceny nástroje
C_M	$[-]$	konstanta pro výpočet krouticího momentu
C_{TUL}	$[Kč]$	cena testů na Technické univerzitě v Liberci
D	$[mm]$	vnější průměr
E	$[MPa]$	Youngův modul pružnosti
M_a	$[Kč]$	metalografická analýza
M_C	$[Nm]$	řezný moment
N_i	$[ks]$	počet vyrobených railů na jeden nástroj
NI	$[let]$	návratnost
O_{ks}	$[-]$	počet vrtaných otvorů na rail
P	$[-]$	pravděpodobnost
P_C	$[W]$	řezný výkon
P_i	$[ks]$	počet strojů
P_t	$[Kč]$	pulzní testy
P_V	$[W]$	výkon
Q	$[ks]$	předpokládaný objem výroby
Q_m	$[-]$	počet testů za rok
T	$[°C]$	teplota
T_{akti}	$[s]$	takt stroje za daných podmínek
T_i	$[h]$	čas na výrobu stanoveného množství
TUL	$[Kč.rok^{-1}]$	úspora při testování na Technické univerzitě v Liberci
U	$[Kč.rok^{-1}]$	roční úspora
V	$[l],[m^3]$	objem
$VČF$	$[h]$	využitelný časový fond
V_z	$[Kč]$	výroba vzorků
X_i	$[-]$	hodnoty statistického souboru
Z	$[let]$	teoretická životnost nástroje
Z_n	$[Kč]$	test zbytkových napětí
d	$[mm]$	vnitřní průměr
f	$[mm]$	posuv na otáčku
f_C	$[N]$	měrná řezná síla
F_C	$[N]$	řezná síla
f_i	$[-]$	absolutní četnost
f_r	$[-]$	relativní četnost
h	$[-]$	délka třídy hodnot
n	$[min^{-1}]$	otáčky

n_s	[-]	rozsah statistického souboru
n_v	[ks]	počet vzorků
ost_i	[-]	počet ostření nástroje
p	[Pa]	tlak
s_1, s_2	[TPa]	rentgenografické elastické konstanty
t	[s]	čas
v_C	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
x	[mm]	vzdálenost od osy railu
x_M	[-]	koeficient vlivu průměru otvoru
y_{Fc}	[-]	koeficient vlivu posuvu
ε, δ	[-]	složky tenzoru napjatosti
μ	[-]	střední hodnota
$\Delta\sigma_t$	[Mpa,%]	úchylka zbytkového napětí
ν	[-]	Poissonovo číslo
σ	[-]	směrodatná odchylka
σ^2	[-]	rozptyl
σ_{ij}	[Mpa]	stav napjatosti
σ_t	[Mpa,%]	zbytkové napětí

Zkratka**Význam**

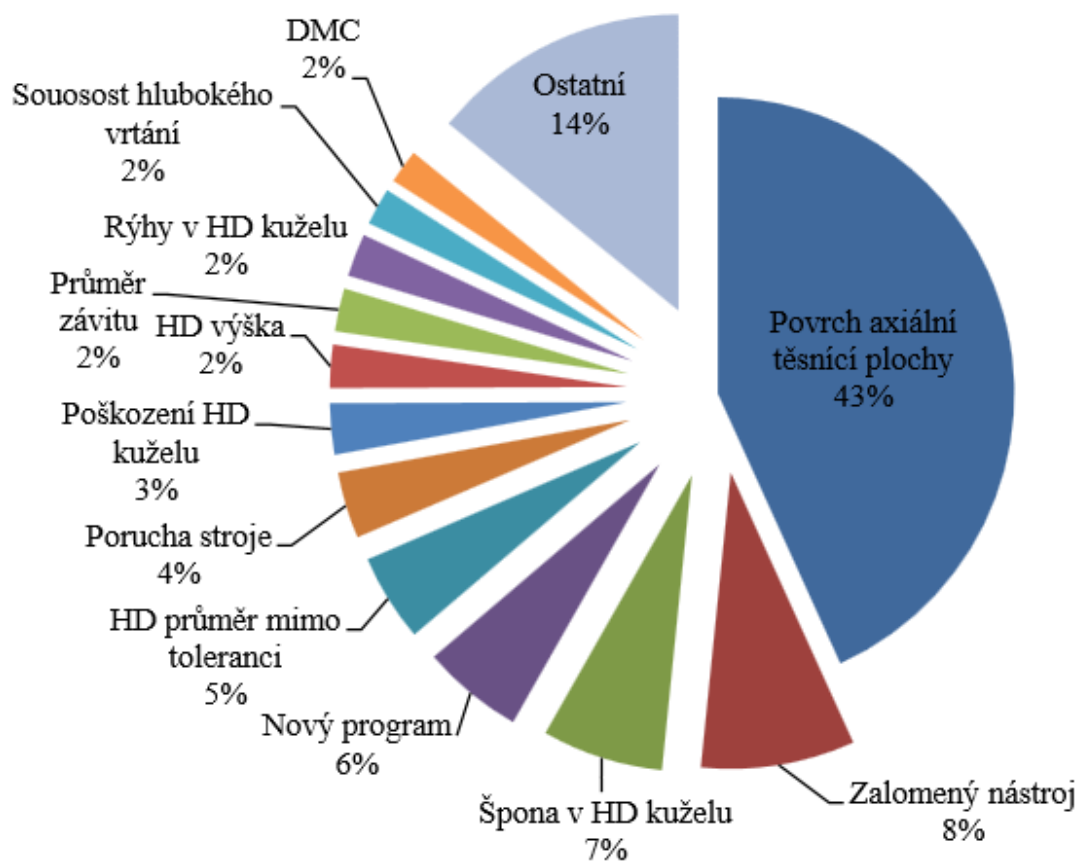
ABS	Anti-block systém
CNC	počítačem řízený stroj
CP1, 2, 3, 4	common Rail Pump
DRV1, 2, 3	Druck Regel Ventil
ESP	elektronická stabilizace
HFR	kovaný rail
LWR	laserem svařovaný rail
PDM	druhá generace čerpadel
PFM	první generace čerpadel
rtg	rentgen

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Interní výpadky při výrobě LWR

PŘÍLOHA 1

interní výpadky při výrobě LWR



Problémy s vysokotlakým (HD) vývodem zaobírají téměř 20 % všech interních výpadků při výrobě LWR.