



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV GEOMETRIE A ŘEZNÝCH PARAMETRŮ  
NÁSTROJE NA ZBYTKOVÉ NAPĚTÍ PŘI  
OBRÁBĚNÍ TLAKOVÝCH ZÁSOBNÍKŮ**

THE INFLUENCE OF GEOMETRY AND CUTTING TOOL PARAMETERS ON  
RESIDUAL STRESS DURING MACHINING OF THE PRESSURE  
CONTAINERS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Martin Berka

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jan Strejček, Ph.D., MBA

BRNO 2016

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Martin Berka</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Strejček, Ph.D., MBA</b>
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:

### **Vliv geometrie a řezných parametrů nástroje na zbytkové napětí při obrábění tlakových zásobníků**

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

Diplomová práce je zaměřena na analýzu současného stavu zbytkového napětí po hlubokém obrábění tlakových zásobníků ve společnosti Bosch Diesel s.r.o.

#### **Cíle diplomové práce:**

1. Analýza současného stavu povrchu obrobené plochy, vliv geometrie nástroje a řezných parametrů na zbytkové napětí a jeho závislost v průběhu opotřebení nástroje.
2. Návrh změny řezných parametrů
3. Provedení experimentu, měření zbytkových napětí a parametrů na vzorcích
4. Vyhodnocení experimentu
5. Technicko-ekonomické zhodnocení a přínosy pro výrobu

#### **Seznam literatury:**

KOCMAN, K., PROKOP, J., Technologie obrábění. 2. vyd. Brno:

CERM, 2004. 270 s., ISBN 80-214-3068-0

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.


HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.


HUMÁR, A. Technologie obrábění – Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2005 [online].

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

V Brně, dne 26. 11. 2015



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan

## **ABSTRAKT**

BERKA Martin, Vliv geometrie a řezných parametrů nástroje na zbytkové napětí při obrábění tlakových zásobníků

Diplomová práce se zabývá vlivem změny řezných parametrů a geometrie nástroje na zbytkovou napjatost uvnitř materiálu. Vliv je zkoumán u hlubokého vrtání. Změna řezných parametrů se týká změny posuvu nástroje a tlaku chladicí kapaliny při procesu. Vliv geometrie nástroje je zkoumán použitím dvou rozdílných jednobřítých dělových vrtáků. Výzkum byl uskutečněn ve spolupráci se společností Bosch Diesel s.r.o. Teoretická část obsahuje popis vstřikovacího systému, ve kterém je obsažen vysokotlaký zásobník. Ten byl použit pro zhodnocení vlivu řezných parametrů a geometrie nástroje na zbytkové napětí. Dále se teoretická část zabývá použitou technologií hlubokého vrtání a teorií zbytkových napětí. Praktická část zobrazuje parametry měření a jeho výsledky. Na závěr je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení měření.

### **Klíčová slova**

Hluboké vrtání, zbytková napětí, dělový vrták, vysokotlaký zásobník rail, nástroj

## **ABSTRACT**

BERKA Martin, The influence of geometry and cutting tool parameters on residual stress during machining of the pressure containers

This thesis deals with the influence of changes in cutting parameters and tool geometry on residual stress inside the material. I examine the influence by deep drilling. Changing the cutting parameters concerns the alteration of the tool feed and the pressure of the coolant during the process. The influence of tool geometry is studied by using two different single edge cannon drills. The research was realized in cooperation with Bosch Diesel Ltd. The theoretical part includes a description of the injection system, in which a high-pressure container is contained. The high-pressure container was used to evaluate the influence of the cutting parameters and tool geometry on residual stress. Furthermore, the theoretical part deals with the deep drilling technology used and the theory of residual stresses. The practical part shows the measurement parameters and the corresponding results. In the conclusion of this thesis, a technical-economic evaluation of the measurement is conducted.

### **Key words**

deep drilling, residual stress, gun drill, high-pressure container, tool

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BERKA, M. *Vliv geometrie a řezných parametrů nástroje na zbytkové napětí při obrábění tlakových zásobníků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Strejček, Ph.D., MBA.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv geometrie a řezných parametrů nástroje na zbytkové napětí při obrábění tlakových zásobníků** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Janu Strejčkovi, Ph.D., MBA za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji za poskytnutí potřebných podkladů a rad k diplomové práci konzultantům Vladislavovi Rodovi a Jaroslavovi Tunovi ze společnosti Bosch Diesel s.r.o spolu s dalšími, kteří se podíleli na poskytnutí podkladů k práci. Nakonec bych chtěl ještě poděkovat Tomáši Jarošovi za umožnění pracovat na diplomové práci ve spolupráci s firmou Bosch Diesel s.r.o.

## OBSAH

Abstrakt

Bibliografická citace

Prohlášení

Poděkování

Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	10
<b>1 SPOLEČNOST BOSCH</b> .....	11
1.1 Historie společnosti.....	11
1.2 Společnost Bosch Diesel s.r.o. ....	12
<b>2 VSTŘIKOVACÍ SYSTÉM COMMON RAIL</b> .....	14
2.1 Vývoj vstřikovacích systémů.....	15
2.1.1 První generace.....	16
2.1.2 Druhá generace .....	16
2.1.3 Třetí generace .....	16
2.1.4 Čtvrtá generace .....	17
<b>3 VYSOKOTLAKÝ ZÁSOBNÍK RAIL</b> .....	18
3.1 Komponenty vysokotlakého zásobníku .....	18
3.2 Výroba svařovaného vysokotlakého zásobníku paliva LWR.....	20
3.2.1 Hluboké vrtání .....	20
3.2.2 Axiální a radiální obrábění .....	21
3.2.3 Kartáčování a praní .....	23
3.2.4 Výstupní kontrola na obrábění LWR.....	24
3.2.5 Autofretáž .....	24
3.2.6 Svařování .....	25
3.2.7 Povrchová úprava, lisování tlumičů a montáž.....	27
<b>4 VRTÁNÍ</b> .....	28
4.1 Hluboké vrtání .....	32
4.1.1 Systém dělového vrtání.....	35
<b>5 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ</b> .....	39
5.1 Metody měření zbytkového napětí .....	42
5.2 Difrakční rentgenografická tenzometrická analýza .....	43
5.2.1 Podstata a vlastnosti difrakční tenzometrie .....	44
5.2.2 Technika měření a užití v průmyslu .....	46



<b>6 STANOVENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ A DALŠÍCH PARAMETRŮ</b> .....	48
6.1 Měřicí zařízení .....	49
6.2 Použité nástroje při hlubokém vrtání .....	50
6.3 Aplikovaný stroj při hlubokém vrtání.....	51
6.4 Interní měření na měřícím středisku .....	53
6.5 Polotovar vysokotlakého zásobníku .....	53
6.6 Výsledky měření zbytkových makroskopických napětí a ostatních měření .....	54
6.7 Zhodnocení výsledků měření zbytkových makroskopických napětí .....	59
6.8 Zhodnocení výsledků interního měření .....	61
6.9 Zbytková napětí a podpovrchové vady u nástroje CJ02 .....	63
<b>7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ</b> .....	65
<b>8 ZÁVĚR</b> .....	66

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

## ÚVOD

Zbytková napětí jsou zkoumána od začátků 20. století a jsou důležitým parametrem, ke zjištění celkové napjatosti uvnitř materiálu. Stanovení původu zbytkových napětí v kombinaci s provozním namáháním je velmi důležité ke stanovení jejich vlivu na životnost zkoumané součásti. Zbytková napětí jsou definována, jako napětí vyskytující se uvnitř materiálu bez působení vnějších sil. Jsou vnesena do materiálu během výroby součástí pro určité technologické procesy. Mezi tyto procesy lze řadit obrábění, tváření, odlévání, svařování, chemické zpracování atd. <sup>1,2,3,4,5,6</sup>

V minulosti se nevěnovala pozornost zbytkovým napětím v povrchových vrstvách, jejichž přítomnost je velmi důležitá. Povrchová zbytková napětí jsou dělena na prospěšná a škodlivá. Prospěšná napětí jsou napětí tlaková, zlepšující únavové vlastnosti materiálu a omezující vznik a rozvoj povrchových trhlin. Napětí tahová na rozdíl od tlakových nepotlačují povrchové trhliny, ale naopak je zvětšují. Vysoké hodnoty zbytkových napětí obecně ovlivňují pevnostní charakteristiky a mohou zapříčinit nestabilitu tvaru a kvality povrchu součásti <sup>1,2,4,5,6</sup>.

Zjištění vlivu geometrie a řezných parametrů nástroje na zbytkovém napětí bylo provedeno prostřednictvím firmy Bosch Diesel s.r.o. v Jihlavě. Zjištění vlivu bylo zkoumáno na vysokotlakém zásobníku nazývaném rail. Zásobník byl obráběn na stroji pro hluboké vrtání. Ke zjištění vlivu geometrie nástroje byly použity dva jednobřité dělové vrtáky s odlišnou geometrií břitu. Vliv řezných parametrů byl obstarán změnou rychlosti posuvu nástroje a změnou tlaku dodávané chladicí kapaliny u procesu hlubokého vrtání. Samotné měření zbytkového napětí bylo provedeno externě. Měření předcházelo obrábění railu technologií hlubokého vrtání se změnou nástrojů, posuvů a tlaků chladicí kapaliny.

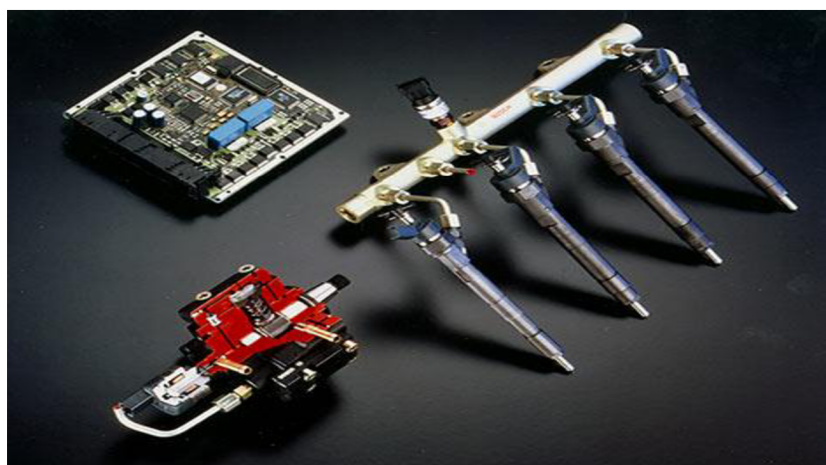
# 1 SPOLEČNOST BOSCH

## 1.1 Historie společnosti

Historie firmy Bosch začíná dne 15. listopadu v roce 1886, kdy se Robertu Boschovi podařilo získat oficiální povolení k otevření své první dílny pro jemnou mechaniku a elektrotechniku ve Stuttgartu. Celý závod měl v té době kancelář, jednu menší a jednu větší dílnu a místnost s malou kovářskou dílnou. V roce 1897 Robert Bosch společně se svým společníkem poprvé v historii vybavili motorové vozidlo nízkonapětovým magnetoelektrickým zapalovacím zařízením. Rok poté založili první pobočku, která byla umístěna mimo Německo, prodejní kancelář pro výrobky Bosch ve Velké Británii. První výrobní závod mimo Německo byl postaven v roce 1905 v Paříži <sup>7</sup>.

Okolo 30. let dvacátého století mnoho z evropských výrobců opatrovali své nákladní vozidla a zemědělské stroje systémy vstříkovaní nafty společností Bosch. V roce 1932 bylo na Lipském obchodním veletrhu představeno nové vrtací kladivo, které bylo schopné jako první elektrická vrtačka zajistit přiklep a otáčení nástroje najednou. Rok 1951 bylo představeno vstříkovaní benzínu pro dvoudobé automobily, které snížilo spotřebu benzínu přibližně o 20 procent a zároveň zvýšilo výkon motoru o pět koňských sil. Světově první série elektronického systému vstříkovaní benzínu řízeným tlakem se objevila v roce 1967 a byl to systém se jménem Jetronic. Díky přesnosti systému, Jetronic splňoval jedny z nejpřísnějších ekologických norem v USA. Další úspěch byl zaznamenán v roce 1978, kdy byl představen první elektronický protiblokovací brzdový systém působící na všechna kola automobilu <sup>7</sup>.

Rok 1997 byl pro společnost Bosch jedním z dalších úspěchů, zahájením výroby systému vysokotlakého přímého vstříkovaní paliva u vznětových motorů, který je nazýván jako systém Common Rail a lze jej vidět na Obr. 1. Tento systém dosáhl úspěchu především díky své ekologičnosti. V porovnání s prvními technologiemi v roce 1990, dosáhl tento systém pro rok 2010 snížení úrovně jedovatých zplodin o více než 96 procent <sup>1,7</sup>.

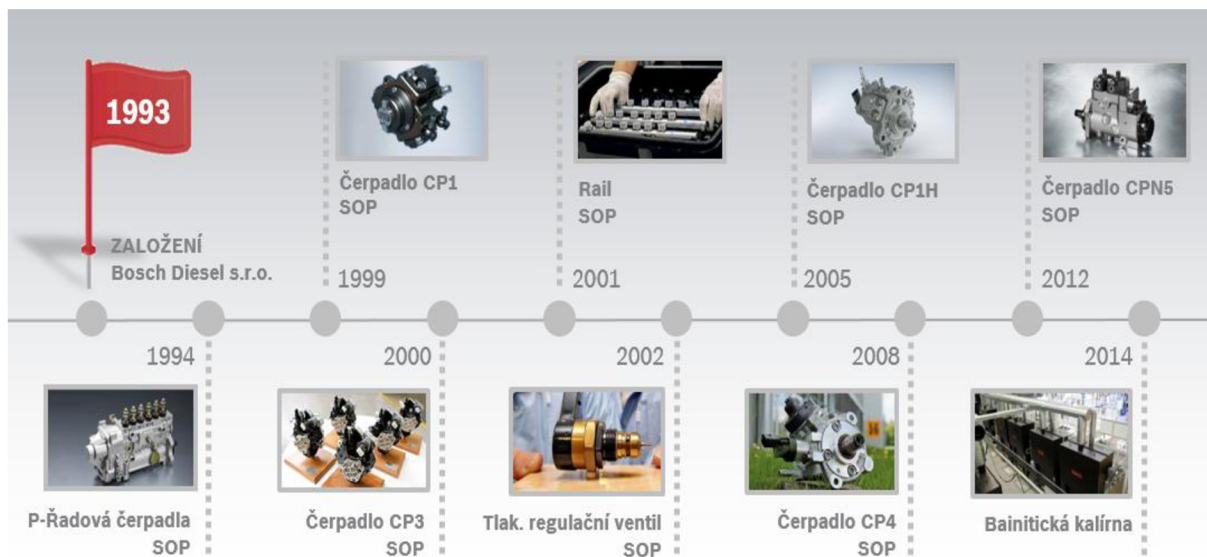


Obr. 1 Vysokotlaký vstříkovací systém Common Rail <sup>7</sup>.

Roku 2000 se společnost Bosch rozhodla vrátit k nápadu přímého vstříkovaní benzínu z roku 1954. Inovací u tohoto systému DI motronic byla především podstata vrstveného plnění, díky které se došlo ke spalování lokalizovaného oblaku směsi vzduchu s palivem vytvořeným přímým vstříkovaním. Tím bylo dosaženo nižší spotřeby paliva, okolo 10 procent. Pro rok 2010 začala společnost vyrábět první sériové automobily, které byly vybaveny paralelní plně hybridní technologií. Společnost Bosch poskytla těmto modelům automobilů, kromě klíčových součástí i tzv. mozek vozidla v podobě řídicí jednotky Motronic pro hybridní vozidla <sup>7</sup>.

## 1.2 Společnost Bosch Diesel s.r.o.

Společnost Bosch Diesel s.r.o. byla založena v Jihlavě v roce 1993. První smlouva byla podepsána společně se společností Motorpal a.s. Na začátku založení společnosti byla firma složena ze 160 zaměstnanců a od roku 1994 se společnost Bosch stala postupně celosvětově největším výrobním závodem pro vysokotlaký diesellový vstříkovací systém Common Rail v rámci skupiny Bosch. V roce 1996 byl Bosch Diesel s.r.o. odkoupen od společnosti Motorpal a.s. a tím došlo k osamostatnění firmy. Vývoj společnosti od jejího založení je zobrazen na Obr. 2<sup>1,8</sup>.



Obr. 2 Vývoj společnosti Bosch Diesel s.r.o.<sup>1</sup>.

Od založení závodu v Jihlavě investovala skupina Bosch do závodu více než 850 milionů eur a v současné době má firma okolo 4400 zaměstnanců, čímž se stává jedním z největších zaměstnavatelů v kraji Vysočina. V České republice zaujímá společnost Bosch sedm lokalit, které jsou znázorněny na obr. 3<sup>1,8</sup>.



Obr. 3 Rozložení lokalit v České republice<sup>1</sup>.

Mezi hlavní výrobky firmy Bosch Diesel s.r.o. v Jihlavě patří vysokotlaká vstříkovací čerpadla, vysokotlaké zásobníky, tzv. raily a tlakové regulační ventily. Tyto výrobky jsou vyráběny ve třech výrobních závodech. Popis závodů se základními informacemi o každém závodě je znázorněn na obr. 4<sup>1,8</sup>.



Obr. 4 Rozdělení jihlavských závodů<sup>1</sup>.

Výrobky Bosch Diesel jsou dodávány více než třiceti předním celosvětovým výrobcům automobilů, proto musí splňovat nejpřísnější a nejnáročnější kritéria kvality. V porovnání se zážehovými motory chce firma Bosch u vznětových motorů snížit spotřebu paliva o více než 30 %, docílit o 25% nižších emisí CO<sub>2</sub> a zvýšit točivý moment přibližně o 50 %. Cílem je ekonomická výhodnost, šetrnost k životnímu prostředí a nebývalý požitek z jízdy<sup>1,8</sup>.

Jihlavský závod je pro vysokou technickou kompetenci důležitým přínosem do mezinárodní sítě výrobní skupiny sítě skupiny Bosch. Velké množství výrobků z České republiky je dodávána do Evropy. Množství výrobků dodávaných do Evropy činí 74% z celkové produkce. Zbytek vyrobených součástí putuje do Asie, kam je odesláno 14% z celkové produkce a do Ameriky, kam jde zbylých 12% z celkové produkce<sup>1,8</sup>.

Za pomoci špičkových technologií je dosahováno nejvyšší kvality v oblasti automobilové techniky. Procesy jsou účinně řízeny s pomocí výrobního systému společnosti Bosch a vylepšovány za pomoci metodiky neustálého zlepšování. Firma Bosch jako největší zaměstnavatel a exportér Kraje Vysočina podporuje místní veřejně prospěšné společnosti, nemocnice, školy a kulturní zařízení<sup>1</sup>.

Firma Bosch je držitelem Národní ceny kvality ČR. Toto prestižní ocenění společnost získala v roce 2011. Cena je výrazem ocenění excelentních výkonů a dalšího důsledného rozvoje firmy. Při hodnocení ve své kategorii firma dosáhla nejvíce bodů, které kdy byly uděleny od roku, kdy je cena kvality ČR udělována. Mimo toto ocenění společnost dosáhla na řadu dalších ocenění v oblastech<sup>1,8</sup>:

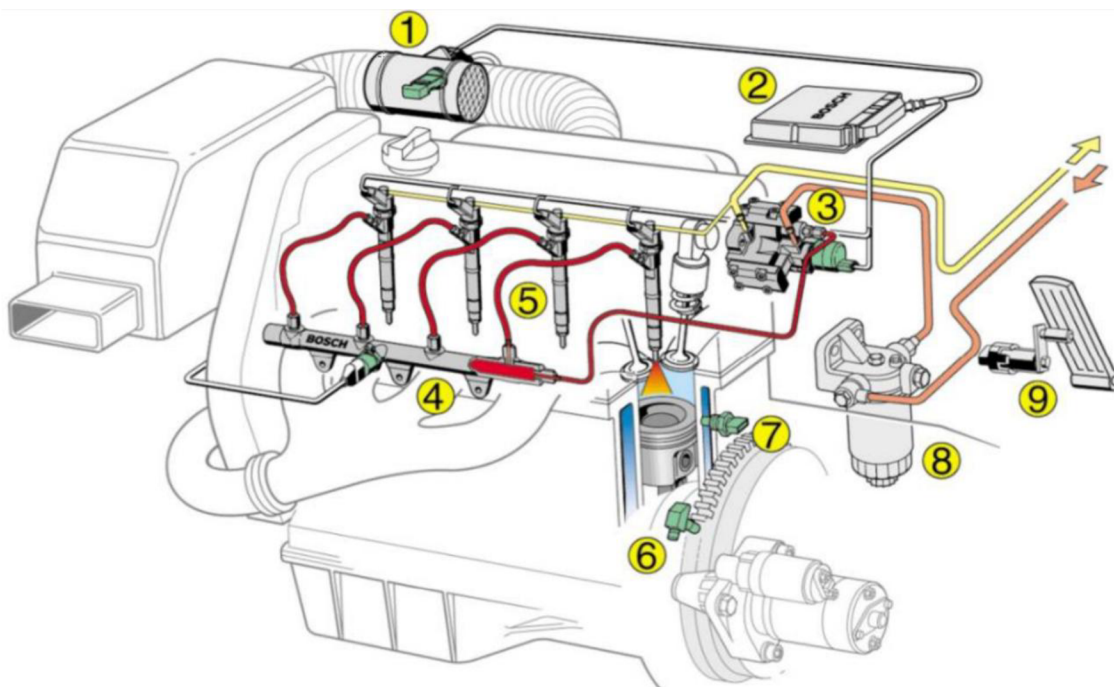
- Zákaznické ocenění
- Národní ocenění
- Mezinárodní certifikáty

## 2 VSTŘIKOVACÍ SYSTÉM COMMON RAIL

Vznětový motor se řadí mezi nejučinnější pohonné jednotky a je jedním z hlavních zdrojů mechanické energie. Oblasti užití mechanické energie lze dělit na <sup>9</sup>:

- Užitkové automobily
- Zemědělské stroje
- Stavební stroje
- Stacionární jednotky

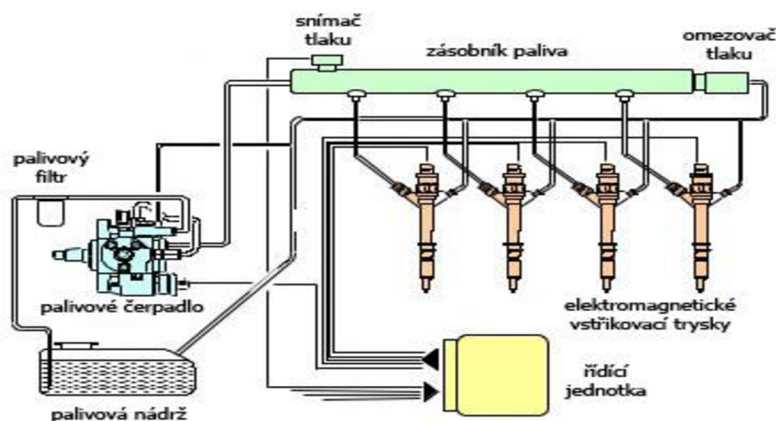
Vývoj ekologických podmínek a předpisů neustále motivuje výrobce, obzvláště v automobilovém průmyslu, k výzkumům nových strategií spalování, vstřikování paliva, přeplňování a dodatečného čištění výfukových plynů. Pro oblast vstřikování paliva je charakteristický trend zvyšování vstřikovacích tlaků, který napomáhá velkou částí k plnění emisních předpisů pro vznětové motory. Dalším výrazným zlepšením se stalo zavádění elektronického řízení funkcí motoru, což zahrnuje i samotný vstřikovací proces. Elektronické řízení lze dělit do více částí reagujících na okamžitou potřebu motoru. Za účelem zlepšení výše uvedených vlastností vznikají palivové systémy typu Common rail. Tento systém se skládá z vysokotlaké části, která obsahuje vysokotlaké čerpadlo, tlakový zásobník neboli rail, vstřikovače a vysokotlaké palivové vedení. Dále je složen z nízkotlaké části obsahující komponenty pro zásobování palivem a poslední část je elektronická regulace motoru, která obsahuje řídicí jednotku, akční členy a systémové bloky snímačů. Konstrukce systému u vozidel je znázorněna na obr. 5. Červeně je zobrazena oblast vysokého tlaku, růžová barva značí oblast nízkého tlaku a žlutá barva je pro oblast odtoku přebytečného paliva <sup>9,10,11,12</sup>.



Obr. 5 Vstřikovací systém Common rail <sup>13</sup>.

1 – Snímač hmotnosti vzduchu, 2 – Řídicí jednotka, 3 – Palivové čerpadlo, 4 – Vysokotlaký zásobník rail, 5 – Vstřikovací trysky, 6 – Snímač polohy klikové hřídele, 7 – Snímač teploty chladicí kapaliny, 8 – Palivový filtr, 9 – Snímač polohy akceleračního pedálu

Systém common rail je v dnešní době nejpoužívanější systém přímého vysokotlakého vstřikování paliva u vznětových motorů. Systém Common rail je specifický tím, že palivo je zde vedeno z vysokotlakého čerpadla do vysokotlakého zásobníku, který je společný pro všechny válce motoru. Z toho plyne anglické spojení Common rail. Palivo je dále ze zásobníku rozváděno k jednotlivým vstřikovačům umístěných ve válcích. Zjednodušené schématické znázornění rozvodů paliva vstřikovacího systému Common rail je zobrazeno na obr. 6<sup>9,10</sup>.



Obr. 6 Schéma rozvodů paliva systém Common rail<sup>10</sup>.

Obvykle se používá jedno vysokotlaké čerpadlo, které je třípístové. U větších motorů lze použít i čerpadla dvě. Čerpadla jsou dimenzována na dodávku největšího možného výkonu, tlak v zásobníku je udržován ventilem a přebytečné palivo je navráceno do sání čerpadla nebo do palivové nádrže. Soustava je vhodná pro víceválcové motory s přímým vstřikem paliva. Elektronická řídicí jednotka určuje správný moment, kdy je palivo vstřiknuto do válce a množství paliva ovládáním vstřikovacích trysek<sup>1,9,10</sup>.

## 2.1 Vývoj vstřikovacích systémů

Od roku 1980 došlo v Evropě ke znatelnému zvyšování vstřikovacích tlaků. To bylo vyvoláno většími požadavky na snížení spotřeby paliva a na snížení množství škodlivin, které vznikaly ve výfukových plynech. Řadová čerpadla používaná v roce 1980 byla schopna vyvolat tlak přibližně 60 MPa. Od té doby prošly řadou úprav. Úpravy zahrnovaly dimenzování a optimalizace tvaru vaček a velikosti výtlačných pístů, změna druhu ventilů a náhrada složitějších mechanických regulátorů za elektronické regulační systémy. V roce 2000 tak bylo dosahováno tlaků až 115 MPa. Po následné optimalizaci délky vedení paliva mezi čerpadlem a tryskou byl vstřikovací tlak navýšen na hodnotu 135 MPa<sup>1,9,12</sup>.

Další zvýšení vstřikovacích tlaků zaznamenaly plně elektricky regulované vstřikovací jednotky. Tlak ve vstřikovacích jednotkách je vyvozen pístem, který je poháněn vačkovou hřídelí. Ta je umístěna v bloku nebo hlavě válce. Tryska a toto samostatné čerpadlo je spojeno velmi krátkým vedením nebo je tryška přímo jeho součástí. Díky tomu jsou tlaky na trysce a čerpadle shodné a dosahují hodnot až 220 MPa<sup>1,9</sup>.

Na konci šedesátých let minulého století vyvinul první prototyp systému Common rail Robert Huber, který pocházel ze Švýcarska. Ve vývoji dále pokračovala Spolková vysoká škola v Curychu. V roce 1993 odkoupila patenty firma Robert Bosch GmbH. Firma pokračovala ve výzkumu a vývoji systému a v roce 1997 ho zavedla jako první do sériové výroby u aut Alfa Romeo 156 a Mercedes Benz E 320. Do dnešní doby firma Bosch představila čtyři generace systému Common rail<sup>1,9</sup>.

### 2.1.1 První generace

První generace byla firmou Bosch uvedena v roce 1997. Je zde používáno injektorů, které jsou řízeny elektromagnetickými ventily. Injektor je zobrazen na obr. 7. Příchozí tlak paliva z railu působí v řídicím prostoru na píst a z druhé strany na mezikruží jehly. Rozdíl působících sil uzavírá trysku. Tlak vstřikování u této metody dosahoval 160 MPa. Vstřikování u této metody předcházelo předstřík nepatrného množství paliva, což vedlo ke snížení nárůstu spalovacího tlaku. Tím docházelo i ke snížení hluku spalování u vznětových motorů. Tlak zásobníku je zde řízen za pomoci regulačního tlakového ventilu. Tím je způsobeno, že palivové čerpadlo musí dodávat při každém pracovním režimu plný objem paliva, čímž je čerpadlo více zatěžováno a je potřebný vysoký příkon. Proto je do zpětného okruhu přepouštěno velké množství přehřátého paliva. V některých případech tak dochází k zástavbě chladiče paliva<sup>1,9</sup>.

### 2.1.2 Druhá generace

Druhá generace představena v roce 2001 využívala stejně jako první generace u vstřikování injektor s elektromagnetickým ventilem. Je zde však dosahováno větších tlaků až 200 MPa. Oproti první generaci je u druhé generace i tzv. dostřík. Dostříkem se dokončuje celková dávka paliva za pracovní cyklus a zlepšuje funkci filtru pevných částic. Tlak ve vysokotlakém zásobníku je regulován na straně nízkého tlaku dávkovací jednotkou. Palivové čerpadlo zde dodává jen takové množství paliva, které je potřeba. Není zde zapotřebí takového příkonu čerpadla jako u první generace a spotřeba paliva je také menší<sup>1,9</sup>.

### 2.1.3 Třetí generace

Třetí generace byla vyvinuta v roce 2003. U třetí generace se dosahuje podobných tlaků jako u generace předešlé, ovšem navíc tato generace umožňuje zvládat větší počet dílčích vstřiků za cyklus. Je zde dosahováno 5 dílčích vstřiků na jeden cyklus. Oproti minulým generacím je zde piezoelektrický vstřikovač, který je přibližně čtyřikrát rychlejší než původně používaný vstřikovač s elektromagnetickým ventilem a je znázorněn na obr. 8. Piezoelektrický ovladač se skládá z několika stovek vrstev tenkých folií keramického materiálu. Ten je odolný vůči teplotám vznětového motoru. Přivedené napětí na svazek folií působí na jeho krystaly, které se protáhnou setiny milimetrů. Tato deformace je převedena na zdvih jehly vstřikovací trysky. Díky své rychlosti lze s použitím piezoelektrického vstřikovače vytvářet analýzy průběhu vstřiku v závislosti na režimu motoru. Rozdělením vstřikované množství na několik různě velikých dávek vede ke snížení emisí, hluku a ke zlepšení regenerace filtru pevných částic. Používaná čerpadla jsou stejná jako u předešlého typu<sup>1,9,12</sup>.



Obr. 7 Elektromagnetický vstřikovač<sup>12</sup>

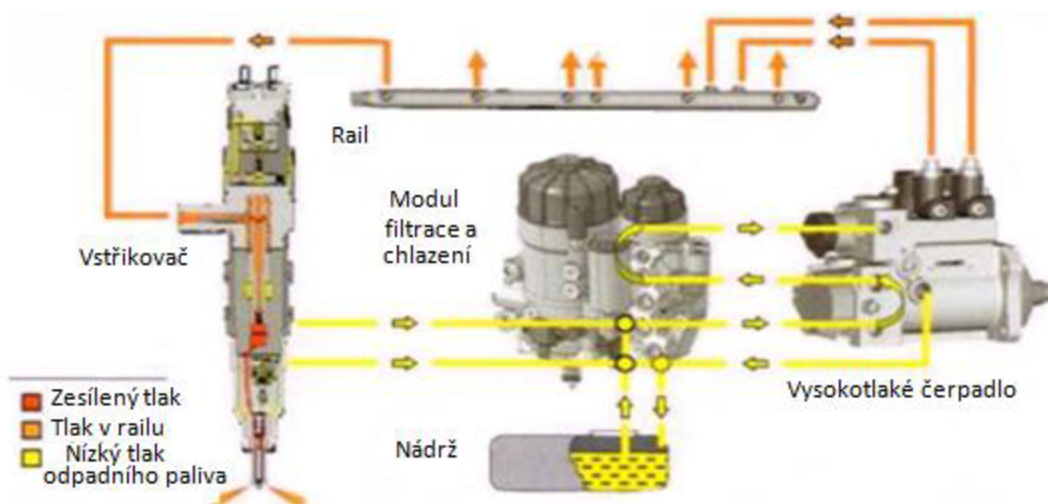


Obr. 8 Piezoelektrický vstřikovač<sup>12</sup>



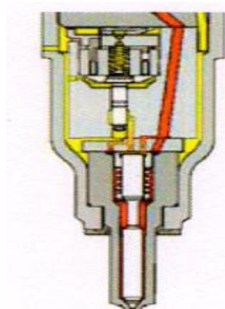
### 2.1.4 Čtvrtá generace

U čtvrté a prozatím poslední oznámené generace od roku 2008 se dosahuje vstřikovacích tlaků až 250 MPa. Palivo je dodáváno jako v předešlých případech vysokotlakým čerpadlem do railu. Z railu palivo pokračuje do vstřikovače pod poměrně nízkým tlakem 90-135 MPa. Ve vstřikovači je tlak následně navýšen prostřednictvím tlakového převodníku na přibližně dvojnásobnou hodnotu, takže tlak dosahuje hodnot až 250 MPa. Za pomoci dvou sekvenčně buzených elektromagnetických ventilů lze dosáhnout programově řízeného vstřiku paliva do válce motoru pod nižším nebo zesíleným tlakem. Konfigurací dvou tlakových stupňů se dosahuje zatížení jen určitých částí systému s nižším časovým podílem. Palivo není náhle vstřikováno do spalovacího prostoru, nýbrž je vstřikováno s pomocí speciálního geometrického dimenzování vstřikovače s rostoucím tlakem. Tím se tvoří méně škodlivin při spalování. Průběh vstřiku umožňuje šetrnější postup spalování s méně patrnými teplotními špičkami. Schéma systému čtvrté generace vyvíjený pro nákladní automobily DaimlerChrysler je zobrazeno na obr. 9<sup>1,9,12</sup>.

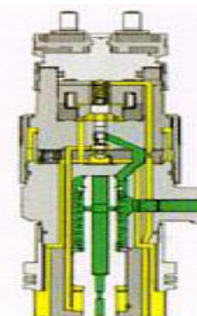


Obr. 9 Systém Common rail čtvrté generace<sup>9</sup>.

Vstřikovač systému je modulární a je sestaven ze dvou jednotek. Jednotky jsou modul vstřikování paliva a řídicí modul zesilovače tlaku. Modul vstřikování paliva je v podstatě ve velkém měřítku zmenšený vstřikovač druhé generace. Miniaturní elektromagnetický ventil s plochou kotvou řídí pohyb jehly trysky. Blízkost řídicího elektromagnetického ventilu k trysce je výhodná, protože je zde potřebná méně objemná jehla, což znamená nižší hmotnost jehly. Řídicí modul zesilovače tlaku je složen z tlakové převodníku s odstupňovaným pístem. Ten je aktivován druhým elektromagnetickým ventilem. Modul vstřikování paliva je zobrazen na obrázku 10. a řídicí modul zesilovače tlaku je na obrázku 11<sup>1,9</sup>.



Obr. 10 Modul vstřikování paliva<sup>9</sup>.

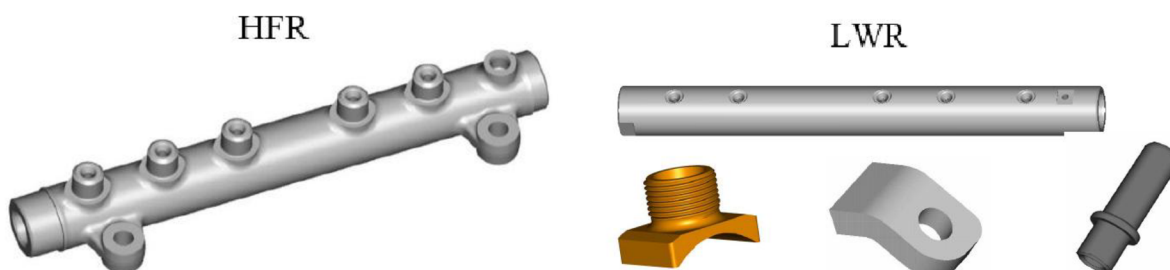


Obr. 11 Řídicí modul zesilovače tlaku<sup>9</sup>.

### 3 VYSOKOTLAKÝ ZÁSOBNÍK RAIL

Hlavní úloha vysokotlakého zásobníku je udržování paliva pod vysokým tlakem. Zároveň zásobník musí tlumit tlakové kmitání, ke kterému dochází pulzující dodávkou paliva z vysokotlakého čerpadla a neustálým otvíráním a zavíráním vstřikovačů. Zásobník musí mít dostatečný objem k tlumení těchto pulzů. Objem nesmí být ani příliš velký, aby se při začátku provozu vstřikovacího systému vytvořil rychle potřebný konstantní tlak. Pro optimalizaci výsledného objemu se využívají simulační výpočty. Objem paliva vstřikovaného do válců je neustále doplňovaný za pomoci vysokotlakého čerpadla. K dosažení efektu zásobníku je využívána stlačitelnost paliva při vysokém tlaku. Při následném odčerpání i většího množství paliva, je tlak v zásobníku téměř konstantní<sup>1,14,15</sup>.

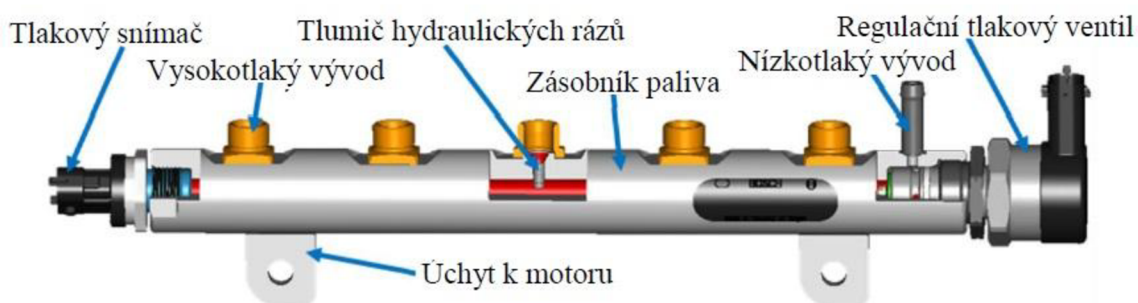
Dalším podstatným úkolem railu je rozdělování paliva ke vstřikovačům pro jednotlivé válce. Podle konstrukce motoru a jeho umístění je konstruován zásobník. Podle způsobu výroby jsou děleny tlakové zásobníky rail na dvě skupiny. První možnost výroby je kovaný rail HFR (Hot Forged Rail), kde je kovaný výkovek následně obráběn. Jako druhá možnost je svařený rail LWR (Laser Welded Rail), kterým se budeme v dalších částech práce zabývat. Kovaný a svařený rail lze vidět na Obr. 12<sup>1,14,15</sup>.



Obr. 12 Kovaný a svařený rail<sup>1</sup>.

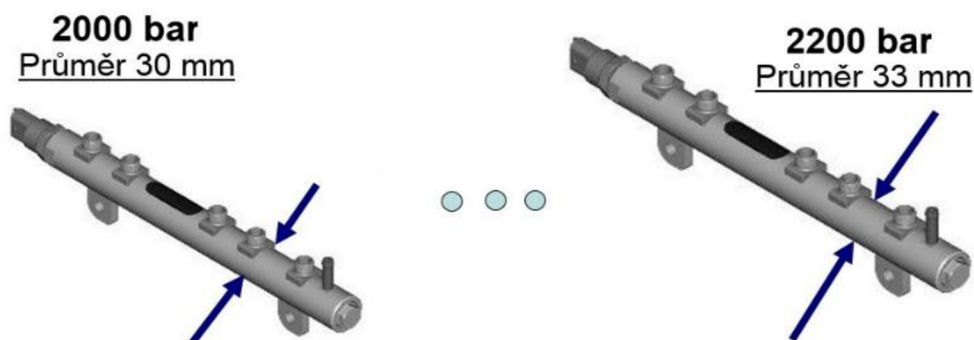
#### 3.1 Komponenty vysokotlakého zásobníku

Svařený rail se v konečné fázi skládá z několika částí. Ty lze vidět na obr. 13. Jsou zde vysokotlaké a nízkotlaké vývody a úchyty, které slouží k uchycení railu k motoru. Tělo railu, které slouží jako zásobník paliva je polotovár, který je následně obráběn do požadovaného tvaru. Nízkotlaké vývody jsou navařeny jako první svařovací operace za pomoci odporového svařování. Vysokotlaké vývody a úchyty jsou poté navařeny technologií laserového svařování. Další části bývají označovány jako přídavné komponenty, kam lze zařadit regulační tlakový ventil (DRV), snímač tlaku (RDS), pojistný tlakový ventil (DBV) nebo závitová zátka. Tyto části jsou voleny podle požadavků zákazníka<sup>1,14,15</sup>.



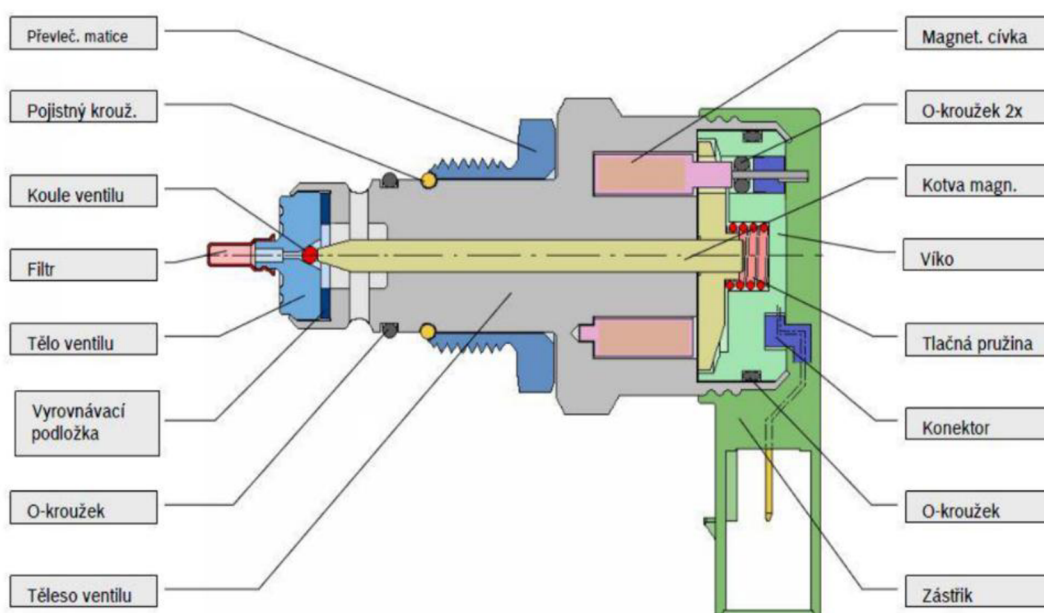
Obr. 13 Části tlakového zásobníku<sup>1</sup>.

Jednotlivé typy railů se liší počtem vysokotlakých vývodů, které navazují na vysotlaké potrubí a vstřikovače, kde je dán počet vývodů podle toho, kolik má potřebný motor válců. Dále se mohou lišit průměrem těla railu, délkou railu nebo systémovým tlakem. Pro vyšší tlaky jsou potřeba objemnější typy railů, jak lze vidět z obr. 14 <sup>1</sup>.



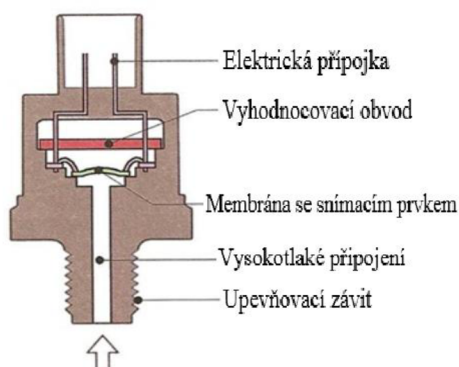
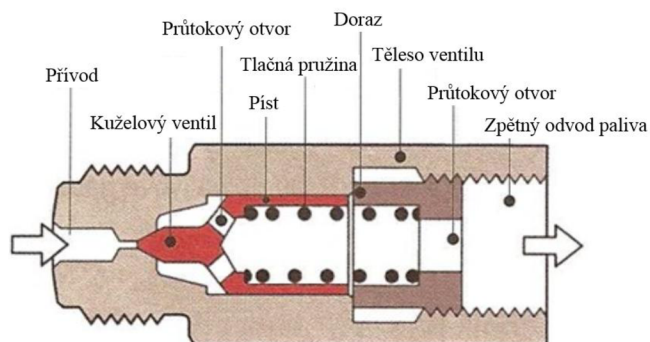
Obr. 14 Typy railů pro různé tlaky <sup>1</sup>.

Regulační tlakový ventil DRV slouží k udržení tlaku paliva nezávisle na otáčkách, zatížení motoru a dalších. Ventil DRV s popisem jednotlivých částí je na obr. 15. Funkce ventilu spočívá v tom, že když je potřebný nižší tlak paliva, otevře se kuličkový ventil a přebytečné palivo se zpětným potrubím odvede zpátky do palivové nádrže. Když tlak v zásobníku naopak poklesne, ventil se uzavře a čerpadlo dodá potřebný tlak. Regulační tlakový ventil tak pracuje ve dvou režimech, ventil je aktivní nebo naopak. U neaktivního režimu na elektromagnet není přivedené napětí, takže elektromagnet nevyvine žádnou sílu. Koule ventilu je do sedla přitlačena pouze pružinou, která má tuhost stejně velkou jako otevírací tlak paliva. Poté co je na elektromagnet přivedené napětí, elektrický proud začne spolu s pružinou působit na kotvu a ta tlakem na kouli ventilu uzavře ventil. Ten je uzavřený do doby, než dojde k vyrovnání mezi silami od tlaku paliva na jedné straně a elektromagnetem s pružinou na straně druhé. Na měnící se tlak reaguje koule ventilu, která je více nebo méně tlačena do sedla <sup>1,14,15</sup>.



Obr. 15 Regulační tlakový ventil DRV <sup>1</sup>.

Snímač tlaku RDS (Obr. 16) využívá jednotku motoru na přesné stanovení okamžitého tlaku v zásobníku paliva. Na základě velikosti měřeného tlaku snímač generuje napěťový signál, který následně vyhodnocuje řídicí jednotka. Hlavní částí snímače je membrána, která se nachází na konci příváděcího kanálku. Na membránu tlačí přiváděné palivo a jako snímací člen je na membráně umístěn polovodičový prvek. Snímací člen obsahuje na membráně elastické rezistory v můstkovém zapojení. Měřicí rozsah je určený tloušťkou membrány, větší tloušťka znamená vyšší tlaky. Průhybem membrány dojde ke změně odporu rezistorů. S měnícím odporem se mění napětí v obvodu. Napětí je následně zesíleno pro vyhodnocovací obvod. Zesílené napětí putuje od řídicí jednotky, kde se vypočítá tlak paliva. V případě odchylky je tlak paliva upravovaný regulačním tlakovým ventilem<sup>1,14,15</sup>.

Obr. 16 Snímač tlaku RDS<sup>14</sup>.Obr. 17 Pojistný tlakový ventil DBV<sup>14</sup>.

Pojistný tlakový ventil DBV (Obr. 17) omezuje tlak na maximální povolenou hodnotu. Ventil pracuje na mechanickém principu. Na straně připojení k railu je otvor, který je uzavřen kuželovým koncem pístu v sedle. Při překročení maximálního tlaku je překonána síla tlačné pružiny a píst je ze sedla odsunutý. Nadbytečné palivo tak odtéká přes průtokové otvory zpět do palivové nádrže. Tlakový ventil tak chrání systém proti možnému velkému vzrůstu tlaku, který může vzniknout při funkční poruše systému. U novějších verzí systému je možnost nouzové chodu, u které se v případě otevření vypouštěcího otvoru zachová minimální tlak a je umožněna omezená jízda vozidla<sup>1,14,15</sup>.

### 3.2 Výroba svařovaného vysokotlakého zásobníku paliva LWR

Polotovarem je válcová tyč z nízkolegované ušlechtilé mangan-chromové oceli, s obsahem uhlíku 0,17% až 0,22%. Ocel je vhodná pro středně namáhané díly motorových vozidel a strojních součástí určených k cementování s vyšší pevností. Ke zlepšení obrobiteľnosti je zde obsažena síra v rozmezí 0,02% až 0,04%. Numerické označení materiálu podle normy ČSN je 1.7149. Většinou je u svařovaných railů používán tento typ oceli, lze však použít i oceli mírně odlišných materiálů<sup>1</sup>.

#### 3.2.1 Hluboké vrtání

Hluboké vrtání je první operace třískového obrábění a základní princip je zobrazen na obr. 18. Hluboké vrtání je označováno jako vrtání v hloubkách, které jsou aspoň patnáctkrát větší než průměr nástroje. Operace spočívá ve vyvrtání díry určitého průměru v celé délce polotovaru. Ve firmě Bosch je vnější průměr polotovaru 30 nebo 33 mm a vnitřní průměr může být 7,5 mm, 9 mm, 9,4 mm nebo 10 mm s potřebnou tolerancí. Nástroj pro vrtání je dělový vrták chlazený olejem. Vnitřní díra je následně kontrolována kalibrem na průměr, číselníkovým úchylkoměrem souosost otvoru a je také kontrolována drsnost obrobené plochy<sup>1,16,17</sup>.



Obr. 18 Hluboké vrtání <sup>17</sup>.

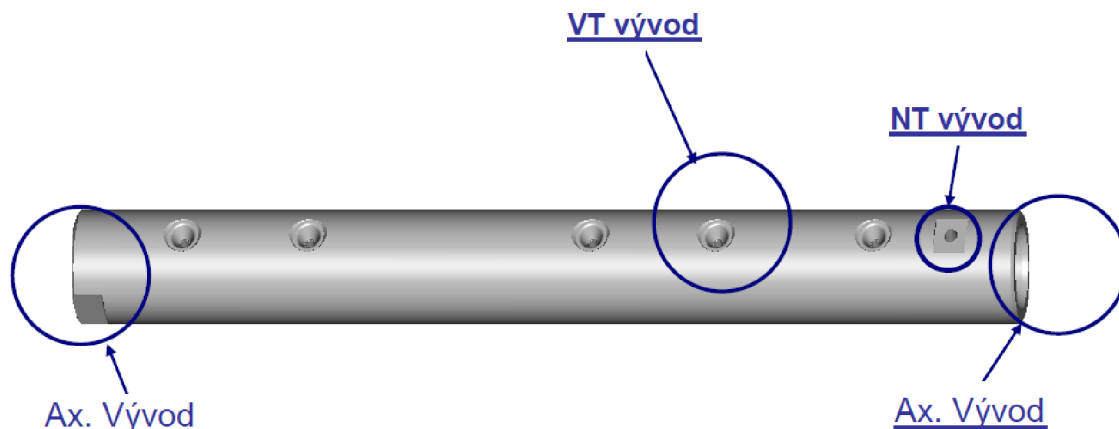
Hluboké vrtání je ve firmě Bosch prováděno na strojích TBT. Stroj je vybaven šesti vřeteny, takže lze vrtat šest polotovarů najednou. TBT stroj je vybaven spádovým dopravníkem, na který jsou pokládány polotovary, a tím je dosaženo automatického zásobování stroje. Polotovary dále putují do pracovního prostoru, kde dojde k jejich obrobení a následně jsou hotové kusy vyvezeny z pracovního prostoru, kde dojde ke kontrole kvality. Nakonec jsou zkontrolované kusy uloženy do plastových výlisků, tzv. blistrů. Stroj TBT je na obr. 19 <sup>1</sup>.



Obr. 19 Stroj TBT pro hluboké vrtání <sup>18</sup>.

### 3.2.2 Axiální a radiální obrábění

Druhá operace třískového obrábění zahrnuje obrábění v axiálním směru tlakového zásobníku a obrábění ve směru radiálním. Axiální směr slouží pro výrobu axiálního vývodu. Pro jeho výrobu jsou použity operace frézování a vrtání. V radiálním směru jsou vyráběny vysokotlaké a nízkotlaké vývody. Vysokotlaké vývody (VT) jsou vrtány, hrubovány, struženy a následně mechanicky odjehleny. Nízkotlaký vývod (NT) je vrtán, stružen a mechanicky odjehlen. Rozmístění vývodů na zásobníku je zobrazeno na obr. 20. Pro operaci axiálního a radiálního obrábění jsou ve společnosti Bosch používány obráběcí centra se značením Elha a obráběcí centra Hüller Hille <sup>1,19</sup>.



Obr. 20 Axiální a radiální vývody <sup>1</sup>.

Obráběcí centrum Elha je CNC stroj, který má jeden upínací přípravek, který se otáčí kolem své horizontální osy o 360°. Každý nástroj ve stroji má své vlastní vřeteno. Operace je tak zrychlena o čas potřebný pro výměnu nástroje. Obráběcí centrum je schopno pohánět až 40 vřeten. Na stroji Elha dojde k axiálnímu i radiálnímu obrábění naráz. Obráběné raily jsou vloženy obsluhou na zakládací paletu. Ta je dopravena do pracovního prostoru stroje, kde jsou upnuty do přípravku za pomoci robotu. Na stroji Elha lze obrábět dva kusy naráz. Po obrobení jsou kusy opět za pomoci robotu uloženy na paletu. Centrum Elha je znázorněno na obr. 21<sup>1,19</sup>.



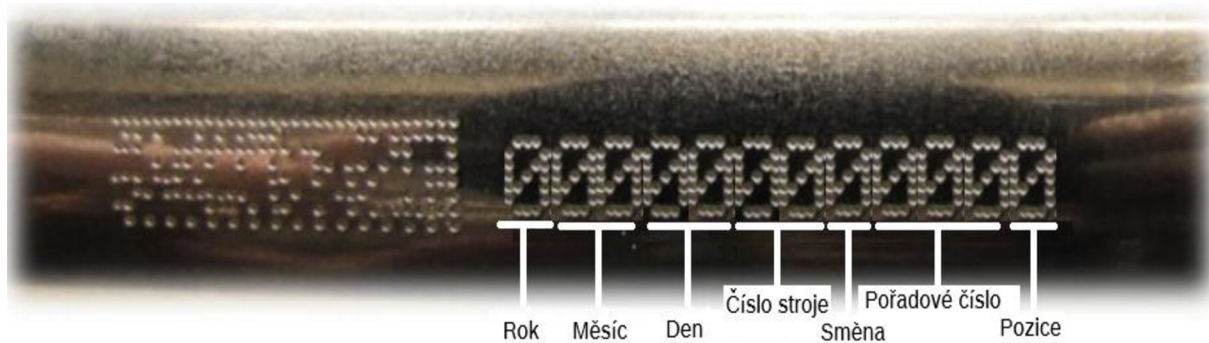
Obr. 21 Obráběcí centrum Elha<sup>20</sup>.

Druhé obráběcí centrum Hüller Hille bylo používáno především pro lité raily, protože byla však zvýšena poptávka po svařovaných railech, používá se toto centrum i pro svařované raily. Centrum je vybaveno jedním vřetenem. Vřeteno se může pohybovat ve třech osách. Stroj Hüller Hille má nástrojový zásobník, který je schopný pojmout až 36 nástrojů. Uvnitř stroje je otočný stůl, který zahrnuje dva stejné přípravky. Do jednoho přípravku mohou být vloženy čtyři obráběné zásobníky na jeden cyklus. Otočný stůl je schopný otočení o 180°. Ve stroji je prováděno radiální obrábění nebo axiální obrábění. Nelze provádět obě operace současně. Centrum Hüller Hille je na obr. 22<sup>1,19</sup>.



Obr. 22 Obráběcí centrum Hüller Hille<sup>21</sup>.

Po druhé operaci třískového obrábění je následně obrobený kus označen DMC kódem. DMC kód je zkratka z anglického názvu Data Matrix Code. Tento kód slouží k identifikaci obrobeného railu. Kód zaznamenává, kdy byl daný kus vyroben, na jakém oddělení a stroji byl vyroben, pořadí jeho vyrobení v závislosti na směně, pozici v jaké byl kus upnut a o jaký typ vysokotlakého zásobníku se jedná. DMC kód s popisem jednotlivých znaků je znázorněn na obr. 23 <sup>1</sup>.

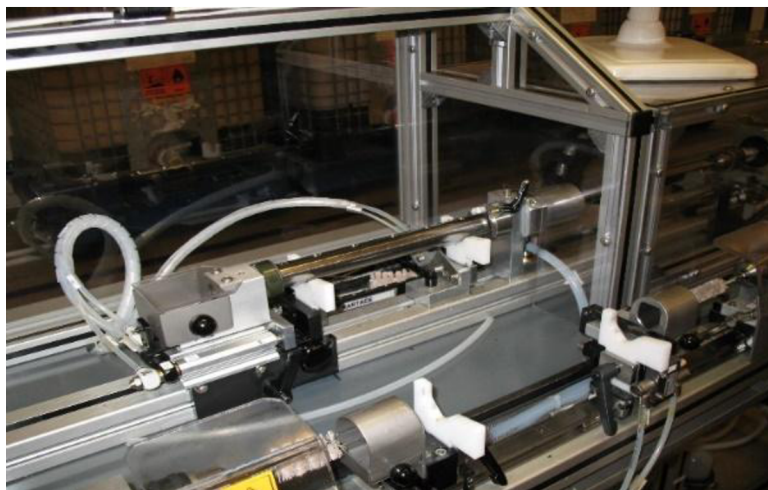


Obr. 23 DMC kód <sup>1</sup>.

Na obráběcím centru Elha je DMC kód vyražen automaticky ihned po obrobení railu. K vyražení kódu se používá razicí jehla. Ta je spolu s ostatními částmi popisovacího zařízení umístěna v ohraničeném prostoru před pracovním prostorem samotného stroje. U obráběcího centra Hüller Hille neprobíhá ražení DMC kódu automaticky jako u stroje Elha, ale kus musí být vložen obsluhou do popisovacího zařízení, které je umístěno blízko stroje <sup>1,19</sup>.

### 3.2.3 Kartáčování a praní

Po označení railů následuje operace kartáčování. Kartáčování slouží především k odstranění otřepů, které vznikly při předešlém obrábění. Stanice je ovládána pneumaticky a jako nástroj se používá plastový kartáč s abrazivem. První operace kartáčování slouží k odstranění nečistot u axiálních vývodů, převážně u závitů, kde jsou nečistoty nejčastěji. Následně dochází ke kartáčování díry po hlubokém vrtání, kde jsou nejčastěji nečistoty zachyceny u hran přechodů ploch po hlubokém vrtání a ploch po radiálním obráběním. U operace dochází současně s kartáčováním k odsávání nečistot a zbylého oleje. Kartáčovací stůl lze vidět na obr. 24 <sup>1,19</sup>.



Obr. 24 Kartáčovací stůl <sup>1</sup>.

Praní je další operací po předešlém kartáčování. V pračkách dochází k odmašťování railů a k nanášení povlaku, který brání tvorbě koroze před povrchovou úpravou tlakového zásobníku. Používá se ultrazvuková pračka Summa, kde je médiem voda společně s pracím prostředkem a konzervačním prostředkem. Na jeden cyklus lze zároveň vyprat 75 dílů. Jeden cyklus trvá přibližně 14 minut. Vyprané díly automaticky putují na další operaci. Na obr. 25 lze vidět ultrazvukovou pračku Summa<sup>1,19,22</sup>.



Obr. 25 Ultrazvuková pračka Summa<sup>22</sup>.

### 3.2.4 Výstupní kontrola na obrábění LWR

Následuje výstupní kontrola, která je složena z tří částí. Jako první se kontrolují průměry pro tlumiče hydraulických rázů. Je to průměr vzniklý radiálním obráběním u vysokotlakých vývodů. Průměr se kontroluje měřidlem Stotz, které pracuje na bázi tlaku vzduchu. Následná kontrola slouží ke změření správnosti odjehlení. K tomu slouží endoskop, což je optický přístroj, který slouží k zobrazení špatně přístupných míst. Poslední kontrola je vzhledová kontrola, kde se kontroluje především povrch a těsnící plochy railu, souosost po hlubokém vrtání, závity, axiální a radiální otvory na výskyt třísek. Jestliže celá výstupní kontrola kusu proběhne bez zjištění vady, kus je načten přes kód DMC do systému a uložen dle balícího předpisu do plastových blistrů. Jestli je naopak nalezena závada, je kus zablokován a uložen k zablokovaným kusům<sup>1,19</sup>.

### 3.2.5 Autofretáž

Další proces je autofretáž pro zlepšení únavové životnosti součástí, které jsou namáhány vnitřním tlakem. Využití má hlavně u součástí pracujících za vysokých pracovních tlaků. Autofretáž je operace, u které dochází k záměrnému zatěžování tělesa vysokým tlakem. U railů je autofretáž prováděna pro typy, které mají systémový tlak 1 800 bar a více<sup>1,23</sup>.

Proces autofretáž se skládá ze dvou kroků. V prvním kroku je na vnitřní povrch součásti vyvíjen velmi vysoký tlak. Na vnitřní straně dojde k překročení meze kluzu a vznikne tak trvalá plastická deformace. Směrem k vnější straně se napětí zmenšuje a na vnější straně tak může dojít pouze k elastické deformaci materiálu. V druhém kroku procesu je vnitřní povrch součásti odlehčován, čímž dojde u oblasti deformované elasticky k navrácení do původního stavu. Po navrácení elastické části dochází ke stlačení části, kde byla deformace plastická. Tím se vyvolá na vnitřní straně tlakové obvodové zbytkové napětí. U tlakových zásobníků vzniká největší tlakové zbytkové napětí v přechodu mezi hlubokým vrtáním a radiálními vývody<sup>1,24</sup>.

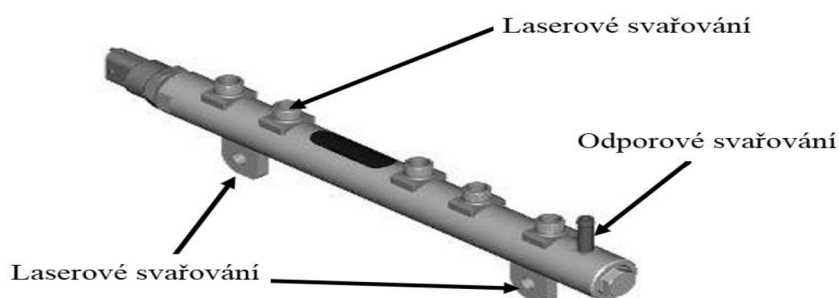


Autofretáž lze provádět mechanicky nebo hydraulicky. Mechanicky prováděná autofretáž spočívá v protažení tvrdého trnu otvorem dílu. Trn musí mít průměr o trochu větší než je vnitřní rozměr. Vzniklým přesahem je způsobena plastifikace vnitřní části. Tento způsob je používán především u jednodušších součástí. Hydraulická varianta spočívá v přivedení kapaliny, která vyvolá vysoký hydraulický tlak. Kapalina je schopna vyvíjet tlak 8 000 barů. Tím vzniká potřebná pružně-plastická deformace. U této metody je potřeba dobře utěsnit všechny části součástí a kapalina je přiváděna jednou ze zátek nebo dutinou, která slouží pro tento účel. Hydraulicky lze autofretovat součásti složitějších tvarů a tato metoda se používá i u railů ve firmě Bosch<sup>1,24</sup>.

Autofretáž součástí přináší řadu výhod. Součásti mohou být podrobeny vyšším tlakům a jejich životnost může být prodloužena až na třicetnásobek. Díky větší odolnosti vůči tlakům, tak při stejném pracovním tlaku lze použít součást, která bude mít menší tloušťku stěny nebo bude vyrobena z levnějšího materiálu. Při výskytu trhlin na vnitřní straně je pomalejší jejich šíření nebo je úplně zastaveno, díky vzniklým tlakovým napětím. Citlivost na přítomnost vrubů je také výrazně snížena<sup>24</sup>.

### 3.2.6 Svařování

Svařování probíhá na pěti svařovacích linkách. Jedna linka je poloautomatická. Ta se používá především pro menší výrobní dávky. Ostatní čtyři linky jsou automatické sériové. Svařování je rozděleno do tří etap. První etapa spočívá v navaření nízkotlakého vývodu. Nízkotlaký vývod je navařen elektrickým odporovým svařováním. Druhá fáze je heftování vysokotlakových vývodů a úchytů. Jedná se o laserové navaření bez přídavného materiálu a bez ochranné atmosféry, kde dojde k pulznímu přichycení vývodů a úchytů k tělu railu za účelem zajištění pozice pro následující etapu. Následující a zároveň finální etapa je svařování vysokotlakých vývodů a úchytů laserem s přídavným materiálem v ochranné atmosféře CO<sub>2</sub>. Svařování komponent railu je zobrazeno na obr. 26<sup>1,19</sup>.



Obr. 26 Svařování komponent railu [4].

Odporové svařování patří mezi metody tlakového svařování, kde potřebné teplo vzniká přímo ve svařovaném předmětu. Teplo potřebné k roztavení materiálu vzniká průchodem střídavého proudu vysoké intenzity a nízkého napětí. Množství vzniklého tepla se stanovuje podle Joule-Lenzova zákona (1)<sup>25,26</sup>.

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1)$$

kde:  $Q$  [J] - množství vzniklého tepla,

$R$  [ $\Omega$ ]- elektrický odpor,

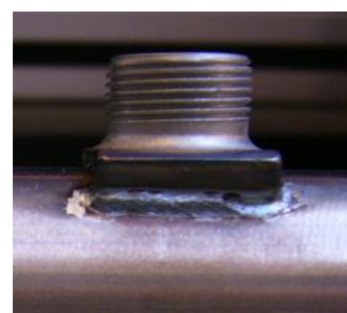
$I$  [A] - elektrický proud,

$t$  [s] - doba průtoku proudu.

Odporové svařování je charakteristické vysokou rychlostí svařování, možností svařování ve všech polohách a lze svařovat většinu kovových materiálů. Je vhodné především u malosériové a hromadné výroby, rozsah svařované tloušťky je od 0,4 do 4 milimetrů. Druhy odporového svařování jsou bodové svařování, výstupkové svařování, švové svařování, stykové odporové svařování stlačením a svařování natupo odtavením. U svařovaného railu se pro NT vývody používá metoda výstupkové svařování. Svary vznikají na svařovacích lisech. Dochází k roztavení záměrně vytvořených kruhových výstupků, díky kterým se vytvoří svár bez přídavného materiálu. Svařený nízkotlaký vývod můžeme vidět na obr. 27<sup>1,25,26</sup>.

Druhá fáze pulzního přichycování vysokotlakých vývodů a úchytů k motoru je prováděna pevnolátkovým laserem Nd:YAG. Princip laseru spočívá v transformaci přiváděné energie na elektromagnetické záření o jedné vlnové délce. Pevnolátkový laser znamená, že jako médium se užívá pevná látka, což je v tomto případě tyčinka z yttritohlinitého granátu obohaceného ionty neodymu. Tento typ může pracovat v pulzním i v kontinuálním režimu. Kromě svařování lze laser použít ke značení nebo vrtání kovů. Heftovaný vysokotlaký vývod je zobrazen na obr. 28<sup>1,19</sup>.

Posledním krokem je finální svařování VT vývodů a úchytů plynovým laserem, kde je médiem oxid uhličitý. CO<sub>2</sub> lasery zaručují vysoké výkony, mají větší účinnost než lasery pevnolátkové a mohou stejně jako pevnolátkové lasery pracovat v pulzním nebo v kontinuálním režimu. Laserový paprsek se generuje ve směsi laserových plynů CO<sub>2</sub>, dusíku a helia. Plyny je třeba případně chladit nebo doplňovat, protože jsou během procesu intenzivně zahřívány a ztrácejí tak schopnost vytvářet laserové záření. K zaostření energie laseru se používají vodou chlazená zrcadla. Lasery je nutno pravidelně kontrolovat, aby nedošlo ke zhoršení kvality laserového paprsku. Na obr. 29 lze vidět VT vývod svařený CO<sub>2</sub> laserem<sup>1,19</sup>.



Obr. 27 Svařený NT vývod<sup>1</sup>. Obr. 28 Heftovaný VT vývod<sup>1</sup>. Obr. 29 VT vývod CO<sub>2</sub> laser<sup>1</sup>.

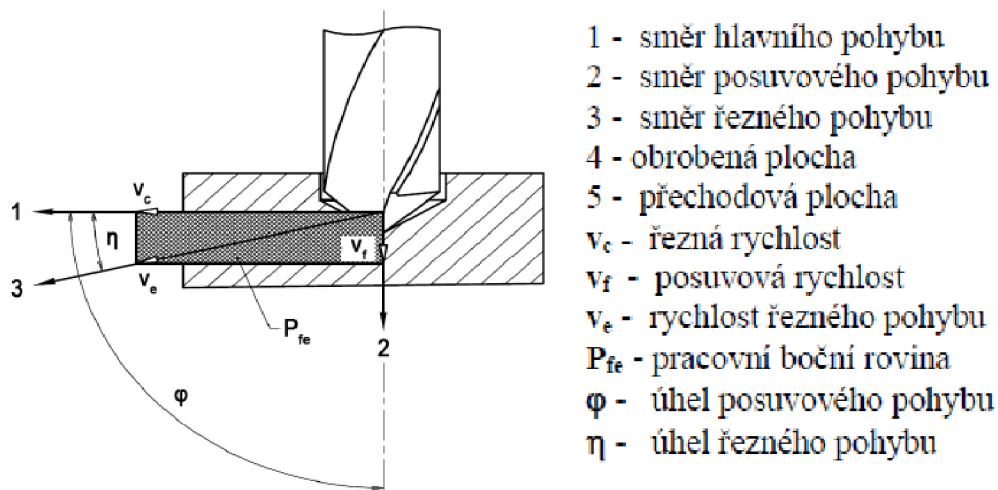
Po finálním svařování je rail spolu se zhotovenými svary poslán na kontrolu kvality. Kontrola kvality po svařování spočívá v metalografické zkoušce, ultrazvukové zkoušce, tahové zkoušce a následném měření rozměrů. Metalografická zkouška je prováděna u odporového svařování, u heftování i u finálního svařování na každém stém kusu. Jde o destruktivní zkoušku, kdy je součást rozřezána v místech svaru a následně zkoumána. Zkouška ultrazvukem je prováděna na každém kusu. Využívá se akustické vlnění o frekvenci nad hranici slyšitelnosti lidského ucha ke zjištění vad součástí, převážně u railu ke zjištění možných vzduchových bublin. Tahová zkouška je prováděna trhacími stroji, kde je vzorek podroben tahové deformaci, jejíž velikost s časem rovnoměrně roste. Je sledována závislost tahového napětí na deformaci. Zkouška se provádí na každém stopravním kusu. Poté následuje měření rozměrů<sup>1,19</sup>.

### **3.2.7 Povrchová úprava, lisování tlumičů a montáž**

Po kontrole kvality svařovaného railu LWR je prováděna povrchová úprava, která je provedena mimo závod. Provádí se galvanickým pokovením nebo silnou vrstvou pasivovaného zinku. Nově nanešená vrstva se vyznačuje lepšími vlastnostmi a dosahuje tloušťky 5-8  $\mu\text{m}$ . Následuje lisování tlumičů pro tlumení tlakových rázů paliva. Poté jsou raily ještě jednou vyprány a poslední operací je montáž. Montáž spočívá v přidělení přídatných komponentů, které jsou voleny podle požadavků zákazníka, a aby nedošlo k jejich porušení, jsou opatřeny plastovými krytkami, které rovněž slouží k zamezení vniku nečistot do vysokotlakého zásobníku paliva<sup>1,19</sup>.

## 4 VRTÁNÍ

Vrtání je výrobní metoda, která nám umožňuje zhotovit díry do plného materiálu nebo zvětšit předpracované díry. Hlavní rotační pohyb vykonává většinou nástroj nazývaný vrták. Posuvový (vedlejší) přímočarý pohyb zpravidla vykonává taktéž nástroj. U méně častých případů může hlavní pohyb vykonávat i obrobek, např. při vrtání na soustruhu. Pro vrtání je zpravidla užíván dvoubřitý nástroj, lze však vrtat i jednobřítým nebo vícebřítým nástrojem. Osa nástroje je většinou kolmá k obráběné ploše, kde nástroj vniká do obráběného materiálu. Kinematiku procesu vrtání znázorňuje obr. 30<sup>27,28,29,30,31</sup>.



Obr. 30 Kinematika procesu vrtání<sup>27</sup>.

Pro vrtání je charakteristickou vlastností, že řezná rychlost se podél hlavního ostří vrtáku zmenšuje, směrem od obvodu vrtáku do jeho středu. V ose vrtáku se řezná rychlost rovná nule. U vrtání je řezná rychlost brána jako rychlost obvodová, která vzniká na největším průměru nástroje. Pro řeznou rychlost platí vztah (2)<sup>27,28,30</sup>.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2)$$

kde:  $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] - řezná rychlost,  
 $D$  [mm] - průměr nástroje,  
 $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] - otáčky nástroje.

Pro posuvovou rychlost platí vztah (3)<sup>28,30</sup>.

$$v_f = f \cdot n \quad (3)$$

kde:  $v_f$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] - posuvová rychlost,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku,  
 $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] - otáčky nástroje.

Pro rychlost řezného pohybu platí vztah (4) <sup>28,30</sup>.

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (4)$$

kde:  $v_e$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] - rychlost řezného pohybu,

$v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] - řezná rychlost,

$v_f$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] - posuvová rychlost.

Proces vrtání lze dělit podle technologie a druhu vrtání, konstrukce a geometrie použitého nástroje na <sup>28,29</sup>:

- navrtávání do plného materiálu středícím vrtákem,
- vrtání krátkých děr do plného materiálu, krátká díra se vyznačuje poměrem průměru vůči délce díry v rozmezí 0,1 až 0,2,
- vrtání krátkých děr do předpracovaných děr,
- vrtání hlubokých děr do plného materiálu, hluboké vrtání má poměr průměru vůči délce díry větší jak 0,1,
- vrtání hlubokých děr do předpracovaných děr,
- vrtání průchozích děr odřezáváním obráběného materiálu ve tvaru mezikruží jednobřitým nebo vícebřitým korunkovým vrtákem,
- speciální případy vrtání,
- vrtání děr u kompozitních, těžkoobrobitelných a nekovových materiálů pomocí vrtáků se speciální geometrií nebo konstrukcí.

Průřez třísky je vrstva obráběného materiálu, která je odebírána ostřím nástroje. Jmenovitý průřez třísky se značí  $A_D$  a vyznačuje plochu průřezu třísky v rovině řezu za určitý čas. Průřez třísky u vrtání s pomocí šroubovitého vrtáku je zobrazen na obr. 31. Jmenovitý průřez třísky pro vrtání šroubovitým vrtákem pro jeden břit vyjadřuje vztah (5) <sup>27,28,30</sup>.

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot \frac{f}{2} \quad (5)$$

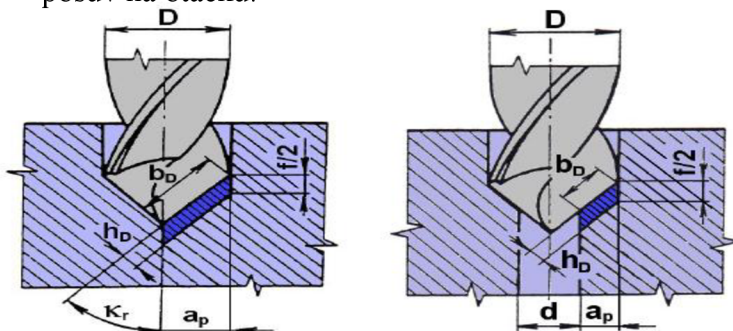
kde:  $A_D$  [ $\text{mm}^2$ ] - jmenovitý průřez třísky,

$b_D$  [mm] - jmenovitá šířka třísky,

$h_D$  [mm] - jmenovitá tloušťka třísky.

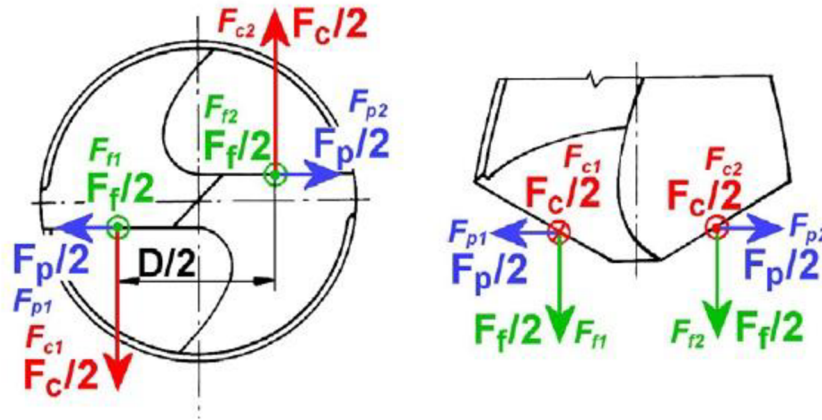
$a_p$  [mm] - šířka záběru ostří,

$f$  [mm] - posuv na otáčku.



Obr. 31 Průřez třísky pro vrtání šroubovitým vrtákem <sup>28</sup>.

Při vrtání vznikají tři základní řezné síly, které se označují jako posuvová síla  $F_f$ , pasivní síla  $F_p$  a řezná síla  $F_c$ . Velikost výsledných sil je tvořena součtem nebo rozdílem hodnot. Počet složek sil je závislý na počtu břitů nástroje. Pro standartní šroubovitý vrták, který je jedním z nejčastěji používaných vrtáků, jsou zobrazeny složky sil na obr. 32<sup>28,32</sup>.



Obr. 32 Složky sil při vrtání šroubovitým vrtákem<sup>28</sup>.

Podle obrázku lze pro jednotlivé složky určit vztahy (6), (7), (8)<sup>28,32</sup>.

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} \quad (6)$$

kde:  $F_f$  [N] - výsledná posuvová síla,  
 $F_{f1}, F_{f2}$  [N] - složka posuvové síly.

$$F_p = F_{p1} - F_{p2} \quad (7)$$

kde:  $F_p$  [N] - výsledná pasivní síla,  
 $F_{p1}, F_{p2}$  [N] - složka pasivní síly.

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} \quad (8)$$

kde:  $F_c$  [N] - výsledná řezná síla,  
 $F_{c1}, F_{c2}$  [N] - složka řezné síly.

Při teoreticky přesné geometrii vrtáku, jsou síly na obou břitech stejné, proto pro rozdíl pasivních složek vychází pasivní síla nulová. U řezné a posuvové síly jsou naopak složky sil polovina výsledné řezné a posuvové síly. Tyto dvě síly lze stanovit pomocí empirických vztahů (9), (10)<sup>28,32</sup>.

$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{X_{Ff}} \cdot f^{Y_{Ff}} \quad (9)$$

kde:  $F_f$  [N] - posuvová síla,  
 $C_{Ff}$  [-] - materiálová konstanta,  
 $D^{X_{Ff}}$  [-] - exponent vlivu průměru vrtáku,  
 $f^{Y_{Ff}}$  [-] - exponent vlivu posuvu na otáčku.

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{X_{F_c}} \cdot f^{Y_{F_c}} \quad (10)$$

kde:  $F_c$  [N] - řezná síla,

$C_{F_c}$  [-] - materiálová konstanta,

$D^{X_{F_c}}$  [-] - exponent vlivu průměru vrtáku,

$f^{Y_{F_c}}$  [-] - exponent vlivu posuvu na otáčku.

Nástroje pro vrtání zobrazeny na obr. 33 lze dělit podle technologie vrtání a druhu, konstrukce a geometrie nástroje na tyto druhy vrtáků<sup>28,29,30</sup>:

- středící vrtáky – k navrtávání tvarových důlků pro upínání obrobku do hrotů nebo k navrtávání středícího důlku pro následné vrtání,
- šroubovitě vrtáky – nejčastěji používaný nástroj pro vrtání krátkých děr,
- kopinaté vrtáky – vyznačují se vysokou tuhostí, umožňují vrtání bez navrtávání do poměru délky k průměru 3:1,
- vrtáky s vyměnitelnou špičkou – špička ve formě břitové destičky nebo hlavice, špičky vyráběny většinou ze slinutých karbidů,
- vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami – řezná část z vyměnitelné břitové destičky, která je z povlakovaného slinutého karbidu
- korunkové vrtáky – materiál je obráběn v mezikruží,
- dělové a hlavňové vrtáky – použití pro vrtání hlubokých děr,
- ejektorové vrtáky – vrtací hlavice je našroubovaná do vrtací trubky, řezná kapalina přiváděna k břitům mezikružím mezi vnější a vnitřní trubkou
- BTA (Boring and Trepanning Association) a STS (Single tube systém) vrtáky – vrtání větších průměrů než vrtáky ejektorové, vrtací hlavice vyráběny o průměru až 180 mm,
- stupňovité vrtáky – vrtání plechů, trubek a profilů do hloubky stěny 4 mm,
- speciální sdružené nástroje – vrtání zároveň s dalšími operacemi pro časovou úsporu, např. vrtání společně se zahlubováním.



Obr. 33 Typy vrtáků<sup>28,30,33,34,35,36,37,38</sup>

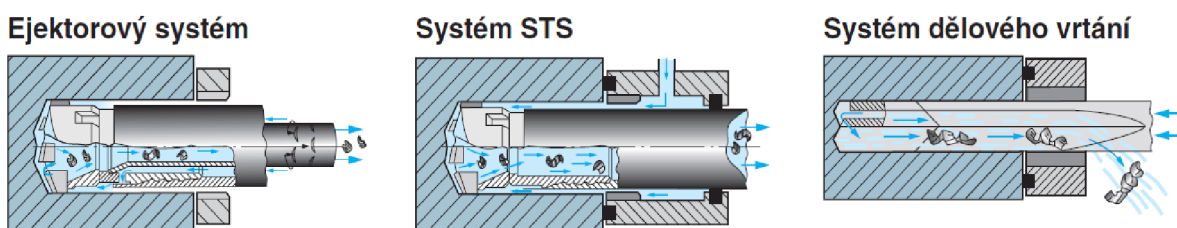
#### 4.1 Hluboké vrtání

Hluboké vrtání je třískové obrábění, při kterém je hloubka vrtání minimálně desetinásobkem obráběného průměru a při kterém je požadavek vyrobit díru na jeden proces, bez výjezdu nástroje z díry, např. z důvodu odstranění přebytečných třísek. Je potřeba, aby docházelo ke správnému lámání třísky, protože jinak by mohlo docházet k zaseknutí třísky do povrchu, které by mohlo nepříznivě ovlivnit povrch obráběné plochy. U této technologie lze dosahovat vysokých poměrů hloubky vrtání k průměru. Poměry můžou dosahovat hodnot až 150:1. Hluboké vrtání je možné provádět více způsoby z hlediska pohybu nástroje a obrobku. Lze obrábět s rotujícím nástrojem, s rotujícím obrobkem nebo s rotujícím nástrojem i obrobkem. Nejčastěji se používá rotující obrobek, u kterého má nástroj přidaný lineární posuv. U hlubokého vrtání je důležitá správná volba řezných rychlostí a posuvů pro správné utváření a odvod třísky obráběného materiálu, aby nedocházelo k nežádoucímu poškození nástroje nebo polotovaru<sup>1,36,39,40</sup>.

Mezi požadované vlastnosti technologie hlubokého vrtání patří dosažení vysokého úběru materiálu s vysokou přesností. Z toho vyplývají vysoké nároky na přímost díry, rozměrové tolerance a na kvalitu obrobeného povrchu. Proto vznikají velké nároky i na nástroj, obráběcí stroj a související vybavení. Technologie je používána v mnoha odvětvích, např. ocelářství, letecký a kosmický průmysl, jaderná energetika a těžba zemního plynu a ropy. Celý proces má velkou ekonomickou náročnost, proto je velmi důležitá spolehlivost celého procesu. Používané nástroje mají vysokou kvalitu, a proto je lze výhodně použít i v určitých aplikacích při vrtání mělkých děr<sup>1,36</sup>.

Pro správný odvod třísek a přívod řezné kapaliny vznikly systémy hlubokého vrtání, které jsou schopné zajistit bezproblémové obrábění. Hloubka díry u těchto systémů dosahuje hodnot stokrát větších než je průměr a tyto systémy jsou zobrazeny na obr. 34 a dělíme je do tří skupin<sup>1,36</sup>:

- Ejektorový systém
- Systém STS
- Systém dělového vrtání



Obr. 34 Systémy hlubokého vrtání<sup>36</sup>.

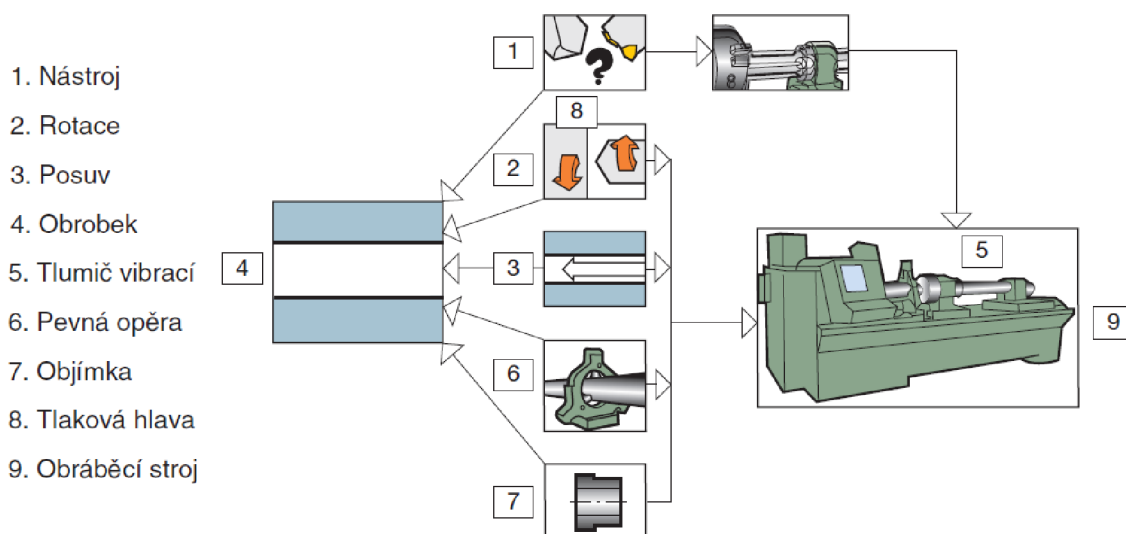
U ejektorového systému je vrták spojen s vnitřní i vnější trubkou. Řezná kapalina je přiváděna čerpadlem do těla vrtáku, což je prostor nástroje mezi dvěma trubkami. Odvádění třísek je rovněž prováděno tělem vrtáku vnitřní trubkou. Díky uzavřenému systému uvnitř nástroje si ejektorový systém vystačí s poměrně nízkými tlaky kapaliny, lze jej instalovat běžně bez větších zásahů do konstrukce, není zde zapotřebí žádné těsnění mezi obrobkem a pouzdem nástroje a je výhodný především u běžných soustruhů, na obráběcích centrech a u vodorovných vyvrtávacích strojů<sup>1,36</sup>.



Pro systém STS je zapotřebí zajistit vyšší tlaky řezné kapaliny za pomoci vysokotlakých čerpadel, protože řezná kapalina je přiváděna do prostoru mimo těla vrtáku, přesněji do prostoru mezi nástrojem a obráběnou dírou. Třísky jsou odváděny tlakem řezné kapaliny do vrtáku štěrbinami v řezné hlavě. Vrták má dutou stopku, kterou jsou následně třísky odvedeny ze stroje. Díky vyšším tlakům je systém spolehlivější při obrábění materiálů, kde dochází k obtížnějšímu utváření třísky. Systém je výhodný především ve větších výrobních sériích. Výhodné jsou zde stejnorodé tvary polotovarů a polotovary, které jsou extrémně dlouhé. Průměry děr mohou dosahovat velikosti přes 200 mm. Nevýhodou je potřeba speciálního stroje pro tento systém<sup>1,36</sup>.

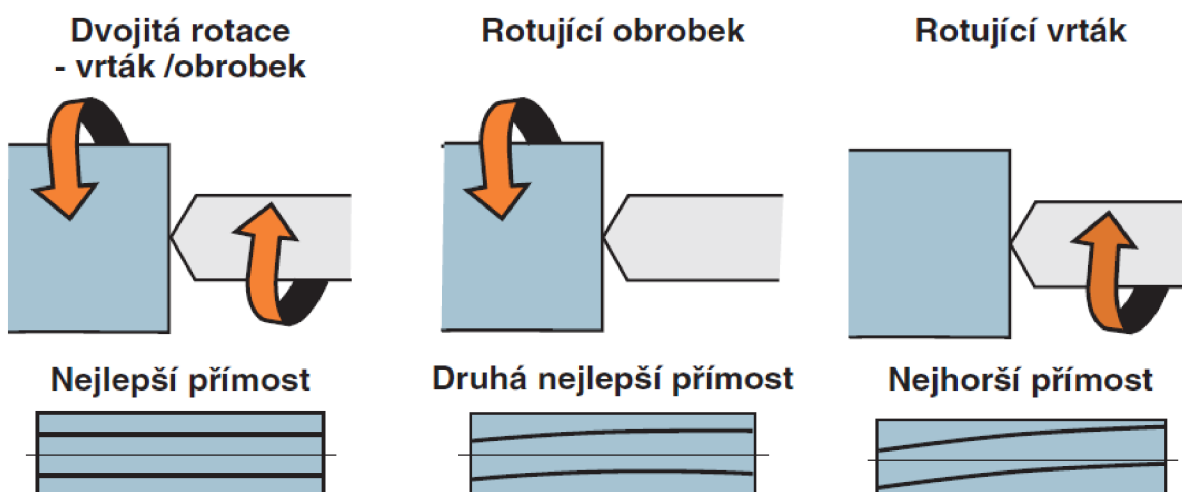
Systém dělového vrtání je vybaven dutou stopkou, kterou je přiváděna řezná kapalina v ose řezu a následně je vytlačována otvory v řezné hlavě. Třísky jsou odváděny tlakem řezné kapaliny drážkou, která je umístěna na vnější části stopky vrtáku. Drážka má tvar profilu V nebo tvar běžné drážky. Dělový vrták je běžně užíván, ovšem musí být zajištěn vysoký tlak řezné kapaliny<sup>1,36</sup>.

Vzhledem k velkým hloubkám vrtaných děr vzniká větší náročnost na přímost vyrobené díry. Pro zlepšení přímosti díry se používá dodatečných opor. Opory umožňují pro jednotlivé technologie vrtat větší hloubky děr v poměru na průměr, kterých by bez opor nešlo dosáhnout. Nepříznivý vliv na přímost díry mohou mít naopak opotřebená nebo nesprávně uložená pouzdra vrtáků. Faktory, které ovlivňují přímost děr, jsou zobrazeny na obr. 35<sup>1,36</sup>.



Obr. 35 Faktory ovlivňující přímost hluboké díry<sup>36</sup>.

Jedním z důležitých faktorů ovlivňujících přímost díry je rotační pohyb u nástroje a obrobku. Jestliže je dosaženo rotace obou částí, které rotují vůči sobě v opačném směru, je dosaženo nejlepších přímostí díry. Další způsob, kdy rotační pohyb koná pouze obrobek, není tak efektivní jako první zmíněný způsob. Zde bývá odchylka od přímosti díry vyjadřována jako 0,1 až 0,3 mm na metr vrtané délky. Nejhorším způsobem je ovšem ten, kde rotační pohyb koná pouze nástroj. U kratších děr se dosahuje poměrně dobrých přímostí děr, ale při vrtání hlubokých děr vzniká problém z důvodu průhybu vrtací trubky. Zde je odchylka od přímosti díry 0,3 až 1 mm na metr. Uvedené tři možnosti rotačního pohybu nástroje a obrobku jsou zobrazeny na obr. 36<sup>1,36</sup>.

Obr. 36 Typy rotačního pohybu nástroje a obrobku <sup>36</sup>.

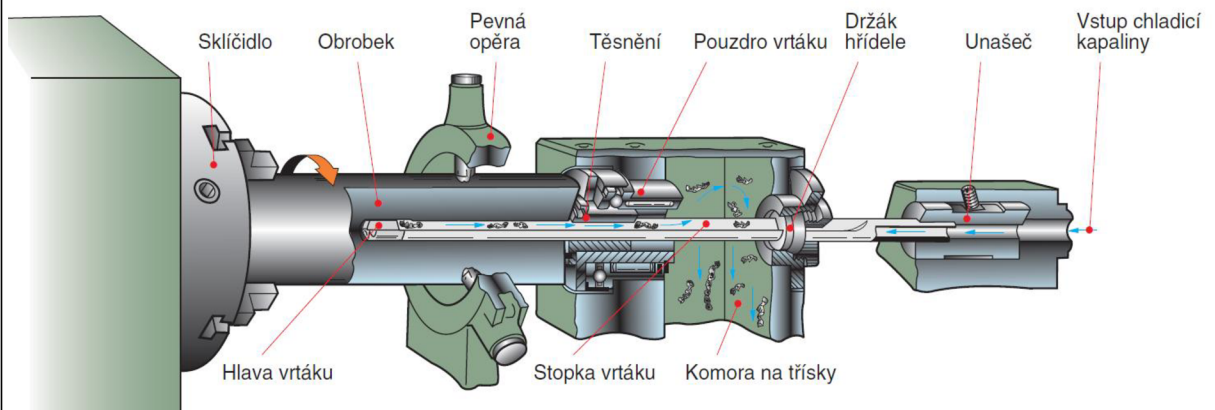
Požadovaná vysoká přesnost u hlubokých děr vyžaduje podepření nástroje. Podepření se provádí vodítky, které vyvažují řezné síly a vedou nástroj vůči povrchu vrtané díry. Vrták je uložen v pouzdru, které zajišťuje jeho vedení a podporuje ho do okamžiku, kdy vrták dosáhne vniknutí do materiálu a dojde k dosednutí vodítek na obráběný materiál. V případech, kde je zapotřebí vniknout do šikmého povrchu obrobku, u křížových děr nebo u vrtání předvrtaných děr velkého průměru, se využívají přídavná vodítka. Přídavná vodítka zlepšují přímost díry a pomáhají nést váhu vrtáku a trubek <sup>1,36</sup>.

Chlazení u hlubokého vrtání má funkci odvodu tepla a třísek, zlepšení životnosti vrtáku a podporu a mazání podložek. Systém chlazení funguje jako dodávka chladicí kapaliny k vrtáku s potřebnou teplotou a tlakem. Pro správné množství chlazení a dodržení potřebného tlaku je zapotřebí v systému čerpadla, popřípadě spojit do rozvodu dvě a více čerpadel, jestliže je třeba větší množství chladicí kapaliny. K zamezení nadměrného opotřebení je nutno opatřit čerpadla správným těsněním. Kvalita obrobené plochy je dále závislá i na jakosti chladicí kapaliny. Filtrace chladicí kapaliny je důležitou součástí systému chlazení z důvodu dodržení požadovaného povrchu vyráběné díry, aby nedocházelo k nepřijatelnému opotřebení opěrné podložky, k zabránění opotřebení nebo dokonce poškození čerpadla a ke zvýšení životnosti nástroje. Často používané filtry pro systém chlazení u hlubokého vrtání jsou magnetické filtry, pásmové filtry, nohavicové filtry a automatické filtry. Další potřebná část systému chlazení je nádrž pro chladicí kapalinu. Velikost nádrže by měla být desetkrát větší než množství kapaliny, kterou je schopno čerpadlo načerpat za jednu minutu. Tím je dosaženo potřebného odvodu tepla. Jestliže by nedocházelo k dostatečnému odvodu tepla, roste teplota chladicí kapaliny, zhoršují se mazací vlastnosti kapaliny a kapalina rychle degraduje. Ideální teplota chladicí kapaliny se pohybuje v rozmezí 30 až 40°C <sup>1,36</sup>.

Jako chladicí kapalina se používají čisté řezné oleje nebo olejové emulze. Čisté řezné oleje jsou oleje bez přidání vody. Často jsou složeny z minerálních a mastných olejů s dalšími přísadami pro extrémní tlaky. Směs je potřeba skladovat za optimálních teplot, jinak dochází k rozkladu směsi. Olejové kapaliny zlepšují životnost nástroje, plynulost tvorby třísky a mají vyšší rozsah použití. Olejové emulze jsou oleje s přidáním vody, které kombinují mazací účinky oleje s tepelnou kapacitou vody. Pro udržení směsi se dodávají přísady jako koncentráty, které vyžadují přesné dávkování v čistém prostředí. Jako přísady se užívají emulgátory, mazadla, antibakteriální činidla a jiné. Při používání emulzí dochází na rozdíl od olejů k čištění obrobku, mohou být výhodnější pro rychloobrábění, ale jejich příprava je zpravidla komplikovanější a musí být pečlivě sledovány vlastnosti emulzí <sup>1,36</sup>.

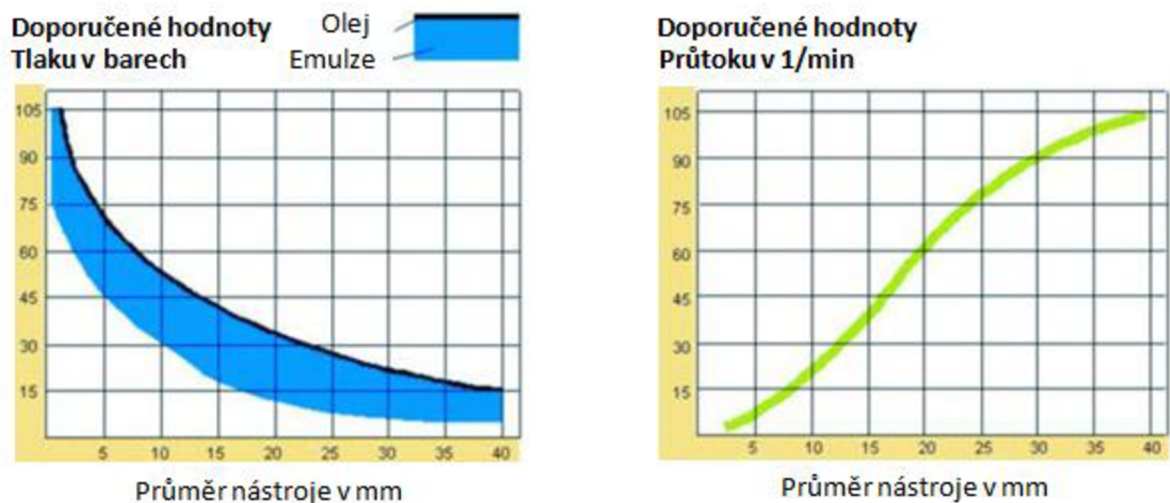
#### 4.1.1 Systém dělového vrtání

Při obrábění tlakových zásobníků hlubokým vrtáním byl použit systém dělového vrtání. Systém dělového vrtání používá jeden z nejstarších principů přívodu chladicí kapaliny, který spočívá v přívodu kapaliny kanálkem na břit, který je vyroben uvnitř vrtáku, jak již bylo zmíněno. Drážka vrtáku ve tvaru V charakterizuje průřez vrtáku, a tak je průřez vrtáku přibližně tři čtvrtiny plného průřezu. Mezi obráběným polotovarem a pouzdem vrtáku je zapotřebí použít těsnění. Systém dělového vrtání má použití především pro menší průměry u běžných obráběcích center s využitím předvrtané díry jako vodící díry a můžeme jej vidět na obr. 37. Výhodou dělového vrtání je, že ho můžeme použít i u velmi tvrdých materiálů a u materiálů, kde se při obrábění špatně utváří tříska. Dosahuje se úzkých tolerancí rozměrů a dobré kvality obrobenej plochy<sup>1,36,40</sup>.



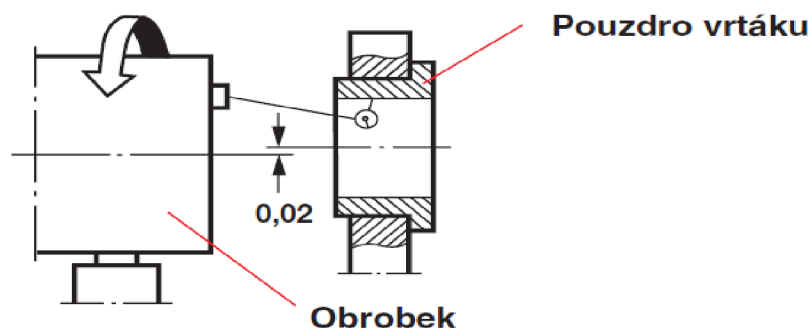
Obr. 37 Systém dělového vrtání<sup>30</sup>.

Strojní zařízení by mělo umožňovat plynulý konstantní mechanický posuv. Pro měření tlaku chladicí kapaliny se používá manometr a k zabránění spuštění stroje bez přívodu chladicí kapaliny se používá elektrické blokovací zařízení. Správnou funkci chladicí kapaliny zajišťuje správně dimenzované čerpadlo. Doporučené hodnoty tlaku chladicí kapaliny pro olej nebo emulzi a doporučené hodnoty průtoku chladicí kapaliny jsou znázorněny na obr. 38<sup>1,36,40</sup>.



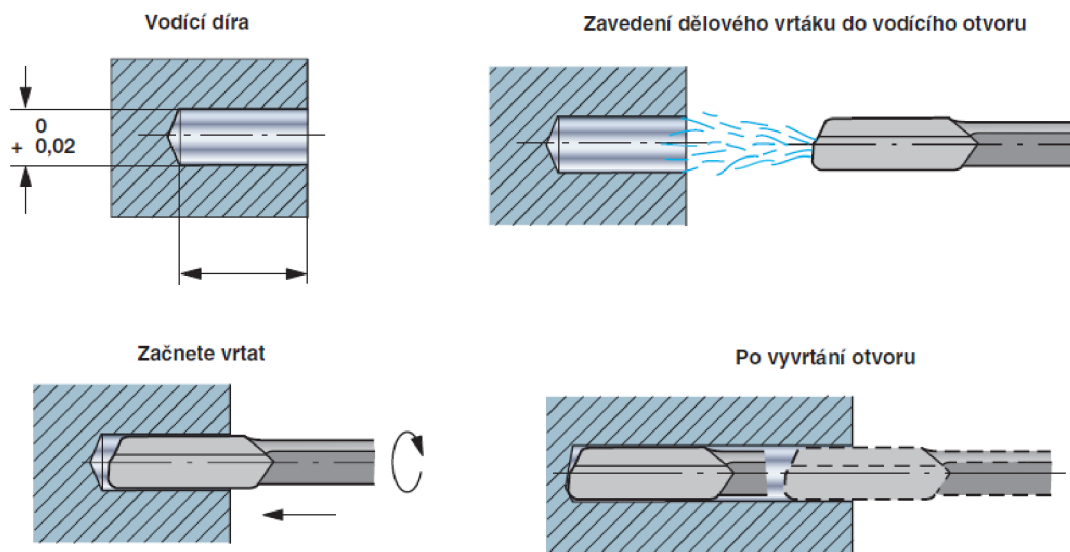
Obr. 38 Doporučené hodnoty tlaku a průtoku chladicí kapaliny<sup>40</sup>.

Souosost systému je určena nastavením osy pouzdra vrtáku s osou vřetena stroje a s osou nástroje. Maximální tolerance souososti je 0,02 mm. Souosost mezi pouzdem nástroje a obrobkem je pro ukázkou zobrazena na obr. 39. Pro delší obráběné polotovary se používají opěrky pro stopku vrtáku i pro obrobek. Vnitřní průměr pouzdra vrtáku je broušen na stejný nominální průměr jako nástroj s určitou tolerancí. Obráběný polotovar musí být spolehlivě upnut<sup>1,36</sup>.



Obr. 39 Souosost mezi pouzdem nástroje a obrobkem<sup>36</sup>.

Na začátku operace dělového vrtání je třeba vyvrtat vodící díru nahrazující vrtací pouzdro. Vodící díra se vyrábí s tolerancí do 0,02 mm a průměr nesmí přesahovat průměr vrtáku, jinak je potřeba použít vrtací pouzdro. Další krok je zavedení nástroje do vodící díry. Mimo díru se dělový vrták neotáčí. S přívodem chladicí kapaliny je vrták zaváděn do vodící díry. Následně je spuštěn rotační pohyb a posuv do řezu. Tím je zahájen proces vrtání. Po dosažení vyvrtání požadované hloubky dojde k rychlému návratu nástroje do polohy, kde byl pouze ve vodící díře. Poté je zastaven rotační pohyb a přívod chladicí kapaliny a nástroj je vysunut z obrobenej součásti. Celý postup je znázorněn na obr. 40<sup>1,36,40</sup>.



Obr. 40 Postup dělového vrtání<sup>36</sup>.

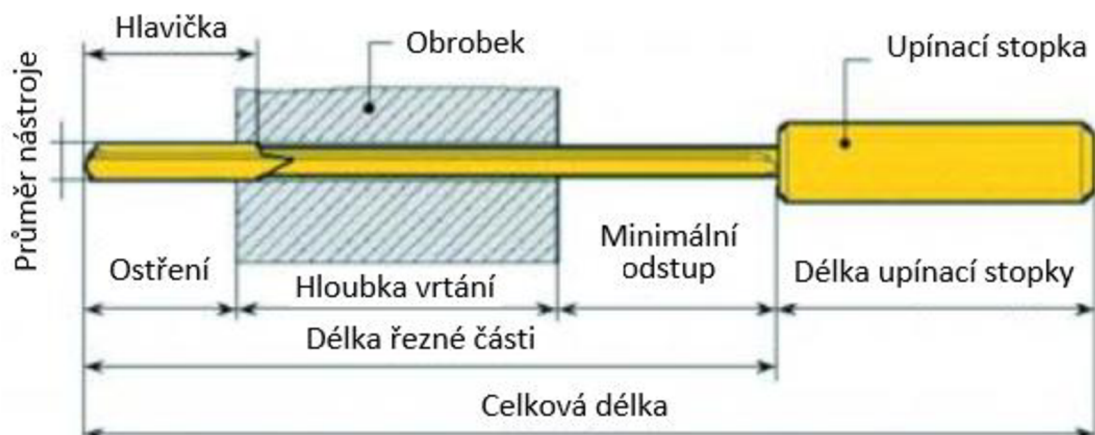
Nástroje pro dělové vrtání jsou zobrazeny na obr. 41 a lze je dělit podle jejich geometrie a použití na <sup>41</sup>:

- Jednobřítý dělový vrták
- Jednobřítý monolitní karbidový dělový vrták
- Dělový vrták pro vysoké rychlosti posuvu
- Dvoubřítý dělový vrták



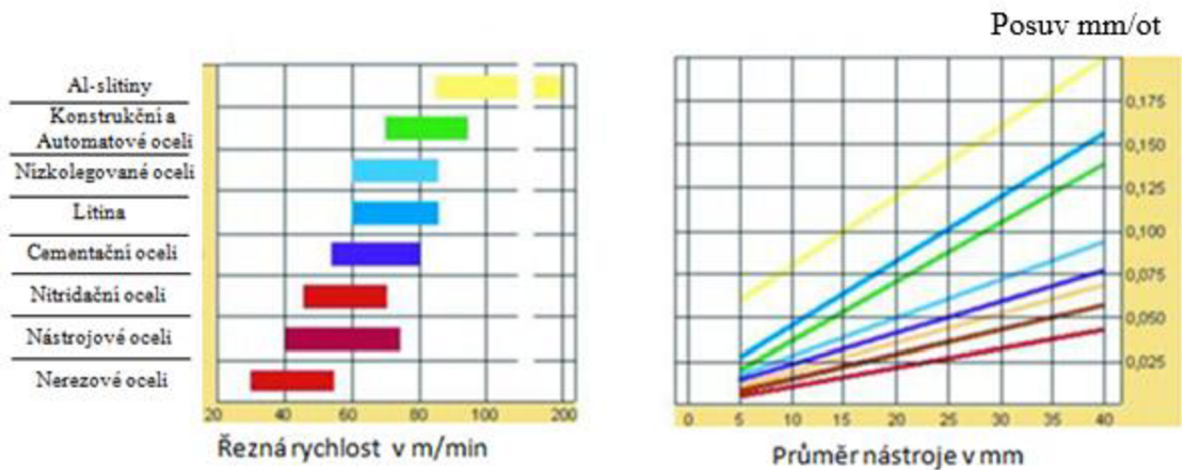
Obr. 41 Dělové vrtáky <sup>41</sup>.

Pro obrábění railu byl použit jednobřítý dělový vrták, který je základní volbou pro obrábění všech typů materiálu. Jednobřítý dělový vrták není rotačně symetrický, proto není schopen se zavrtávat do materiálu. Vzhledem k umístění těžiště nástroje mimo osu rotace, při obrábění vznikají odstředivé síly, které namáhají nástroj na ohyb. Pro charakteristickou délku a štíhlost dělového vrtáku, mohou odstředivé síly spolu se vznikajícími axiálními silami způsobit u nástroje namáhání na vzpěr. Proto je třeba správné volby vhodné vodící díry a spuštění rotačního pohybu pouze pokud je nástroj zaveden ve vodící díře. Pro optimální podmínky je při zavádění jednobřítých dělových vrtáků možnost dosáhnout dobrých výkonů obrábění a lepší kvality obráběných děr, především pro přímost, kvalitu povrchu a pro osové odchylky. Důležitou částí pro optimální podmínky je správná volba délky vrtáku vzhledem k hloubce vrtané délky. Popis částí jednobřítého dělového vrtáku je znázorněn na obr. 42 <sup>1,36,40</sup>.



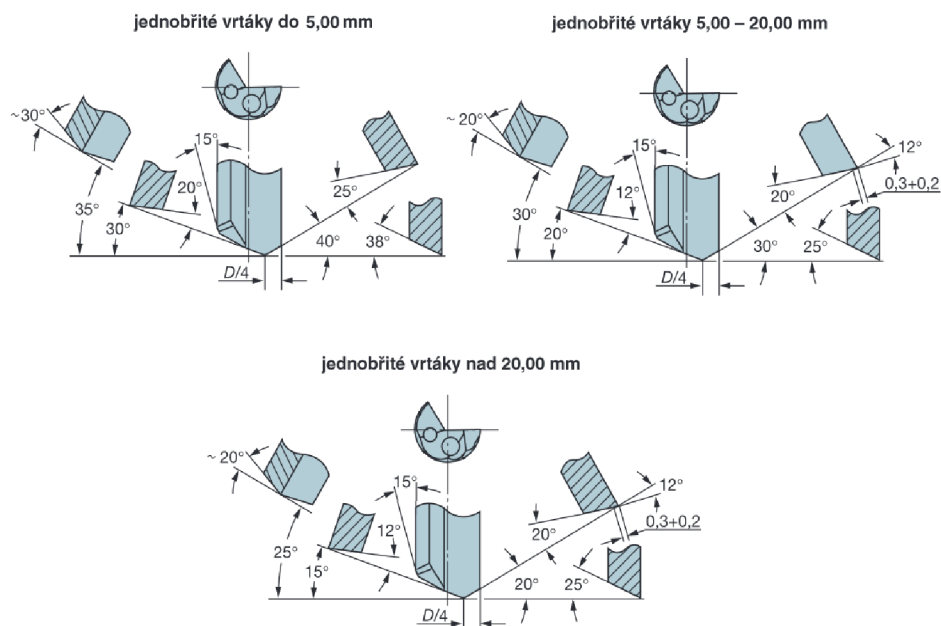
Obr. 42 Jednobřítý dělový vrták <sup>40</sup>.

Řezné podmínky u hlubokého vrtání se liší podle druhu obráběného materiálu. Nejlepší řezné podmínky vznikají u měkkých materiálu pro jejich lepší obrobiteľnosť. Lze tak u obrábění volit vyšší řezné rychlosti, větší posuvy a úběr třísek. U materiálu s vyšší pevností jsou tyto hodnoty voleny nižší, díky horší obrobiteľnosti materiálu. Orientační hodnoty řezné rychlosti a posuvu pro hluboké vrtání podle zvoleného obráběného materiálu jsou znázorněny na obr. 43<sup>1,36,40</sup>.



Obr. 43 Řezné rychlosti a posuvy pro uvedené druhy obráběných materiálů<sup>40</sup>.

Dalším důležitým parametrem je geometrie nástroje. Geometrie nástroje se liší především podle průměru díry, kterou je třeba vyrobit. Např. na obr. 44 můžeme vidět rozdělení geometrie jednobřitého dělového vrtáku od firmy Sandvik, která je rozdělena podle průměru vrtáku do tří skupin. Pro zachování přesné geometrie jsou vrtáky po přesažení dovoleného opotřebení hřbetu ostřeny. Nástroje je možno přeastřovat v závislosti na toleranci vyráběného průměru a na materiálu obrobku patnáctkrát až dvacetkrát. Přeastření se většinou provádí na běžné brusce pro broušení nástrojů s pomocí upínacího přípravku pro přeastření nebo na brusce pro broušení vrtáků<sup>1,36</sup>.



Obr. 44 Geometrie jednobřitých vrtáků firma Sandvik<sup>36</sup>.

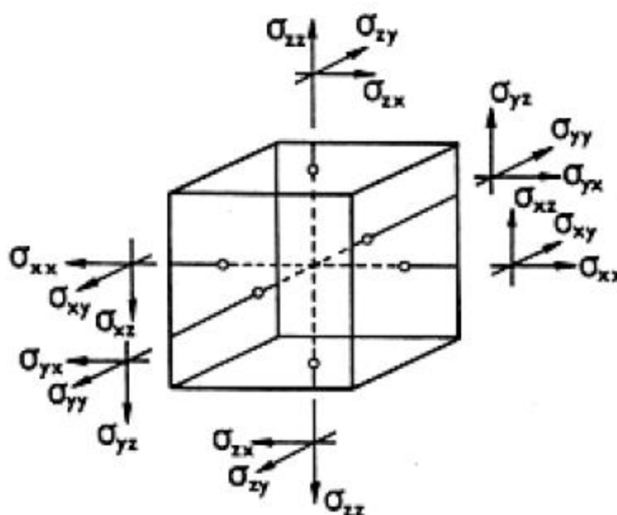
## 5 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ

Před charakteristikou zbytkových napětí je vhodný popis integrity povrchu. Z hlediska neustálého vývoje výrobních procesů je pojem integrity povrchu velmi důležitý. Integrity povrchu lze definovat, jako zpětnou odezvu podmínek, při kterých vzniká funkční plocha. Integrity povrchu zahrnuje důsledky působení technologických metod na jakosti obrobenej plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. Zásadním významem je tak znalost mechanismu, při kterém se bude vyrábět nový povrch, aby mohly být vylepšovány výrobní procesy, a aby obrobenej plochy vznikaly bez poruch<sup>6,42</sup>.

Vývojem nových nástrojů s vysokou řezivostí a zvyšováním výkonů obráběcích strojů vzniká vysoké množství energie mezi nástrojem a obráběným povrchem, které může výrazně ovlivnit vlastnosti obráběné součásti. Nejvýznamnější a nejčastěji analyzované faktory, které nejlépe charakterizují integrity povrchu po obrábění, jsou<sup>1,6,42</sup>:

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

Stav napjatosti v libovolném bodě tělesa je v souřadnicové soustavě charakterizován devíti složkami symetrického tenzoru napětí 2. řádu  $\sigma_{i,j}$  ( $i,j = x, y, z$ ). Systém souřadnic se obvykle orientuje podle os souměrnosti daného objektu nebo podle jiných význačných směrů, jako jsou např. směr obrábění, tváření, aj. Jestliže na objekt nepůsobí žádné vnější síly a momenty, je symetrickým tenzorem napětí  $\sigma_{i,j}$  popsán stav reziduální neboli zbytkové napjatosti. Znázornění složek tenzoru napětí pro souřadnicový systém ( $x, y, z$ ) je zobrazeno na obr. 45<sup>1,6</sup>.



Obr. 45 Složky tenzoru napětí<sup>6</sup>.

U homogenního elasticky izotropního tělesa je vztah mezi složkami tenzoru napětí  $\sigma_{i,j}$  a deformace  $\epsilon_{i,j}$  dán Hookovým zákonem což popisuje vztah (11). Doplnění ke vztahu (11), když  $i = j$  je  $\delta_{ij} = 1$  a když se  $i \neq j$  je  $\delta_{ij} = 0$ <sup>1,6</sup>.

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[ \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-\nu} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \right] \quad (11)$$

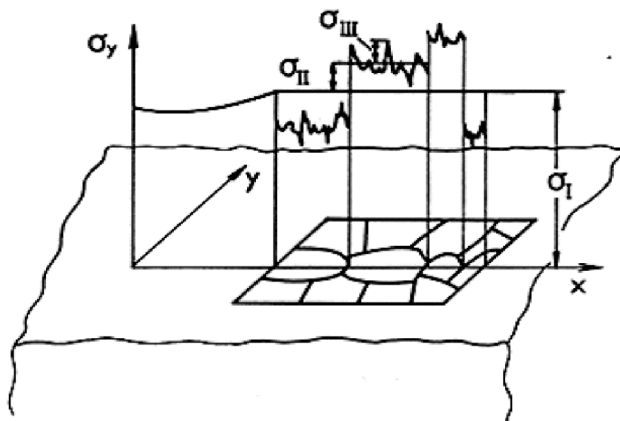
- kde:  $\sigma_{ij}$  [Pa] - tenzor napětí,  
 $\varepsilon_{ij}$  [-] - tenzor deformace,  
 $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  [-] - složky tenzoru deformace,  
 $E$  [Pa] - Youngův modul elasticity,  
 $\nu$  [-] - Poissonovo číslo.

Zbytková napětí jsou mechanická napětí, která se vyskytují v tělese bez působení vnějších sil nebo momentů. Tato definice nezahrnuje napětí vyvolaná nemechanickými účinky, např. změnou teploty, i když jsou důsledkem po dlouho dobu neměnicích se podmínek. Vnitřní složky sil nebo napětí spojené se zbytkovým napětím jsou v rovnováze. Z principu neexistují pevné látky, kde by nebyla žádná zbytková napětí<sup>1,6</sup>.

Vznik zbytkových napětí je důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko-plastických deformací. Pro technickou praxi to znamená, že vzniká mnoho různých stavů zbytkové napjatosti v materiálech, důsledkem zavedené technologie výroby a dalším zpracováním materiálu<sup>1</sup>.

Zbytková napětí jsou pro technickou praxi důležitá. Při vysokých tahových napětích způsobených změnami teplot a fázovými transformacemi mohou zbytková napětí způsobit vznik trhlin i bez dodatečného působení vnějších sil. Zbytková napětí lze dělit na užitečná nebo škodlivá. Užitečná jsou vnesená tlaková napětí pro zlepšení životnosti součástí, např. vnesení tlakových napětí do povrchové vrstvy kuličkováním. Škodlivá napětí vedou ke vzniku trhlin, napěťové korozi a ke snížení meze únavy, či křehkolomové odolnosti. Negativní vliv je především u tahových zbytkových napětí<sup>1</sup>.

Podle klasifikačního kritéria velikosti objemů, v nichž se zbytková napětí nemění velikostí ani směrem působení, jsou tedy homogenní a dělíme je do tří druhů. Zbytková napětí I. druhu jsou označována jako makroskopická, zbytková napětí II. druhu jsou označována jako mikroskopická a zbytková napětí III. druhu nazýváme submikroskopická. Schématické znázornění rozdílu mezi zbytkovými napětími lze vidět na obr. 46<sup>1,6,43</sup>.



Obr. 46 Zbytková napětí I., II. a III. druhu u jednofázového polykrystalického materiálu<sup>6</sup>.



Zbytková napětí I. druhu jsou ve značné míře oblasti materiálu přibližně homogenní. Oblast může popisovat tvarem plošnou rozsáhlou vrstvu o nepatrné tloušťce. Zbytková napětí I. druhu jsou střední hodnotou napětí působících v mnoha krystalech. Jakýkoliv řez tělesem vykazuje, že vnitřní síly spojené se zbytkovým napětím I. druhu jsou v rovnovážném stavu. Rovnováha platí i pro vnitřní momenty, které jsou uvažovány k jakémoliv ose procházející tělesem. Při změně velikosti vnitřních sil nebo momentů, kde se vyskytuje napjatost I. druhu, dojde i ke změně makroskopických rozměrů. Příčiny pro vytváření makroskopických napětí jsou<sup>1,43</sup>:

- obrábění – soustružení, frézování, vrtání, broušení, hoblování,
- tepelné zpracování – kalení, cementování, nitridování, transformační procesy,
- spojování – sváření, lepení, měkké a tvrdé pájení,
- lití, tváření – kování, tažení a válcování za studena, lisování, tlačení, kuličkování,
- vytváření krycích vrstev (povlaků) – plátování, stříkání, galvanizace, potahování, zinkování, vylučování,
- elasticko-plastické deformace u základních typů namáhání – tah, tlak, ohyb, krut.

Zbytková napětí II. druhu jsou přibližně homogenní pro oblasti srovnatelné s velikostí jednotlivých krystalků a představují odchylky mezi zbytkovým napětím I. druhu a mezi středními hodnotami napětí pro jednotlivé krystalky. Rovnováha vnitřních sil a momentů je předpokládána už u objemů, které tvoří větší počet krystalků. Při zásahu do silové a momentové rovnováhy nemusí dojít ke změně tvaru tělesa. Mikroskopická napětí vznikají z<sup>1,43</sup>:

- tepelného procesu – materiál s fázemi, který má rozdílné hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti
- deformace materiálu – materiál z jedné fáze, které má různě orientována zrna k silovému toku a mez kluzu je anizotropní nebo více fází s různými mechanickými vlastnostmi.

Zbytková napětí III. druhu jsou nehomogenní i pro oblasti s meziatomovými vzdálenostmi. Napětí III. druhu charakterizují změny skutečných místních zbytkových napětí okolo hodnot zbytkových napětí II. druhu, proto je rozhodujícím faktorem velikost krystalku materiálu pro dané těleso. Silová a momentová rovnováha je dosažena i v dostatečně velkých částech jednoho krystalku. Jestliže je rovnováha porušena, nedochází k tvarovým změnám tělesa. Submikroskopická napětí jsou důsledkem<sup>1,43,44</sup>:

- poruchy krystalické mřížky – bodové poruchy, čárové poruchy, plošné poruchy, objemové poruchy, difúze.

Zbytkové napětí I. a II. druhu mohou být nulová na rozdíl od zbytkového napětí III. druhu, které se vyskytuje ve všech případech, s jakými se lze v technické praxi setkat. Zbytkové napětí v určitém bodě je superpozicí tří zmíněných druhů napětí. Superpozice je definována vztahem (12)<sup>1</sup>.

$$\sigma = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III} \quad (12)$$

kde:  $\sigma$  [Pa] - výsledné zbytkové napětí,

$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$  [Pa] - zbytkové napětí I., II., a III. druhu.

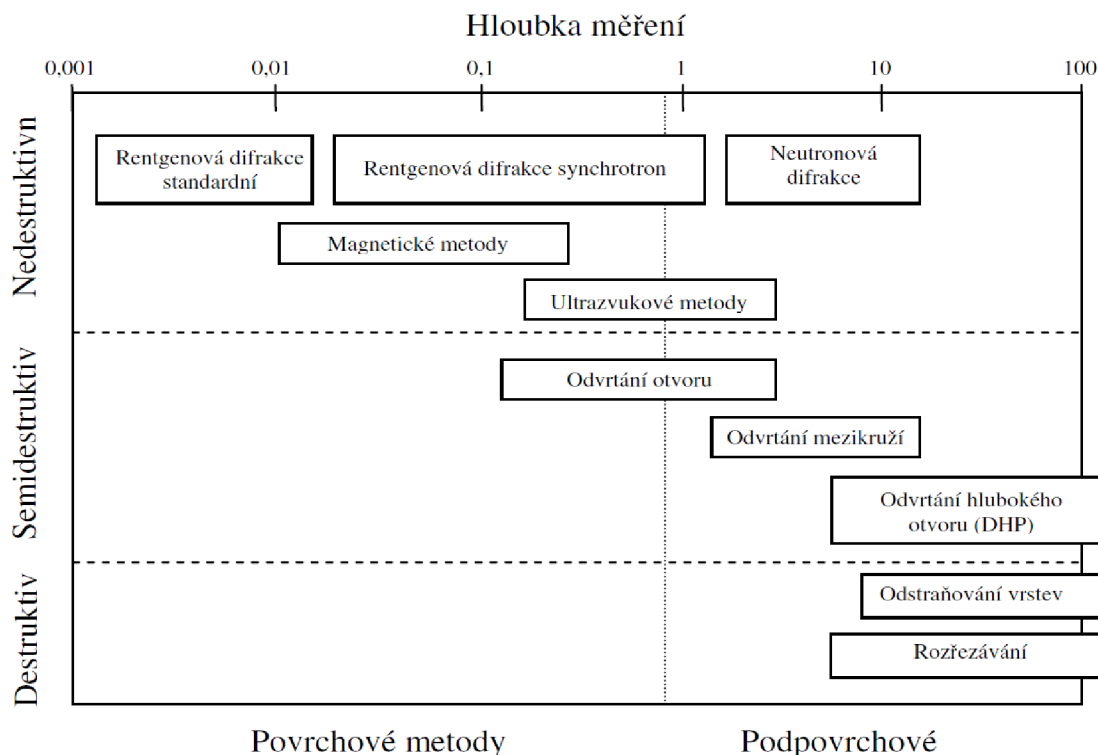
## 5.1 Metody měření zbytkového napětí

Pro stanovení původu a velikosti zbytkových napětí nám slouží různé metody měření zbytkového napětí. Ani jeden ze známých způsobů měření zbytkového napětí není zcela univerzální a určitou metodu lze použít vždy jen na určité druhy materiálu. Zjištění zbytkových napětí nám slouží především pro stanovení jejich vlivu na životnost součástí. Nejpoužívanější metody měření zbytkového napětí lze dělit podle principu na metody<sup>45,46,47</sup>:

- mechanické – měření deformací doprovázejících porušení napěťové rovnováhy při odstranění části objemu měřeného vzorku
- optické – fotoelasticimetrie, tzn. zkoumání mechanického napětí pomocí polarizace,
- magnetické – využívá závislost mezi napětím a magnetickými charakteristikami,
- ultrazvukové – vychází ze závislosti mezi napětím rychlostí ultrazvukových vln,
- difrakční – rentgenografická a neutronografická metoda.

Metody měření zbytkového napětí lze dělit dále podle míry narušení celistvosti zkoumaného materiálu, což zobrazuje obr. 47, na zkoušky<sup>45,46,47</sup>:

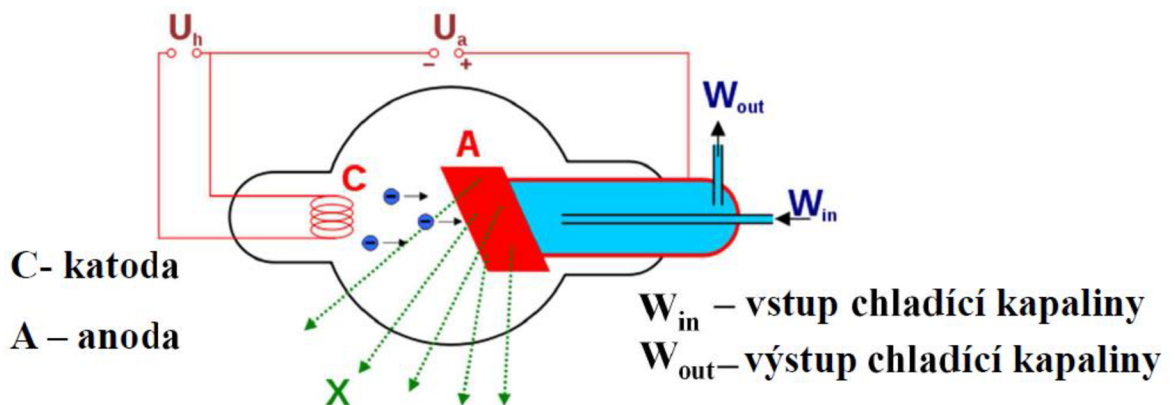
- destruktivní – charakteristické obvykle tím, že vyžadují tvorbu vzorku definovaného tvaru zkoumané součásti a pro požadovaný průběh napětí je třeba postupného odstraňování vrstev materiálu, aby se daly měřit vzniklé makrodeformace,
- semidestruktivní – jsou vyznačovány měřením deformací z vyvolaných přerozdělených napětí v oblasti povrchu, do něhož byla vrtána díra. Deformace jsou obvykle snímány za pomoci tenzometrických růžic, které vyhodnocují výsledné napětí z naměřených změn elektrického odporu,
- nedestruktivní – jak plyne z názvu, tak nedochází k poškození zkoumaného materiálu a tato metoda se liší od ostatních vrstvou zkoumané tloušťky, které se omezuje na efektivní hloubku vnikání použitého záření 5-10  $\mu\text{m}$ .



Obr. 47 Metody měření zbytkového napětí<sup>46</sup>.

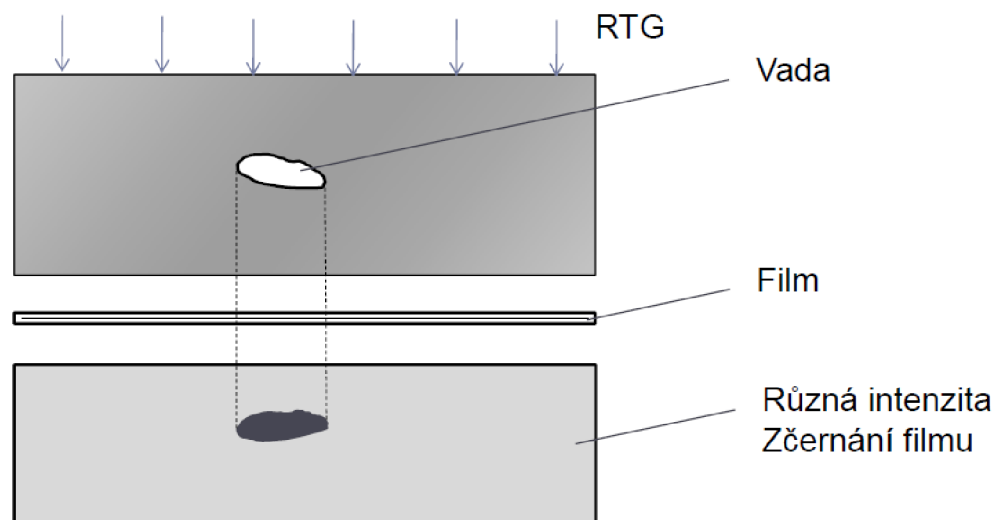
## 5.2 Difrakční rentgenografická tenzometrická analýza

Tato metoda byla použita pro měření tangenciálního zbytkového napětí u hlubokého vrtání vysokotlakého zásobníku rail. Metoda využívá rentgenové záření, což je ionizující elektromagnetické záření, které je složeno z proudu fotonů s vlnovou délkou  $10^{-12}$  až  $10^{-8}$  m. Záření vzniká v diodě. Dioda je evakuovaná nádoba s elektrodami, do které je přiváděn stejnosměrný proud o napětí dosahující několika stovek kilovolt. Emitované elektrony postupují od katody směrem k anodě a s dopadem na anodu se zbrzdí. Tím se 99% kinetické energie přemění na teplo a zbylé 1% energie se přemění na rentgenové záření. Tento postup zobrazuje obr. 48<sup>1,47</sup>.



Obr. 48 Rentgenové záření<sup>47</sup>.

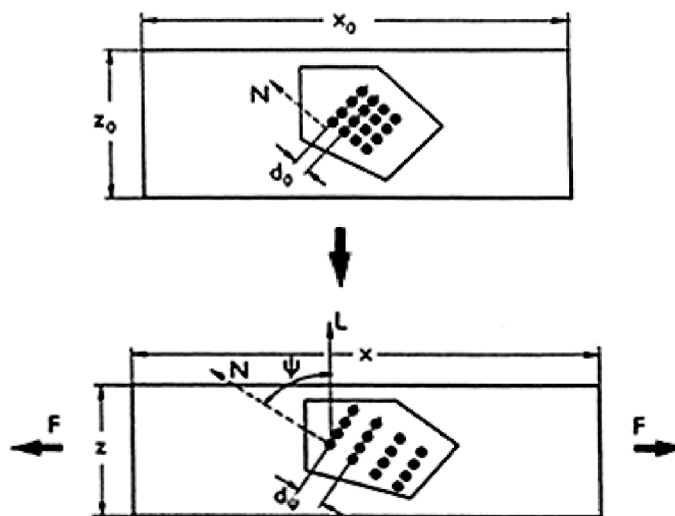
Rentgenové záření se ve strojírenství používá běžně pro kontrolu trhlin a dalších vad uvnitř materiálu u svarů, odlitků z těžkých a lehkých kovů a dalších. Základním principem metody je zeslabení intenzity záření při průchodu zkoušeným tělesem. Zeslabení intenzity záření závisí na hustotě a tloušťce zkoušeného tělesa. Na film umístěný za zkoušeným tělesem dopadne v místě vady záření o vyšší intenzitě, a to se projeví na vyvolaném snímku jako tmavá vrstva na světlém pozadí. Princip prozáření rentgenového paprsku zkušebním tělesem je na obr. 49<sup>1,47</sup>.



Obr. 49 Princip prozáření rentgenového záření materiálem<sup>47</sup>.

### 5.2.1 Podstata a vlastnosti difrakční tenzometrie

Podstata rentgenové tenzometrie spočívá ve využití rozptylu, tzv. difrakce rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností vyvolaných napětím. Difrakce je definována jako světlo, jež se odchyluje od přímočarého šíření jinak než odrazem nebo lomem. Dále je třeba definovat mřížkovou deformaci  $\varepsilon^{mř}$ , která se analogicky popisuje jako deformace makroskopická. Obr. 50 znázorňuje v horní části uspořádání atomů v krystalu u tělesa v nenapjatém stavu a dolní část zobrazuje těleso za působení vnějších sil, kde se mění základní rozměry spolu se vzdáleností atomových rovin  $d_0$ . Normála  $N$  vzdálenosti meziatomových rovin svírá s povrchovou normálou  $L$  úhel  $\psi$ , a tak bude mít vzdálenost meziatomových rovin novou hodnotu  $d_\psi$ <sup>1,43,48</sup>.



Obr. 50 Makroskopická a mikroskopická deformace<sup>1</sup>.

Makroskopickou deformaci určuje vztah (13)<sup>1</sup>.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \quad (13)$$

kde:  $\varepsilon$  [-] - makroskopická deformace,

$x_0$  [ $\mu\text{m}$ ] - původní rozměr objektu,

$x$  [ $\mu\text{m}$ ] - konečný rozměr objektu.

Pro mikroskopickou oblast je mřížková deformace definována relativní změnou meziatomové vzdálenosti, což je vzdálenost atomových mřížkových rovin a je popsána vztahem (14)<sup>1,6</sup>.

$$\varepsilon^{mř} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_\psi - d_0}{d_0} = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (14)$$

kde:  $\varepsilon^{mř}$  [-] - mikroskopická deformace,

$d_0$  [ $\text{Å}$ ] - původní vzdálenost atomových rovin,

$d, d_\psi$  [ $\text{Å}$ ] - konečná vzdálenost atomových rovin.

Jestliže dopadá na elasticky deformovanou krystalovou mřížku rentgenový paprsek a rozdíl drah obou paprsků je celočíselným násobkem vlnové délky  $\lambda$ , platí Braggova podmínka, kterou popisuje vztah (15)<sup>1,6</sup>.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad (15)$$

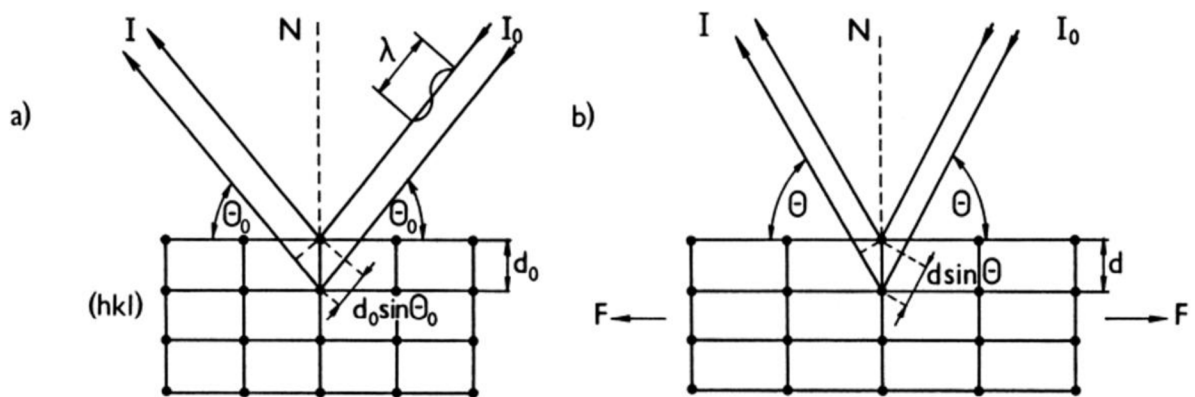
kde:  $n$  [-] - řád reflexe,

$\lambda$  [Å] - vlnová délka dopadajícího a difraktovaného záření,

$d$  [Å] - vzdálenost atomových rovin,

$\theta$  [°] - difrakční úhel.

Potom se změna mezirovinné atomové vzdálenosti z  $d_0$  na  $d$  projeví změnou Braggova úhlu z  $\theta_0$  na  $\theta$ . Tuto změnu z nenapjatého stavu na stav zatížený silou  $F$  znázorňuje obr. 51<sup>1,6</sup>.



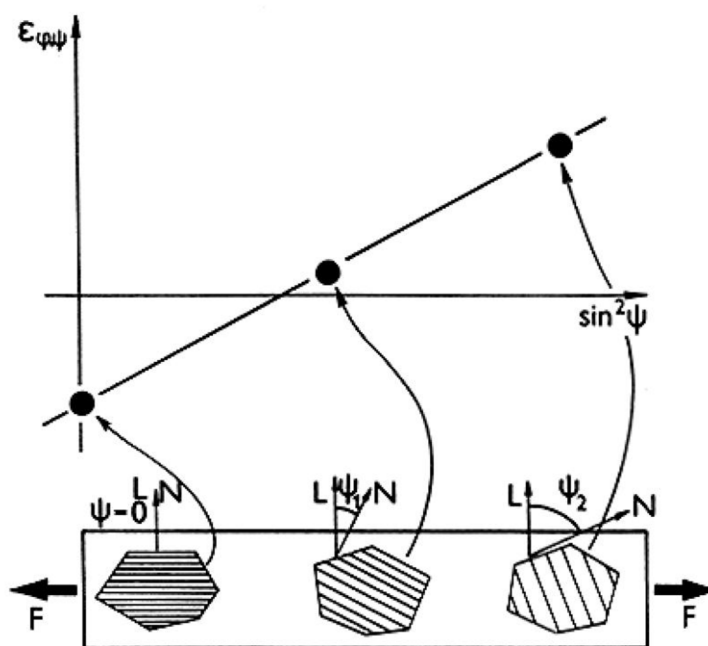
Obr. 51 Změna vzdálenosti mřížkových rovin a Braggova úhlu<sup>6</sup>.

Mřížkové deformace se stanovují vždy v kolmém směru vzhledem k reflektujícím rovinám vhodně orientovaných krystalů. Z obr. 45 vyplývá, že vyvolaná změna úhlové polohy  $\Delta\theta$  při určité mřížkové deformaci bude tím větší, čím větší bude počáteční difrakční úhel  $\theta_0$ . Proto jsou mřížkové deformace měřeny většinou v tzv. oblasti zpětného paprsku, kde je podmínkou, že dvojnásobek difrakčního úhlu v zatíženém stavu musí být větší než  $90^\circ$ <sup>1,48</sup>.

Rentgenová difrakční analýza napětí se od ostatních tenzometrických metod liší určitými specifickými rysy. Měření lze provádět pouze u krystalických látek nebo u krystalických fází částečně amorfních materiálů a u tenké povrchové vrstvy je měření zcela nedestruktivní. Pro stanovení hloubkového profilu mřížkové deformace lze využít metody, která je složena z difrakční analýzy a postupného odleptání povrchu. Mřížkové vzdálenosti sloužící v difrakční tenzometrii jako tzv. měrky jsou přibližně o osm řádů menší než u ostatních mechanických a elektromechanických obvyklých metod. Pro jednofázové materiály má měření deformace omezení na vhodně orientované krystaly uvnitř ozářeného objemu svazkem rentgenových paprsků. Pro vícefázové soustavy jsou informace získány pouze u jednotlivých krystalů jedné fáze. Proto jsou získané výsledky ovlivněny elastickou anizotropií krystalů zkoumaného objektu. U vícefázových soustav je možnost využití selektivní vlastnosti difrakční metody a lze stanovit mřížkové deformace na krystalech u každé fáze jednotlivě. Lze tedy u rentgenové tenzometrie měřit zbytková napětí I. a II. druhu ve vícefázových polykrystalických materiálech<sup>1,6,48</sup>.

### 5.2.2 Technika měření a užití v průmyslu

K měření zbytkových makroskopických napětí se používají stacionární a přenosné soustrojí s fotografickou detekcí záření nebo difraktometry v určitém uspořádání i s paralelním svazkem. Ani jedno z těchto zařízení není naprosto univerzální pro splnění požadavků základního, ale i aplikovaného výzkumu. Pro provozní podmínky mají největší perspektivu mobilní aparatury, které jsou vybaveny polohově citlivými detektory. U laboratorní tenzometrické analýzy je nejvíce osvědčena metoda měření s plně automatizovanými  $\psi$ -difraktometry. Pro dvojosý stav napjatosti rovnoběžný s povrchem se nejčastěji používá metoda “ $\sin^2\psi$ ”. Princip měření dvojosého stavu napjatosti metodou “ $\sin^2\psi$ ” je znázorněn na obr. 52<sup>1,6</sup>.



Obr. 52 Schéma metody měření dvojosého stavu napjatosti metodou “ $\sin^2\psi$ ”<sup>6</sup>.

Pro metodu “ $\sin^2\psi$ ” je měřená vzdálenost systému mřížkových rovin  $\{hkl\}$  v různých a různě orientovaných krystalech. Získaná informace je tím víc spolehlivější, čím je vyšší počet reflektujících krystalů. Významnou výhodou rentgenografické tenzometrické techniky je to, že zkoumaný povrch materiálu nemusí být speciálně upravován před samotným měřením a běžná drsnost materiálu po obrábění a tváření měření nijak záporně neovlivní. Tenké přilnavé povrchové vrstvy rovněž nejsou při měření na závadu, jestliže příliš nezeslabují intenzitu záření difraktovaného krystaly zkoumaného podkladu nebo nejsou zdrojem vlastního difrakčního záření. Je třeba však vždy počítat s tím, jak ovlivní nepatrná hloubka vnikání rentgenových paprsků danou úlohu<sup>1,48,49</sup>.

Pro odstranění nežádoucích povrchových efektů se používá elektrochemické odleptávání, které zasahuje do hloubky materiálu 0,1 až 0,2 mm. Odleptávání je používáno především proto, že nevyvolává žádné dodatečné zbytkové napětí. Odleptaný objem by měl být zanedbatelný vzhledem k velikosti zkoumané části, aby nevznikaly velké změny napjatosti způsobené porušením celistvosti materiálu. Doba určení jedné složky napětí se pohybuje v jednotkách minut až hodin. Závisí především na výkonu rentgenky, ploše ozářeného povrchu zkoumané části, materiálu a stavu zkoumaného vzorku, typu reflektujících rovin  $\{hkl\}$ , požadované přesnosti měření a použitým detekčním zařízením<sup>1,48,49</sup>.

Pro volbu vlnové délky záření je nutno řešit specifické rysy interakce záření s materiálem a její hodnota určuje hloubku vnikání záření v materiálu, existenci difrakcí pro vysoké difrakční úhly a pravděpodobnost výskytu rušivého fluorescenčního záření. U měření za nepříznivých podmínek může vzniknout chyba, která dosahuje hodnot až 80 MPa<sup>1,48</sup>.

Pro rentgenografické měření zbytkových napětí je elastická anizotropie určována za pomoci Voigtových rentgenografických elastických konstant. Konstanty jsou vyjadřovány Youngovým modulem  $E$  a Poissonovým číslem  $\nu$ . Jsou vyjádřeny vztahy (16) a (17)<sup>1,6,48</sup>.

$$s_1 = -\nu/E \quad (16)$$

$$1/2 s_2 = (\nu + 1)/E \quad (17)$$

kde:  $s_1, 1/2 s_2$  [Pa<sup>-1</sup>] - Voigtovy elastické konstanty,  
 $E$  [Pa] - Youngův modul elasticity,  
 $\nu$  [-] - Poissonovo číslo.

Elastická anizotropie se projevuje v různých krystalografických směrech elastickými vlastnostmi a ovlivňuje tím naměřené výsledky. Pro mechanické měření deformace, kde se vyskytují většinou objemy s vysokým počtem náhodně orientovaných krystalů, je efekt anizotropie “zprůměrován” a chování zkoumaného vzorku je popsáno jako kvaziizotropní. Určované deformace se tak budou lišit. Výjimkou mohou být materiály s podobnými elasticky izotropními krystaly, čímž je charakteristický např. wolfram. Vliv elastické anizotropie není příliš významný u hliníku a jeho slitin, avšak u materiálů na bázi železa již nelze elastickou anizotropii zanedbat<sup>1</sup>.

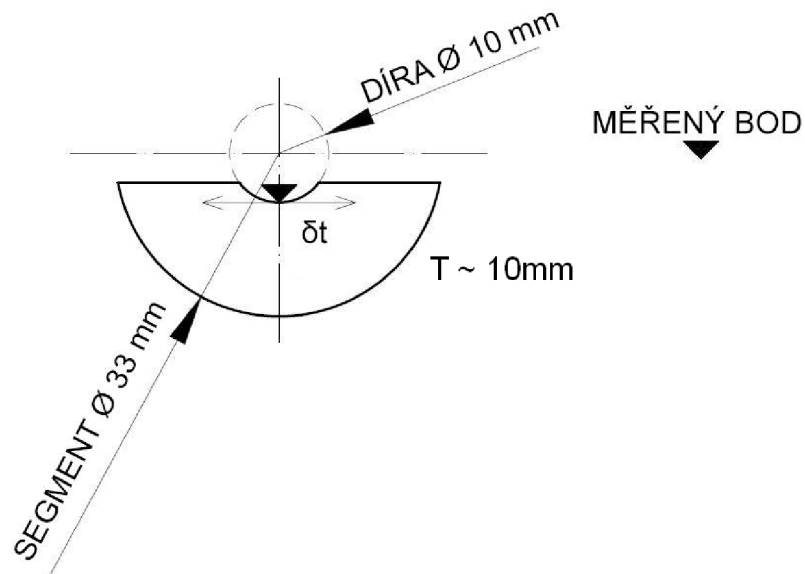
Měření zbytkového napětí bylo poprvé v tehdejším Československu provedeno v roce 1936 profesorkou Adélou Kochanovskou, která hledala příčinu praskání obalů pancéřových granátů. V letech 1957 až 1961 byly vyhotoveny tři měřicí postupy založené na stejném principu. Byla to metoda šesti expozic, metoda šikmých snímků a metoda “sin<sup>2</sup>ψ”, která dodnes představuje východisko pro stanovení zbytkové napjatosti. V dnešní době je vývoj metodiky ovlivněn především těmito faktory<sup>1,6</sup>:

- nové konstrukční řešení přístrojů (difraktometry a mobilní zařízení),
- zdokonalování běžně užívaných prvků rentgenové optiky (vrstevnatá zrcadla),
- zvýšení zájmu o difrakční studium reálné struktury tenkých povrchových vrstev a nanokrystalických materiálů,
- vývoj a cenová dostupnost nových typů detektorů.

V průmyslové výrobě jsou metody využívány pro měření zbytkových napětí v povrchových vrstvách u převodovek osobních automobilů, náprav motorových lokomotiv, klikových hřídelů, ozubených kol, válcovaných ocelových pásů, šroubových pružin, závitů řezaných různými technologiemi a u dalších. Podrobně byly zpracovány stavy napjatosti v povrchových vrstvách kovů při soustružení, frézování, honování, broušení, vrtání, indukčním kalení, balotínování, zásahu laserovým nebo elektronovým paprskem a další. Byly sledovány účinnosti různých příčin relaxace zbytkových napětí u strojních dílů a speciálně připravených laboratorních vzorků<sup>1,6</sup>.

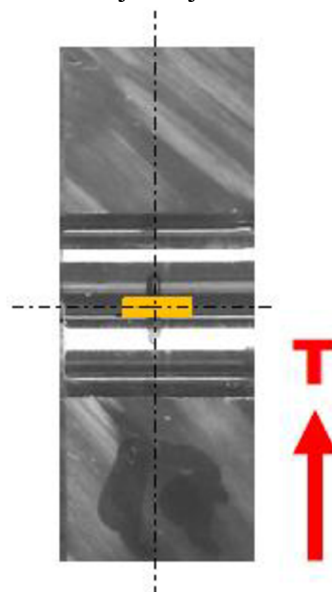
## 6 STANOVENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ A DALŠÍCH PARAMETRŮ

Pro měření makroskopických zbytkových napětí v tangenciálním směru bylo použito 40 segmentů nařezaných na metalografické pile. Segmenty byly nařezány ve vzdálenosti 50 mm od konce railu, kde je sražení  $0,3 \times 45^\circ$ . Nařezány byly tak, aby jejich tloušťka byla přibližně 10 mm. Vzorky byly nařezány z vysokotlakého zásobníku rail, u kterého byl vyvrtán axiální otvor dělovým vrtákem za různých obráběcích podmínek. Vzorky mají tvar půlměsíce s rozřízým otvorem o průměru 10 mm. Na obr. 53 je znázorněn tvar vzorku, kde bylo měřeno tangenciální napětí<sup>1</sup>.



Obr. 53 Vzorek tvaru půlměsíce<sup>1</sup>.

Napětí bylo měřeno na vnitřním povrchu axiálních otvorů. Stanovení povrchových zbytkových napětí je pouze v tangenciálním směru ve směru řezné rychlosti dělového vrtáku a místo měření bylo vždy na stejném místě uprostřed vzorku. Oblast rentgenového měření vzorků charakterizuje kolimátor, který měl rozměr  $0,5 \times 3 \text{ mm}^2$ . Umístění kolimátoru, kde probíhalo měření, lze vidět na obr. 54. Měřené tangenciální napětí je označováno symbolem  $\sigma_T$  a rozptyl tangenciálního napětí označujeme jako  $\Delta\sigma_T$ .

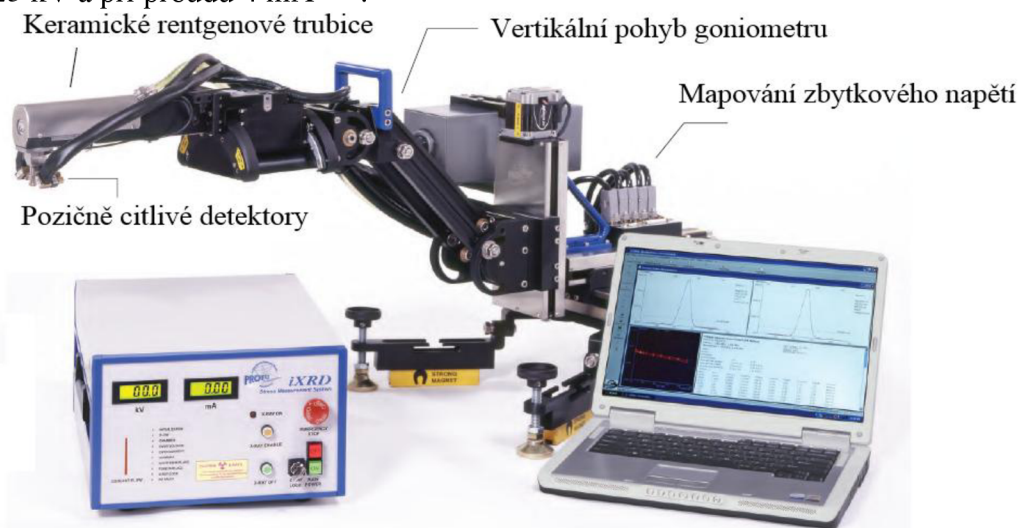


Obr. 54 Ozářená oblast (kolimátor) o rozměrech  $0,5 \times 3 \text{ mm}^2$ <sup>1</sup>.



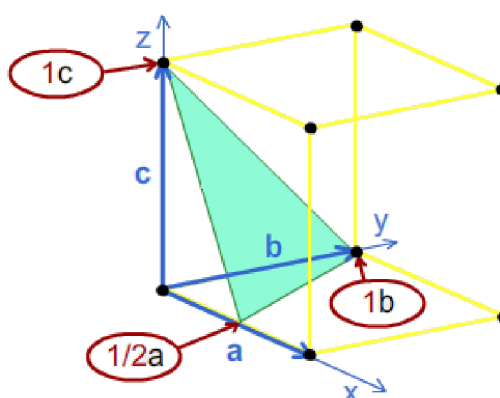
## 6.1 Měřící zařízení

Difrakční měření makroskopických zbytkových napětí bylo prováděno externě difraktometrem PROTO iXRD COMBO s uspořádáním  $\chi$ -goniometru. Difraktometr PROTO iXRD COMBO lze vidět na obr. 55. Záření rentgenky provedeno s chromovou anodou při napětí 25 kV a při proudu 4 mA<sup>1,50</sup>.



Obr. 55 Difraktometr PROTO iXRD COMBO<sup>50</sup>.

Analýza probíhala v difrakčních rovinách  $\{211\}$  fáze  $\alpha$ -Fe. Rovina  $\{211\}$  v systému mřížkových rovin  $\{hkl\}$  je zobrazena na obr. 56. Při použitím záření  $\text{CrK}\alpha$  odpovídá rovinám difrakční maximum  $2\theta \approx 156,4$ . Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací, stanovených na základě experimentálních závislostí  $2\theta(\sin^2\psi)$  s předpokladem dvojosé zbytkové napjatosti. Závislosti  $2\theta^{211}(\sin^2\psi)$  byly měřeny pouze v tangenciálním směru, tedy kolmo na osu segmentu měřeného otvoru<sup>1,51</sup>.



Obr. 56 Rovina  $\{211\}$  v systému mřížkových rovin  $\{hkl\}$ <sup>51</sup>.

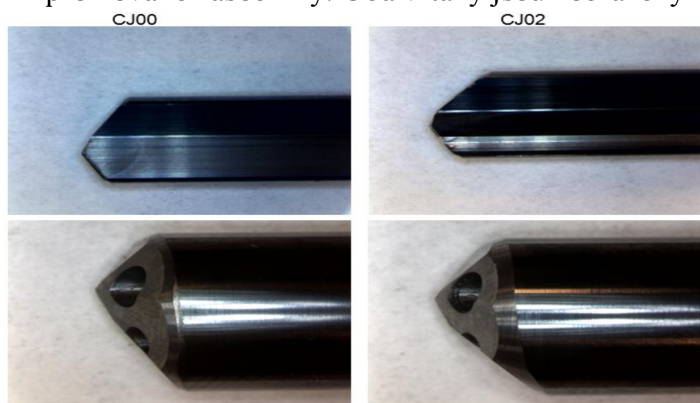
Difraktované měření bylo zaznamenáno dvěma lineárními detektory. Detektory byly umístěny na obou stranách kolimátoru. Hodnoty makroskopických zbytkových napětí byly stanoveny s pomocí softwaru XRD Win 2000. Změna difrakčního úhlu  $2\theta^{211}$  dubletu  $\text{CrK}\alpha$  difraktovaného na mřížkových rovinách  $\{211\}$  fáze  $\alpha$ -Fe byla stanovena Gaussovou metodou. Experimentální chyba naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou podle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou  $\sin^2\psi$ <sup>1</sup>.

Parametry měření <sup>1</sup>:

- $\chi$  modifikovaná geometrie,
- doba expozice 1 s,
- elastické konstanty  $s_1 = 5,75 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $\frac{1}{2} s_2 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$ ,
- 15 expozic na jedno naměřené difrakční maximum,
- oscilace rentgenové hlavy v rozsahu  $\pm 3^\circ$ ,
- hloubka vnikání záření 3 až 5  $\mu\text{m}$
- maximální hodnota natočení rentgenky  $35^\circ$ .

## 6.2 Použité nástroje při hlubokém vrtání

Na hluboké vrtání měřených segmentů byly použity dva typy jednobřítých dělových vrtáků. Základní značení vrtáků je CJ00 a CJ02. Vrták CJ00 je v jihlavské společnosti Bosch Diesel s.r.o. používán jako standardní vrták pro svařované dílce. Vrták CJ02 se používá pro velké série především pro kované zásobníky. Oba vrtáky jsou zobrazeny na obr. 57 <sup>1</sup>.



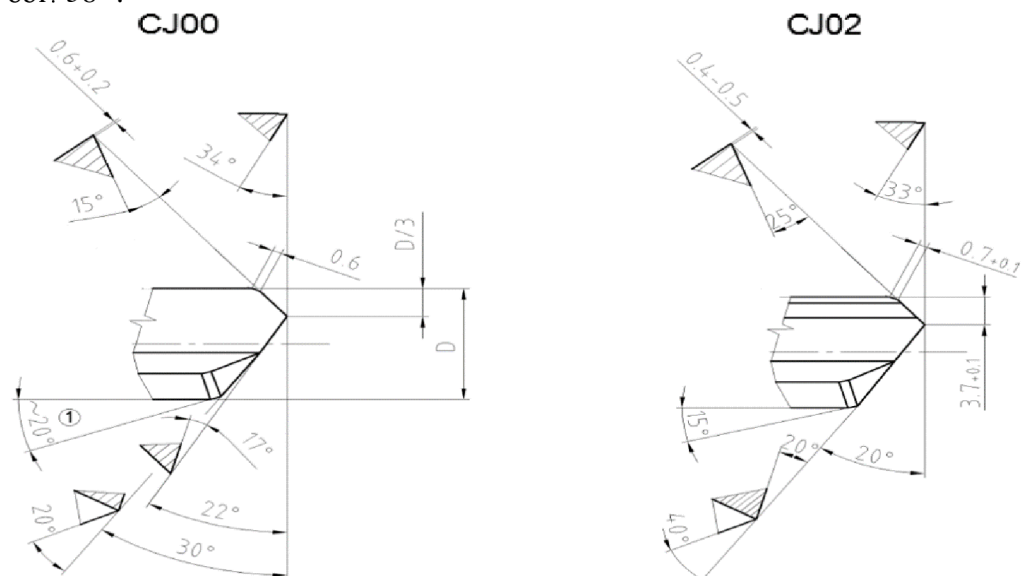
Obr. 57 Dělový vrták CJ00 a CJ02 <sup>1</sup>.

Dělové vrtáky jsou ve společnosti Bosch Diesel s.r.o. dodávány firmou Botek. Na parametry obou vrtáků odkazuje tab. 1 <sup>1</sup>.

Tab. 1 Parametry vrtáků CJ00 a CJ02 <sup>1</sup>.

Typ vrtáku	CJ00	CJ02
Průměr vrtáku	Ø10,1h5 mm	Ø10,1h5 mm
Materiál vrtáku	H15	H15
Trvanlivost vrtáku	40 m	30 m
Minimální délka pro ostření	30 mm	30 mm
Povlak	XT	XT
Celková délka vrtáku	1100 mm	1100 mm
Směr řezu	Pravořezný	Pravořezný
Počet ostření vrtáku	7x	7x

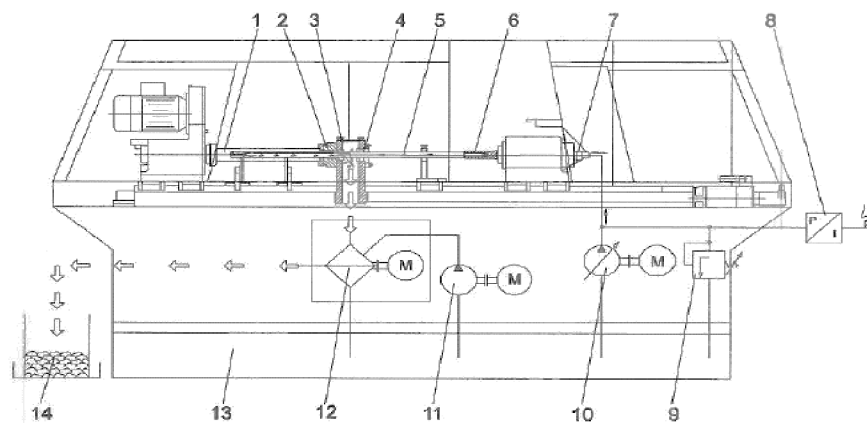
Geometrii obou dělových vrtáků zobrazující velikost jednotlivých úhlů obou nástrojů lze vidět na obr. 58<sup>1</sup>.



Obr. 58 Geometrie vrtáku CJ00 a CJ02<sup>1</sup>.

### 6.3 Aplikovaný stroj při hlubokém vrtání

Hluboké vrtání vzorků bylo prováděno na stroji pro hluboké vrtání. Upevnění obráběcího materiálu, vrtacích pouzder, vrtacích nástrojů a lunet je třeba vybrat patřičně podle obráběného předmětu. Vrtací jednotka se skládá z šesti vřeten a slouží k upevnění a pohonu nástrojů. Pohon probíhá prostřednictvím frekvenčně řízených motorů střídavého proudu řemenovým pohonem. Počet otáček vrtacího vřetene a posuvný pohon je postupně říditelný (programovatelný). Luneta slouží k podepření a vedení nástroje. Je vybavena pneumaticky ovládaným vlečným zařízením. Pro redukci průběhu vrtání, obsahuje zařízení rotující natahovací koník, který otáčí obráběnou součást proti směru vrtáku. Schéma stroje vrtačky pro jednobřité hluboké vrtání je znázorněno na obr. 59<sup>1</sup>.



Obr. 59 Schéma stroje TBT<sup>1</sup>.

1 – Obráběná součást, 2 – Upevnění vrtacího pouzdra, 3 – Nosič vrtacího pouzdra, 4 – Těsnící kryt, 5 – Vrtací nástroj, 6 – Držák nástroje, 7 – Přívod vrtacího oleje, 8 – Upevnění tlaku, 9 – Ventil tlakového omezení, 10 – Vysokotlaké čerpadlo, 11 – Ponorné čerpadlo, 12 – Filtr, 13 – Nádrž chladícího maziva, 14 – Nádrž pro třísky.

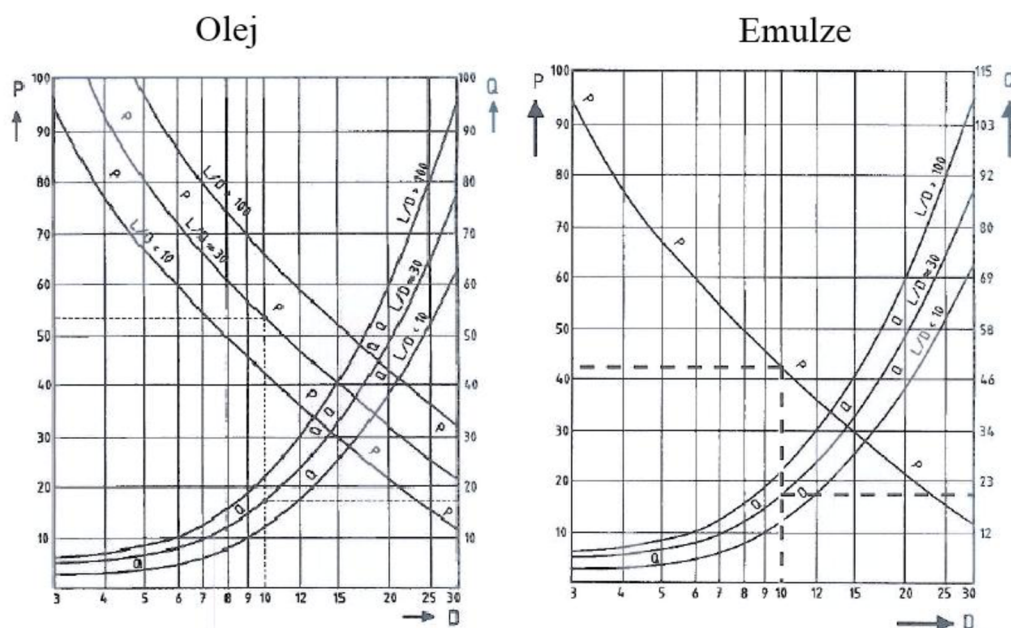
Jednobřité vrtáky jsou v navrtávací fázi vedeny prostřednictvím vrtacího pouzdra. Chladicí mazací látka je přivedena z nádrže pro chladicí prostředky prostřednictvím vysokotlakého čerpadla, přívodu vrtacího oleje, vřetene a vrtacího nástroje. Třísky a chladicí mazací látka jsou odvedeny drážkou nástroje V a vypuštěny u odvodu třísek nosiče vrtacího pouzdra. Hrubé oddělení třísek od chladicího maziva probíhá v zařízení na dopravu třísek. Jemné oddělení probíhá prostřednictvím filtračního systému. Objemový proud chladicího maziva je nastavitelný a na sobě závislý <sup>1</sup>.

Upnutí obráběného polotovaru je mezi upínací čelisti nosníku vodícího pouzdra a rotujícího natahovacího koníka. Pohyb koníka je ovládaný elektrickým motorem. Obráběný polotovar je vytlačen z čelisti nosníku koníka pružným vyhadzovačem. Nakládací a vykládací zařízení taktuje po šesti obráběných součástech nakládacího zařízení přes místo samotného obrábění dále k vykládacímu zařízení. Základní parametry vrtačky pro hluboké vrtání popisuje tab. 2 <sup>1</sup>.

Tab. 2 Základní parametry vrtačky pro hluboké vrtání <sup>1</sup>.

Počet vrtacích vřeten	6
Proces vrtání	Jednobřité vrtání
Hloubka vrtání	Max. ca. 750 mm
Rozměr TBT délka x šířka x výška	7100 x 6800 x 3300 mm
Strojová hmotnost (bez chladicího zařízení)	9000 kg
Provozní napětí	400 V
Příkon stroje	78 kW
Frekvence	50 Hz
Jmenovitý proud	140 A
Rozmezí otáček	750 – 4500 min <sup>-1</sup>

Systém chladicího maziva je rozdělen na oblasti vysokého a nízkého tlaku. Oblast vysokého tlaku zásobuje oblast samotného obrábění. Tlak je zde závislý na průměru nástroje. Oblast nízkého tlaku slouží k filtrování a chlazení chladicího maziva a je poháněna ponornými čerpadly. Chladicí mazivo má kromě funkce chlazení a mazání za funkci i přepravu třísek. Pro správný transport musí být krátké třísky, aby nedocházelo při dopravě třísek k ucpávání stroje. U malých průměrů vrtání je doprava třísek zajištěna vysokým tlakem při malém průtoku chladicí kapaliny. Pro velké průměry je tomu naopak. Tlak a množství chladicího maziva jsou dvě na sobě závislé hodnoty a jsou zjišťovány z diagramů zobrazených na obr. 60. Diagramy se liší podle použitého média na diagram pro vrtací olej nebo emulzi. Pro zhodnocení vlivu zbytkového napětí byl použit vrtací olej <sup>1</sup>.



Obr. 60 Digramy tlaku  $P$  [bar] a množství chladicího maziva  $Q$  [l/min] na průměru vrtání  $D$  [mm] ( $L$  – délka vrtání [mm])<sup>1</sup>.

#### 6.4 Interní měření na měřícím středisku

Interní měření probíhalo ve společnosti Bosch Diesel s.r.o., na měřícím středisku závodu Na Dolech. Měření obsahovalo hodnoty velikosti průměru díry a souososti děr na obou stranách axiální díry railu, činný výkon stroje, teplotu chladicího olejového maziva, hodnoty délky cyklu vrtání na jeden obráběný kus v sekundách a hodnoty drsnosti díry po hlubokém vrtání<sup>1</sup>.

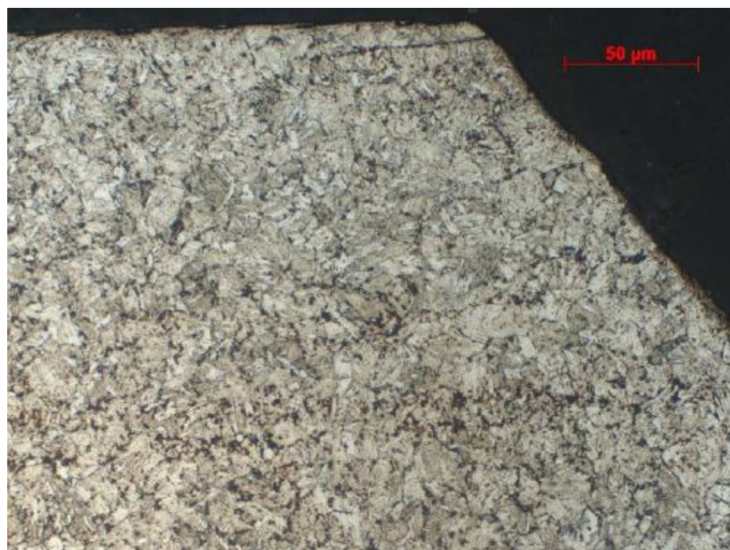
#### 6.5 Polotovar vysokotlakého zásobníku

Materiál měřeného vysokotlakového zásobníku je 20MnCrS5. Mez pevnosti v tahu  $R_m$  se udává pro tento materiál 900 až 1050 MPa. Mez kluzu  $R_e$  je 820 MPa. Tvrdost podle Brinella je 280 až 330 HBW. Složení jednotlivých chemických prvků materiálu zásobníku zobrazuje tabulka 3<sup>1</sup>.

Tab. 3 Složení chemických prvků materiálu<sup>1</sup>.

Obsah prvků v %			
Uhlík	0,18 až 0,25	Hliník	0,02 až 0,06
Křemík	Max. 0,25	Chrom	1,15 až 1,35
Mangan	1,25 až 1,45	Molybden	Max. 0,08
Fosfor	Max. 0,02	Nikl	Max. 0,3
Síra	0,008 až 0,015	Měď	Max. 0,3

Délka použité typu polotovaru je 371 mm. Na jednom konci railu je sražení  $2 \times 45^\circ$ . Tato strana je označována jako návrt a z této strany vniká nástroj do polotovaru. Druhý konec railu má sražení  $0,3 \times 45^\circ$  a je nazýván jako vývrt. Struktura materiálu obsahuje jemný temperovaný martenzit a bainit. Výskyt bainitu se metalurgickým šetřením prokazuje těžko, protože struktura martenzitu a bainitu je velmi podobná. Pro zjištění bainitu by se musela provést elektronová mikroskopie. Metalurgické šetření struktury materiálu je znázorněno na obr. 61 <sup>1</sup>.



Obr. 61 Struktura vysokotlakého zásobníku rail <sup>1</sup>.

## 6.6 Výsledky měření zbytkových makroskopických napětí a ostatních měření

K analýze integrity povrchu bylo použito 5 vzorků, které byly obrobena za různých řezných podmínek. Různých řezných podmínek u hlubokého vrtání bylo dosaženo změnou rychlosti posuvu nástroje, změnou tlaku procesní kapaliny a výměnou dělových vrtáků. Podmínky, za kterých byly jednotlivé kusy vyrobeny, popisuje tabulka 4 <sup>1</sup>.

Tab. 4 Podmínky měřených vzorků.

Číslo vzorku	Použitý nástroj	Posuv nástroje [mm·min <sup>-1</sup> ]	Tlak chladicího maziva (olej) [bar]
1 až 5	Standardní nástroj CJ00	100	70
6 až 10	Standardní nástroj CJ00	100	90
11 až 15	Standardní nástroj CJ00	120	70
16 až 20	Standardní nástroj CJ00	120	90
21 až 25	Nástroj CJ02	100	70
26 až 30	Nástroj CJ02	100	90
31 až 35	Nástroj CJ02	120	70
36 až 40	Nástroj CJ02	120	90







Výsledky měření zbytkového napětí a ostatních měření pro vzorky s použitým nástrojem CJ02, za standardního posuvu nástroje ( $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) a za standardního tlaku chladicího olejového maziva (70 bar) zobrazuje tabulka 9<sup>1</sup>.

Tab. 9 Výsledky měření vzorků 21. až 25.

Číslo vzorku	21	22	23	24	25	Průměr (21-25)
$\sigma_T$ [MPa]	-872	-876	-916	-936	-906	-901
$\Delta\sigma_T$ [MPa]	8	9	10	8	7	1
Průměr vývrt [mm]	10,09966	10,09943	10,0995	10,09947	10,09881	10,099373
Průměr návrt [mm]	10,10209	10,10262	10,10169	10,10042	10,10155	10,101673
Drsnost Rzmax 10	3,74	1,94	2,97	2,92	2,91	2,896
Souosost vývrt [mm]	0,191086	0,102445	0,130472	0,237968	0,176721	0,167739
Souosost návrt [mm]	0,036066	0,047993	0,086674	0,014603	0,043337	0,045735
Činný výkon [%]	14	14	14	14	14	14
Cyklus na kus [s]	42	42	42	42	42	42
Teplota [°C]	30	30	30	30	30	30

Výsledky měření zbytkového napětí a ostatních měření pro vzorky s použitým nástrojem CJ02, za standardního posuvu nástroje ( $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) a za zvýšeného tlaku chladicího olejového maziva (90 bar) zobrazuje tabulka 10<sup>1</sup>.

Tab. 10 Výsledky měření vzorků 26. až 30.

Číslo vzorku	26	27	28	29	30	Průměr (26-30)
$\sigma_T$ [MPa]	-886	-787	-814	-715	-833	-807
$\Delta\sigma_T$ [MPa]	7	9	11	10	7	2
Průměr vývrt [mm]	10,09893	10,09822	10,09724	10,09772	10,09873	10,098166
Průměr návrt [mm]	10,09864	10,09732	10,09863	10,09812	10,09875	10,098293
Drsnost Rzmax 10	3,08	3,09	3,59	2,97	3,97	3,34
Souosost vývrt [mm]	0,12353	0,101235	0,192626	0,177772	0,094815	0,137996
Souosost návrt [mm]	0,096021	0,06922	0,072751	0,030335	0,055364	0,064738
Činný výkon [%]	14	14	14	14	14	14
Cyklus na kus [s]	42	42	42	42	42	42
Teplota [°C]	30	30	30	30	30	30

Výsledky měření zbytkového napětí a ostatních měření pro vzorky s použitým nástrojem CJ02, se zvýšeným posuvem nástroje ( $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) a za standardního tlaku chladicího olejového maziva (70 bar) zobrazuje tabulka 11<sup>1</sup>.

Tab. 11 Výsledky měření vzorků 31. až 35.

Číslo vzorku	31	32	33	34	35	Průměr (31-35)
$\sigma_T$ [MPa]	-715	-678	-866	-652	-885	-759
$\Delta\sigma_T$ [MPa]	10	20	9	17	11	4
Průměr vývrt [mm]	10,10161	10,10083	10,10048	10,10031	10,10023	10,100691
Průměr návrt [mm]	10,09826	10,09839	10,09899	10,09787	10,09954	10,098611
Drsnost Rzmax 10	2,58	2,6	2	1,91	1,79	2,176
Souosost vývrt [mm]	0,116397	0,184394	0,109431	0,146521	0,285729	0,168494
Souosost návrt [mm]	0,032	0,060168	0,073472	0,04136	0,010015	0,043403
Činný výkon [%]	16	16	16	16	16	16
Cyklus na kus [s]	36	36	36	36	36	36
Teplota [°C]	33	33	33	33	33	33

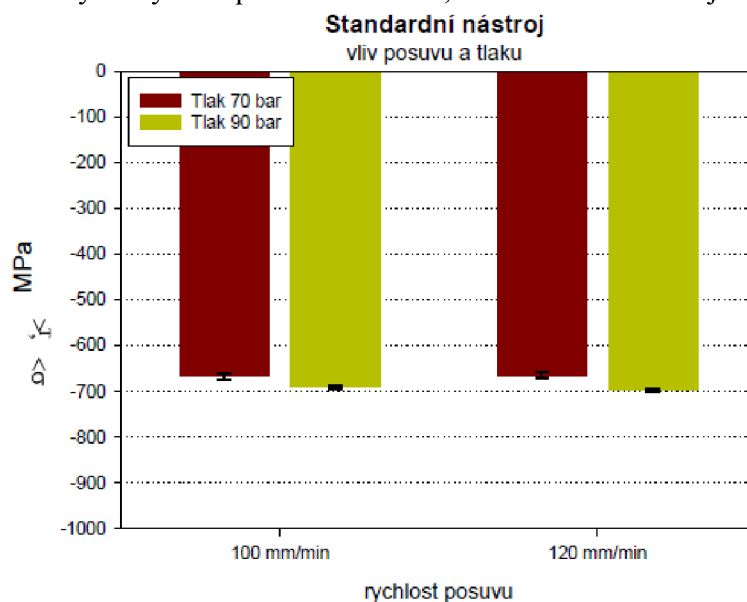
Výsledky měření zbytkového napětí a ostatních měření pro vzorky s použitým nástrojem CJ02, se zvýšeným posuvem nástroje ( $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) a za zvýšeného tlaku chladicího olejového maziva (90 bar) zobrazuje tabulka 12<sup>1</sup>.

Tab. 12 Výsledky měření vzorků 36. až 40.

Číslo vzorku	36	37	38	39	40	Průměr (36-40)
$\sigma_T$ [MPa]	-829	-740	-698	-724	-796	-757
$\Delta\sigma_T$ [MPa]	10	22	9	32	20	8
Průměr vývrt [mm]	10,10121	10,09909	10,09979	10,10048	10,10006	10,10013
Průměr návrt [mm]	10,09918	10,0988	10,09761	10,09767	10,09638	10,09793
Drsnost Rzmax 10	1,9	1,79	2,14	2,87	1,76	2,092
Souosost vývrt [mm]	0,048956	0,176982	0,047172	0,134088	0,084204	0,098281
Souosost návrt [mm]	0,078523	0,102147	0,080213	0,046951	0,083278	0,078222
Činný výkon [%]	16	16	16	16	16	16
Cyklus na kus [s]	36	36	36	36	36	36
Teplota [°C]	33	33	33	33	33	33

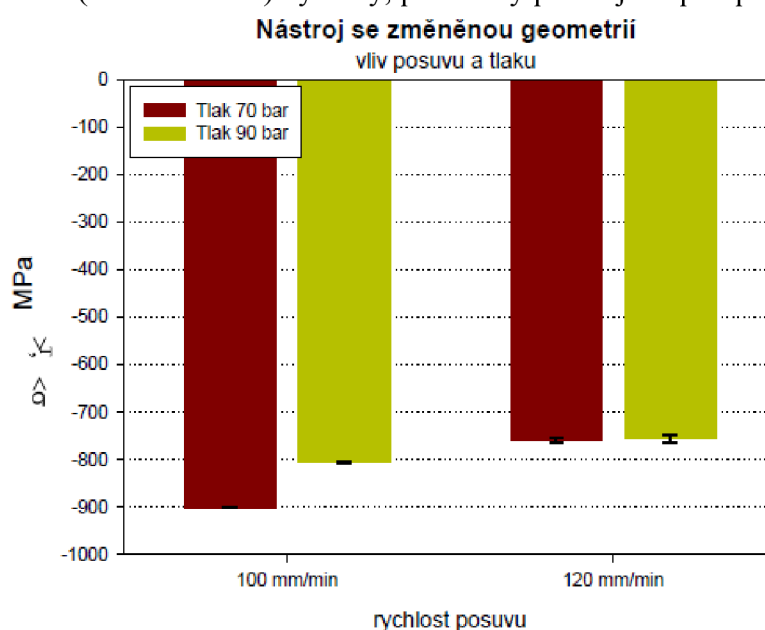
### 6.7 Zhodnocení výsledků měření zbytkových makroskopických napětí

Vliv posuvu nástroje a tlaku chladicího maziva u zbytkových makroskopických napětí pro standardní nástroj CJ00 znázorňuje graf na obr. 62. Graf je sestaven z průměrných hodnot vždy pěti naměřených napětí. Z grafu lze vidět, že vliv změny posuvu nástroje na zbytkové napětí u obou hodnot tlaků maziva je pro standardní nástroj minimální. U vlivu změny tlaků je rozdíl hodnot zbytkových napětí o něco větší, ale také ho lze brát jako minimální.



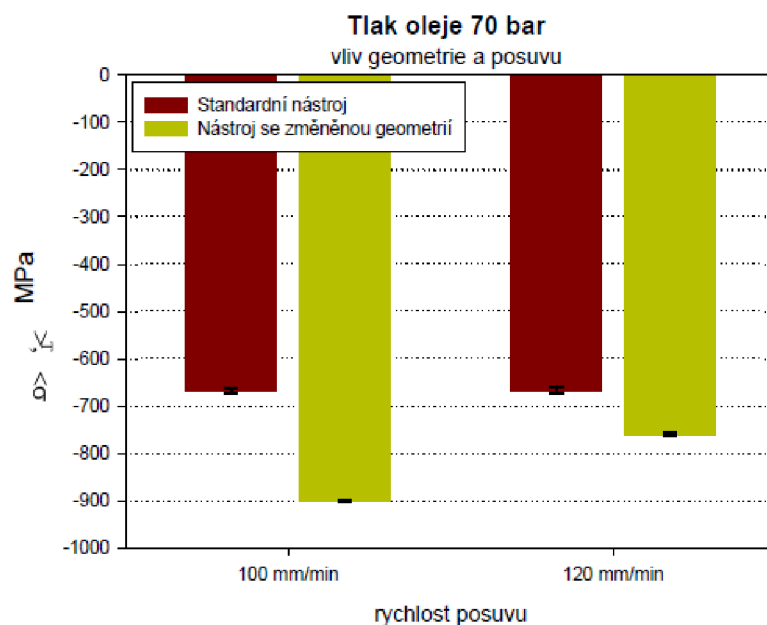
Obr. 62 Vliv posuvu a tlaku na zbytkové napětí pro standardní nástroj.

Vliv posuvu nástroje a tlaku chladicího maziva u zbytkových makroskopických napětí pro nástroj CJ02 znázorňuje graf na obr. 63. Graf je sestaven z průměrných hodnot. U nástroje CJ02 lze vidět, že vliv změny posuvu nástroje, zejména u tlaku 90 bar chladicí kapaliny, je výrazně větší než u standardního nástroje. Vliv změny tlaku chladicí kapaliny je zejména u nižšího posuvu ( $100\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) výrazný, pro druhý posuv je napětí přibližně stejné.



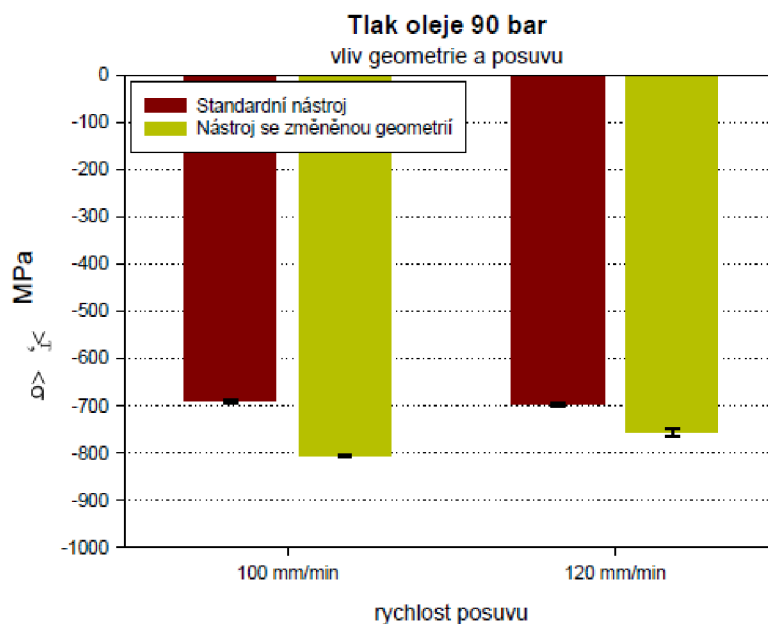
Obr. 63 Vliv posuvu a tlaku na zbytkové napětí pro nástroj CJ02.

Vliv změny geometrie nástroje a rychlosti posuvu nástroje pro tlak chladicí olejové kapaliny 70 bar je zobrazen grafem na obr. 64. Z grafu lze vyzpozorovat, že největší rozdíl zbytkových napětí vzniká změnou geometrie nástroje. Největšího rozdílu bylo dosaženo u nižšího posuvu  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Vliv změny rychlosti posuvu nástroje je znatelný především u nástroje CJ02. U standardního nástroje je rozdíl zbytkového makroskopického napětí přibližně nulový.



Obr. 64 Vliv posuvu a geometrie na zbytkové napětí pro tlak chladicí kapaliny 70 bar.

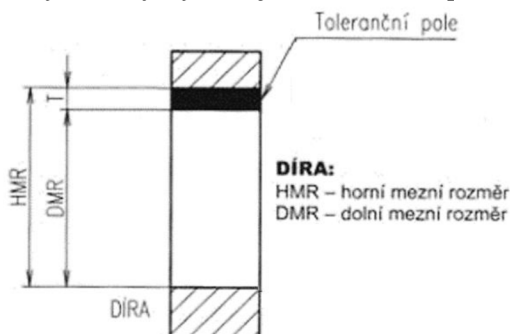
Vliv změny geometrie nástroje a rychlosti posuvu nástroje pro tlak chladicí olejové kapaliny 90 bar je zobrazen grafem na obr. 65. Pro tento tlak lze z grafu vyčíst, že u standardního nástroje opět nedojde k téměř žádné změně zbytkového napětí a u nástroje CJ02 je změna poněkud větší. Vliv posuvu nástroje je pro tento tlak menší u standardního nástroje než u nástroje CJ02, ale i u tohoto nástroje nedochází k příliš velké změně zbytkového napětí.



Obr. 65 Vliv posuvu a tlaku na zbytkové napětí pro nástroj CJ02.

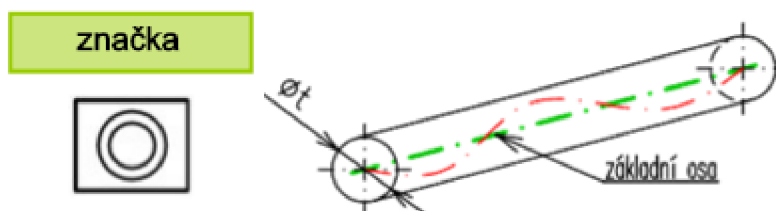
## 6.8 Zhodnocení výsledků interního měření

Hodnoty velikosti průměrů návrtu a vývrtu obráběného railu jsou přibližně stejné a všechny vyhovují dané toleranci díry H13. Tolerance H13 má pro obráběný průměr 10 mm dolní mezní rozměr 10,00 mm a horní mezní rozměr 10,22 mm. Naměřené výsledky průměrů se pohybují přibližně okolo 10,1 mm, což je téměř uprostřed tolerančního pole. Z toho vyplývá, že měření pro všechny vzorky vyhovuje. Toleranční pole díry je na obr. 66<sup>1,52</sup>.



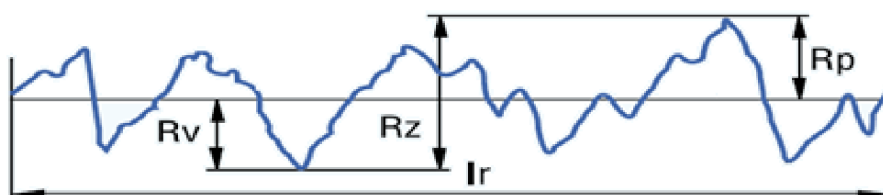
Obr. 66 Toleranční pole díry<sup>52</sup>.

Souosost je vyhovující, když skutečná osa tolerovaného prvku leží uvnitř válce, jehož vnější průměr je hodnota tolerance. To je znázorněno na obr. 67. Naměřené hodnoty souososti jsou poněkud vyšší u vývrtu vysokotlakého zásobníku než u návrtu za všech podmínek měření. Nejvyšší hodnota vznikla na vývrtu s použitým standardním nástrojem CJ00, se zvýšeným posuvem nástroje a za zvýšeného tlaku chladicího olejového maziva u vzorku č. 18. Její velikost je 0,305645 mm. Nejvyšší dovolená hodnota souososti je 0,9mm. Z toho lze odvodit, že i souosost vyhovuje za všech použitých podmínek<sup>1,53</sup>.



Obr. 67 Toleranční pole souososti<sup>53</sup>.

Drsnost povrchu je nerovnost, která vzniká při výrobě součásti. Je důležitým faktorem především pro dynamicky namáhané součásti. Čím je dosažena větší drsnost povrchu, tím je horší i únavová pevnost součásti a její odolnost proti otěru. Stupeň a druh drsnosti závisí na mnoha parametrech. Mezi hlavní parametry lze řadit způsob zvoleného obrábění, tvar a geometrie nástroje, fyzikální a mechanické vlastnosti obráběné plochy i nástroje a řezné podmínky, především řezná rychlost a velikost posuvu. Při měření byla vyhodnocována drsnost  $R_{zmax}$ . Drsnost  $R_z$  je největší výška profilu a je součtem výšky výstupku profilu  $R_p$  a hloubky prohlubně profilu  $R_v$ . Drsnost  $R_z$  společně s velikostí výstupku  $R_p$  a velikostí prohlubně  $R_v$  je zobrazena na obr. 68<sup>54,55,56,57</sup>.



Obr. 68 Toleranční pole souososti<sup>57</sup>.

Drsnost  $Rz_{max}$  10 je měřena na délce 6 mm a je to naměřená maximální hodnota  $Rz$  z pěti měření základní délky  $l_r$ . Nejlepší hodnoty drsností  $Rz_{max}$  byly naměřeny za podmínek s použitým nástrojem CJ02, se zvýšeným posuvem nástroje a za zvýšeného tlaku chladicího olejového maziva a aritmetický průměr hodnot byl 2,092. Druhé nejlepší drsnosti  $Rz_{max}$  byly naměřeny s použitým nástrojem CJ02, se zvýšeným posuvem nástroje a za standardního tlaku chladicího olejového maziva, kde byl aritmetický průměr drsností 2,17. Z výsledků drsností lze vyhodnotit, že lepší drsnost povrchu vznikla s použitým nástrojem CJ02 a se zvýšeným posuvem. Největší aritmetický průměr drsností vznikl za podmínek s použitým standardním nástrojem CJ00, se zvýšeným posuvem nástroje a za standardního tlaku chladicího olejového maziva. Hodnota aritmetického průměru  $Rz_{max}$  byla 5,244. Největší naměřená hodnota drsností  $Rz_{max}$  byla s použitým standardním nástrojem CJ00, za standardního posuvu nástroje a za zvýšeného tlaku chladicího olejového maziva. Hodnota byla zaznamenána u vzorku č. 10 a její velikost byla 7,42. Maximální možná hodnota drsnosti  $Rz_{max}$  je 10 a z toho vyplývá, že i pro tento parametr jsou všechny výsledky měření vyhovující <sup>1</sup>.

Délka cyklu na kus se udává v sekundách a udává, za jak dlouho je polotovar obroběn. Pro hluboké vrtání je celková délka cyklu dělena na čas návrtu, čas vrtání a čas vývrtu. Pro zvolený typ polotovaru o délce 371 mm je délka návrtu i vývrtu 10 mm. Délka vrtání je zbylých 351 mm. Posuv u návrtu i vývrtu je taktéž totožný a jeho hodnota je  $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . To znamená, že délka cyklu se liší pouze v samotném času vrtání podle zvoleného posuvu. V našem případě to jsou posuvy  $100$  a  $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Čas návrtu, vrtání a vývrtu se stanovují podle vztahu (18), délku cyklu definuje vztah (19) a čas na kus popisuje vztah (20). Po dosažení vychází přibližně stejná délka cyklu na kus. Tzn. pro posuv  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je cyklus na kus 42 s a pro posuv  $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je cyklus na kus 36 s <sup>1</sup>.

$$t_{n, vr, v\acute{y}} = \frac{l_{n, vr, v\acute{y}}}{f_{n, vr, v\acute{y}}} \quad (18)$$

kde:  $t_{n, vr, v\acute{y}}$  [s] - čas návrtu, vrtání a vývrtu,  
 $l_{n, vr, v\acute{y}}$  [m] - délka návrtu, vrtání a vývrtu,  
 $f_{n, vr, v\acute{y}}$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] - posuv návrtu, vrtání a vývrtu.

$$t_{cyk} = t_n + t_{vr} + t_{v\acute{y}} + t_{v\acute{y}m} \quad (19)$$

kde:  $t_{cyk}$  [s] - doba cyklu,  
 $t_{v\acute{y}m}$  [s] - doba výměny obrobku.

$$t_{kus} = \frac{t_{cyk}}{n_{v\acute{r}}} \quad (20)$$

kde:  $t_{kus}$  [s] - doba cyklu na kus,  
 $n_{v\acute{r}}$  [-] - počet vřeten ( $n_{v\acute{r}} = 6$  pro šestivřetenový stroj TBT).

Naměřený činný výkon je zaznamenán především pro určení zatížení stroje při jednotlivých operacích a je udáván v procentech. Největší činný výkon vznikl za podmínek s použitým standardním nástrojem při zvýšeném posuvu nástroje. Nejmenšího zatížení stroje bylo naopak dosaženo se standardním posuvem nástroje a pro oba nástroje bylo přibližně stejné. Tlak chladicí kapaliny neměl viditelný vliv na činný výkon stroje TBT <sup>1</sup>.

Teplota chladicího olejového maziva je kontrolována teplotním čidlem. Teplota chladicí kapaliny odpovídá přímou úměrou přibližně zatížení stroje. Nejmenší naměřená teplota byla naměřena 30° C a největší teplota 34,5° C. Ideální vlastnosti chladicí kapaliny jsou udávány v rozmezí teplot 30 až 40° C, proto lze naměřené hodnoty teploty chladicí kapaliny shledat za vyhovující<sup>1,36</sup>.

Měření hodnot probíhalo za konstantních otáček o velikosti 1800 min<sup>-1</sup> s průměrem nástroje D = 10,1 mm. Za použití vztahů (2), (3) a (4) lze určit řeznou rychlost, posuvovou rychlost pro oba posuvy a rychlost řezného pohybu obou posuvů<sup>1</sup>.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 10,1 \cdot 1800}{1000} = 57,114 \text{ m/min} \quad (2)$$

$$V_{f100} = f \cdot n = 0,100 \cdot 1800 = 180 \text{ m/min} \quad (3)$$

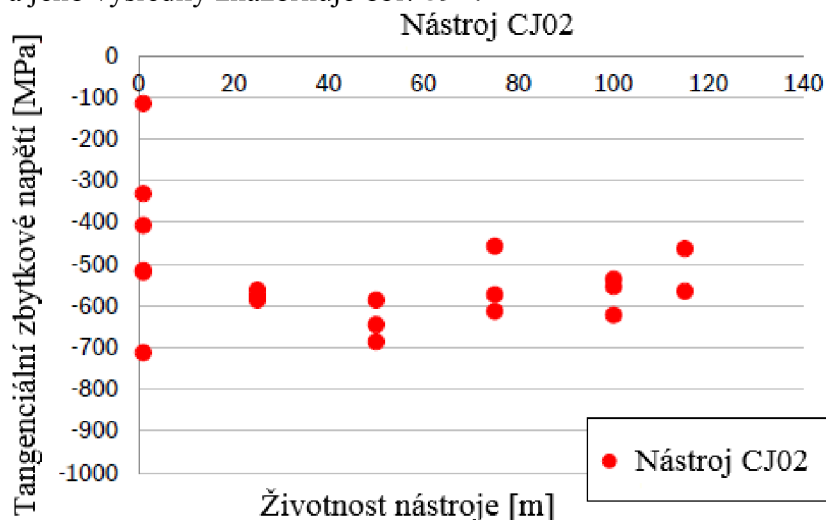
$$V_{f120} = f \cdot n = 0,120 \cdot 1800 = 216 \text{ m/min} \quad (3)$$

$$v_{e100} = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \sqrt{57,085^2 + 180^2} = 188,835 \text{ m/min} \quad (4)$$

$$v_{e120} = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \sqrt{57,085^2 + 216^2} = 223,416 \text{ m/min} \quad (4)$$

## 6.9 Zbytková napětí a podpovrchové vady u nástroje CJ02

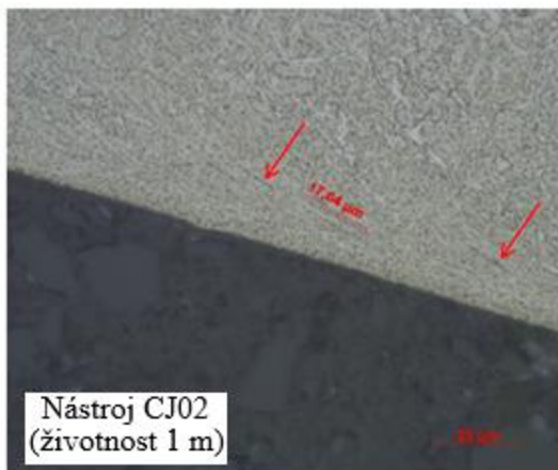
Měření tangenciálních zbytkových napětí u nástroje CJ02. Měření probíhalo za standardních podmínek, se zvýšeným posuvem na 160 mm·min<sup>-1</sup> a s otáčkami nástroje 2550 min<sup>-1</sup>. Zbytková napětí byla měřena do požadované životnosti nástroje 115 m. Měření zbytkového tangenciálního napětí v závislosti na životnosti nástroje bylo provedeno u pěti nástrojů CJ02 a jeho výsledky znázorňuje obr. 69<sup>1</sup>.



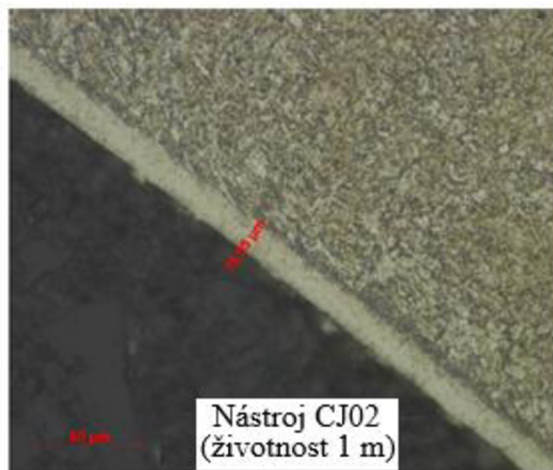
Obr. 69 Závislosti zbytkového napětí na životnosti nástrojů CJ02<sup>1</sup>.

Z naměřených výsledků je vidět vysoký rozptyl zbytkových napětí na začátku životnosti nástroje. Tangenciální pnutí na začátku životnosti nástroje dosahuje v některých případech malých hodnot tlakového zbytkového napětí, což by mohlo mít negativní vliv na únavovou pevnost obráběného vysokotlakého zásobníku. Velký rozptyl zbytkových napětí je zaznamenán především na začátku životnosti nástroje. Se zvyšující se životností nástroje je rozptyl zbytkových napětí maximálně okolo hodnot 160 MPa<sup>1</sup>.

Podpovrchové vady byly zjišťovány na nástroji CJ02 metalurgickým šetřením na začátku životnosti nástroje pro 1 m a na konci životnosti nástroje pro 115 m. Na začátku životnosti nástroje CJ02 lze z obr. 70 zpozorovat relativně hluboké zóny plastické deformace materiálu a na obr. 71 žádné neobvyklé povrchové nedokonalosti materiálu<sup>1</sup>.

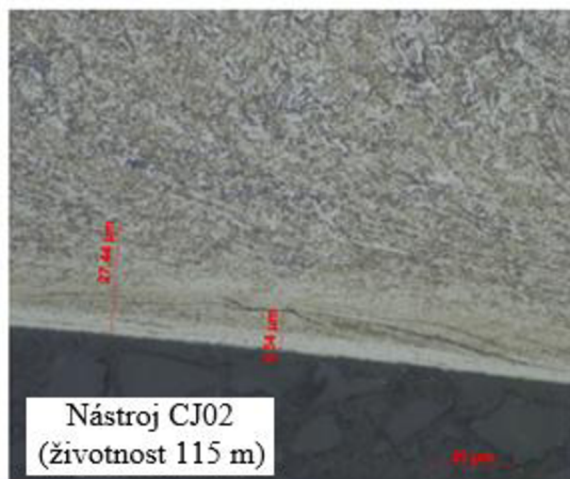


Obr. 70 Plastická deformace (1 m)<sup>1</sup>.

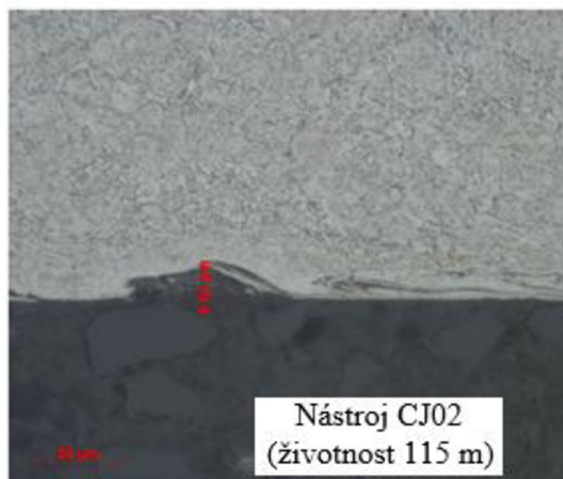


Obr. 71 Povrchové nedokonalosti (1 m)<sup>1</sup>.

Konec životnosti nástroje je metalurgicky znázorněn na obr. 72 pro plastickou deformaci a na obr. 73 pro povrchové nedokonalosti. Zde jsou vidět rovněž relativně vysoké plastické deformace materiálu a jsou zde navíc viditelné i relativně vysoké povrchové vady materiálu nástroje<sup>1</sup>.



Obr. 72 Plastická deformace (115 m)<sup>1</sup>.



Obr. 73 Povrchové nedokonalosti (115 m)<sup>1</sup>.



## 7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V současnosti představuje rentgenografická technika měření zbytkových napětí jednu z nejvýznamnějších metod analýz pro zbytkové stavy makroskopické napjatosti. Její uplatnění je v oblasti základního materiálového výzkumu a dále při řešení širšího spektra konkrétních technologických problémů pro různá průmyslová odvětví. Hlavní význam pro rentgenografickou techniku měření zbytkového napětí a pro její další rozvoj má především informovanost o možnostech této experimentální techniky, která se kromě výčtu předností zaobírá i kvalifikovaným posouzením hranic použitelnosti.

Výsledky získané difrakčními metodami byly v minulosti přijímány v průmyslu s nedůvěrou. Ze zemí s vyspělým průmyslem jsou podle zkušeností vědomosti o zbytkových napětích efektivně využívány především tam, kde se podařilo odstranit nedůvěru mezi pracovníky výzkumu a výroby a kde je obousměrný tok informací mezi těmito oblastmi.

Pozitivních příkladů užití rentgenové tenzometrie na provozní spolehlivost strojních dílů je mnoho. Lze uvést např. zjištění trhlin při únavových zkouškách svařovaných částí zadní nápravy automobilů, kde byla zjištěna zbytková tahová napětí ve směru kolmém ke svařovanému švu. Možným řešením je vytvoření tlakové předpjaté ochranné vrstvy kování nebo kuličkováním. Počet podobných případů užití rentgenové tenzometrie ve strojírenství přibývá. Hlavním cílem je vyhnout se tahovým napětím, aby nevznikaly v materiálu trhliny, které by se dále šířily. Ve všech případech měření bylo naměřeno tlakové zbytkové napětí, což je hlavním cílem.

V diplomové práci byla difrakční měření makroskopických zbytkových napětí prováděna externě. Mimo difrakčních měření byly měřeny hodnoty průměru, soustřednosti a drsnosti axiální díry po hlubokém vrtání. Dále proběhlo metalurgické šetření nástroje CJ02 a pro difrakční měření zbytkových napětí bylo třeba rozřezat kusy na měřené segmenty. Cenu jednotlivých operací udává tabulka 13<sup>1</sup>.

Tab. 13 Cena jednotlivých operací.

Externí měření zbytkového napětí	1 500Kč na jedno měření
Interní měření průměru, souososti a drsnosti	15 Kč na kus
Interní metalurgické šetření podpovrchových vad	2 500Kč na jedno měření
Test řezných podmínek - rozřezání kusu	120 Kč na kus

Celkovou cenu měření s ostatními operacemi z tab. 7.1 udává vzorec (21).

$$Cena_{celk} = Q_{zb} + Q_{psd} + Q_{pod} + Q_{řep} \text{ [Kč]} \quad (21)$$

$$Cena_{celk} = (45 * 1500 + 40 * 15 + 5 * 2500 + 45 * 120) \text{ Kč} = 86\,000 \text{ Kč}$$

kde:  $Q_{zb}$  [Kč] - náklady na měření zbytkových napětí (40 segmentů + 5 nástrojů CJ02),

$Q_{psd}$  [Kč] - náklady na měření průměru, souososti a drsnosti (40 segmentů),

$Q_{pod}$  [Kč] - náklady na metalurgické šetření podpovrchových vad (5 nástrojů CJ02),

$Q_{řep}$  [Kč] - náklady na rozřezání kusu (40 segmentů + 5 nástrojů CJ02).

## 8 ZÁVĚR

Základním předpokladem pro správnou interpretaci závěrů u zbytkových napětí je pochopení podmínek, za nichž byly stanoveny buď deformace, nebo ty veličiny, které lze napětím ovlivnit. Na základě výsledků difrakční tenzometrické analýzy vnitřních povrchů dodaných segmentů axiálních otvorů lze vyvodit následující závěry. Ve všech analyzovaných případech byla zjištěna ve vyšetřovaném tangenciálním směru významná tlaková napětí. Mezi hodnotami tlakových zbytkových napětí získaných rentgenografickou tenzometrickou analýzou povrchů vzorků obrobených stejnými parametry není pozorovatelný rozptyl, který by významně překračoval chybu stanovení zbytkových napětí.

S použitým standardním nástrojem CJ00 v případě porovnání vlivu tlaku chladicí kapaliny u standardních podmínek lze vyvozovat, že zvýšení tlaku chlazení vede k jistému zvýšení, ale toto zvýšení v rámci experimentální chyby nemá výrazný vliv. Vliv zvýšení tlaku chlazení u vyšších posuvů vede opět k jistému zvýšení, avšak ani v tomto případě, nemá zvýšení posuvu významný vliv. Vliv zvýšení posuvu nástroje u obou použitých tlaků chlazení, nemá téměř žádný vliv na stav zbytkové napjatosti.

U nástroje CJ02 v případě porovnání vlivu tlaku chlazení lze vyvodit, že u posuvu  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dochází k výraznému poklesu tlakových zbytkových napětí, který činí přibližně  $100 \text{ MPa}$ . U posuvu  $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  nebyl pozorovaný žádný defekt. Vliv zvýšení posuvu u druhého nástroje vede ke snížení tlakových makroskopických zbytkových napětí, kdy u nižšího tlaku chladicí kapaliny činí hodnota poklesu přibližně  $140 \text{ MPa}$  a u tlaku  $90 \text{ barů}$  je rozdíl hodnot  $50 \text{ MPa}$ .

Pro porovnání nástrojů lze konstatovat, že u standardního nástroje odlišné řezné podmínky nevedou ke změně zbytkových napětí. V případě nástroje CJ02 však obráběcí podmínky ovlivňují výsledná zbytková napětí. Geometrie nástroje, při porovnání tlaku a posuvu, vede ve všech případech k jednoznačně odlišnému stavu zbytkových napětí, kdy povrchy obrobené nástrojem CJ02 vykazují vyšší tlaková makroskopická zbytková napětí a to v intervalu od  $93$  do  $203 \text{ MPa}$ .

Při vysokých hodnotách zbytkových napětí může docházet k nežádoucím deformacím vlivem jejich uvolňování a degradací mechanických vlastností jak tahových napětí, tak v našem případě i u tlakových napětí. Z tohoto důvodu je lepší volit standardní nástroj CJ00, kde byly hodnoty zbytkových napětí menší než u druhého nástroje. Dalším výrazným důvodem je, že u standardního nástroje odlišné řezné podmínky nevedou k tak velké změně zbytkových napětí jako u nástroje CJ02. Nejmenší aritmetický průměr naměřených zbytkových napětí byl s použitým standardním nástrojem, se zvýšeným posuvem nástroje a za standardního tlaku chladicího olejového maziva a lze tak tyto řezné podmínky shledat jako nejlépe vyhovující i z důvodu zvýšeného posuvu nástroje, což vede ke zkrácení délky cyklu na kus.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Bosch Diesel Jihlava spol. s.r.o. *Firemní a školící materiály*.
2. *Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>
3. *Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271\\_p.pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271_p.pdf)
4. *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: [http://opi.zcu.cz/download/Integrita\\_prednaskaTZ.pdf](http://opi.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf)
5. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>
6. *Poznání nehmotného světa zbytkových napětí* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: [http://www.opi.zcu.cz/download/1\\_Ganev.pptx](http://www.opi.zcu.cz/download/1_Ganev.pptx)
7. *Bosch Česká republika: Historie společnosti* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: [http://www.bosch.cz/cs/cz/our\\_company\\_7/history\\_7/history.html](http://www.bosch.cz/cs/cz/our_company_7/history_7/history.html)
8. *Bosch Česká republika: BOSCH DIESEL s.r.o. - Jihlava* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: [http://www.bosch.cz/cs/cz/our\\_company\\_7/locations\\_7/jihlava\\_menu/jihlava\\_menu\\_historie/jihlava\\_historie.html](http://www.bosch.cz/cs/cz/our_company_7/locations_7/jihlava_menu/jihlava_menu_historie/jihlava_historie.html)
9. *Moderní systémy vstřikování paliva vhodné pro vznětové motory*. [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/13340410-Moderni-systemy-vstrikovani-paliva-vhodne-pro-vznetove-motory.html>
10. *Common-rail* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/common-rail/>
11. *Palivové soustavy vznětového motoru* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/SIV/Motory%20-%20vst%C5%99ik.syst%C3%A9my%20vzn%C4%9Bt.motor%C5%AF-UT.pdf>
12. *Autopříslušenství prvovýbava* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: [http://press.bosch.cz/detail.asp?f\\_id=269](http://press.bosch.cz/detail.asp?f_id=269)
13. *Common rail* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.fastolblue.com/pagine/commonrail.htm>
14. *Tlakový zásobník - rail, regulátor tlaku, snímač tlaku a teploty klukového a vačkového hriadeľa* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/tlakovy-zasobnik-rail-regulator-tlaku-snimac-tlaku-a-teploty-klukoveho-a-vackoveho-hriadela>
15. *Palivová soustava vznětového motoru EDC se systémem Common Rail* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [http://www.sossoukyjov.cz/data/file/SIV/VY\\_32../VY\\_32\\_INOVACE\\_4c19.ppt](http://www.sossoukyjov.cz/data/file/SIV/VY_32../VY_32_INOVACE_4c19.ppt)
16. *Hluboko a ještě hlouběji* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hluboko-a-jeste-hloubeji.html>
17. *Deep Hole Drilling* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=403>

18. *TBT ML 300* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [http://prom.globatek.ru/mech\\_processing/tbt\\_ml\\_300/](http://prom.globatek.ru/mech_processing/tbt_ml_300/).
19. SEDLÁČEK, T. Konstrukční úprava upínání tlakových zásobníků vstřikovacího systému Common Rail při výrobě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.
20. *Technical Data FM 3+X* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.elha.de/en/production-modules/technical-data/fm-3x/>
21. *Huller Hille* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.star-su.com/technology-partners/ffg-werke/huller-hille>
22. *Stroje pro odmašťování, čištění postřikem a ultrazvukem* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://nabidky.edb.cz/Nabidka-35378-Stroje-pro-odmastovani-cisteni-postrikem-a-ultrazvukem>
23. *Autofrettage* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.aquarese.fr/procedes/autofrettage/?lang=en>
24. BLAHA, J. Výpočtová analýza zbytkových napětí u autofretovaných vysokotlakých zásobníků paliva. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 72 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c
25. *Technologie I*. [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD12\\_prezetace.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD12_prezetace.pdf)
26. *Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
27. KOCMAN, K., PROKOP, J., *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0
28. HUMÁR, A. *Technologie I. Technologie obrábění – 2.část. Studijní opory pro magisterskou formu studia*. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf)
29. HUMÁR, A. *Technologie I. Základní metody obrábění – 1.část. Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia*. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl\\_met\\_obr/zakl\\_met\\_obr\\_1.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1.pdf)
30. HUMÁR, A., *Výrobní technologie II* [sylaby předmětu]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 83 s. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobniTecnologie\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobniTecnologie_II.pdf)
31. PROKOP, J., KOCMAN, K., *Technologie výroby II – Řešené příklady*, 2002. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 63 s. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf)
32. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.
33. *VRTÁNÍ ZPLNA: EJEKTOROVÝ SYSTÉM* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: [http://www.winter-servis.cz/index.php?page=botek/zplna\\_ejektor](http://www.winter-servis.cz/index.php?page=botek/zplna_ejektor)
34. *PŘEVRTÁVÁNÍ: DĚLOVÉ VRTÁKY* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: [http://www.winter-servis.cz/index.php?page=botek/zplna\\_delove](http://www.winter-servis.cz/index.php?page=botek/zplna_delove)

35. *Korunkový vrták* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://shop.alfavaria.cz/produkty/vrtani/korunkove-vrtaky/korunkovy-vrtak-26mm-x-30mm-hss-tin-wodex-3417cz>
36. *Vrtání hlubokých děr* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/C-1202-1.pdf>
37. *Vrták stupňovitý* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <https://www.eva.cz/zbozi/44303/vrtak-stupnovity-extol-4-32-mm-20055/>
38. *Řezání závitů na vrtačce, vrtání složenými a sloučenými nástroji* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1215>
39. *Hluboko a ještě hlouběji* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hluboko-a-jeste-hloubeji.html>
40. *Vrtání hlubokých otvorů na obráběcích centrech* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vrtani-hlubokych-otvoru-na-obrabecich-centrech.html>
41. *Dělové vrtáky: Vysoce produktivní dělové vrtáky* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/gundrills>
42. BUMBÁLEK, Bohumil. *INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)
43. GANEV, Nikolaj a Ivo KRAUS. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>
44. HALAMA, Radim, František FOJTÍK, Martin FUSEK, Jaroslav ROJÍČEK a Ludmila ADÁMKOVÁ. *Vlastnosti a zkoušení materiálu: Poruchy krystalické mřížky* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2002.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2002.pdf)
45. *ZBYTKOVÁ POVRCHOVÁ NAPĚTÍ PO OBRÁBĚNÍ* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_12.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf)
46. VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN a Otakar WEINBERG. *APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271\\_p.pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271_p.pdf)
47. *Nauka o materiálu* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Slide8\\_ZbytkovaNapeti\\_NDT.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Slide8_ZbytkovaNapeti_NDT.pdf)
48. KRAUS, I., GANEV, N.: *Difrakční analýza mechanických napětí*. Skriptum ČVUT, Vydavatelství ČVUT. Praha 1995.
49. KOLAŘÍK, Kamil, Nikolaj GANEV a Zdeněk PALA. *Rtg difrakční diagnostika povrchových vrstev obroběných strojních součástí* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/16429/Kolarik.pdf?sequence=1>
50. *IXRD Combo* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.protoxrd.com/pdf/ixrdcombo.pdf>

51. *Introduction to Crystallography* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.materials.ac.uk/elearning/matter/crystallography/indexingdirectionsandplanes/miller-indices.html>
52. *Licování* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=3168](http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=3168)
53. *Technická dokumentace* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2505280/>
54. *Měření drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: [http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA\\_3.1.4\\_MERENI\\_DRSNOSTI\\_POVRCHU.pdf](http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA_3.1.4_MERENI_DRSNOSTI_POVRCHU.pdf)
55. *Drsnost obrobeneho povrchu* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
56. *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura\\_povrchu\\_vybranych\\_tehnologii\\_obrazeni.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_tehnologii_obrazeni.pdf)
57. *Drsnost povrchu* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
$A_D$	Jmenovitý průřez třísky	[mm <sup>2</sup> ]
$a_p$	Šířka záběru ostří	[mm]
$b_D$	Jmenovitá šířka třísky	[mm]
$C_{ena_{celk}}$	Celková cena měření	[Kč]
$C_{Ff,c}$	Materiálová konstanta	[-]
$D$	Průměr nástroje	[mm]
$d, d_\psi$	Konečná vzdálenost atomových rovin	[Å]
$d_0$	Původní vzdálenost atomových rovin	[Å]
$D^{X_{Ffc}}$	Exponent vlivu průměru vrtáku	[-]
$E$	Youngův modul elasticity	[Pa]
$f$	Posuv na otáčku	[mm]
$F_c$	Řezná síla	[N]
$F_f$	Posuvová síla	[N]
$f_{n,vr,vý}$	Posuv návrtní, vrtání a vývrtní	[m·s <sup>-1</sup> ]
$F_p$	Pasivní síla	[N]
$f^{Y_{Ffc}}$	Exponent vlivu posuvu na otáčku	[-]
$h_D$	Jmenovitá tloušťka třísky	[mm]
$I$	Elektrický proud	[A]
$l_{n,vr,vý}$	Délka návrtní, vrtání a vývrtní	[m]
$n$	Otáčky nástroje	[min <sup>-1</sup> ]
$n$	Řád reflexe	[-]
$n_{vř}$	Počet vřeten	[-]
$Q$	Množství vzniklého tepla	[J]
$Q_{pod}$	Náklady na metalurgické šetření podpovrchových vad	[Kč]
$Q_{psd}$	Náklady na měření průměru, souososti a drsnosti	[Kč]
$Q_{řep}$	Náklady na rozřezání kusu	[Kč]
$Q_{zb}$	Náklady na měření zbytkových napětí	[Kč]
$R$	Elektrický odpor	[Ω]
$s_1, 1/2 s_2$	Voightovy elastické konstanty	[Pa <sup>-1</sup> ]
$t$	Čas	[s]
$t_{cyk}$	Doba cyklu	[s]
$t_{kus}$	Doba cyklu na kus	[s]
$t_{n,vr,vý}$	Čas návrtní, vrtání a vývrtní	[s]
$t_{vým}$	Doba výměny obrobku	[s]
$v_c$	Řezná rychlost	[m·min <sup>-1</sup> ]
$v_e$	Rychlost řezného pohybu	[m·min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	Posuvová rychlost	[mm·min <sup>-1</sup> ]
$x$	Konečný rozměr objektu	[μm]
$x_0$	Původní rozměr objektu	[μm]
$\sigma$	Výsledné zbytkové napětí	[Pa]
$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$	Zbytkové napětí I., II., a III. druhu	[Pa]
$\varepsilon$	Makroskopická deformace	[-]
$\varepsilon_{ij}$	Tenzor deformace	[-]
$\varepsilon^{mř}$	Mikroskopická deformace	[-]

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$	Složky tenzoru deformace	[-]
$\nu$	Poissonovo číslo	[-]
$\lambda$	Vlnová délka	[Å]
$\theta$	Difrakční úhel	[°]

<u>Zkratka</u>	<u>Popis</u>
----------------	--------------

CNC	Computer Numerical Control – číslicové řízení
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
DBV	Pojistný tlakový ventil
DMC	Data Matrix Code – identifikační kód
DRV	Regulační tlakový ventil
HFR	Hot Forged rail – kovaný rail
LWR	Laser Welded rail – laserem svařovaný rail
NT	Nízkotlaký vývod
RDS	Snímač tlaku
STS	Single Tube System – systém hlubokého vrtání
VT	Vysokotlaký vývod