



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## PLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ VÝFUKŮ MOTORŮ

PLASMA WELDING OF EXHAUST STROKES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR NOGOL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Petr Nogol

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Plazmové svařování výfuků motorů**

v anglickém jazyce:

### **Plasma welding of exhaust strokes**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti vyráběné automobily mají výfukový systém svařovaný z vysokolegovaných ocelí. Práce definuje vhodnou technologii a postup svařování.

Cíle bakalářské práce:

Definovat podmínky a technologii svařování výfuků automobilů. Navrhnout technologický postup svařování.

Seznam odborné literatury:

- 1.DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
- 2.BLAŠČÍK,F. a kol. Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarovania, 1vyd. ALFA Bratislava 1988, 830s. ISBN 063-563-87
- 3.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999,249s. ISBN 80-85771-70-5
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Kubíček

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

### PETR NOGOL: PLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ VÝFUKŮ MOTORŮ.

Bakalářská práce se zabývá problematikou plazmového svařování výfuku motoru. Práce rozebírá jak motocyklové, tak i automobilové výfukové potrubí. Na základě literární studie byla rozebrána svažitelnost žáruvzdorných a korozivzdorných oceli.

Dále byly objasněny základní pojmy ohledně plasmového obloukového svařování.

Teoreticky byl naznačen technologicky postup tlumiče výfuku, který byl vyhotoven z feritické oceli.

Bakalářská práce se zabývá i dalšími korozivzdornými a žáruvzdornými ocelemi.

## **ABSTRACT**

### PETR NOGOL: PLASMA ARC WELDING ENGINE EXHAUST.

My bachelor's thesis describe questions of plasma welding engine exhaust. Work examines the motorcycle and automobile exhaust pipes. Based on literature studies were analyzed weldability refractory and stainless steel.

Further were clarify basic concepts about plasma arc welding. Technological process exhaust silencer, which was made from ferritic steel, was outlined theoretic.

Other alternatives of refractory and stainless steel are part of my bachelor's thesis.

#### **Klíčová slova:**

výfuk

výfukové potrubí

korozivzdorná ocel

žáruvzdorná ocel

svařování

plazma

#### **Key words:**

exhaust

exhaust pipe

Stainless Steel

Heat resistant steel

welding

plasma

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NOGOL, P. *Plazmové svařování výfuků motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 41s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Kubíček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně, dne 26.5. 2010

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

## OBSAH

Titulní list	
Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2. DEFINICE VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU</b> .....	<b>10</b>
2.1 Výfukový systém automobilu.....	10
2.1.1 Výfukový systém musí splňovat.....	10
2.1.2 Díly pro odvod výfukových plynů a tlumení hluku u automobilu.....	10
2.1.3 Porovnání výfukových systémů bez katalyzátoru a s katalyzátorem	11
2.2 Výfukový systém motocyklu.....	13
2.3 Tlumení hluku.....	14
2.3.1 Díly pro odvod výfukových plynů a tlumení hluku.....	15
2.3.2 Rozdělení tlumičů.....	15
2.4 Materiály výfukového systému.....	18
<b>3. OCELI KOROZIVZDORNÉ A ŽÁRUVZDORNÉ</b> .....	<b>20</b>
3.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí a slitin.....	21
3.2 Fyzikální vlastnosti.....	25
3.3 Svařitelnost, tepelné zpracování.....	27
<b>4. PLAZMOVÉ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ</b> .....	<b>28</b>
4.1 Svařování materiálů při sváření plazmovým obloukem.....	32
4.2 Parametry sváření vybraných ocelí.....	32
4.3 Příprava svarových ploch.....	33
4.4 Využití plazmového svařování v technické praxi.....	33
4.5 Výhody plazmového svařování.....	33
<b>5. TECHNOLOGICKÝ POSTUP</b> .....	<b>34</b>
5.1 Rozbor problematiky.....	34
5.2 Obecné podmínky.....	35
5.3 Použité materiály.....	35
5.4 Technologický postup.....	36
5.5 Rozměrové rozkreslení.....	37
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	



## 1. ÚVOD

Svařování obecně, se dá zařadit mezi jednu z hlavních odvětví strojírenské technologie, kde stojí po boku obrábění, tváření, povrchových úprav a mnoho dalších důležitých skupin. Technologie svařování nezaujímá co do rozsahu největšího objemu mezi technologiemi, avšak můžeme ji zařadit k technologiím zpracovávající největší objem kovových materiálů, jakožto tvářených nebo litých a nejen ty, svařují se i nekovové materiály, ale to už je mimo rámec mé práce.

Výfukové potrubí je nedílnou součástí každého spalovacího motoru. Jednak zabezpečuje plynulý odvod spalin z motoru, tlumí hluk, zabraňuje vniknutí spalin do ústrojí vozu, ale hlavně zabraňuje úniku nebezpečných spalin vzniklých při spalování do ovzduší. Výfukový systém se může lišit podle účelu využití, zejména jednalo se o osobní automobil, motocykl nebo nákladní automobil, dále se může odlišovat svou konstrukcí a zvoleným typem materiálu. Tento jev je především zásadní u závodních vozů a motocyklů, kde se může díky správnému nastavení výfukové soustavy, zvýšit výkon jednotky o několik desítek, než při užití sériových výfukových systémů.

Cílem bakalářské práce je definovat podmínky a technologii plazmového svařování výfuků automobilů a navrhnout technologický postup svařování. Proč se výfuky automobilů svařují metodou plazmové svařování? Při plazmovém svařování se dosahuje vysoké kvality svaru, zabezpečuje dokonalé provaření a pravidelné formování kořene s minimálním převýšením na straně kořene, vysokou celistvost svarového kovu a minimální tepelně ovlivněnou oblast a také zejména svarové spoje jsou odolné proti korozi.

## **2. DEFINICE VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU [1]**

Výfukový systém odvádí výfukové plyny z motoru vznikající jeho spalováním. Další úlohou je snížení hluku tvořeného spalováním v motoru. Výfukový systém odvádí škodlivé výfukové plyny mimo vozidlo, aby nedošlo k jeho proniknutí do kabiny. Výfukový systém je navržen pro každý motor zvlášť, aby byl zachován správný zpětný tlak uvnitř motoru, čímž je zaručeno správné plnění a vyprázdnění spalovacího prostoru. Díky tomu má výfuk velký vliv na využití maximálního výkonu při co nejmenší spotřebě.

Výfuk je jedním z nejmávaných součástí automobilu. Díky výraznému střídání teplot, působením kyselé vody vzniklé kondenzací výfukových plynů, podléhá celé výfukové potrubí extrémní korozi. Z venkovní strany na výfuk působí voda, nečistoty na cestách (kameny a jiné předměty). Dalším faktorem, který na výfuk působí, jsou vibrace, které namáhají ohyby a především spoje

### **2.1 Výfukový systém automobilu [2]**

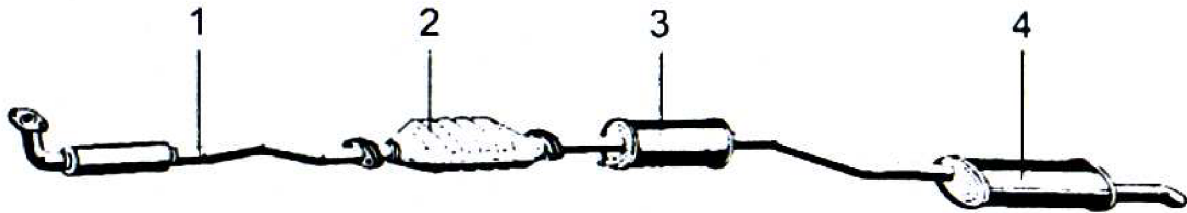
Výfukový systém zajišťuje odvod spalin z válců motoru. Obecný požadavek na výfukový systém motoru nepřepřehnaného turbodmychadlem je dán snahou o co nejmenší odpor proti výtoku spalin z válce motoru. Omezení vytváří legislativní požadavky na obsah emisí ve výfukových plynech a požadavky na vnější hlučnost motoru při jeho zástavbě do vozidla. Je tedy celkový tlakový spád na výfukovém systému určován odporem výfukového ventilu, výfukového kanálu v hlavě válců, sběrného potrubí, katalyzačního tlumiče a tlumiče hluku.

#### **2.1.1 Výfukový systém musí splňovat [2]**

- odvádět bezpečně výfukové plyny do ovzduší tak, aby nemohlo dojít k jejich vniknutí do vnitřního prostoru vozidla,
- tlumit hluk odcházejících spalin, včetně hluku vznikajícího rázy při nepravidelném proudění výfukových plynů v silných impulsech (třesknutí) tak, aby nebyla překročena určitá hladina hluku,
- proud výfukových plynů během tlumení hluku co nejméně omezovat, aby tím snížení výkonu motoru bylo co nejmenší,
- obsah škodlivých látek ve spalinách na limity předepsané legislativě.

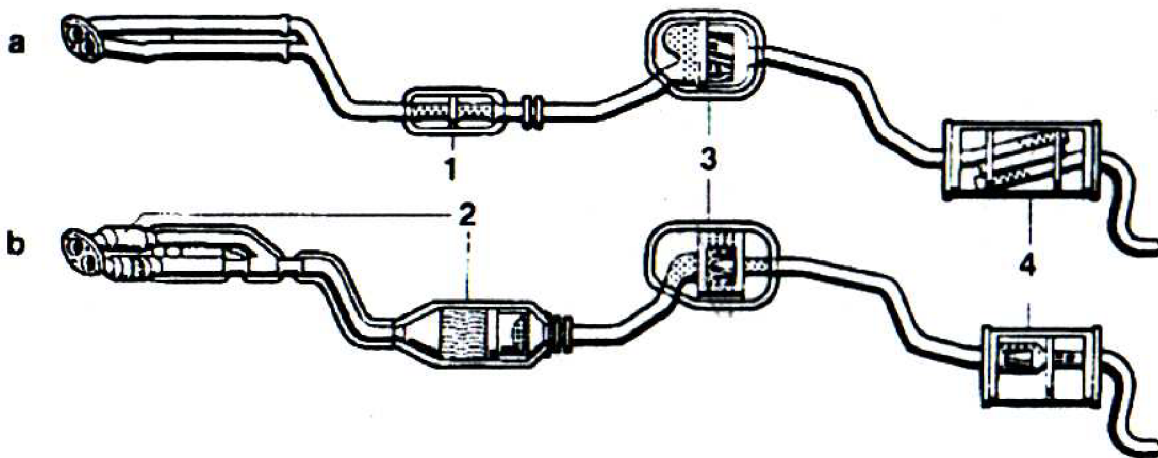
#### **2.1.2 Díly pro odvod výfukových plynů a tlumení hluku u automobilu - obr. 2.1**

- sací sběrné potrubí a výfuková potrubí,
- tlumiče hluku (předřazený tlumič hluku, koncový tlumič hluku).



obr. 2.1 Výfukový systém pro osobní automobil (výfukové sběrné potrubí nezakreslené ): [2]  
 1- přední výfukové potrubí, 2- katalyzátor, 3- předřazený (střední) tlumič hluku, 4- zadní (koncový) tlumič hluku s koncovým potrubím

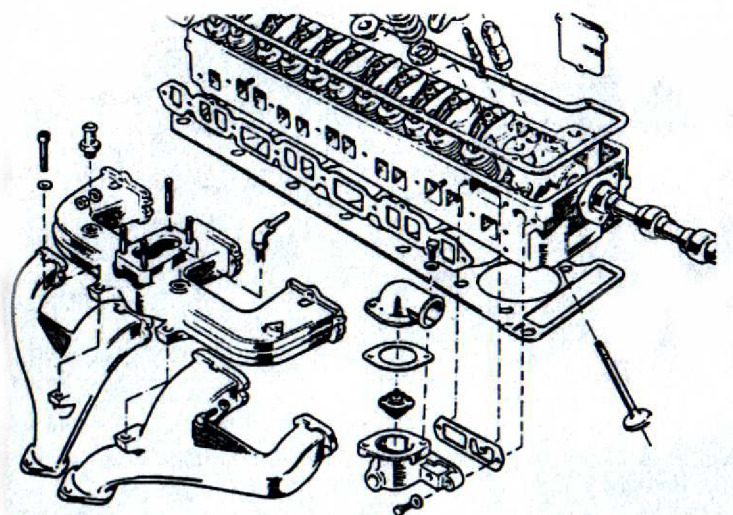
### 2.1.3 Porovnání výfukových systému bez katalyzátoru a s katalyzátorem (obr. 2.2)



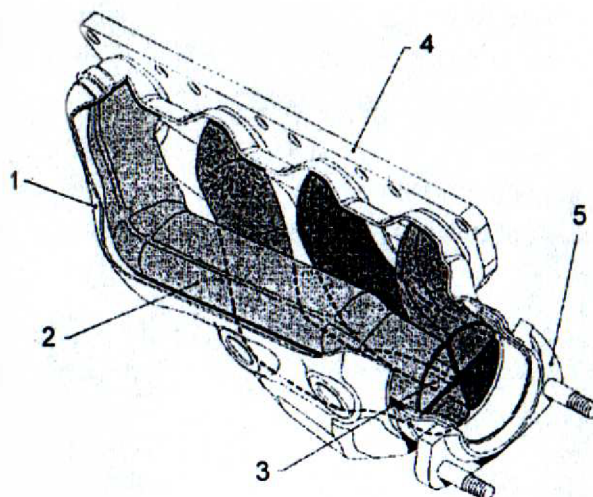
Obr. 2.2 Výfukové systémy: [2]  
 a – bez katalyzátoru, b – s katalyzátorem 1- přední tlumič hluku, 2- katalyzátor, 3 – střední tlumič hluku, 4 – koncový tlumič hluku

Přední výfukové potrubí je přírubou připojeno na sběrné výfukové potrubí a ústí do katalyzátoru. Katalyzátor je spojovacím potrubím spojen s tlumiči hluku. Z nich jsou výfukové plyny odváděny koncovým potrubím do volného prostoru stranou za vozidlo.

Sběrné výfukové potrubí odvádí výfukové plyny z hlavy válců. Vyrábí se většinou z litiny - obr. 2.3, v posledním době za účelem dalšího snižování hmotnosti i z plechu - obr. 2.4. Sběrné výfukové potrubí bývá upevněno k hlavě válců nasazením na závrtné šrouby a přitaženo samojistíci maticemi s měděným povlakem. Mezi sběrným potrubím a hlavu válců se vkládá metaloplastické těsnění a pod matice ocelové podložky. Druhý konec výfukového sběrného potrubí má přírubu, ke které se připojuje přední výfukové potrubí nebo katalyzátor.

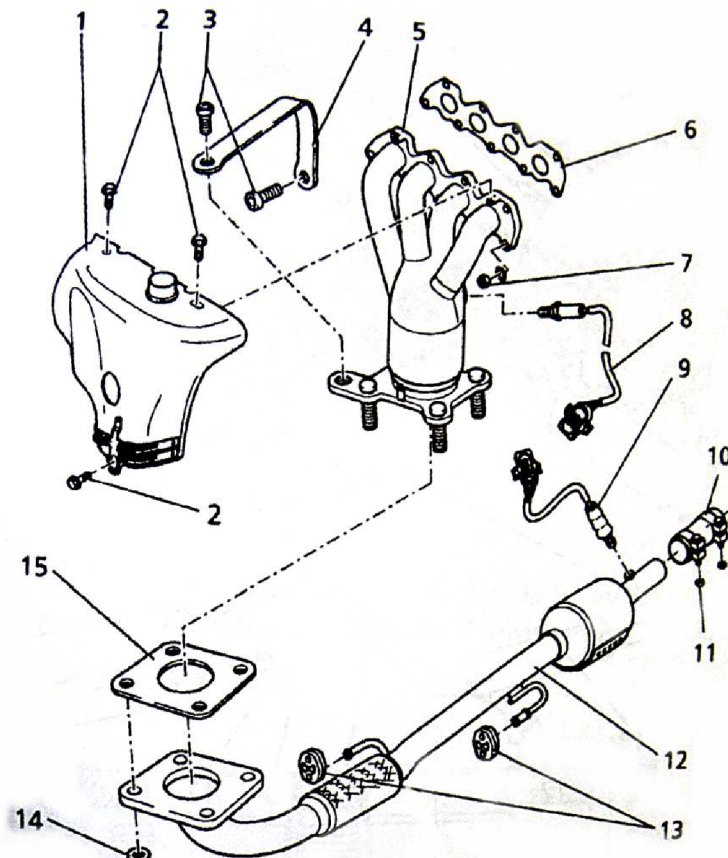


Obr. 2.3 Litinové výfukové sběrné potrubí [2]  
(dolní potrubí, horní je sací hliníkové potrubí) u šestiválcového řadového motoru (Opel)



Obr. 2.4 Plechové výfukové sběrné potrubí izolované vzduchovou mezerou (zážehový motor Audi V8, MTZ 1991/1): [2]  
1 – plechový kryt, 2 – samostatné výfukové trubky tvářené vysokým vnitřním tlakem, 3 – čtyři sběrná výfuková potrubí, 4 – příruba výfukového sběrného potrubí (levá řada válců), 5 – připojení k přednímu potrubí výfukového systému (příruba sběrného výfukového potrubí)

Na obr. 2.5 je znázorněn příklad výfukové systému pro moderní osobní automobil. Přední a zadní díly výfuku jsou zavěšeny na podlahu karoserie prostřednictvím pružných závěsů. Přední díl je upevněn přírubou ke sběrnému výfukovému potrubí motoru. V předním dílu je vložena pružná vložka umožňující výkyvy výfukového traktu v pružných závěsech. V předním dílu je umístěn jeden nebo dva katalyzátory a příslušné lambda-sondy. Zadní díl výfuku je pružně zavěšen ve třech bodech. Spojení předního a zadního dílu zajišťuje dvojité spojení. V zadním dílu výfuku procházejí výfukové plyny nejprve tzv. expandérem. Před koncem výfuku je tlumič výfuku. Z něho vycházejí plyny jednou nebo dvěma směry k zemi ohnutými koncovkami.



Obr. 2.5 Výfukový systém osobního automobilu Fabia [2]

(VW – Škoda Auto, motory 1,4 – 55kW a 1,4 – 74kW):

1 předehříváč – tepelný kryt, 2 upevňovací šrouby předehříváče, 3 upevňovací šrouby držáku, 4 držák upevněný k bloku motoru a sběrnému potrubí, 5 sběrné potrubí integrované s předřazeným katalyzátorem, 6 těsnění sběrného potrubí, 7 matice upevnění, 8 lambda – sonda umístěná ve sběrném potrubí, 9 lambda – sonda umístěná za druhým katalyzátorem, 10 dvojitá spona předního a zadního dílu výfuku, 11 matice šroubů spony, 12 přední část výfuku s katalyzátorem, 13 – pružný závěs, 14 matice, 15 těsnění

## 2.2 Výfukový systém motocyklu [3]

Požadavky kladené na výfukový systém motoru motocyklu jsou následující:

- výrazné snížení hluku odcházejících spalin,
- příznivé ovlivnění průběhu točivého momentu a výkonu motoru,
- v některých případech i snížení obsahu škodlivých látek ve spalinách.

Výfukový systém je tvořen výfukovou přívěrou, výfukovým potrubím, výfukovým rezonátorem a tlumící koncovkou. U některých motocyklových motorů se vyskytuje i oxidační katalyzátor, případně doplněný pomocným katalyzátorem.

Tlumení hluku odcházejících spalin zabezpečuje tlumící koncovka obsahující většinou interferenční a absorpční komoru. Soustava tvořená výfukovou přívěrou, potrubím a rezonátorem ovlivňuje průběh tlaku ve výfukovém otvoru válce motoru tak, že v okolí rezonančních otáček je zlepšeno plnění válce motoru. Rozšíření otáčkové oblasti, v níž příznivě působí rezonanční systém je možno jeho frekvenčním přeladěním.

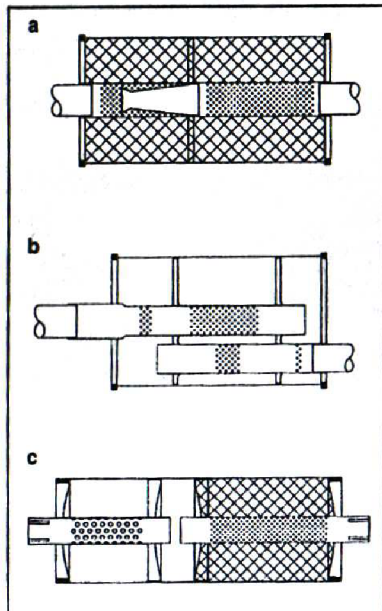
Toto přeladění je možno uskutečnit:

- změnou délky výfukového rezonátoru,
- změnou objemu rezonátoru, např. připojením přídavné komory pro snížení frekvence hmotnostních pulzací ve výfukovém potrubí a tím i zvýšení točivého momentu motoru v nižších otáčkách,
- změnou úhlu otevření výfukového otvoru pomocí výfukové přívěry.

Poloha výfukové přívěry je tedy určována okamžitou velikostí otáček motoru. Může být provedena jako válcové nebo ploché výkyvné či posuvné šoupátko.

### 2.3 Tlumení hluku [3]

Pro tlumení hluku (snižování emisí hluku) se do výfukového systému vkládají různé tlumiče, -obr. 2.6 a 2.7.



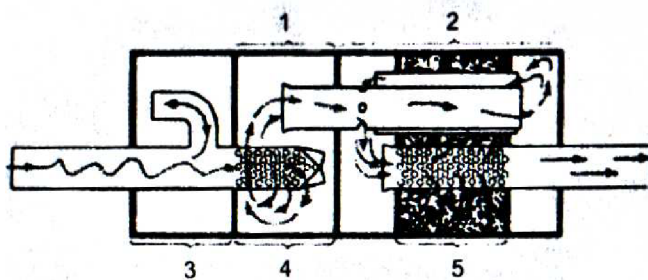
Obr. 2.6

Principy tlumičů hluku výfuku [4]

*a – absorpční tlumič hluku*

*b – reflexní tlumič hluku*

*c – kombinace absorpčního a reflexního tlumiče hluku*



Obr. 2.7

Kombinovaný tlumič hluku výfuku [4]

*1 – reflexe*

*2 – interference*

*3 – rezonátor*

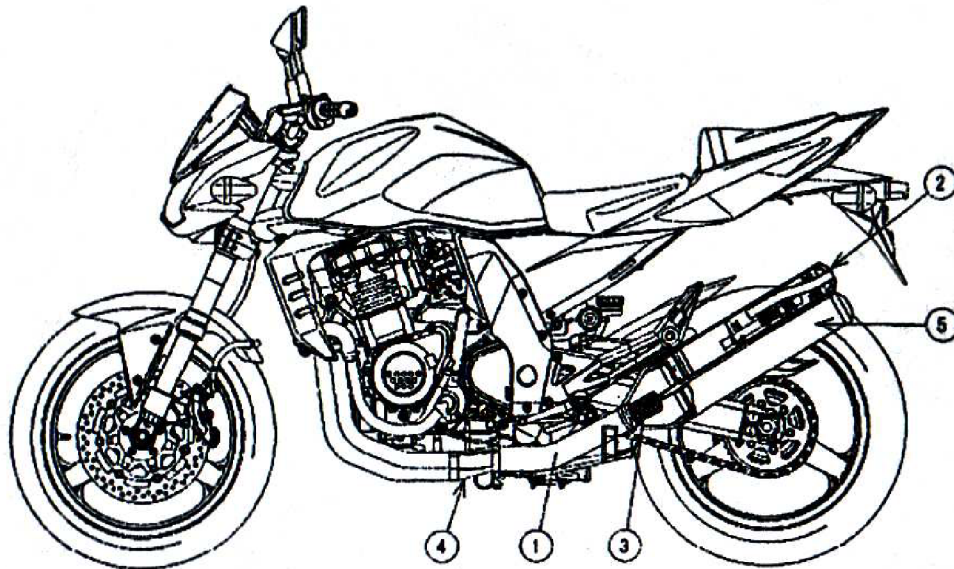
*4 – škrčení*

*5 – absorpce*

### 2.3.1 Díly pro odvod výfukových plynů a tlumení hluku [3]

Mezi tyto díly řadíme - obr. 2.8 :

- výfuková kolena, sběrná potrubí a výfuková potrubí,
- tlumiče hluku.



Obr. 2.8 Výfukový systém Kawasaki ZR 1000 – A1: [3]

1 – výfukové potrubí, 2 – tlumič výfuku, 3 – voštinový katalyzátor, 4 – označení výfukového potrubí, 5 – označení tlumiče výfuku

### 2.3.2 Rozdělení tlumičů [3]

Existují různé typy tlumících systému, které lze podle potřeby kombinovat i v jedné výfukové soustavě - obr. 2.6

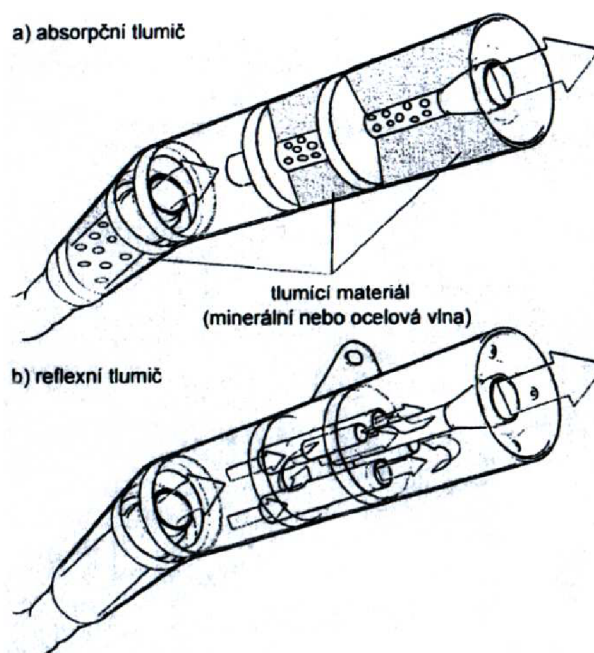
**Absorpční tlumiče** mají nepatrný odpor proti proudění spalin. Tyto tlumiče produkují pouze malý protitlak. Absorpční tlumiče - obr. 2.9a mají mnoho komor vyplněných žáruvzdorným a porézním materiálem (na bázi křemíku), který dobře pohlcuje hluk. Komory jsou propojeny velkými otvory, kterými proudí výfukové plyny. Třením o tlumicí materiál se proud plynů zbrzdí a tím se tlumí vibrace a tím pádem i hluk. Absorpční tlumiče se často používají v kombinaci s rezonančními tlumiči. K dalšímu utlumení hluku je pak zapotřebí určitý, pokud možno objemový prostor. Tlumiče (kromě samotných tlumících výplní) musí být zhotoveny z odolných a dobře opracovatelných materiálů, protože tenké plechy a volné díly mají omezenou životnost a mohou samy způsobovat hluk (tzv. vlastní rezonance). U drahých koncových tlumičů se proto v současné době používá kevlar a uhlíkaté sloučeniny.

**Reflexní tlumič** - obr. 2.9b se používá v kombinacích pro tlumení vysokofrekvenčního a nízko frekvenčního hluku. Pro tlumení vysokofrekvenčního hluku musí být výfukové plyny rozvedeny do několika za sebou umístěných komor. V těchto komorách se výfukové plyny rozpínají a zmenšuje se tak jejich kinetická energie. Vysokofrekvenční tlumiče propouštějí nízkofrekvenční hluk a tlumí hluk vysokofrekvenční. Používají se především u dvoudobých a u maloobjemových vysokootáčkových čtyřdobých motorů. Nízkofrekvenční tlumiče jsou

tvořeny pouzdem s trubkou mnoha otvory, která obepíná výfukové potrubí. Těmito otvory se mohou výfukové plyny rozpínat do velkého prostoru a odtud unikají ven. Nízkofrekvenční tlumiče dobře tlumí nízkofrekvenční zvuky, vysokofrekvenční pak jen slabě. Nízkofrekvenční tlumiče se používají u čtyřdobých velkoobjemových motorů, které se neprovozují ve vysokých otáčkách.

**Interferenční tlumič** je tvořen trubkou položenou uprostřed tlumiče. V trubce je velký počet otvorů, které jsou od sebe umístěny v přesně vypočtených vzdálenostech. Mezera mezi děrovanou trubkou a pláštěm tlumiče vytváří za chodu motoru rezonance frekvencí akustických vlnění tak, aby se frekvence setkávaly pokud možno s opačnými fázemi (překrývají se negativní amplitudy neboli výchylky jednoho vlnění s pozitivními amplitudami druhého vlnění). V ideálním případě při rezonanci frekvencí posunutých fázově o  $180^\circ$  (výše popsané překrytí) dojde k úplnému vyrušení a zániku hluku. V praxi lze tímto způsobem dosáhnout podstatného utlumení hluku. Interferenční princip se většinou kombinuje s odrazovým tlumením.

**Tlumič s rozvětvenými rezonátory** je schopný tlumit velmi hlasité tóny bez zvýšení odporu proti proudění spalin. Při průtoku velkého množství plynů je při příslušně vysokých otáčkách k dosažení špičkového výkonu zapotřebí jen nepatrný odpor proti proudění.



Obr. 2.9 Druhy tlumičů výfuku pro motocykly [3]

Čtyřdobé motory mají minimálně jedno výfukové koleno na každý válec. Čtyřdobé jednoválce mají často na hlavě válců dokonce dvě výfuková kolena. Tyto motory s velkým objemem válce ( $600 \text{ cm}^3$ ) mají totiž dva výfukové ventily. Dvě výfuková kolena mají pak pozitivní vliv na tlumení rázových vln vznikajících při výfuku spalin a pomáhají udržet teplotu hlavy válce na snesitelné úrovni.

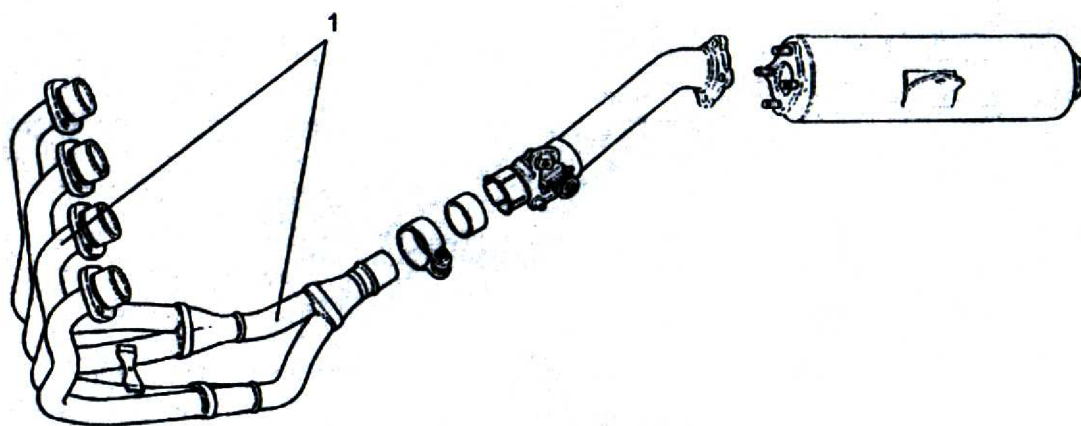
Mezi kolenem výfuku a koncovým tlumičem bývá u soudobých motocyklů vložený přední tlumič hluku. Přední tlumič hluku musí být svým tvarem uzpůsoben prostorovým poměrům mezi rámem motocyklů a koncovým tlumičem.



Sběrné výfukové potrubí je ta část výfuku, do které ústí jednotlivá výfuková kolena. Úkolem sběrného potrubí je rozdělovat spaliny do koncových tlumičů podle počtu jednotlivých výfuků. Sběrné potrubí mohou plnit i funkci předního tlumiče. Sběrné potrubí je většinou umístěno napříč pod rámem a na každém konci je spojeno s příslušným dílem výfukové soustavy.

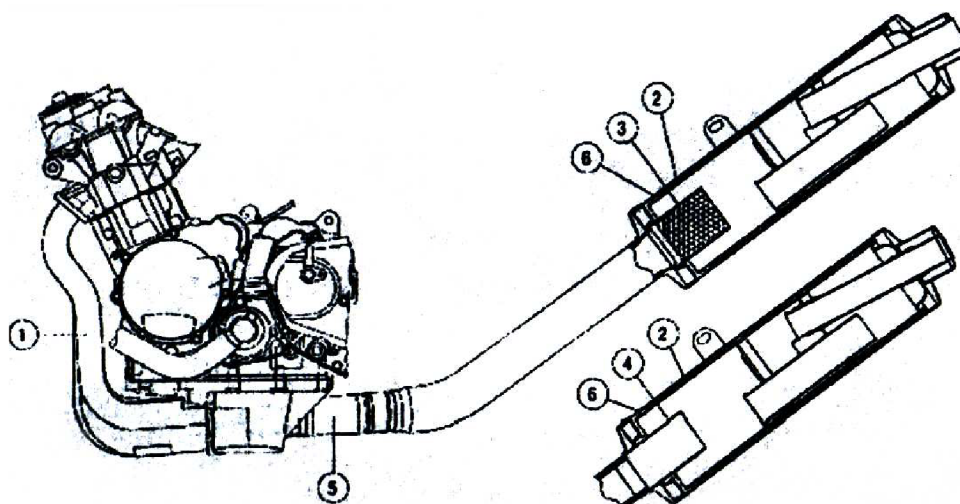
U více válcových motorů jsou výfuková kolena často propojena spojovacím (interferenčním) potrubím (to je často umístěno pod motorem a rámem tak, že není vidět). Toto potrubí ovlivňuje rázové vlny vytvářené spaliny a působí pozitivně na točivý moment a výkon motoru.

Koncové tlumiče u čtyřdobých motorů většinou nelze rozebírat; u dvoudobých motorů to je na druhou stranu nutnost kvůli odstraňování sazí a karbonových usazenin.



Obr. 2.10 Jedno trubkový výfuk čtyřválcového čtyřdobého motoru se čtyřmi koleny a s tlumičem (Suzuki GSX-R 1000). [3]

*Výfuková kolena (1) jsou z titanového plechu*



Obr. 2.11 Výfukový systém Kawasaki ZX636-B1: [3]

*1 – výfukové sběrné potrubí, 2 – tlumič výfuku, 3 – voštinový typ katalyzátoru (třícestný katalyzátor), 4 – systém bez katalyzátoru (trubkový typ), 5 – označení výfukové potrubí, 6 – označení tlumiče výfuku*

Spáry a dělicí místa ve výfukové soustavě musí být pečlivě utěsněny, aby nedocházelo k přísávání falešného vzduchu (při ubrání plynu) nebo k úniku tlaku (při přidání plynu). Jako těsnění slouží většinou azbestové vyměnitelné žáruvzdorné kroužky. Přísávání falešného vzduchu mezi hlavou válců a kolenem výfuku se projevuje jako silné exploze, které mohou zničit vnitřek tlumiče výfuku. Netěsnosti způsobují za provozu zvýšení hlučnosti a pokles výkonu, zejména v oblasti nízkých otáček. Kromě toho při velkých netěsnostech (prorezivělá potrubí, velké netěsnosti mezi kolenem výfuku a koncovým tlumičem) dochází ke zvýšení spotřeby paliva. Důsledkem úniku tlaku je také narušení výměny plynů v motoru, což má za následek pokles výkonu motoru řádově PS nebo kW a posun maximálního točivého momentu do oblasti vysokých otáček (motor špatně táhne při nízkých otáčkách).

Dvoudobé motory jsou z hlediska výměny plynů o mnoho citlivější na správné vyladění výfuku než motory čtyřdobé. Uspořádání a vyladění výfuku má velký vliv na výměnu plynů v motoru a na průběh a načasování jednotlivých pracovních (sacích a výfukových) taktů. Negativním ekologickým hlediskem je u dvoudobých motorů potřeba spalování oleje; žádný dvoudobý motor totiž nemůže bez spalování oleje fungovat. Skoro každý systém pro snižování škodlivosti výfukových plynů, ať již se jedná o katalyzátor, ochuzování palivové směsi nebo termické dodatečné spalování reaguje alergicky na zbytky oleje. Tyto zbytky oleje se totiž všude usazují ve formě karbonových sloučenin a sazí. Karbonový povlak se pak lepí na všechno, co mu přijde do cesty, nehledě na to, že zbytky po spalování oleje jsou velmi škodlivé pro životní prostředí. Současné dvoudobé motory jsou v současné době jednoválcové (skútry, mopedy a malé motocykly s obsahem do 100 cm<sup>3</sup>). Jednoválcové dvoudobé motory se s oblibou používaly u terénních a motokrosových motocyklů.

Jednoválcové dvoutakty mají z válce vyvedeno jedno výfukové koleno, které pokračuje do tlumiče výfuku. Dvouválcové dvoutakty pak mají dvě výfuková kolena vyvedená do dvou výfuků. Mezi výfuky pak není spojovací potrubí. Kolena výfuku jsou samozřejmě tvarována tak, aby vyhovovala procesům probíhajícím při výměně plynů ve válcích. U víceválcových motorů jsou tvarována tak, aby odpovídala frekvenci kmitání sloupce výfukového plynu, což má velký vliv na točivý moment a výkon motoru. Výfukové systémy dvoudobých motorů musí být rozebíratelné. Podle počtu ujetých kilometrů se ve výfuku usazuje stále silnější karbonový povlak, který motoru ubírá na výkonu.

## **2.4 Materiály výfukového systému** [3], [5], [6], [11]

Výfukové systémy automobilů jsou zatěžovány vysokou teplotou, mechanickým namáháním a korozním prostředím. Horká část potrubí je vystavena teplotě nad 900°C, část katalyzátoru v rozmezí 750 až 900 a ostatní části se sestupným gradientem teplot. Mechanické namáhání je vyvoláno teplotní roztažností a cyklickou únavou při teplotních cyklech dlouhodobým zatěžováním při provozu vozidla. Oxidace výfukového potrubí je způsobena kondenzací vody z paliva, která se slučuje s oxidy síry na kyselinu sírovou.

Z výše uvedených důvodů se v současné době vyrábějí výfukové systémy z feritických vysokolegovaných ocelí, které nejlépe odolávají nepříznivým vlivům. Často používaným materiálem jsou 11 – 13% Cr oceli, ale při požadavku záruky 150 000 km, resp. 10 roků životnosti se používají feritické oceli s 17 – 20% Cr. Často jsou oceli legovány molybdenem.

Dále jsou uvedeny další možnosti využitých materiálů pro jednotlivé části výfukového systému:

**Svody** – zhotoveny z litiny, pro závodní využití nahrazeno titanovým plechem o větším vnitřním průměru potrubí.

**Výfukové Potrubí** – výfukové potrubí, které spojují jednotlivé díly výfukového systému, mají rovněž svůj nezanedbatelný podíl na výsledné účinnosti celé soustavy. Vhodný materiál se volí s ohledem na jeho tepelné vlastnosti a předpokládanou životnost výfukové soustavy. U běžného potrubí se využívá litina.

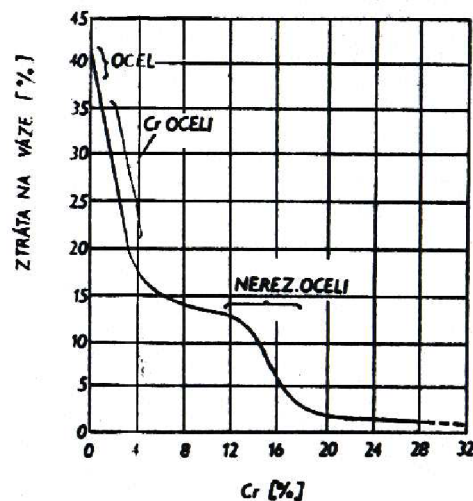
**Katalyzátor** – Katalyzátory se vyrábějí v různých technických provedeních, která se od sebe liší zejména životností a odolností, kvalitou čištění a průtokovým odporem. V automobilovém průmyslu se používají katalyzátory s ocelovým nosičem, které díky nízkému průtokovému odporu a vysoké mechanické a tepelné odolnosti jsou vhodné i pro tyto náročné podmínky. V katalyzátorech je použit ocelový nosič se strukturou tzv. medového plástu. Tenká zvlněná fólie z vysoce legované oceli je stočená do tvaru písmene "S", čímž se výrazně redukuje vnitřní pnutí při vysokých teplotních změnách. Vrstvy fólie jsou pájeny mezi sebou a do vnějšího válce pláště. Tvar "S" se dvěma středy také zabraňuje znehodnocení nosiče teleskopickým efektem, což se někdy děje u katalyzátorů jednodušší konstrukce. Na kovových stěnách nosiče je nanášena mezivrstva z oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Jde o vysoce porézní materiál, na kterém je teprve nanášena vlastní katalytická vrstva vzácných kovů (platina, rhodium, palladium). Díky tomu je reakční plocha katalyzátoru mnohem větší.

**Tlumiče výfuku** – se nejčastěji vyrábějí hlubokým tažením z nerezové oceli, titanových plechu nebo v kombinaci s karbonem.

### 3. OCELI KOROZIVZDORNÉ A ŽÁRUVZDORNÉ [7]

Oceli obsahující více než 5% chrómu jsou nejjednodušším typem ocelí se zvýšenou odolností proti korozi a o vyšší pevnosti při vyšších teplotách v porovnání s nízkolegovanými oceli. Kombinací chrómu, železa a dalších vhodných legujících prvků vzniknou oceli obvykle označované jako nerezavějící oceli. Jelikož pouze velmi málo kovů a jejich slitin je nerezavějících v pravém slova smyslu, nazývají se tyto slitiny obvykle korozivzdorné a žáruvzdorné oceli popř. slitiny. Použití těchto ocelí se stále rozšiřuje v souvislosti s rozvojem chemie, energetiky, letectví a dalších nově se vyvíjejících odvětví techniky.

Hlavním legujícím prvkem těchto ocelí je chróm. Přísady některých dalších prvků, jako je nikl, molybden, křemík a další, zesilují příznivé účinky vyvolávané přísadou chrómu. Chróm jednak zvyšuje pevnost základní feritické matrice, jednak zvyšuje prokalitelnost těch typů ocelí, které jsou kalitelné při zvolených způsobech tepelného zpracování. Zvýšení odolnosti proti popuštění ocelí, do teploty 450 - 550°C, vytváří předpoklady pro výrobu ocelí o zvýšených pevnostních charakteristikách. Odolnost proti korozi je jednak dána specifickými vlastnostmi chrómu, jednak tím, že přísada chrómu podporuje vznik ochranného oxidického filmu na povrchu strojních součástí. Výrazný vliv chrómu na odolnost proti oxidaci ukazuje - obr. 3.1.



Obr. 3.1 Vliv obsahu chrómu na odolnost proti oxidaci chromových ocelí [7]

Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli se dají v zásadě rozdělit podle obsahu chrómu na oceli s obsahem chrómu okolo 5% a na oceli s obsahem chrómu nad 10 – 12%.

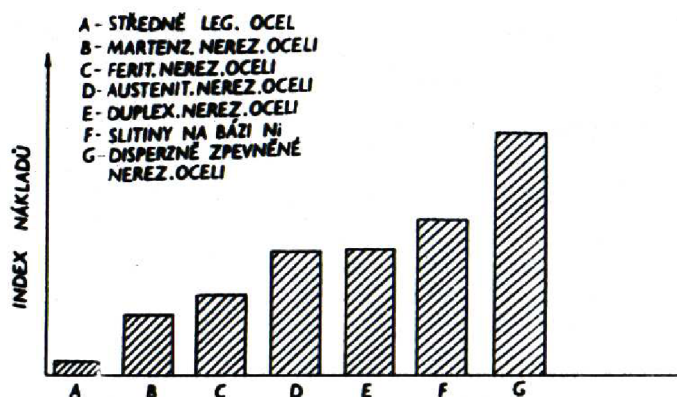
Dále je vhodné rozčlenit je podle jejich struktury do pěti skupin:

1. Feritické nerezavějící oceli,
2. Austenitické nerezavějící oceli,
3. Austeniticko-feritické duplexní nerezavějící oceli,
4. Martenzitické nerezavějící oceli,
5. Disperzně zpevněné nerezavějící oceli.

Pro orientační informaci o vztazích mezi těmito oceli, z porovnání dosahované úrovně jejich pevnosti při normální teplotě - tab. 3.1 plyne, že oceli s nejvyšší odolností proti korozi, standardní austenitické oceli legované na bázi Cr – Ni, mají poměrně nejnižší pevnostní charakteristiky při vysoké houževnatosti, kdežto martenzitické nerezavějící oceli (o poměrně nejnižší úrovni odolnosti proti korozi) dosahují nejvyšší pevnosti, avšak mají poměrně nízkou houževnatost. Jak je však vidět z obr. 3.2 cenově nejméně výhodné jsou disperzně zpevněné nerezavějící oceli, kdežto nejméně nákladné jsou martenzitické nerezavějící oceli.

Tabulka 3.1. Porovnání vlastností nerezavějících ocelí [7]

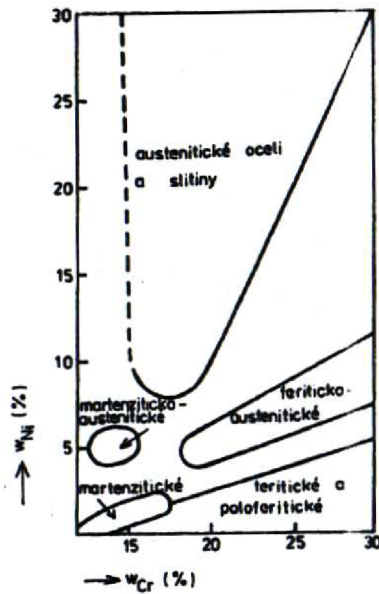
Parametr	Austenitická ocel	Feritická ocel	Duplexní ocel	Martenzitická ocel (kalená a popouštěna)	Disperzně zpevněná ocel
$\sigma_{Kt}$ [hbar]	22 - 40	25 - 40	35 - 50	55 - 180	50 - 170
$\sigma_{Pt}$ [hbar]	50 - 80	50 - 70	70 - 90	72 - 200	95 - 180
$\delta_S$ [%]	30 - 50	25 - 30	30 - 40	2 - 20	2 - 20
$\psi$ [%]	55 - 70	45 - 60	50 - 60	5 - 55	10 - 40
RV[daJ/cm <sup>2</sup> ]	12 - 25	2 - 6	6 - 25	0,5 - 12	0,5 - 8



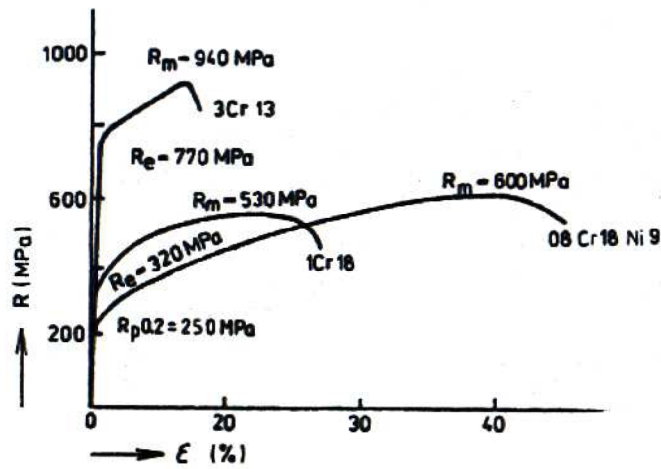
Obr. 3.2. Relativní srovnání nákladů na výrobu jednotlivých typů nerezavějících ocelí. [7]

### 3.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí a slitin [8]

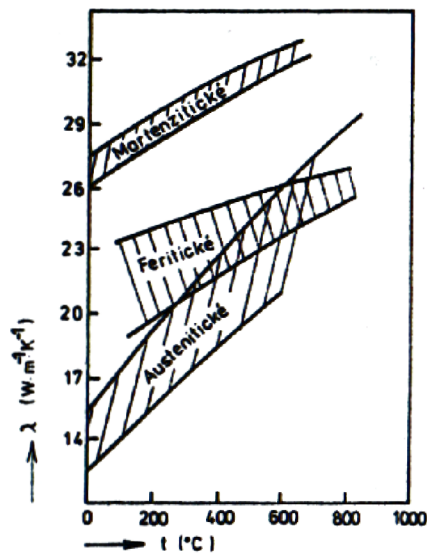
Korozivzdorné oceli a slitiny všeobecně rozdělujeme podle jejich chemického složení a struktury do několika základních skupin, a to na martenzitické (kalitelné), feritické a austenitické s některými přechodovými skupinami - obr. 3.3. Podle chemického složení jsou to oceli chromové, chromniklové a chrom-manganové, které mohou obsahovat ještě další slitinové prvky, jako molybden, křemík, měď, titan, niob, dusík a při vysokém obsahu niklu slitiny s chromem, molybdenem, křemíkem a mědí. Přehled o rozdělení korozivzdorných ocelí a jejich základních vlastnostech je uveden v obrázcích 3.4 a 3.5.



Obr. 3.3 Vyznačení oblasti chemických složení různých typů korozivzdorných ocelí. [8]



Obr. 3.4 Příkladů tahových křivek ocelí martenzitických, feritických a austenitických s vyznačením hodnot meze kluzu,  $R_p 0,2$  a pevnosti. [8]



Obr. 3.5 Porovnání tepelné vodivosti v závislosti na teplotě pro korozivzdorné oceli austenitické, feritické a martenzitické. [8]

Korozivzdorné oceli jsou chromové slitiny se železem obsahující 12 až 30% chromu, až 30% niklu (i více při přechodu na niklové slitiny) nebo do 24% manganu při jistém množství dalších již uvedených slitinových prvků, avšak již v množství nejvýše jen několika málo procent. Chrom zajišťuje pasivitu těchto slitin a je proto rozhodujícím prvkem pro dosažení odolnosti ocelí a slitin k celkové korozi. Korozivzdorné oceli i slitiny jsou v některých prostředích náchylné k místním druhům koroze, jako je koroze bodová, štěrbinová, mezikrystalová nebo korozní praskání. Ty však mohou být eliminovány vhodným výběrem oceli nebo slitiny pro dané podmínky a jejím správným zpracováním.

Ačkoli chrom, nikl, mangan a další slitinové prvky jsou v korozivzdorných ocelích v poměrně velkém množství, je základním prvkem železo a jeho slitina s uhlíkem, tzn. Ocel. Zásadní vliv přísady chromu záleží vedle posílení pasivního stavu i v potlačení austenitické fáze ( $\gamma$ ) v soustavě železo – uhlík. Slitina s více než 18% chromu je při sníženém obsahu uhlíku v rovnovážném stavu zcela feritická. Sledujeme-li vliv jednotlivých slitinových prvků ve vztahu k železu a soustavě Fe – C, můžeme je rozdělit na dvě hlavní skupiny:

a) prvky, které zvětšují oblast existence feritu a jejichž představitelem je chrom, označujeme je jako *feritotvorné*, a patří mezi ně dále molybden, křemík, titan, hliník, niob, berylium, vanad, wolfram aj. Rozpustnost některých z těchto slitinových prvků se s klesající teplotou zmenšuje a při jejich vyšším obsahu mohou vznikat intermediální fáze. Typickým příkladem je fáze sigma, která rozpouští i další prvky, např. molybden, a má v podstatě nepříznivý vliv na vlastnosti korozivzdorných ocelí;

b) prvky, které rozšiřují a otevírají oblast austenitu a jejichž představitelem je nikl, nazýváme *austenitotvornými*. Dalšími prvky této skupiny jsou, uhlík, dusík a dále také mangan a měď, tvořící oblast austenitu jen omezeně.

Kalitelné korozivzdorné oceli jsou zakalovány z teploty rozpouštěcího žhání okolo 1000°C, což vede k fázové přeměně z austenitické, plošné centrované krychlové mřížky na *martenzitickou*. Tyto oceli jsou magnetické a mohou být tepelně zpracovány do vysoké pevnosti v závislosti na obsahu uhlíku a dalších slitinových prvků. Korozní odolnost je nízká v porovnání s austenitickými ocelmi, a proto jejich použití přichází v úvahu v méně agresivních prostředích. Nejvyšší korozní odolnosti kalitelných korozivzdorných ocelí dosáhneme zakalením a popuštěním při 200 až 300°C. Po zakalení a popuštění při vyšších teplotách jsou odolnější oceli s obsahem uhlíku do 0,15% před ocelmi s vyššími obsahy uhlíku a je nutné jim dát přednost, pokud rozhodujícím faktorem nejsou pevnostní otázky.

Při určitém složení a zpracování se dostanou chromové oceli za vyšších teplot do oblasti se smíšenou strukturou feritu a austenitu, který se přeměňuje na martenzit. Získáme tak poloferitické oceli s vlastnostmi kalitelných i feritických ocelí. V žháném stavu mohou mít čistě feritickou strukturu s malým množstvím karbidů. Při ohřevu nad 900°C dojde k částečné přeměně feritu na austenit a při ochlazení vzniká martenzit. Nepříznivě se to projevuje například při svařování. U ocelí s obsahem chromu nad 20% již k zakalení na vzduchu nedochází, ale zůstává u těchto ocelí nebezpečí hrubnutí zrna.

Kalitelné korozi vzdorné oceli mohou nalézt použití ve styku s kyselinou dusičnou (mimo koncentraci pod 1%), boritou, octovou ať koncentrovanou, či při koncentracích pod 10%, benzoovou, olejovou, stearovou, pikrovou, s uhličitany, se síranem sodným a draselným, s dusičnany a s louhy. Se stoupající teplotou však jejich odolnost klesá. Odolnost proti atmosferické korozi je dostatečná jen ve velmi čistém ovzduší. Za velmi nízkých obsahů uhlíku a dusíku ve slitinách Fe – Cr je existence austenitické fáze omezena na asi 12% chromu, takže slitiny jsou v celém rozmezí teplot až k bodu tavení feritické. Ve feritických korozivzdorných ocelích je proto 12 až 30% chromu a nízký obsah uhlíku. Mají krychlovou prostorově centrovanou mřížku, jsou magnetické a dostatečně tažné. Pevnostní hodnoty lze u těchto ocelí zvýšit tvářením za studena, nikoliv však tepelným zpracováním. Vyšší obsah chromu zvyšuje jejich korozní odolnost, která je v oxidačních prostředích vyšší než u

kalitelných korozivzdorných ocelí a u některých typů dosahuje při legování molybdenem odolnosti austenitických ocelí. Nalézají uplatnění v chemickém průmyslu, v prostředí kyseliny dusičné, ale i jinde, dále v dopravě, vzduchotechnice, architektuře. V některých průmyslových atmosférách a atmosférách přímořských však nevyhovují. Dobře odolávají říční i mořské proudící vodě, nejsou-li přítomny mořské organismy, a hojně jsou využívány v potravinářském průmyslu. Proto se mohou tyto oceli uplatnit v celé řadě případů, kde použití chrómnikových ocelí představuje zbytečný přepych.

**Nevhodnost** použití těchto ocelí ve svařovaných konstrukcích, kde se zahřátí oceli v okolí svarového kovu na teplotu 1000°C zvýší křehkost a náchylnost k mezikrystalové korozi, se dá eliminovat snížením obsahu uhlíku a dusíku a přísadou titanu nebo niobu.

Přísadou molybdenu lze zvýšit korozní odolnost u feritických ocelí ve znečištěných atmosférách, v přímoří, v brakické a mořské vodě a v některých organických kyselinách, vroucí kyselině octové, citronové a vinné, molybden výrazně zvyšuje odolnost proti bodové korozi.

**Feritické oceli** s obsahem chrómu nad 18% jsou náchylné k vrubovému účinku a křehnutí při výrobě klasickými prostředky, což stále omezuje jejich použití jako žárovečných ocelí i přes vysokou korozní odolnost při teplotách do 350°C, obzvláště odolnost proti praskání korozi za napětí. Vzhledem k úspěchům ve vakuové metalurgii lze dnes vyrobit oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku, které nevykazují křehkost za normální teploty a mají přechodovou teplotu posunutou až k -45°C. Toto platí do určitých tlouštěk, popř. do průměru asi 30mm, podle druhu oceli.

U **austenitických** korozivzdorných ocelí je ve struktuře i za normální teploty přítomna pouze austenitická fáze, nebo je v převaze, přičemž může podle chemického složení být stabilní nebo metastabilní. Především nikl je v těchto ocelích rozhodující pro udržení austenitické struktury po ochlazení z teploty rozpouštěcího žhání. Stabilita austenitu roste s vyšším obsahem niklu. I další prvky – mangan, uhlík a dusík – podporují tvorbu a zvyšují stabilitu austenitu. Stupeň stability austenitu značně závisí na obsahu niklu. Při obsahu niklu pod 7% se austenit snadno přeměňuje na martenzit za velmi nízkých teplot nebo při deformaci za studena, zatímco při obsahu nad 14% lze pokládat za zcela stabilní pro veškeré praktické použití. V rozmezí 9 až 14% Ni má na teplotu martenzitické přeměny vliv jak obsah chrómu, tak i uhlík, popř. dalších slitinových prvků. Kromě vlivu na strukturu má nikl příznivý vliv též na zvýšení korozní odolnosti, zvláště pak v neoxidačních prostředcích.

Austenitické chrómnikové korozivzdorné oceli mají ze všech základních tříd obecně nejvyšší korozní odolnost, kterou je možné zvyšovat přísadami dalších slitinových prvků, zejména molybdenu a mědi. Méně významné postavení ve skupině korozivzdorných austenitických ocelí zaujímá chrómmanganové a chrómmanganoveniklové oceli. Chrómmanganové oceli vyžadují k udržení austenitické struktury snížit obsah chrómu, čímž se sníží i jejich korozní odolnost. Tyto typy však vykazují odolnost proti koroznímu praskání. Při vyšším obsahu chrómu mají tyto oceli dvoufázovou strukturu, neboť samotný mangan nemá dostatečný austenitotvorný účinek. Teprve kombinace manganu s dusíkem, popř. s niklem, umožňuje získat čistě austenitické oceli s širším uplatněním z hlediska celkové korozní odolnosti. Legováním těchto ocelí posledně jmenovanými prvky ve větším rozsahu se však ztrácí odolnost chrómmanganové báze ke koroznímu praskání. Ve srovnání s klasickými chrómnikovými oceli vykazují zvýšenou mez kluzu.

Všeobecně zlepšené vlastnosti dodávají austenitickým ocelím různé přísady:

- molybden, měď, křemík, zvýšení korozní odolnosti,
- titan, niob, zaručení odolnosti proti mezikrystalové korozi,
- dusík, zvýšení pevnostních vlastností a odolnosti proti bodové a šterbinové korozi,
- síra, selen, měď, zlepšení obrobitelnosti.



Zvýšení meze kluzu lze dosáhnout přísadou dusíku zpravidla mezi 0,1 až 0,2%, aniž by to mělo za následek zvláštní narušení jiných vlastností.

**Austeniticko – feritické** oceli jsou odvozeny od klasických austenitických ocelí zvýšením obsahu chrómu a snížením obsahu niklu. Tyto změny ve složení vedou k přítomnosti určitého podílu feritu ve struktuře. Oceli pak mají některé významné specifické vlastnosti, a to:

- vyšší mechanické vlastnosti než austenitické oceli, především pak hodnotu  $R_{p0,2}$ ,
- zvýšenou odolnost proti mezi krystalové korozi a koroznímu praskání,
- omezenou citlivost k tvorbě trhlin u litých součásti a svarů.

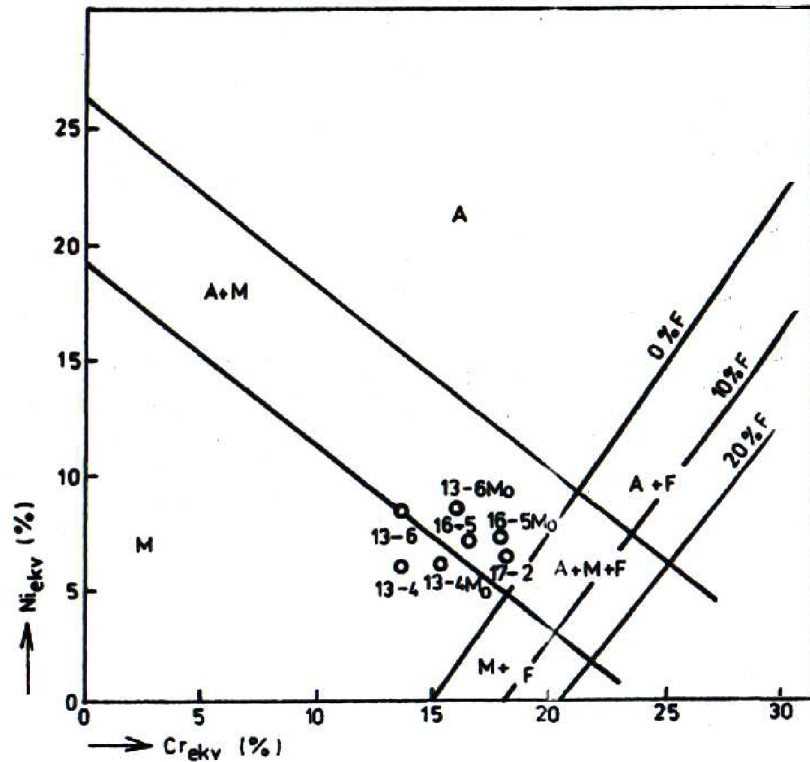
Svařování těchto ocelí je náročnější než u austenitických, ale snažší než u čistě feritických. Po svařování není nutné tepelné zpracování. Typy legované molybdenem, dusíkem, popř. mědí, vykazují vysokou odolnost proti bodové, štěrbinové a celkové korozi.

### 3.2 Fyzikální vlastnosti [8]

**Kalitelné oceli:** hlavní fyzikální vlastnost kalitelných korozivzdorných ocelí se od skupiny ke skupině jen velmi málo liší. Hustota, součinitel tepelné roztažnosti, specifické teplo, modul pružnosti se příliš neliší od hodnot pro polotvrdou nízkolegovanou uhlíkovou ocel. Tepelná vodivost je však přítomnosti chrómu značně snižena. Elektrický odpor je asi 5krát vyšší než u nelegované uhlíkové oceli. Kalitelné korozivzdorné oceli jsou feromagnetické, ať jsou jakkoliv tepelně zpracovány.

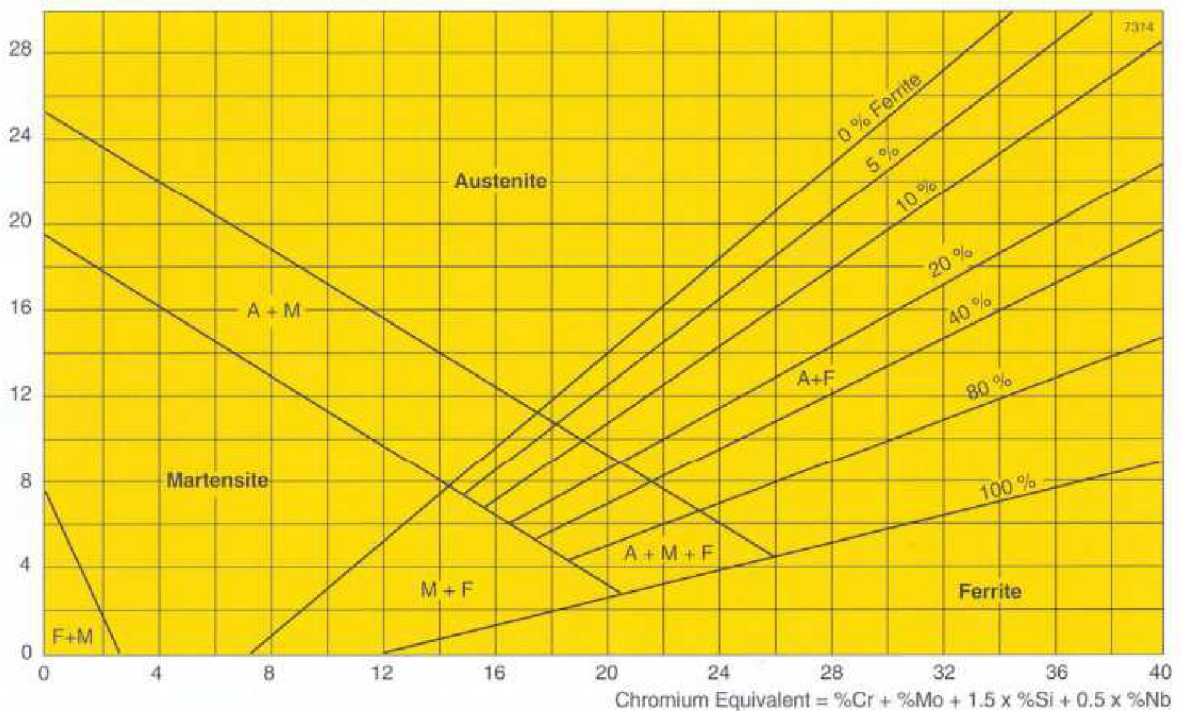
**Feritické a poloferitické oceli:** Fyzikální vlastnosti feritických ocelí se jen málo liší od vlastností martenzitických ocelí. Tepelná roztažnost ocelí klesá s rostoucím obsahem chrómu, pokud se v nich neobjeví austenit, jehož roztažnost je mnohem větší. Feritické oceli mají stejnou tepelnou roztažnost jako některé druhy skla a hodí se pro zátavy při výrobě elektronek, obrazovek, rentgenek apod. Měrné teplo feritických chrómových ocelí je stejné jako měrné teplo jiných konstrukčních ocelí. Elektrická vodivost se s obsahem chromu rovněž snižuje (odpor se tedy zvětšuje) a teplotní součinitel elektrického odporu se zmenšuje, tzn., že elektrický odpor chrómových ocelí při stoupající teplotě vzrůstá méně než odpor měkké uhlíkové oceli.

**Austenitické oceli:** základní fyzikální vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí odvozených a blízkých typů oceli s 18% chrómu a 9% niklu se týkají hustoty, tepelné vodivosti, měrného tepla, teplotní roztažnosti, elektrického odporu a termoelektrických vlastností. Zdůraznit je třeba pokles bodu tání za přítomnosti niklu v oceli a jejich nízkou tepelnou vodivost, měrné teplo a podstatně vyšší součinitel teplotní roztažnosti v porovnání s kalitelnými feritickými korozivzdornými oceli. Austenitické oceli po rozpouštěcím žhání jsou magnetické.



Obr. 3.6 Polohy martenzitických a martenzitického-austenitických ocelí v modifikovaném Schaefferově diagramu (stav po austenitizačním žhání a zakalení) [8]

$$\text{Nickel Equivalent} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn$$



Obr. 3.7 Schaefferův diagram znázorňující strukturu svarového kovu korozi vzdorných ocelí podle účinného obsahu chrómu a niklu [10]

### 3.3 Svařitelnost, tepelné zpracování [8]

**Kalitelné oceli:** Význačná kalitelnost martenzitických ocelí na vzduchu omezuje jejich svařitelnost na druhy s obsahem do 0,1 až 0,2% uhlíku a omezuje také jejich použití v žáru na teploty 750 až 800°C; ostatně při vyšších teplotách není jejich žáruvzdornost dostatečná. Nízkouhlíkové kalitelné korozivzdorné martenziticko-austenitické oceli mají lepší svařitelnost v porovnání s běžnými kalitelnými oceli o odpovídajících pevnostních hodnotách. Lze je svařovat i za normální teploty a austenitickými přídavnými materiály, vyhovuje-li to pevnostním požadavkům na svar. Při svařování elektrodami shodného chemického složení se základním materiálem je vhodné svar vyžít na teplotu kolem 600°C k dosažení plné tažnosti. Žihání na měkko nevede k změkčení srovnatelnému se změkčením ocelí bez hliníku. Maximální změkčení lze dosáhnout dvojnásobným vyžítáním, prvním nad  $A_{c1}$  a druhým nepatrně pod touto teplotou, zhruba při 650°C. Dosáhne se tak tvrdosti mezi 200 až 250HB. Jednoduché vyžítání s pomalým ochlazením po ohřevu nad teplotu přeměn je neúčinné. Přísada niklu totiž stabilizuje austenit, který se nerozpadá při běžném tepelném cyklu a mění se na martenzit při ochlazení.

**Feritické a poloferitické oceli:** U oceli prodávající při ohřevu austenitickou přeměnu může být nahodilě přehřátí během tepelného zpracování nebo během svařování a dalšího technologického zpracování napraveno ohřevem pod teplotu  $A_{c3}$ , takže vznikne jemnozrný austenit a struktura oceli se zotaví. V případě feritických ocelí bez této přeměny je jedinou možností jak regenerovat zrno mechanická deformace za normální teploty a s následujícím žiháním. Jediným prostředkem proti zhrubnutí zrna během tváření za tepla a tepelného zpracování, které je příčinou křehnutí, spočívá v ukončení všech operací při poměrně nízkých teplotách. Přísada titanu, při níž se tvoří karbidy a nitridy stálé až k vysokým teplotám, brání hrubnutí zrna a má velký význam pro svařování, během něhož jsou oblasti základního materiálu, blízké natavenému svarovému kovu, vystaveny velmi vysokým teplotám.

Tepelné zpracování feritických korozivzdorných ocelí spočívá v ohřevu na 750 až 900°C s následujícím ochlazováním na vzduchu nebo v oleji. Cílem toho zpracování je jednak potlačení vlivu zpevnění za tepla i za studena, jednak odstranění náchylnosti oceli k mezikrystalové korozi vyrovnáním obsahu chrómu na hranicích zrn. Je nutné se vyhnout zpracováním při teplotách nad 900°C, které vedou k hrubnutí zrna a v případě ocelí s obsahem chrómu okolo 17% k vytvrzení v důsledku vzniku martenzitu.

**Austenitické oceli:** Účelem základního tepelného zpracování austenitických ocelí je -získat homogenní tuhý roztok a optimální korozní odolnost rozpuštěním karbidů, popř. dalších fází v austenitu,

-potlačit zpevnění vyvolané tvářením za tepla nebo za studena,

-vyvázet co největší množství uhlíku (popř. dusíku) na stálé karbidy (popř. nitridy) za účelem omezit dlouhodobý tepelný vliv na stabilitu struktury a korozní odolnost.

Tepelné zpracování spočívá v ohřevu na 950 až 1150°C podle druhu oceli, s následujícím rychlým ochlazením, kterým se vyhneme vylučování karbidů; nazývá se rozpouštěcí žihání. U ocelí legovaných titanem nebo niobem, ocelí tzv. stabilizovaných, se doplňuje rozpouštěcí žihání podle potřeby ještě stabilizačním žiháním při 850 až 950°C po dobu 2 až 4 hodin, popř. zvláštními způsoby tepelného zpracování při snížených teplotách, s cílem dosáhnout optimální korozní odolnosti při zvýšených pevnostních charakteristikách. Tato zpracování mohou být uplatněna i u ocelí se sníženým obsahem uhlíku určených pro použití za zvýšených teplot.

Austenitická ocel nanesená svařováním je tažná při nízkých teplotách s podmínkou, že neobsahuje příliš mnoho feritu, který je křehký pod 0°C

#### 4. PLAZMOVÉ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ [9]

Plazma je definována jako směs elektronu a kladných iontu, která může být a zvláště i je rozložená uvnitř plynu z neutrálních částic. Jako celek je plazma v ustáleném stavě elektricky neutrální. Může být částečně nebo úplně ionizována. Teplota částečně ionizované plazmy je 5 000 až 15 000K, úplně ionizovaná je asi 100 000K.

Extrapolací uvedených stavu látky se dojde k dalším ještě vyšším stavům:

- Čtvrtý stav (střední energie plazmy je 4 až 24,5 eV)
- Pátý stav (volné jádra a elektrony 2 až 200 MeV)
- Šestý stav (rozštěpení jádra, mezony a elektrony 0,2 až 4 GeV)

Plazma je elektricky vodivá a podléhá účinkům elektrického a magnetického pole.

Možnosti dosažení plazmy:

- elektrickými výboji – elektricky, kompenzovaným iontovým svazkem  
– mechanicky (družice v atmosféře vytváří na svých okrajích v plynné atmosféře plazmu)
- rozpadovými a slučovacemi jadrovými reakcemi.

V technické praxi používaná plazma je v podstatě neizotermická. Teplota elektronového plynu se liší od teploty atomů a iontů. Na ionizaci plynů je potřebná energie. Vhodným zdrojem je teplo elektrického oblouku. Elektrický oblouk jako sám takový je už vlastně plazma.

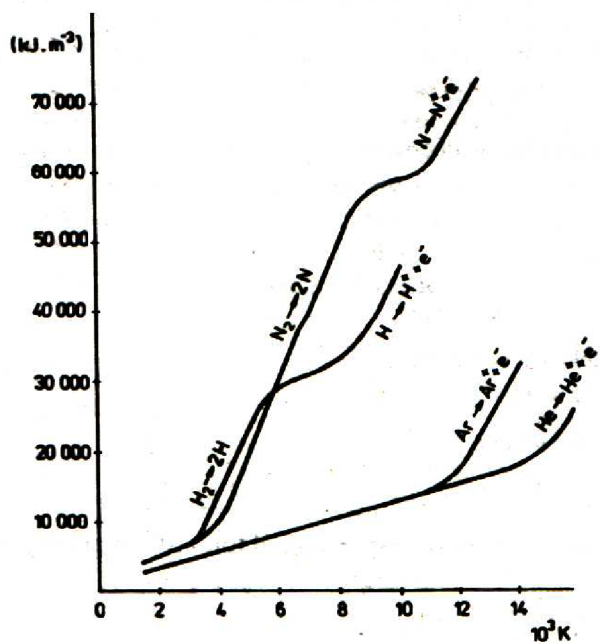
V technické praxi se používá pojem plazma až tehdy, kdy se elektrický oblouk kontrahoval (zuzil), v důsledku toho se zvýšila teplota a taktéž i stupeň ionizace.

V technické praxi se vžil název stabilizace oblouku, který se dosahuje určitý, na technické cíle vyžadovaný stav plazmového oblouku. Ke stabilizaci se může dojít několika způsoby:

- tvarem dýzy plazmového hořáku,
- proudícím plynem,
- vodou

Teplota plazmy značně závisí na míře, jaké plyny se budou přeměňovat do plazmatického stavu. Různé druhy plynů mají různé fyzikální vlastnosti, včetně ionizačních potenciálů a kontrahovaný elektrický oblouk má vzhledem na použité plyny tyto teploty - obr. 4.1:

- vodíková plazma do 8 000K,
- dusíková plazma 7 000K,
- argónová plazma 15 000K,
- héliová plazma 20 000K.



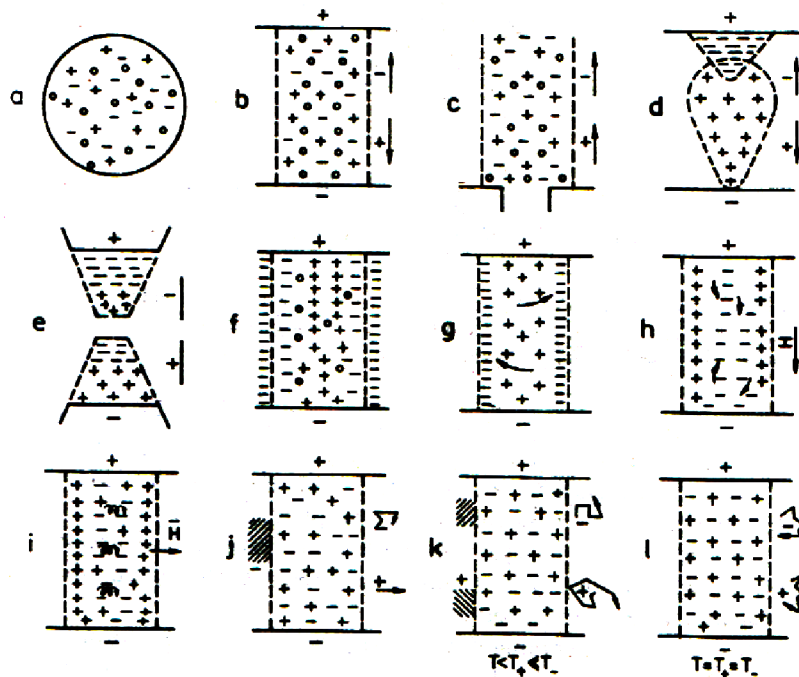
Obr. 4.1 Závislost entalpie plynů na teplotě [9]

Tabulka 4.1 Ionizační potenciály plynu [9]

Plyn	Ionizační potenciál (eV)	
	valenční elektrony	elektrony v sousední sféře
He	24,6	54,4
Ne	21,6	41,0
Ar	15,7	27,6
Kr	14,0	26,5
Xe	12,1	21,2
He	13,6	-
N	14,5	29,6
O	13,6	35,1

Běžná technická plazma se vyznačuje hlavně těmito vlastnostmi:

- Vedle pružných srážek mezi jednotlivými molekulami (atomy) se vyskytují i srážky nepružné, které zapříčiňují změnu vnitřních kvantových stavů molekul (atomů), případně jejich disociaci nebo ionizaci.
- Chemický homogenní plyn se v důsledku těchto procesů mění na směs atomů, iontů, elektronu, fotonu apod.
- V plazmě jsou elektricky nabitě částice – elektrony a ionty. Prostřednictvím těchto částic můžeme na plyn působit elektromagnetickým polem. (Magnetické pole částice urychluje, kdežto elektrické pole neurychluje, jen mění směr jejich pohybu).
- Směs částic v plazmě je vodivá a může od elektrického pole přijímat případně mu odevzdávat energii. Elektrická vodivost plazmového oblouku je v podstatě závislá na pohyblivosti elektronu, která je asi 100x větší než pohyblivost iontu.
- Směs plynů (částic) v plazmě je jako celek elektricky kvazineutrální, to znamená, že koncentrace kladných a záporných částí je přibližně stejná



Obr. 4.2 Druhy plazem [9]

Plazmové svařování patří mezi moderní a vysoce produktivní varianty obloukového svařování v plynné (nejčastěji ochranné) atmosféře. Je charakterizována velmi vysokou koncentrací tepla a vysokou pracovní teplotou. Na místní natavení kovů při svařování především nejžhavější část oblouku – plazmu. Zvláštní předností plazmového svařování je vysoce stabilní svářecí proces, charakteristické formování svaru a zejména kořenu, což umožňuje svařování bez podložení kořene až do hloubky plechu asi 10mm (ojediněle i více než 10mm).

Plazmové svařování se v základních rysech podobá obloukovému svařování v ochranné atmosféře netavící se elektrodou (metoda TIG – GTA). Oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem v plynné atmosféře (nejčastěji v atmosféře inertního plynu).

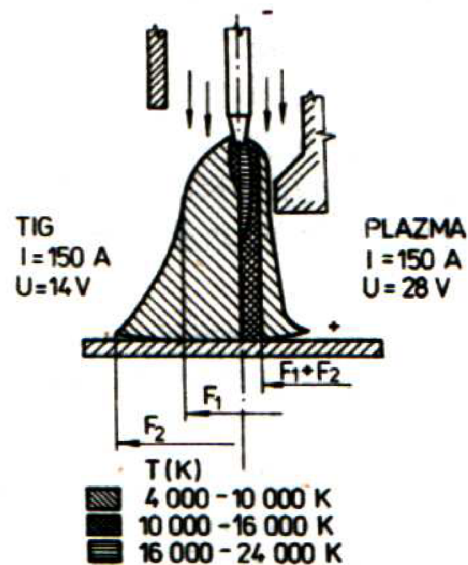
Při svařování plazmovým obloukem je třeba zabezpečit stabilní hoření oblouku při takových výtokových rychlostech stabilizačního plynu, aby nedošlo k vyfukování svarové lázně.

Na rozdíl od svařování metodou TIG se při plazmovém svařování používá hořák s výtokovou dýzou velmi malého průměru, která oblouk tvaruje (zužuje) a tak soustřeďuje tepelnou energii na poměrně malou plochu svařovaného předmětu - obr. 4.3. Vysoká koncentrace tepla a vysoká teplota plazmy zaručuje hluboké natavení základního materiálu, jako je charakteristicky průřez svaru (vínového poháru) a formování kořene - obr. 4.4.

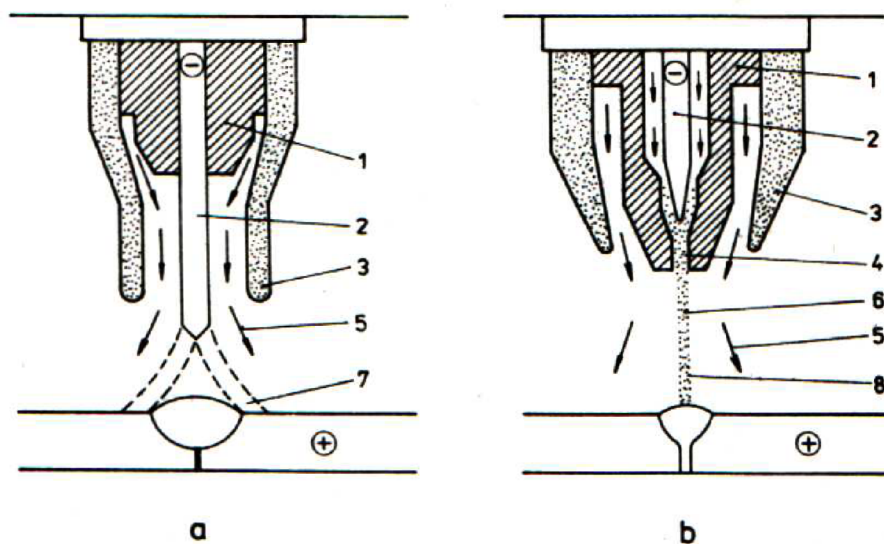
Oblouk se při svařování zpravidla zapaluje vysokou frekvencí, zapojení do okruhu nepřeneseného (pomocného) oblouku.

Velmi důležitou funkční částí plazmového svařecího zařízení jsou hořáky. Plazmové hořáky zabezpečují tyto funkce:

- přívod proudu na elektrodu (W),
- přívod plazmového, fokusačního a ochranného plynu,
- tvarování plazmového oblouku,
- usměrnění plazmového oblouku na svařované místo,
- zabezpečení správné polohy elektrody (centrování oproti otvoru dýzy)



Obr. 4.3 Porovnání svařovacích oblouků TIG a plazma TIG [9]



Obr. 4.4 Princip svaření [9]

a - TIG (GTA), b - plazmový oblouk; 1 - tělo hořáku, 2 - centrovaná wolframová elektroda, 3 - keramická ochrana, 4 - zúžená trubice, 5 - ochranný plyn, 6 - soustředěný plazmový oblouk, 7 - elektrický oblouk, 8 - plazmový oblouk (sloupec)

#### 4.1 Svařování materiál při sváření plazmovým obloukem [9]

Svařitelnost materiálu při svařování plazmovým obloukem bude do jisté míry korespondovat s výsledky při svařování elektrickým obloukem v inertní ochranné atmosféře metodou MIG nebo TIG. V úvahu je třeba brát vyšší teplotu plazmového oblouku, odlišný průvar, dynamické účinky plazmového oblouku.

#### 4.2 Parametry sváření vybraných ocelí [9]

Základními parametry při svařování plazmovým obloukem jsou:

- svařovací proud,
- napětí elektrického oblouku
- rychlost svařování
- výlet elektrody.

Dále na kvalitu svařovaných spojů bude mít vliv:

- druh použitých plynů,
- poměr míchání plynů,
- množství (průtok) jednotlivých plynů přiváděných do místa svaru,
- čistota plynu,
- druh a tvar netavící se elektrody
- vzdálenost hubice od svařovaného materiálu

Parametry svařování vybraných materiálu jsou v - tab. 4.2 a 4.3

Tab. 4.2 Svařování nerezavějící oceli (Cr-Ni – průměr dýzy 2,8 až 3,4) [9]

s (mm)	Plazmový plyn (min <sup>-1</sup> )	Ochranný plyn (min <sup>-1</sup> )	I (A)	U (V)	v <sub>ZV</sub> (cm/min)	vzdálenost (mm)
2,4	2,55 Ar + 0,15 He	14,7 Ar + 0,8 H <sub>2</sub>	115	30	61	4,8
3,2	1,8 Ar	18 Ar + 2 H <sub>2</sub>	220	29	85	7
3,2	4,25 Ar + 0,25 H <sub>2</sub>	14,7 Ar + 0,8 H <sub>2</sub>	145	32	76	4,8
4,8	1,4 Ar + 0,1 H <sub>2</sub>	23 Ar + 2 H <sub>2</sub>	165	34	37,5	7
5	1,9 Ar	19 Ar + 1 H <sub>2</sub>	165	30	23	7
6	1 Ar	13 Ar + 0,5 H <sub>2</sub>	285	25	30	-
6,35	7,6 Ar + 0,4 H <sub>2</sub>	21 Ar + 1,1 H <sub>2</sub>	240	38	35	4,8
9,5	5,1 Ar + 0,3 H <sub>2</sub>	19 Ar + 1 H <sub>2</sub>	240	36	23	4,8
9,5	1,35 Ar	13,5 Ar + 2,25 He	250	-	15	6,3

Tab. 4.3 Parametry svařování titanu [9]

s (mm)	Plazmový plyn (min <sup>-1</sup> )	Ochranný plyn (min <sup>-1</sup> )	I (A)	U (V)	v <sub>ZV</sub> (cm/min)
3,2	3,6 Ar	27 Ar	185	21	51
4,75	8 Ar	27 Ar	175	25	33
10	3,6 Ar + 20 He	7 Ar + 10 He	225	38	25
12,7	6 Ar + 6 He	13,5 Ar + 13,5 He	270	36	25



### 4.3 Příprava svarových ploch [9]

Plechý z nerezavějících ocelí (Cr-Ni) do hloubek 10 až 12mm se svařují na tupo, bez zkosení svarových ploch s mezerou 0,5 až 1mm v místě styku. Svaření se provádí v upínacím přípravku bez podložení kořene svaru.

Je vhodné zabezpečit sekundární plynovou ochranu kořenové části spoje. Před plazmovým navařováním se doporučuje z povrchu základního materiálu odstranit rez, mastnotu, případně jiné nečistoty. Výstupky nebo nerovnosti většího rozsahu je třeba odstranit broušením, případně pískováním. Všeobecně, čím důležitější je přimíchání a pórovitost, tím je třeba věnovat větší pozornost přípravě povrchu.

### 4.4 Využití plazmového svařování v technické praxi [9]

Ve svařecí praxi se plazmové svařování využívá zejména při spojování plechů malých a středních tloušťek, kde je možno využít jednovrstvové spoje. Nejpriznivější výsledky se dosahují při svařování nerezavějících chromniklových ocelí a při svařování titanu. U běžných uhlíkových ocelí je možno použít plazmové svařování bez úpravy hran do hloubky plechů 6mm.

### 4.5 Výhody plazmového svařování [9]

Výhody plazmového svařování, konkrétně Cr-Ni ocelí bez přídavného materiálu:

- jednoduchá příprava spojů ke svařování,
- charakteristické formování svaru,
- možnost svařování ve vodorovné poloze bez podložení kořene,
- zabezpečení dokonalého provařeného a pravidelně formovaného kořene svaru s minimálním převýšením na straně kořene,
- možnost mechanizace svařovacího procesu
- vysoká produktivita práce,
- mechanické a zejména pevnostní vlastnosti svarových spojů jsou v souladu s pevnostními charakteristikami základního materiálu ve vyžádaném stavu,
- vysoká celistvost svarového kovu a minimální tepelně ovlivněné oblasti,
- svarové spoje mají přiměřenou odolnost proti korozi

## 5. TECHNOLOGICKÝ POSTUP

Při řešení technologického postupu jsem vycházel ze studie Ing. Jaroslava Kubíčka, který vyhodnocoval praskavost trubek výfukového systému.

V samotném technologickém postupu se zaměřím na postup výroby výfukového tlumiče pro výfukovou soustavu automobilu Mercedes.

### 5.1 Rozbor problematiky [11]

Část tlumiče výfukového systému je vyráběna plazmovým svařováním. Svařují se dva protilehlé dílce lemovým svarem, které je možno vidět na obrázku - obr. 5.1.

Jako další příklad uvádím část tlumiče výfukového systému, která je vyráběna plazmovým svařováním trubky o průměru 90mm a jeho redukcí konců tlumiče na průměr 55mm - obr. 5.2 a obr. 5.3. Redukce průměru je prováděná tvářením za rotace.



Obr. 5.1 Tlumič výfukové soustavy Mercedes [11]



Obr. 5.2 Tlumič výfukového soustavy tvářen za rotace [11]



Obr. 5.3 Detail zúženého místa tlumiče [11]

## 5.2 Obecné podmínky [11]

Obecně pro svařování feritických ocelí platí:

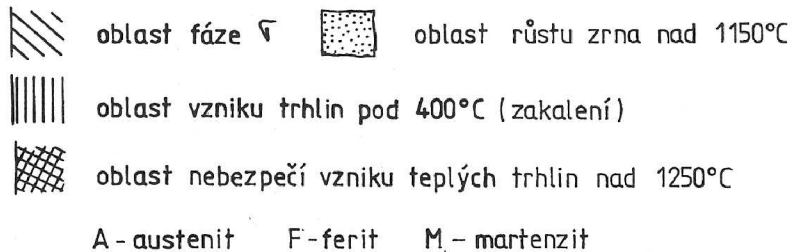
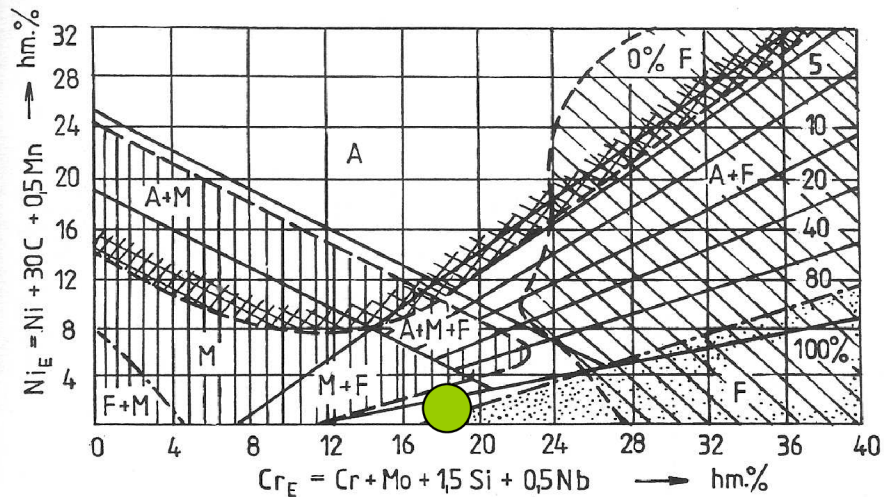
- předehřev je nutný při obsahu C nad 0,08% a tloušťce nad 3 mm
- svařovat s minimálním vneseným teplem
- využívat pulzní proces
- nestabilizované oceli žíhat na snížení nebezpečí mezikrystalické koroze
- svařování je možné s feritickými i austenitickými přídatnými materiály

## 5.3 Použité materiály [11]

Na výrobu výfuků je používána ocel typu X2CrMoTi17-1. Jedná se o feritickou ocel se 17,7% Cr, 0,86% Mo a stabilizovaná titanem o obsahu 0,3%.

Tab. 5.1 Používané oceli jsou uvedené v tabulce podle W-Nr a dle EN. [11]

W-Nr.	Označení podle EN
1.4002	X6CrAl13
1.4003	X2Cr11
1.4006	X12Cr13
1.4016	X6Cr17
1.4511	X3CrNi17
1.4512	X2Ti12
1.4513	X2CrMoTi17-1



Obr. 5.4 Oblast fázového složení základního materiálů označena zeleně [11]

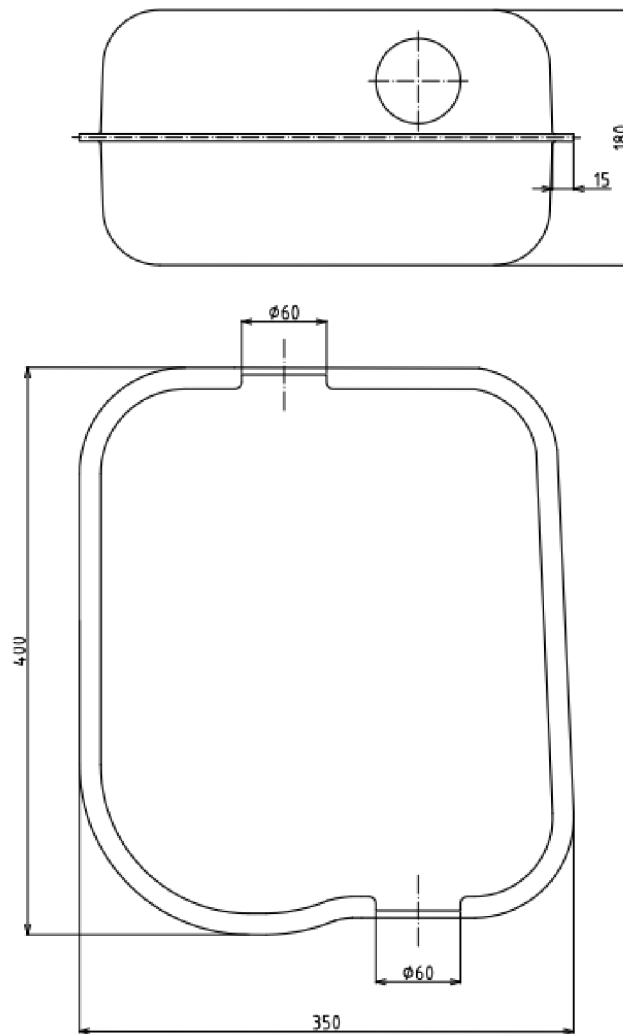
## 5.4 Technologický postup

1. Střih – vystřížení vnějšího tvaru součásti z tabule plechu potřebného pro tváření.
2. Hluboké tažení – hlubokým tažením zhotovíme z rovinného polotovaru duté těleso.
3. Střih – po hlubokém tažení je třeba ostříhnout okraje výtažku, tuto operaci provedeme na ostříhovacím lisu.
4. Olemování – tato operace je potřebná k vytvoření otvoru přívodního a výstupního potrubí výfukové soustavy.
5. Sestavení – mezi dvě části dílců tlumiče se vloží vnitřní ústrojí, vše se upevní do svařovacího přípravku.
6. Svaření – svaření obou částí je provedeno robotickým svařením plazmou bez přídavného materiálu. Použité robotické zařízení - obr. 5.5.
7. Kontrola – po dokončení svaru se provede přímá vizuální kontrola svaru.

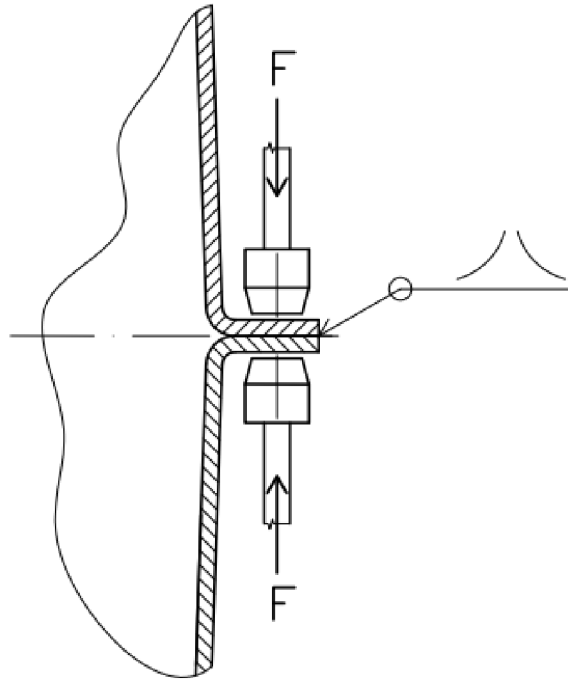


Obr. 5.5 Plasma modul 10 [12]

## 5.5 Rozměrové rozkreslení



Obr. 5.6 Tlumič výfukové soustavy Mercedes



Obr. 5.7 Tlumič výfukové soustavy Mercedes  
*Řez tlumiče, naznačení svorek a lemový svar*

## 6. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá problematikou plazmového svařování výfuku motoru. Svařování výfukového systému je složitý proces, na jehož konci vzniká výrobek, který musí splňovat jak technické normy, emisní normy, tak požadavky zadavatele.

Z důvodu zvyšování nároku na výfukové systémy, zejména odolávání teplotnímu namáhání, mechanickému namáhání, korozních prostředí, ale také brání ohledu na dobu životnosti se musí i samotné materiály výfukových systému zkvalitňovat. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují feritické oceli s 0,02%C, 17 – 30%Cr, stabilizované titanem nebo niobem, které se vyznačují především vysokou tepelnou odolností, dobrou tvárností a také vyšší pevností oproti ocelím poloferitickým.

Z výše uvedených důvodů, na nároky materiálů, se svařitelnost jednotlivých částí výfukového systému zhoršuje. Proto je nezbytná správná volba technologie svařování.

Zvolená metoda plazmového svařování se používá zejména pro svařování nerezových ocelí, kde dosahuje nejpříznivějších výsledků. Příprava spojů pro svařování je jednoduchá, možnost svařování bez podložení kořene, svařový kov je celistvý a vykazuje podobné pevnostní vlastnosti jako základní materiál ve vyžáhaném stavu, tepelně ovlivněná oblast je minimální a především rychlejší rychlost navařování.

Bakalářská práce se dále zabývá i dalšími korozivzdornými a žáruvzdornými oceli, ale z hlediska využití pro výfukové systémy, se feritická ocel jeví jako nejvhodnější.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *EVYFUK.cz* [online]. 2009 [cit. 2010-04-30]. Výfuk, částí výfuků a jeho funkce. Dostupné z WWW: <<http://www.evufuk.cz/co-je-to-vyfuk/>>.
- [2] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory* . Vyd. 1. Brno : František Vlk, 2003 . 580 s.
- [3] VLK, František. *Teorie a konstrukce motocyklů* . 1. vyd. Brno : František Vlk, 2004 . 355 s.
- [4] *Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 23. Auflage. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden 2001*
- [5] DRASTÍK, František, et al. *Atlas použití kovů ve strojírenství, elektrotechnice a v chemickém průmyslu*. Praha : SNTL, 1980. 545 s.
- [6] *Hondaclub.cz* [online]. 2001-2008 [cit. 2010-04-30]. Katalyzátor výfukových plynů. Dostupné z WWW: <<http://www.hondaclub.cz/default.aspx?a=610>>.
- [7] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu* . 2. Praha : Academia, 1975. 542 s.
- [8] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, AV ČR, 1999. 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
- [10] KOLAŘÍK, Ladislav. Skupina Svařování: Hodnocení svařování. Praha 6, 2010. 58 s. ČVUT Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, skupina svařován. Syllabus přednášek. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz>>
- [11] KUBÍČEK, Jaroslav. *Hodnocení praskavosti trubek výfukových systémů* [online]. Brno : VUT FSI Brno, ústav strojírenské technologie , odbor svařování a povrchových úprav, 2005. 33s. Technická zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie.
- [12] Weld+vision. *Časopis pro svařovací techniku* [online]. 2007, 18, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-AC3C94AD-0111DBE1/fronius\\_international/4000062801\\_weld\\_vision\\_Nr18\\_cz.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-AC3C94AD-0111DBE1/fronius_international/4000062801_weld_vision_Nr18_cz.pdf)>.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

Označení	Legenda	Jednotka
$\sigma_{Kt}$	Mez kluzu v tahu	[hbar]
$\sigma_{Pt}$	Mez pevnosti v tahu	[hbar]
$\delta_S$	Houževnatost	[%]
$\psi$	Odolnost proti korozi	[%]
$R_V$	Vrubová houževnatost	[daJ/cm <sup>2</sup> ]
$w_{Ni}$	Hmotnostní zlomek	[%]
$w_{Cr}$	Hmotnostní zlomek	[%]
$R$	Smluvní napětí	[MPa]
$\epsilon$	Poměrné prodloužení	[%]
$R_{P_{0,2}}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti	[MPa]
$\lambda$	Tepelná vodivost	[W/mK]
$t$	Teplota	[°C]