



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV
MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MATERIÁLY A ZPŮSOBY JEJICH SVAŘOVÁNÍ PŘI VÝROBĚ ROTORŮ PARNÍCH TURBÍN

MATERIALS AND METHODS FOR WELDING IN THE MANUFACTURE OF STEAM TURBINE ROTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ CHURÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. MARTIN JULIŠ, Ph.D

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Churý

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:

Materiály a způsoby jejich svařování při výrobě rotorů parních turbín

v anglickém jazyce:

Materials and methods for welding in the manufacture of steam turbine rotors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rešerše shrnující dosavadní poznatky o materiálech a technologiích jejich svařování používaných při výrobě rotorů parních turbín.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této práce je nastudování dané problematiky a vypracování literární rešerše.

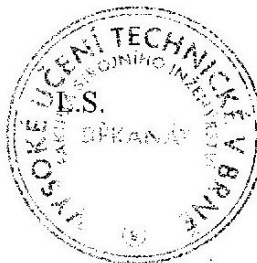
Seznam odborné literatury:

- [1] PILOUS, Václav. Materiály a jejich svařitelnost, In Učební texty pro evropské svařečské specialisty, praktiky a inspektory. 1. vyd. Ostrava: ZERROSS, 2002, s. 17-72. ISBN 80-85771-97-7.
- [2] HLAVATÝ, Ivo. Oceli žárupevné, In Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svařečských inženýrů a technologů. 2. vyd. Ostrava: ZERROS, 2001. Kapitola 14, s. 135–141. ISBN 80-85771-85-3.
- [3] HRIVŇÁK, Ivan. Zvaritelnost ocelí. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979. 240 s. MDT 621.791.011.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Juliš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 8.3.2012





prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce je literární rešerší shrnující současné poznatky o materiálech a způsobech jejich svařování při výrobě rotorů parních turbín. V úvodní části práce je sepsán historický vývoj od nejstaršího zařízení na výrobu páry až k sestrojení první parní turbíny.

V další části práce je uveden přehled nejpoužívanějších kovových materiálů pro součásti parních turbín a také způsoby a metody jejich svařování v současné technické praxi.

Klíčová slova: parní turbína, rotor, kovové materiály, svařitelnost, metody svařování

ABSTRACT

Bachelor thesis is literature review summarizing current knowledge on materials and methods of steam turbine rotors welding. The first part of this work deals with the historical development from the oldest steam generating equipment to construct the first steam turbine.

The next section provides an overview of the most common metal materials for the components of steam turbines and the ways and methods of welding in current technical practice.

Key words: steam turbine, rotor, metal materials, weldability, welding method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHURÝ, T. *Materiály a způsoby jejich svařování při výrobě rotorů parních turbín*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2012

.....
Tomáš Churý

PODĚKOVÁNÍ

Velmi děkuji Ing. Martinu Julišovi Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Také děkuji své rodině za podporu a toleranci po celou dobu mého studia.

OBSAH

ZADÁNÍ	
ABSTRAKT.....	
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	
PROHLÁŠENÍ.....	
PODĚKOVÁNÍ	
OBSAH	
ÚVOD	10
1 PARNÍ TURBÍNA	11
1.1 Historie parních turbín	11
1.1.1 Parní kotel	11
1.1.2 Parní stroj	12
1.1.3 První parní turbíny	13
1.2 Rozdělení parních turbín.....	15
1.2.1 Dělení podle směru proudění páry	15
1.2.2 Dělení podle principu přeměny energie	15
1.2.3 Dělení podle počtu stupňů	16
1.2.4 Dělení podle hřídele	16
1.2.5 Dělení podle způsobu provozu.....	16
1.3 Hlavní části parní turbíny.....	17
1.3.1 Stator	17
1.3.2 Rotor.....	17
1.3.3 Chlazení	17
1.3.4 Mazání.....	17
1.3.5 Regulace.....	17
1.3.5.1 Rozdělení podle způsobu regulace.....	17
1.3.5.2 Rozdělení podle uspořádání a rozvodu regulace	17
1.4 Výkonové dělení turbín.....	18
1.5 Využití parních turbín	18
1.5.1 Výroba elektrické energie	18
1.5.2 Pohon lodí a ponorek	18
1.5.3 Pohon turbodmychadel a turbokompresorů	18
2 MATERIÁLY ROTORU PARNÍCH TURBÍN	19
2.1 Historie materiálů použitých na rotory parních turbín.....	19
2.1.1 Nízkolegované oceli pro turbínové rotory	20
2.1.2 Modifikované oceli Cr12 pro turbínové rotory.....	22
2.2 Současné materiály	23
2.2.1 Nízkolegované žárovečné oceli na rotory.....	23
2.2.2 Modifikované oceli typu 9-12 % Cr	23
2.2.3 Žárovečné austenitické oceli.....	26
3 SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ ROTORŮ PARNÍCH TURBÍN.....	27
3.1 Historie svařování	27
3.2 Svařitelnost materiálů	27
3.2.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí pro rotory.....	27
3.2.2 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí pro rotory	29
3.2.3 Svařitelnost vysokolegovaných ocelí pro rotory.....	29
3.3 Vznik a tvorba svaru	30
3.3.1 Vznik svarového kovu	30
3.3.2 Tepelně ovlivněná oblast	30

3.4 Metody svařování.....	31
3.4.1 Svařování plamenem.....	32
3.4.2 Svařování metodami MIG, MAG	33
3.4.3 Svařování metodou WIG (TIG)	35
3.4.4 Svařování plazmatem.....	37
3.4.5 Laserové svařování	37
3.5 Metalurgie svaru	37
3.5.1 Teplotní cyklus svařování	37
3.6 Trhliny ve svarovém spoji	39
3.6.1 Teplé trhliny	39
3.6.2 Studené trhliny	39
3.6.3 Lamelární trhliny.....	41
3.6.4 Žíhací trhliny	41
4 POHLED DO BUDOUCNOSTI ZDOKONALOVÁNÍ PARNÍCH TURBÍN.....	42
ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÍ LITERATURY	44

ÚVOD

Parní turbína je tepelný rotační stroj, ve kterém se mění energie páry na energii mechanickou v jednom nebo postupně v několika turbínových (tlakových) stupních, tvořených rozváděcím a oběžným kolem s věncem lopatek. Turbína se zpravidla nachází na společné hřídeli s elektrickým generátorem - dohromady tvoří tzv. turbogenerátor.

Výroba tohoto soustrojí, obzvláště turbíny je technicky náročná a technologicky se na její výrobě podílí mnoho profesí, na které je vkládán požadavek precizně odvedené práce.

Veškerý nesoulad ve výkresové dokumentaci, má velký vliv na samotný chod turbíny a obzvláště na vyvažování rotoru. Proto je bakalářská práce zaměřena na materiálovou složku při výrobě, v návaznosti na svařování jednotlivých dílů nejmodernější technologií, kde jsou popsány výhody a nevýhody, jednotlivých svařovacích metod.

Součásti parní turbíny musí být vyrobeny z velmi kvalitních materiálů vzhledem k prostředí, ve kterém pracují. Na tomto základě je vyvíjeno nové složení základních i přídavných materiálů, které jsou součástí nových technologií a výrobních postupů. Není opomenut ani rozbor principu svařování, vlivu svařovacích parametrů na jakost svarového spoje a svařitelnost ocelí.

V dnešní době jsou kladeny na výrobce stále větší nároky. Proto je důležitá volba vhodného materiálu, svařovací techniky a tím docílení co nejvyšší kvality svaru. Postupným vývojem bylo dosaženo mnoho změn v konstrukci a velikosti turbín, ale přesto parní turbíny zůstávají hlavním zdrojem na výrobu elektrické energie.

1 PARNÍ TURBÍNA

Parní turbína patří do skupiny tepelných motorů. Jedná se o parní motor s rotačním pohybem hnacího mechanismu rotoru, ve kterém se tepelná energie páry přemění na energii kinetickou [1].

1.1 Historie parních turbín

O účincích vodní páry se vědělo již ve starověku. V postupném zdokonalování se nadále pokračovalo ve středověku, tak i na počátku novověku, kdy vývoj postupoval od parního kotle přes parní stroj až k parní turbíně [1, 2].

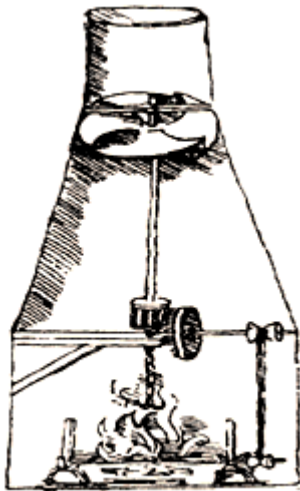
1.1.1 Parní kotel

Nejstarším známým zařízením využívajícím energii páry je Aeolipila (Aeolův míč – podle boha větrů – viz obr. 1.1), kdy se v kotlíku voda měnila v páru, unikala zahnutými trubicemi a otáčela baňkou v opačném směru. Vynálezce byl starověký učenec Hérón z Alexandrie, zvaný též Méchanikós, který ve svých dílech popsal celou řadu mechanismů a strojů využívajících energii páry aj. Princip jednoduchého zařízení je v moderní technice bohatě využíván nejen u parních turbín, ale i u proudového a raketového motoru [3,4].

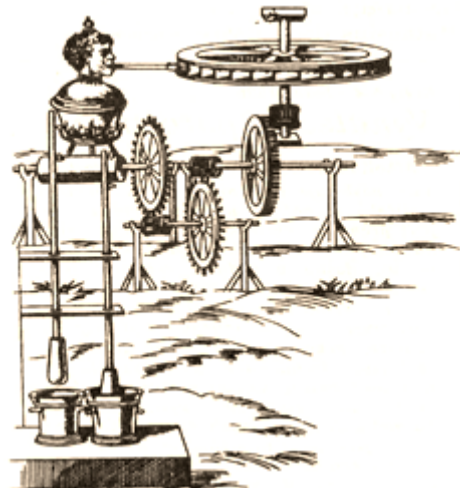


Obr. 1.1: Hérónova aeolipia [4]

Další pozoruhodné návrhy na využití energie páry pocházely z období renesance. Roztažnosti vzduchu v závislosti na ohřívání a ochlazování se věnoval Leonardo da Vinci. Využil teplého vzduchu pomocí vrtulky poháněné stoupajícím teplým vzduchem nad ohništěm a otáčel tak pečení na rožni (obr. 1.2). Další vynálezce Giovanni da Branca vyrobil jakési parní kolo, které se dalo použít mnoha způsoby. Ve skutečnosti šlo o pravzor parní turbíny (obr. 1.3) [2,5].



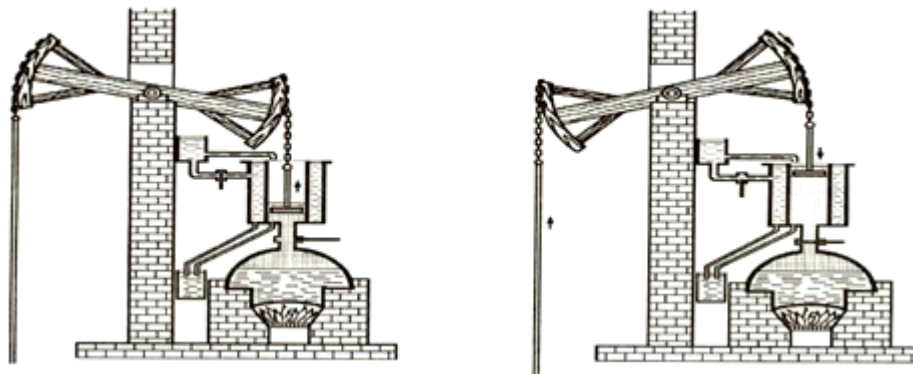
Obr. 1.2: Tepelný stroj Leonarda da Vinci [2]



Obr. 1.3: Parní kolo Giovanni da Branca [5]

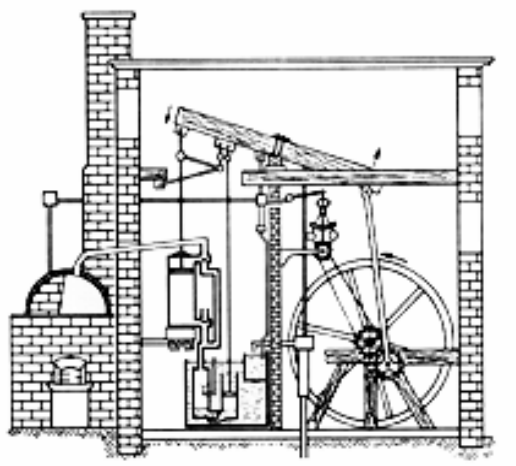
1.1.2 Parní stroj

První zmínky o průmyslovém využití páry pocházejí ze 17. století. V této době dosti významně stoupalo využití kamenného uhlí jako paliva. Z důvodu zaplavení šachet podzemní vodou byla těžba uhlí čím dál složitější. Vynálezci se proto zaměřili na vývoj zařízení, které by dokázalo odčerpávat vodu právě s využitím energie páry. V roce 1698 přišel anglický kapitán Thomas Savery s nápadem využít k čerpání vody podtlaku. Dalším vynálezem byl parní stroj, kde pára již pohybovala pístem (i když prozatím jen v jednom směru). Sestrojil jej Thomas Newcomen (obr. 1.4). Práce na konstrukci tohoto stroje zabrala Newcomenovi deset let [6].



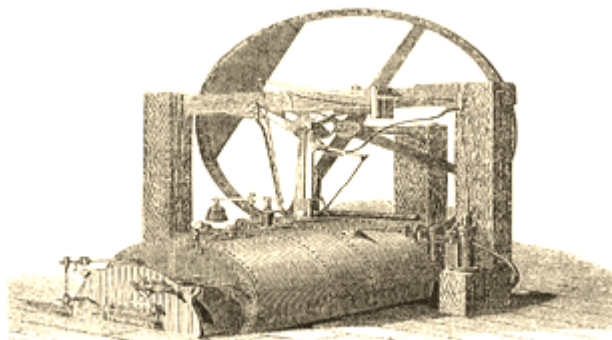
Obr. 1.4: Parní stroj Thomase Newcomena [5]

Výrazné zdokonalení parního stroje poté představovaly převratné vynálezy Jamese Watta v letech 1769-1782. Jeho kondenzátor, který oddělil prostor pro kondenzaci páry a odvod tepla od pracovního válce, výrazně zvýšil účinnost (obr. 1.5). Kotle těchto parních strojů byly již také jištěny pojistnými ventily (vynález Denise Papina) [3,4].



Obr. 1.5: Parní stroj Jamese Watta [5]

V roce 1800 byly rostoucí požadavky na výkon a účinnost podnětem pro další zlepšování. Anglický vynálezce Richard Trevithick navrhl vysokotlaký parní stroj pro pohon vozidel (obr. 1.6). Mezi jeho nejvýznamnější vynálezy patří parní silniční omnibus a první lokomotiva z r. 1804 [3].



Obr. 1.6: Trevithickův parní stroj [5]

1.1.3 První parní turbíny

První návrh novověkého stroje připomínající parní turbínu bylo zařízení Giovanniho da Branca (obr. 1.3). S další myšlenkou předbíhající tehdejší dobu byl patent turbíny Angličana Jamese Sadlera v roce 1791.

Nepřeberně vynálezů v oboru parních turbín poté přineslo nadcházející „století páry“:

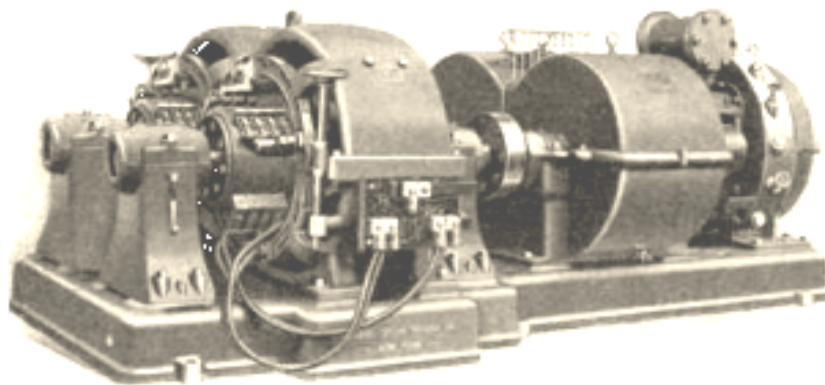
- 1827 Francouzi Rea a Pichon sestavili první vícestupňovou turbínu akčního typu.
- 1831 Avery sestrojil reakční turbínu, která se stala prvním americkým patentem.
- 1838 Leroy byl prvním, kdo použil rozšiřující expanzní trysku.
- 1864 Perrigault a Farcot sestrojili turbínu, kde pára procházela oběžným kolem opakovaně.
- 1894 francouzský profesor August Rateau sestrojil parní turbínu, která měla oběžné kolo s lopatkami připomínajícími Peltonovu vodní turbínu.

- Rateau sledoval při svých experimentech tři hlavní cíle -

vysokou účinnost s tak malými otáčkami, jak jen bude možné (problémem prvních turbín byly právě nezvládnutelné vysoké otáčky), dostatečnou a přitom neškodící vzdálenost mezi pevnými a rotujícími částmi (velká vzdálenost způsobuje ztráty, malá problémy např. při tepelné roztažnosti) a nejmenší možnou hmotnost stroje, zejména rotujících částí.

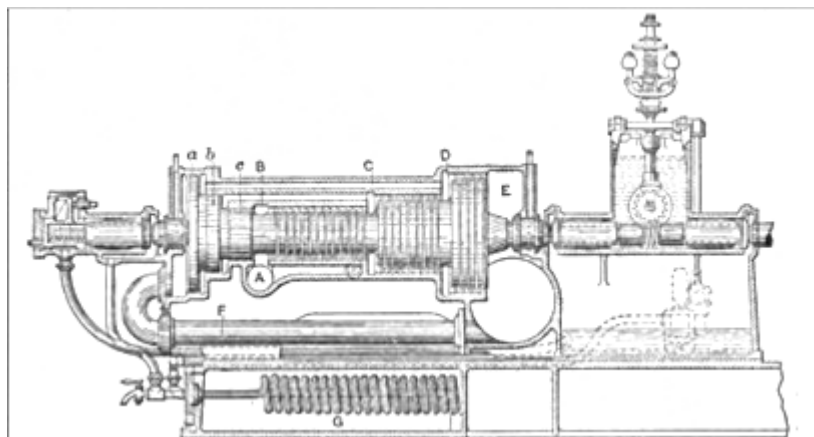
Podle Augusta Rateaua postavila v roce 1904 svoji první turbínu i plzeňská Škodovka [4].

Také v 80. letech se prezentovali úspěšnou prací v oboru parních turbín dva technici - Švéd Carl Gustaf de Laval a Angličan Charles Algernon Parsons. Jejich jména jsou nejčastěji uváděna v souvislosti se vznikem moderních turbín. Vynálezce Laval nejprve experimentoval s čistě reaktivní turbínkou Hérónova typu, dále se inspiroval dle Giovanniho da Branca a sestrojil akční (přesněji rovnotlakou) turbínu. Později dospěl k rovnotlaké turbíně s vysokými otáčkami, u níž expanze páry probíhala v divergentních dýzách (1888). Smyslem této divergentní trysky je užitečné využití co největšího tlakového rozdílu páry. V rozšiřující se dýze (dnes nazývané Lavalova) expanze pokračuje a rychlost vzrůstá nad rychlost kritickou. Zpracujeme-li však celý tlakový rozdíl páry (přesněji tepelný spád) v rozváděcích dýzách pouze jednoho stupně, bude se oběžné kolo točit enormně vysokými otáčkami (u Lavalova asi 30 000 ot. min^{-1}). Tento princip se využívá dodnes. Lavalova společnost vyráběla vysokootáčkové turbíny pro odstředivá čerpadla a dmyhadla. Pro pohon elektrických generátorů musela být turbína silně zpřevodovaná (obr. 1.7) [2,4].



Obr. 1.7: Lavalova turbína [4]

V roce 1884 přišel Charles Algernon Parsons s první turbínou o výkonu 10 HP a s otáčkami 1800 min^{-1} . Pára expandovala částečně ve stacionární lopatkové mříži a částečně v oběžném kole. Celá expanze byla rozdělena do více stupňů (dvojice stacionární rozváděcí lopatky - oběžné kolo). Pára vstupovala v prostoru A, pak postupovala doprava do prostoru E (viz obr. 1.8). Stejný koncept mají přetlakové turbíny dodnes [2,7].



Obr. 1.8: Parsonsova turbína [7]

K turbíně Charles Algernon Parsons následně sestrojil dynamo a založil vlastní firmu pro výrobu turbín. Parsonsova turbína byla použita také pro pohon lodí, nejen úspěšnou Turbinii, ale také oceánskou Mauretanií, Titanic a křižník Dreadnought. Přestože byl Parsons vzdělaným technikem, hlavním teoretikem a zakladatelem vědecké konstrukce parních turbín byl slovenský profesor Aurel Stodola. V parních turbínách viděl velkou budoucnost. V roce 1903 publikoval první vydání „Parních turbín“, kniha byla později několikrát doplňována. Velikého ocenění se mu dostalo v roce 1940, kdy mu Anglie udělila „Zlatou medaili Jamese Watta“ [7].

1.2 Rozdělení parních turbín

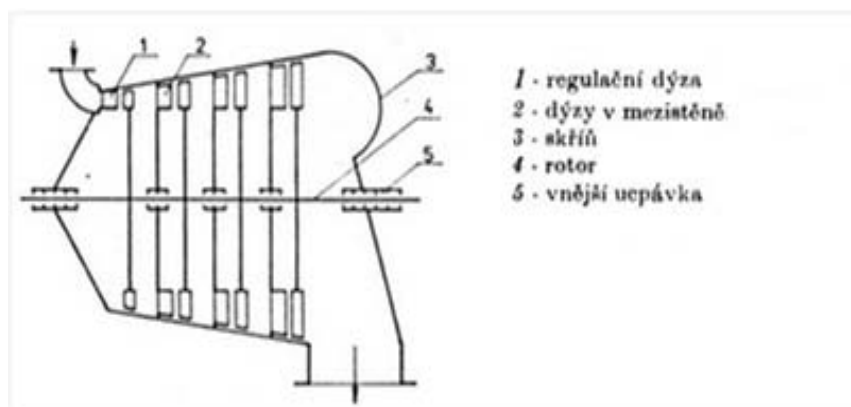
Parní turbíny lze rozdělovat podle mnoha kritérií. Nejčastější termíny a rozdělení parních turbín je uvedeno následující kapitole [8]:

1.2.1 Dělení podle směru proudění páry

- Axiální – pára proudí přibližně rovnoběžně s osou otáčení turbíny
- Radiální – pára proudí kolmo na osu turbíny

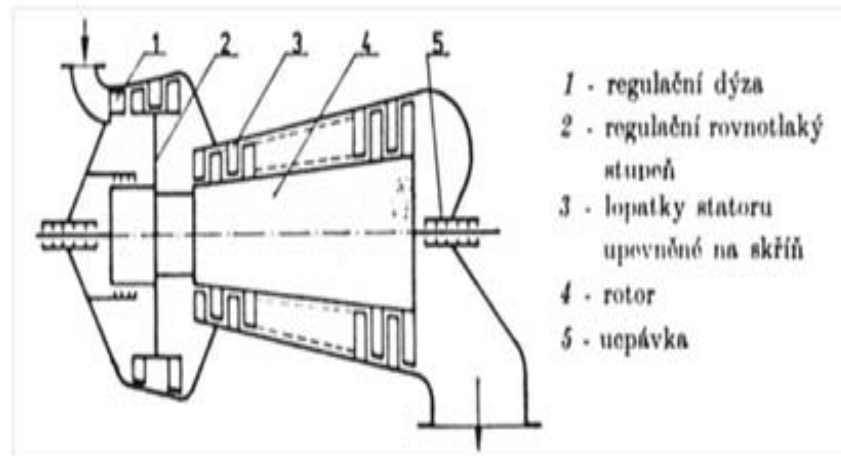
1.2.2 Dělení podle principu přeměny energie

- Rovnotlaká turbína – je charakteristická uložením rozváděcích lopatek v rozváděcím kole (viz obr. 1.9)



Obr. 1.9: Schéma rovnotlaké turbíny [9]

- Přetlaková turbína – má zasazené rozváděcí lopatky do tělesa (skříně) turbíny, expanze páry probíhá v rozváděcím i oběžném kole, (původně Parsonova turbína obr. 1.10)



Obr. 1.10: Schéma přetlakové turbíny [9]

- Kombinovaná – kombinace obou předchozích typů turbín

1.2.2 Dělení podle počtu stupňů

- Jednostupňová
 - Turbína s jedním rychlostním stupněm nebo li jednověncová (Lavalova turbína)
 - Turbína o dvou až čtyřech rychlostních stupních
- Mnohostupňová – spojení více turbín za sebou
 - Turbína s koly jednověncovými
 - Turbína s koly několika věncovými
 - Turbína vzniklá spojením obou předchozích typů

1.2.3 Dělení podle hřídele

- s hřídelem ve vodorovném směru
- s hřídelem ve svislém směru

1.2.4 Dělení podle způsobu provozu

- Kondenzační turbína (pára kondenzuje v kondenzátoru)
- Protitlaková turbína
- Odběrová turbína
- Turbína na čerstvou páru
- Nízkotlaková
- Dvojitlaková

1.3 Hlavní části parní turbíny

1.3.1 Stator

Statorem je samotná skříň parní turbíny. Skládá se z několika dílů, které jsou konstruovány tak, aby umožňovaly snadné uložení všech dílů. Skříň je dělená ve vodorovné poloze a všechny její části přesně obrobeny. Skládá se bez těsnění a stahuje se předepjatými šrouby. Skříň je namáhána vnitřním přetlakem, rozdílem teplot na vstupní a výstupní straně. Vše dohromady má za následek vnitřní pnutí a tím po měrně velké namáhání skříně [1].

1.3.2 Rotor

Jedná se o část parní turbíny, která vykonává rotační pohyb. Skládá se z nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké části. Rotory mohou být celistvé nebo skládané. Oběžné lopatky přetlakové parní turbíny jsou upevněny na bubnovém rotoru, celistvém nebo svařovaném. Skládá se z lopatek, koncových lopatek a hřídele. Rotor je nejnamáhavější částí parní turbíny. Zejména provozními podmínkami (teplota, tlak) a velké odstředivé síly [10].

1.3.3 Chlazení

Provádí se protékající vodou v chladicí smyčce. Chladicí zařízení může být chladicí věž nebo vzduchový kondenzátor.

1.3.4 Mazání

Používají se turbínové a oběžové průmyslové oleje. Vyrábí se z pečlivě vybraných základových olejů a vysoce účinných aditiv, včetně antioxidantů, inhibitorů koroze a protipěnicích činidel [1].

1.3.5 Regulace

Generátor poháněný parní turbínou musí mít určitou stálou rychlost. Proto i turbína musí zachovávat stálé otáčky. Chceme – li, aby soustrojí bylo rovnoměrné, je třeba, aby se zatížení turbíny vždy rovnalo jejímu výkonu. K těmto účelům slouží regulace a její rozdělení je uvedeno níže.

1.3.5.1 Rozdělení podle způsobu regulace

- Regulace škrcením (kvalitativní) – pomocí regulačního (škrtícího) ventilu lze nastavit průtok páry
- Regulace plněním (kvantitativní) – změnou množství páry v důsledku změny průtokového průřezu dýz
- Regulace kombinovaná (smíšená) – spotřeba páry je mezi spotřebou regulace škrcením a regulace plněním

1.3.5.2 Rozdělení podle uspořádání a rozvo du regulace

- Přímá (direktní) – využívá se u malých turbín
- Nepřímá (indirektní) – využívá se u výkonných turbín
- Stálá (isodromní) – udržování otáček turbíny při různých zatíženích samočinně

K regulaci se používají i regulační ventily určené pro parní turbíny. Nejdůležitější je pojistný regulátor. Slouží jako záchranná brzda v případě selhání jednoho z regulátoru, a tím zamezení roztržení nebo jinému poškození rotační části turbíny [1].

1.4 Výkonové dělení turbín

U různých výrobců je dělení rozlišné. Hlavním výkonovým hlediskem pro dělení parních turbín je jejich použití nebo požadavky odběratele. Výkon také závisí na otáčkách rotoru a teplotě vstupní páry. Parní turbíny mají výkonnost od 1 MW až po 1 465 MW.

1.5 Využití parních turbín

Parní turbíny slouží jako hnací zařízení. Na základě vysoké účinnosti nachází velké uplatnění v řadě oblastí průmyslové praxe.

1.5.1 Výroba elektrické energie

V energetice je největší uplatnění parních turbín – zejména elektrárny tepelné a jaderné. Nalezneme i další, ale v omezené míře.

1.5.2 Pohon lodí a ponorek

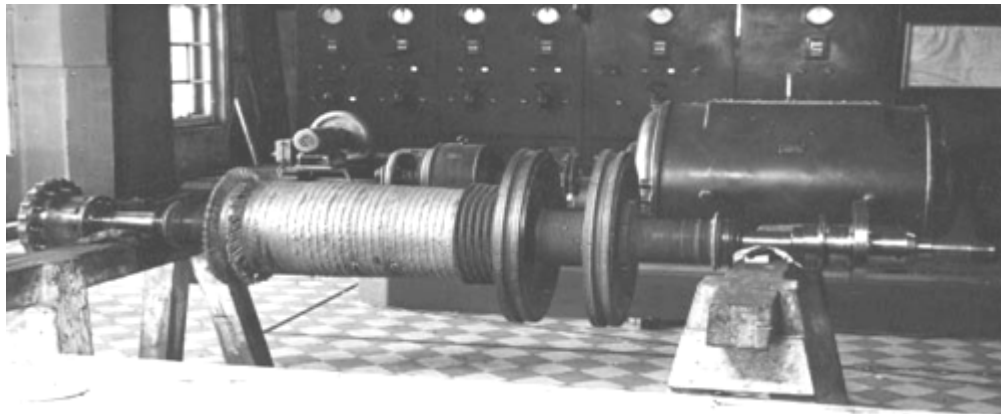
Využití parní turbíny nalezneme i na moři. U lodí a ponorek, které mají jeden nebo i více jaderných reaktorů. Pomocí turbíny se plavidlo dokáže pohybovat a zároveň dodávat dostatek elektřiny k provozním potřebám lodí. Např. ledoborce, válečné a letadlové lodě nebo jaderné ponorky.

1.5.3 Pohon turbodmychadel a turbokompresorů

Kompresory lze použít v dolech, hutích, v chemickém a potravinářském průmyslu a jako komponenty spalovací turbíny [8].

2 MATERIÁLY ROTORU PARNÍCH TURBÍN

Rotor je jednou z nejdůležitějších, nejnamáhavějších a tvarově nejsložitějších částí parní turbíny. Vysoké požadavky jsou kladeny zejména na strukturu a mechanické vlastnosti materiálu. Rotor za provozu musí odolávat velkým silám a tlakům za vysokých teplot někdy přesahujících 600 °C. Při těchto teplotách, zejména pak v místě vstupu páry do turbíny, musí mít použitý materiál zaručenou vysoko u mez pevnosti a kluzu, mez pevnosti při tečení materiálu i odolnost proti tečení. Při spouštění turbíny dochází v krátkém časovém intervalu k velkým teplotním rozdílům mezi povrchem a středem rotoru turbíny a tím ke zvýšenému pnutí materiálu do doby, než se rotor ohřeje na pracovní teplotu. Rozdíly mohou dosahovat i několika set stupňů Celsia, a proto je spouštěcí fáze považována za nejkritičtější v průběhu provozu turbíny. V některých případech vedou kombinace napětí s pnutím od tepelného spádu k překročení meze pružnosti a způsobují trvalé deformace rotoru. V krajních případech mohou od střídavé plastické deformace vznikat trhliny, kdy se projeví veškerá nedůslednost při výrobě těchto dílů. Výroba rotoru je ekonomicky nákladná záležitost. V případě deformace způsobené některou z vad s následnou havárií rotoru, je oprava složitá a finančně i časově náročná (viz obr. 2.1) [10].



Obr. 2.1: Poškozený rotor parní turbíny [11]

Další důležité požadavky pro správnou funkčnost rotorů jsou kladeny na lopatky parních turbín. Lopatky jsou vystaveny působení maximální teploty páry a zároveň musí odolávat velkému statickému a dynamickému namáhání. Koncové lopatky, které svou velikostí několikanásobně převyšují ostatní, jsou výrazněji namáhány odstředivou silou. Použitý materiál by měl odolávat elektrochemické korozi, mít dobré útlumové a únavové vlastnosti [10].

2.1 Historie materiálů použitých na rotory parních turbín

Účinnost parní turbíny se zvyšuje s rostoucí teplotou páry. Proto materiály za celou řadu let procházely vývojem a zlepšovaly se jejich vlastnosti. Prvním použitým materiálem k výrobě rotorů byla uhlíková ocel. Se zvyšujícími nároky na kvalitu se do ocelí přidávaly legující prvky. Nejdříve se používaly oceli nízkolegované, později oceli vysoko legované s feritickou nebo austenitickou strukturou. U austenitických ocelí převládala schopnost vyšší pracovní teploty, ale na základě spojení s nízkolegovanými feritickými oceli, docházelo k vážným technologickým problémům způsobených rozdílnou teplotní roztažností materiálu. Při dodržení optimálního chemického složení, zlepšení tavicího procesu, kalení do vody

se dosahovalo zlepšení hodnot houževnatosti, vyrovnání homogenity a tím rovnoměrných hodnot pevnosti [10].

2.1.1 Nízkolegované oceli pro turbínové rotory

K legování ocelí pro turbínové rotory se nejčastěji používaly prvky – Cr, Mo, V, Ni a W. V ČR byly vyvinuty a odzkoušeny pro výrobu velkých turbínových rotorů oceli 15 320 a 15 335. Chemické složení obou ocelí je uvedeno tab. 2.1 [10].

Tabulka 2.1 Chemické složení nízkolegovaných ocelí na turbínové rotory [10]

Ocel	Chemické složení (hmot. %)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V
15 320	0,20	0,40	0,15	1,10			0,55	0,15
	0,28	0,80	0,40	1,40			0,75	0,65
15 335	0,20	0,25	0,25	1,00	max.	0,40	0,45	0,65
	0,27	0,50	0,50	1,50	0,30	0,70	0,65	0,85

Ocel 15 320 (24 CrMoV) měla zaručené vlastnosti za tepla. Optimální pracovní teploty se nacházely v rozsahu 400 až 520°C. Ocel 15 335 se vyznačovala výrazně zvýšenou žárovečností. Základním legujícím prvkem ve vysokém obsahu byl vanad, kdy hlavním problémem jeho použití byla metalurgická náročnost výroby. Naopak výrazně se snížil obsah Cr. U obou ocelí se dosáhlo vhodných mechanických vlastností tepelným zpracováním. Pomocí kalící teploty, která byla mezi 1010 až 1020°C, docházelo ke vzniku jemnozrné struktury, ale snížení vrubové houževnatosti. Rotory se podle velikosti ochlazovaly na vzduchu nebo v oleji pod teplotu 200 °C. Následovalo popouštění na teploty 720 až 750°C.

Pro turbíny jaderných elektráren, kde se využívá nižších provozních teplot páry, byly používány oceli CrNiMoV. V tab. 2.2 nalezneme chemické složení ocelí a teploty žhání [10].

Tabulka 2.2 CrNiMoV oceli pro turbínové rotory [10]

Ocel	Chemické složení (hmotn. %)							Teplota žhání [°C]
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	
16 444	0,32	0,40	0,15	1,70	1,50	0,15	0,10	640
	0,40	0,60	0,40	2,00	1,80	0,25	0,20	
16 431	0,25	0,40	max.	1,20	1,80	0,40	0,05	640
	0,32	0,60	0,37	1,65	2,30	0,50	0,10	

V zahraničních zemích se nejčastěji používaly nízkolegované oceli pro turbínové rotory s převažujícími prvky CrMoV. Oceli EI 10, Marwe 213 ESV a Durehete 950 se uplatnily jako šroubové oceli a sloužily také k výrobě rotorů parních turbín. Vysoká žárovečnost a mez kluzu se vyznačovala u oceli R 2 již při teplotách dosahujících 535°C. Zvýšením obsahu vanadu u oceli Timkem17-22A se zvýšila žárovečnost o 75% při teplotě 594°C po 1000 hodinách. Pro výkovky rotorů parních turbín se z nízkolegovaných ocelí používala zejména Cr3MoWV. Obsah 3% chromu sice zvýšil korozivzdorní vlastnosti, ale velmi snížil žárovečnost. Anglická ocel (Cr1MoV) a německá ocel (21 CrMoV 5 11) obsahovala vyšší množství Mo. Dalším přidávaným prvkem byl Ni, který zlepšil

prokalitelnost oceli a tím se projeví rovnoměrnější vlastnosti rotoru a menší rozptyl žárovevých hodnot. Přehled chemického složení a tepelného zpracování zahraničních nízkolegovaných ocelí pro turbínové rotory uvádí tabulka 2.3 [10].

Tabulka 2.3 Zahraniční nízkolegované oceli pro turbínové rotory [10]

Označení	Chemické složení (hmotn. %)								Tepelné zpracování
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Ni	
17-22A (S)	0,30	0,60	0,75	1,03	0,50		0,25		983 °C/vzd.- 648 °C/vzd.
17-22A (V)	0,22		0,60	1,35	0,55		0,80		983 °C/vzd.- 648 °C/vzd.
Durehete 950	0,40	0,50	0,20	1,30	0,65		0,25		1 050 °C/olej- 650 ÷ 670 °C/vzd.
Marwe 213 ESV	0,12	0,50	1,00	1,80	0,30		0,30		970 ÷ 1 000 °C/vzd.- 730 ÷ 780 °C/vzd.
HGT 3	0,23	0,33	0,45	2,87	0,50	0,60	0,77		1 060 °C/olej- 690 °C/vzd.
EI 10 (25Ch2MFA)	0,25	0,55	0,25	1,60	0,30		0,20		930 ÷ 1 000 °C/vzd.- 640 ÷ 660 °C/vzd.
R 2	0,25	0,50	0,40	1,60	0,70		0,25		950 ÷ 1 000 °C/vzd.- 650 ÷ 670 °C/vzd.
EI 415 (20Ch3MVF)	0,20	0,50	0,40	3,00	0,45	0,50	0,80		1 020 ÷ 1 050 °C/olej- 680 ÷ 700 °C/vzd.
1CrMoV	0,25	0,60	0,25	1,00	1,00		0,30		950 ÷ 970 °C/vzd.ol. 680 ÷ 710 °C/vzd.
A 293 (6)	max. 0,40	max. 1,00	0,15 0,35	max. 0,50	0,45 0,65		min. 0,03	min. 2,5	843 °C/vzd. na 238°C 660 °C/pec na 232 °C
A 470 (6)	max. 0,28	0,20 0,60	0,15 0,30	2,00 1,25	0,30 0,60		0,05 0,15	3,25 4,00	
24 CrMoV 55	0,20 0,28	0,30 0,60		1,20 1,50	0,50 0,60		0,15 0,25	max. 0,60	950 °C/olej- 700 °C/vzd.
21 CrMoV 5 11	0,17 0,25	0,30 0,50		1,20 1,50	1,00 1,20		0,25 0,35	max. 0,60	950 °C/olej- 700 °C/vzd.
30 CrMoNiV 4 11	0,27 0,33	0,70 1,00		0,90 1,20	1,00 1,20		0,25 0,35	0,50 0,70	950 °C/olej-v. mlha 710 °C/pec

2.1.2 Modifikované oceli Cr12 pro turbínové rotory

Chemické složení u oceli mělo zaručovat strukturální homogenitu v celém objemu. Legovány byly karbidotvornými prvky (W, Mo, V, Nb, B).

V ČSSR se používaly pro rotory modifikované oceli 17 134 a 17 135. Obě byly vyvíjeny ve spolupráci VÚHŽ Praha a VŽKG Ostrava. Svě uplatnění měla i ocel 17 126. Chemické složení uvádí tab. 2.4 [10].

Tabulka 2.4 Chemické složení čs. vysokochromových ocelí pro střední a velké výkovky [3]

Označení	Chemické složení (hmotn. %)										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V	Nb	Ti	B
17 126 (T58)	0,16	0,60	max.	11,0	0,50	1,60		0,15			
	0,22	1,00	0,60	12,5	1,00	2,20		0,25			
17 134	0,17	0,50	0,25	10,0	0,30		0,8	0,20			
	0,23	1,00	0,60	12,5	0,80		1,2	0,35			
17 135	0,17	0,50	0,25	10,6	0,30	0,40	0,40	0,20	0,15	0,03	0,001
	0,24	1,00	0,60	12,0	0,80	0,80	0,70	0,35	0,35	0,15	0,006

Mezi nejrozšířenější typy v zahraničí se řadily oceli Turbotherm 20 MV a 20 MWV. Hodnoty žáropevnosti při teplotě 600 °C byly u těchto ocelí nižší oproti ostatním a k výraznému zlepšení vlastností docházelo až po zušlechtnění. U oceli EI 756 byly hodnoty mechanických vlastností dostatečně vysoké. Jediný problém se projevil s vrubovou houževnatostí, která při 20 °C klesala pod hodnotu tranzitního lomu. Při 50 °C hodnota vrubové houževnatosti byla dostatečně vysoká. Ocel EI 802 splňovala lepší mechanické vlastnosti než ocel EI 756 a vyznačovala se i vyšší mezí pevnosti při tečení. Nepatrný rozdíl byl v mezi pevnosti na povrchu a středu výkovku. V oblastech tzv. „vycezenin“ docházelo k výraznému poklesu vrubové houževnatosti. Získané zkušenosti v USA použili k vytvoření oceli Cr11MoVNbN s obsahem (0,20 % C; 11 % Cr; 1 % Mo; 0,2 % V; 0,10 % Nb). Jednalo se o materiál „složený“ z několika předešlých ocelí z ostatních zahraničních zemí. Její mechanické vlastnosti byly vždy o něco lepší než ty, ze kterých vzešla. Tepelné zpracování bylo velice náročné. Skládalo se z austenitizace při 1100 °C, kalení do oleje na 254 °C, pak vyrovnání teploty povrchu a jádra na 198 °C, popouštění při 615 °C k odstranění prnutí v materiálu, ochlazení na 115 °C a následně další popouštění na 689 °C k dosažení požadované pevnosti. Zahraniční korozivzdorné oceli s jejich složením najdeme v tab. 2.5 [10].

Tabulka 2.5 Chemické složení zahraničních modifikovaných ocelí Cr12 na turbínové rotory [10]

Označení	Chemické složení (hmotn. %)							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Ni
EI 756	0,15	0,7	0,3	11,5	0,7	2,0	0,25	
EI 802	0,15	0,8	0,3	12,0	0,5	0,8	0,25	0,75
Turbotherm 20 MV X 20 CrMoV 1 21	0,20	0,6	0,3	12,0	1,0		0,3	0,6
Turbotherm 20 MWV X 22 CrMoWV 1 21	0,20	0,6	0,3	12,0	1,0	0,5	0,3	0,8

2.2 Současné materiály

V dnešní době se nejvíce využívají dvě skupiny ocelí, kdy do první řadíme již zmírněnou nízkolegovanou ferritickou ocel. Druhou skupinu tvoří korozivzdorné oceli a jejich modifikované typy Cr13. Svě uplatnění nacházejí i austenitické oceli zejména na nejvíce namáhaných součástech rotoru [10,11].

2.2.1 Nízkolegované žárovevné oceli na rotory

Základními požadavky na nové nízkolegované žárovevné oceli jsou zejména vysoké hodnoty meze pevnosti při tečení za pracovních teplot okolo 550 °C, zvýšená houževnatost a odolnost oceli proti křehkému porušení. Hlavními legujícími prvky jsou Mn, Si, Cr, Mo, V. Z oceli 2,25Cr-1Mo se prováděným výzkumem zdokonalovalo chemické složení a mechanické vlastnosti. Přibyl prvek niob, který má velice pozitivní vliv na žárovevnost. Vznikly nové oceli T23 (HCM2S), T24 (7CrMoTiB10-10) a F-2W. Chemické složení se nachází v tab. 2.6 [11,12,13].

Tabulka 2.6 Chemické složení nových nízkolegovaných ocelí (% hm.) [11]

Označení	C	Cr	Mo	V	W	Nb	Ti	B	N
T23 (HCM2S)	0,06	2,25	0,2	0,25	1,6	0,05		0,06	≤0,03
T24 (7CrMoTiB 10-10)	0,05- -0,10	2,4	1	0,25			0,07	0,07	0,012
F-2W	0,10	1,90	0,6	0,37	0,33		0,14	0,046	

Ocel T23 (HCM2S) disponuje lepšími hodnotami vlastností než zmiňovaná 2,25Cr-1Mo. Má lepší mechanické vlastnosti, vyšší pevnost proti tečení nebo žárovzdornost do teploty 600 °C. Ocel T24 (7CrMoTiB 10-10) se také vyznačuje lepšími vlastnostmi a použitím do teploty 600 °C. Při rychlém ochlazení se vytváří struktura martenzitu s tvrdostí kolem 360 HV10. Po austenitizaci se provádí popouštění při teplotě kolem 750 °C. Výsledná tvrdost je 315 HV10. U této oceli nalezneme vysokou stabilitu mikrostruktury a tím i lepší vlastnosti. Při tepelném zpracování žárovevných ocelí výrazně převyšuje jejich horní pracovní teplota a v závislosti na obsahu legujících prvků se popouštění provádí mezi teplotami 610 až 780 °C. Výsledná struktura má zajistit nejvýhodnější morfologii složek a zároveň zabezpečit nejvyšší odolnost proti tečení [11,13].

2.2.2 Modifikované oceli typu 9-12 % Cr

Zlepšováním parametrů páry a zvyšováním účinnosti parních turbín je také nutností se zabývat životností a spolehlivostí, která hraje důležitou roli ve splňování již tak náročných požadavků. Velký podíl na kvalitu a spolehlivost má modifikace ocelí, která se provádí snížením obsahu uhlíku, přidáváním wolframu v množství 1 až 2 % a mikrolegur Nb, B a N.

Ve výzkumných programech bylo cílem vytvoření materiálu s vyššími technologickými a mechanickými vlastnostmi ve srovnání s oceli X20CrMoV121.

U nových ocelí pro energetiku je obsah uhlíku v rozmezí 0,05 – 0,15, který zaručuje požadovanou pevnost proti tečení, dobrou svařitelnost a tvárnost oceli. Obsah chrómu se u žárovevných ocelí nachází v množství mezi 8 – 12%, kdy jsou zaručeny dobré mechanické vlastnosti jako žárovzdornost, odolnost proti korozi, zpevnění za zvýšené teploty a pevnost

proti tečení. Porovnání chemického složení standardních a nových chromových ocelí 8-12 % Cr pro aplikaci v energetice jsou uvedeny v tab. 2.7 [11,13].

Tabulka 2.7 Porovnání chemického složení standardních a nových chromových ocelí 8-12 % Cr [11]

Prvek	Doporučené chemické složení, hm. %										
	X10Cr Mo 91		X20Cr MoV 121	X20Cr MoV Nb91	NF 616	E911	TB 12M	NF 12M	HCM 12	HCM 12A	NF12
	T/P9			T/P91	T/P/ 92					T/P12 2	
C	max. 0,12	0,17 0,22	0,17 0,23	0,08 0,12	0,07 0,13	0,09 0,13	0,10 0,15	0,06	max. 0,14	0,07 0,14	0,08
S	max. 0,030	max. 0,025	max. 0,035	max. 0,015	max. 0,010	max. 0,010	max. 0,010		max. 0,030	max. 0,010	
P	max. 0,035	max. 0,030	max. 0,035	max. 0,020	max. 0,020	max. 0,020	max. 0,020		max. 0,030	max. 0,20	
Cr	8,0 10,0	7,5 9	11,0 12,5	8,00 9,00	8,50 9,50	8,5 9,5	11,00 11,30	11,5	11,0 13,0	10,00 12,50	11,5
Mo	0,90 1,20	2,0 2,6	0,8 1,2	0,85 1,05	0,30 0,60	0,90 1,10	0,40 0,60	0,15	0,80 1,20	0,25 0,60	0,15
W					1,50 2,00	0,90 1,10	1,60 1,90	2,6	0,80 1,20	1,50 2,50	2,6
Ni		max. 0,3	0,3 0,8	max. 0,40	max. 0,40	0,10 0,40	0,70 1,00			max. 0,50	
V		max. 0,05	0,25 0,35	0,18 0,25	0,15 0,25	0,18 0,25	0,15 0,25	0,2	0,20 0,30	0,15 0,30	0,20
Nb				0,06 0,10	0,04 0,09	0,060 0,100	0,04 0,09	0,07	max. 0,20	0,04 0,10	0,07
B		0,003 0,006			0,001 0,006	max. 0,006		0,004		max. 0,005	0,004
N				0,030 0,070	0,030 0,070	0,060 0,080	0,04 0,09	0,05		0,040 0,100	0,05
Cu	max. 0,30			max. 0,25						0,30 1,70	Co 2,5

Tabulka 2.8 Chemické složení austenitických ocelí [11]

Označení	Obsah prvků (hmotn. %)											
	C	Al	B	Co	Cr	Mo	Ni	N	Nb	Ti	V	W
podle DIN 17 006												
X6 CrNi 18 11	0,06				18		11					
X6 CrNiMo 17 13	0,06				17	2,2	13					
X8 CrNiNb 17 13	0,06				16		13		0,7			
X8 CrNiMoNb 16 16	0,06				16,5	1,8	16,5		0,7			
X6 CrNiWNb 16 16	0,06				16,5		16,5	0,1	1			3
X12 CrNiWTi 16 13	0,12				16		13,5			0,5		2,8
X8 CrNiMoVNb 16 13	0,06				16,5	1,30	13,5	0,1	0,7		0,7	
X10 NiCrMoTiB 15 15	0,10		0,005		15	1,2	15,5			0,4		
X8 CrNiMoBNb 16 16	0,06		0,07		16,5	1,8	16,5		0,7			
X40 CrNiCoNb 13 13	0,40			10	16,5	2	13		3			2,5
X12 CrCoNi 21 20	0,20			20	21	3	20	0,15	1			2,5
X40 CrCoNi 20 20	0,40			20	20	4	20		4			4
X10 NiCrAlTi 32 20	0,08	0,3			21		32			0,3		
X5 NiCrTi 26 15	0,04		0,005		15	1,2	26			2,1	0,3	

2.2.3 Žárovevné austenitické oceli

Austenitická struktura zajišťuje výrazný nárůst žárovevnostních a žáruvzdorných vlastností. Projevuje se vyšší pevností proti tečení, ale zároveň nižší mezí kluzu v širokém rozmezí teplot. Za nevýhody u austenitických ocelí bereme vyšší tepelnou roztažnost a menší tepelnou vodivost. Naopak vynikající odolnost proti korozi a koroznímu praskání. Využití austenitických žárovevných ocelí najdeme za teplot 550 až 700 °C. Pro získání vysoké žárovevnosti se přidávají legující prvky Mo, Nb, Ti, V, W, N, B, Co. Konkrétní složení jednotlivých austenitických ocelí najdeme v tab. 2.8. Mimo používání tradičních druhů chromniklových ocelí se využívají i Cr-Mn-Ni a také Cr-Mn oceli [11,13].

3 SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ ROTORŮ PARNÍCH TURBÍN

3.1 Historie svařování

Se svařováním se setkáváme již ve starověku, kdy první nálezy jsou datovány před 4 tisíci lety. Jedinou technikou, která byla používána pro spojování kovů od nejranejších pokusů až do 19. století, byla technika kovářského svařování. Teprve ke konci 19. století se začalo rozvíjet svařování plamenem a obloukové svařování. Velký rozmach vývoje metod svařování nastal především během první a druhé světové války. V druhé polovině 20. století byly vyvinuty speciální metody svařování využívající plasmu a laserového paprsku [14].

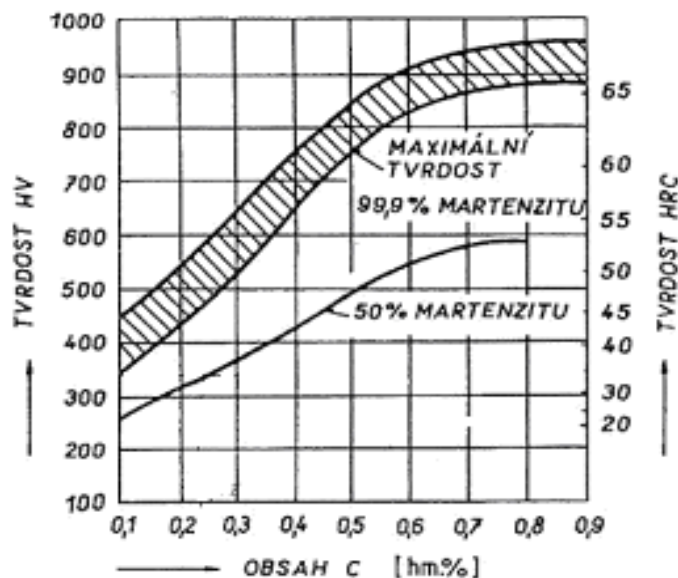
V dnešní době nahrazuje svařování ve výrobě některé ekonomicky náročnější odlitky a výkovky. Je jednou z důležitých výrobních technologií a její význam stále roste. S vývojem a využitím nových technologií svařování dochází k ovlivnění množství tepla vnesené svařováním do svarového spoje, snižování deformace svařenců a zbytkového napětí po svařování. Uvedené výhody a koncentrace energie v malé dopadové ploše umožňují technologií plasmy či laserového paprsku svařovat materiály, které jsou běžnými technologiemi nesvařitelné [14].

3.2 Svařitelnost materiálů

Lze ji definovat jako spojení dvou nebo více materiálů nerozebíratelným svarovým spojem. Jednotlivé chování materiálu při svařování je ovlivněno dalšími důležitými vlivy. Mezi ně patří způsob svařování, přídavný materiál nebo konstrukční složitost [15].

3.2.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí pro rotory

Uhlíkové oceli se podle dřívější ČSN normy řadily do tříd 10, 11, 12. Podle platné normy ČSN EN 10027-1 jsou pak zařazeny do skupiny nelegovaných ocelí. Vzhledem ke způsobu použití, fyzikálním a mechanickým vlastnostem jsou dále označovány symboly (S, P, L, E atd.). Svařitelnost uhlíkových ocelí je ovlivňována zejména jejich chemickým složením, kdy výrobci v některých případech zaručují pouze obsahy C, Mn, Si, P a S. Největší vliv pro svařitelnost má obsah uhlíku, protože s jeho zvyšováním roste tvrdost martenzitu, ale na druhou stranu se snižují plastické vlastnosti. Tvrdosti a procenta martenzitu v tepelně ovlivněné oblasti v závislosti na obsahu uhlíku ve svarovém spoji udává obr. 3.1 [13,15].



Obr. 3.1: Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře tepelně ovlivněné oblasti [15]

S rostoucím obsahem uhlíku nastávají problémy při svařování. Může docházet k zakalení svaru nebo vzniku studených trhlin v tepelně ovlivněné oblasti.

Vzhledem k uvedeným zkušenostem se obsah uhlíku omezuje hodnotou $C \leq 0,25$ %. Pro předcházení vzniku studených trhlin je zapotřebí zvolit správnou teplotu předehřevu, která je také závislá na obsahu uhlíku. Teploty předehřevu jsou zobrazeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Teplota předehřevu v závislosti na obsahu uhlíku [6]

Obsah uhlíku [hm. %]	Teplota předehřevu [°C]
0,20 až 0,30	100 až 150
0,30 až 0,45	150 až 275
0,45 až 0,80	275 až 425

Svařitelnost uhlíkových ocelí ovlivňují další legující prvky a nečistoty v ní obsažené. Nejčastěji jde o křemík, mangan, fosfor, síra, dusík, vodík, hliník a měď. Vliv uvedených přísad na svařitelnost vyjadřuje tzv. uhlíkový ekvivalent C_E . Je ukazatelem svařitelnosti při daném chemickém složení. Ekvivalent lze vypočítat několika způsoby, kdy podle ČSN EN 1011-2 [21] se hodnota C_E vypočítá, viz vzorec (3.1):

$$C_E = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [-] \quad (3.1)$$

Další výpočet lze provést dle návrhu Mezinárodního svářečského institutu, kdy vzorec (3.2) je platný pro ocel s $C < 0,25$ %:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad [-] \quad (3.2)$$

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu lze nalézt spoustu dalších vztahů odpovídajících specifickému chemickému složení ocelí [13,15].

3.2.2 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí pro rotory

Legující prvky značně ovlivňují svařitelnost oceli. Vlivem vyššího obsahu C, Mn, Cr, Mo a Ni, může docházet k nežádoucímu zakalení svarového spoje v tepelně ovlivněné oblasti. Při svařování se používají nejčastěji přídatné materiály stejných nebo podobných vlastností jako svařovaný kov. Obsah difuzního vodíku se snažíme mít co nejmenší, protože společně s rostoucím obsahem martenzitu je svár náchylnější ke vzniku studených trhlin. Před svařováním nízkolegovaných ocelí provádíme předehřev, u větších tloušťek pak i dohřev.

Po svaření obvykle následuje popouštění při teplotách 680 až 720 °C. Musíme dodržovat povolené rychlosti ohřevu a ochlazování, protože nízkolegované oceli jsou náchylné k tvorbě žíhacích trhlin. S vyšším obsahem legujících prvků a tloušťky svarů tato náchylnost roste. Všechny informace pro získání kvalitního svaru jsou zapsány v normě ČSN 05 0211 [22]. K svařování nízkolegovaných žárovevých ocelí používáme přídatný materiál podle meze pevnosti při tečení. I přesto, že jsou hodnoty přibližně totožné se základním materiálem, tak žárovevost svarových spojů je asi o 20 % nižší [13,15].

Pro svařování nízkolegovaných ocelí se používá metoda jako ručního obloukové svařování, svařování v ochranné atmosféře, svařování pod tavídkem, laserové svařování, svařování třením nebo elektrickým odporem [14,16].

3.2.3 Svařitelnost vysokolegovaných ocelí pro rotory

Do této skupiny řadíme oceli vysokopevné nebo ultravysokopevné s mezí skluzu nad 1200 MPa a pevností nad 1300 MPa. Jejich použití je možné u náročných konstrukcí, protože i přes velkou pevnost se vyznačují dobrou houževnatostí [13,14,16].

Martenzitické korozivzdorné oceli

Tyto oceli se svařují jak ve výchozím tak zušlechťeném stavu. Působením vodíku jsou ale náchylné k praskání. Správným předehřevem zobrazeným dle obsahu uhlíku v tabulce 3.2, předcházíme tomuto jevu [13,14,16].

Tabulka 3.2 Doporučené teploty předehřevu, tepelného příkonu a požadavky na tepelné zpracování [14]

Obsah uhlíku (%)	Teplota předehřevu (°C)	Měrný příkon svařování	Požadavky tepelného zpracování po svařování
0,10	min. 50	normální	nedoporučuje se
0,10 - 0,20	200 - 250	normální	pomalé chladnutí, nedoporučuje se
0,20 - 0,50	250 - 320	normální	tepelné zpracování požadované
nad 0,50	250 - 230	vysoký	tepelné zpracování požadované

Martenzitické korozivzdorné oceli mají zvýšenou vrubovou citlivost a náchylnost ke vzniku žíhacích trhlin. Proto je zapotřebí věnovat žíhání velkou pozornost.

Při svařování martenzitických korozivzdorných ocelí se používá přídatný materiál stejného chemického složení. Ve specifických případech je to i austenitický nebo duplexní materiál. Prvořadou úlohou tepelného zpracování je snížit tvrdost a pevnost, naopak zvýšit hodnoty tažnosti a houževnatosti. Docílíme toho popouštěním nebo vyžháním v oblasti teplot pod A₁ [13,14,16].

Feritické korozivzdorné oceli

V případě nižšího obsahu chrómu a vyššího obsahu uhlíku může ocel vykazovat alotropickou přeměnu, kdy v tepelně ovlivněné oblasti dojde k austenitizaci vlivem vzniku martenzitu. Proto je nutné použít vyšší teplotu předehřevu, který má ale tu nevýhodu, že způsobuje hrubnutí zrna. Svařování se může provádět s přídavným materiálem nebo bez něj. Přídavný materiál má stejné chemické složení jako základní materiál, nebo se používá austenitický materiál, popř. slitina niklu [13,14,16].

Austenitické korozivzdorné oceli

Při svařování austenitických ocelí s nízkým obsahem intersticiálních prvků dochází k hrubnutí zrna. U stabilizovaných ocelí tento proces nezaznamenáváme, z důvodu stabilizace titanem, niobem a tantalem. Nepříznivý je i výskyt δ -feritu, který snižuje houževnatost sváru. Svařování probíhá bez předehřevu a přídavný materiál má stejné chemické složení jako základní materiál [13,14,16].

Duplexní (dvoufázové) oceli

Při svařování základního i přidávaného materiálu je důležitá jejich metalurgická čistota. Tepelné zpracování se nepoužívá, s výjimkou přetavování plechů [13,14,16].

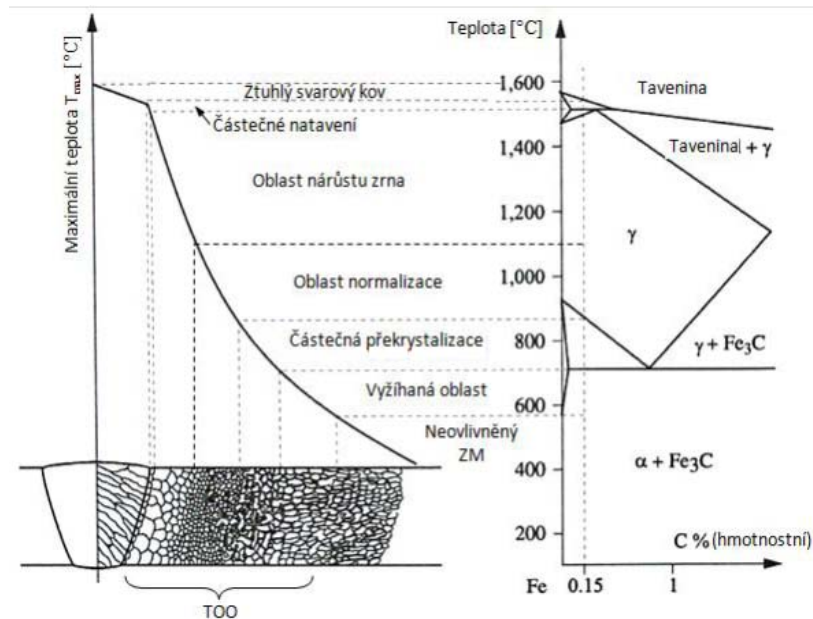
3.3 Vznik a tvorba svaru

3.3.1 Vznik svarového kovu

Vzniká natavením základního a přídavného materiálu, kdy při procesu dochází k promísení, které známe jako podíl nataveného základního materiálu. U kořene svaru je toto promísení vyšší než následné vrstvy svarového spoje. Při svařování různými metodami je tento podíl různý. Ruční obloukové svařování způsobí promísení 10 až 40 %, svařování pod tavidlem až 85 % a při elektrostruskovém svařování až 90 %. Objem svarové lázně je přímo úměrný proudu a napětí použitém při svařování. Svar začne krystalizovat, poklesne-li teplota pod teplotní křivku likvidu a to buď celulárně, nebo dendriticky, což záleží na chemickém složení a rychlosti ochlazování. Vytvořená mikrostruktura závisí zejména na jeho chemickém složení a parametrech svařování. Veškeré vlastnosti svarového spoje jsou horší než základního materiálu. Snaha technologů je tyto rozdíly minimalizovat. [15].

3.3.2 Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněnou oblastí je pojmenovaná oblast v okolí svarového kovu. Zde dochází ke změnám mikrostruktury a pozdějším změnám vlastností. Při svařování ocelí můžeme teplotní ovlivnění rozdělit na několik charakteristických pásem, uvedených na obr. 3.2. Při použití různých materiálů a metod svařování se tepelně ovlivněné oblasti liší jednotlivou šířkou. Hlavní změnou je pokles pevnosti a následné vady svarových spojů [15].



Obr. 3.2: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [15]

- Pásmo částečného natavení – linie přechodu z tepelně ovlivněné oblasti do svarového kovu
- Pásmo přehřátí – oblast nad teplotou A_3 kde pokračuje růst primárních zrn
- Pásmo normalizace – v této oblasti dochází k úplné přeměně $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$
- Pásmo částečné rekystalizace – mezi teplotami A_1 až A_3 kdy dochází k neúplné polymorfní přeměně

3.4 Metody svařování

Svařování je způsob zhotovení nerozebíratelného spojení kovů nebo slitin. Může se použít také přídavného materiálu, který se spojí s oběma konci materiálů a společně vytvoří svar.

Základní metody svařování:

1. Tavné
 - obloukové svařování – (bez ochranného plynu, pod tavidlem, v ochranném plynu)
 - plameno vé
 - elektrostruskové
 - elektronové
 - lasero vé
2. Tlakové
 - odporové
 - třecí
 - tlakové
 - kovářské
 - difuzní
 - ultrazvukové
 - za studena
 - explozí

Dále můžeme svařování rozdělit podle úrovně mechanizace procesu:

- ruční – provádí se ručně pomocí elektrody
- mechanizované – svařuje se pomocí mechanismů a strojů
- automatizované – určité úkony jsou automatizovány pro zrychlení svařování (zapálení oblouku, podávání elektrody, relativní přemísťování oblouku)
- automatické – veškeré úkony jsou řízeny a vykonávány zařízením podle určitého programu

Ke svařování rotorů parních turbín se využívají metody tavného svařování, tj. elektrickým obloukem pod tavídem s tavící nebo netavící elektrodou. Lze použít i další metody např. pomocí plamene plazmy, laserem. Vzhledem k velikosti jednotlivých částí rotorů a tloušťky svařovaných stěn, které dosahují někdy i stovky mm, je svařování obecně problematické [17,18].

3.4.1 Svařování plamenem

Nejstarší metoda, která využívá ke svařování tepelnou energii z hoření plamene. Ten vzniká pomocí směsi plynů. Využívá se směs kyslíku a hořlavého plynu, kterými jsou [17]:

- acetylen C_2H_2
- propan C_3H_8
- propan-butan $C_3H_8-C_4H_{10}$

Fyzikální vlastnosti použitých plynů se nachází v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3 Fyzikální vlastnosti energetických plynů [14]

Hořlavý plyn	Chemická značka	Hmotnost při 15,6 °C vzduchu = 1	Poměr objemu k hmotnosti $[m^3/kg]$	Max. teplota plamene $[°C]$	Spalovací poměr	Spalované teplo $[MJ/m^3]$		
						primární	sekundární	celkové
Acetylen	C_2H_2	0,906	0,91	3087	2,5	19	36	55
Propan	C_3H_8	1,52	0,54	2579	5,0	10	94	104
Metyl acetylen-propadien [MPS]	C_3H_4	1,48	0,55	2927	4,0	21	70	91
Propylen	C_3H_6	1,48	0,55	2900	4,5	16		
Přírodní plyn (metan)	CH_4	0,62	1,44	2538	2,0	0,4	37	37
Vodík	H_2	0,07	11,77	2660	0,5			12

Podle nastavených tlaků a hořáku můžeme nastavit plamen různé charakteristiky.

Rozdělení plamenů je:

Podle intenzity

- měkký – používá se pro svařování nízkotavitelných kovů a slitin, ale i legované oceli
- střední – lze s ním svařovat všechny běžné druhy materiálů
- ostrý – používá se při ohřevu nebo tepelném zpracování

Podle poměru směsi

- neutrální plamen – používá se pro běžné svařování ocelí, protože chemicky neovlivňuje základní a přídatný materiál

$$\frac{O_2}{C_2H_2} = 1,0 - 1,2 \quad (3.3)$$

- nauhličující plamen – výsledný svar vlivem přebytku acetyleny je tvrdý a křehký, používá se při navařování tvrdých vrstev, ale i svařování korozivzdorných ocelí

$$\frac{O_2}{C_2H_2} < 1 \quad (3.4)$$

- oxidační plamen – ve svaru, vlivem přebytku kyslíku, dochází k vypalování legujících prvků a tím snížení tažnosti a vrubové houževnatosti, používá se pro lehké kovy

$$\frac{O_2}{C_2H_2} > 1,2 \quad (3.5)$$

Přídavné materiály se používají stejného nebo podobného chemického složení. Prodávají se ve formě drátů s označením písmenem G a číslem, které udává minimální pevnost v tahu svarového kovu. Podle normy ČSN EN 1708 [22] je plamenné svařování určeno pro materiály do tloušťky 30 mm [14,16,17].

3.4.2 Svařování metodami MIG, MAG

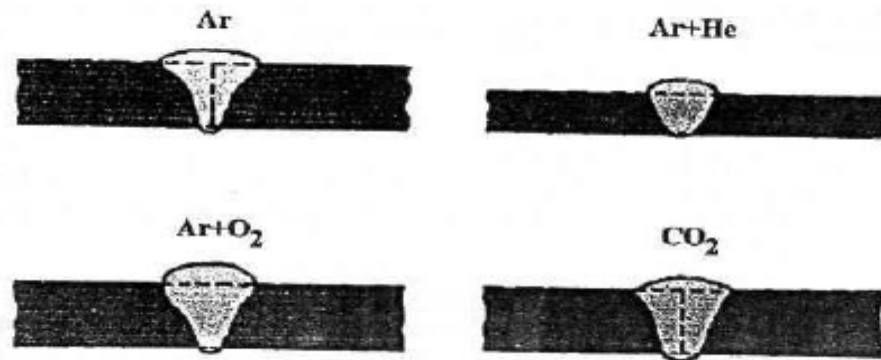
Jedná se o svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře tavící elektrodou. Tato metoda patří mezi velmi produktivní metody a výsledný svar je kvalitnější. U tohoto druhu rozdělujeme dvě metody:

- MAG (Metal Activegas welding) – ochranná atmosféra se vytváří aktivními plyny (CO_2 , Ar + CO_2 , Ar + O_2)
- MIG (Metal Inertgas welding) – ochranná atmosféra se vytváří inertními plyny (Argon, Helium)

Mezi tavící elektrodou (drátem) a základním materiálem hoří elektrický oblouk. Pomocí podávacího zařízení je do místa svarové lázně přiváděn přídavný materiál. Od okolního nepříznivého vlivu atmosféry je svar chráněn proudem inertního nebo aktivního plynu. V místě svařování dochází k přenosu kovu z elektrody na materiál a dochází k vytvoření svaru. Existuje několik způsobů tohoto přenosu – zkratový, kapkový, sprchový a impulzní.

Přídavný materiál je navinut na cívice, ze které se odvíjí pomocí podávacího zařízení. Svařovací drát je malého průměru od 0,6 do 1,6 mm a délky 3 až 30 metrů [8,10,18].

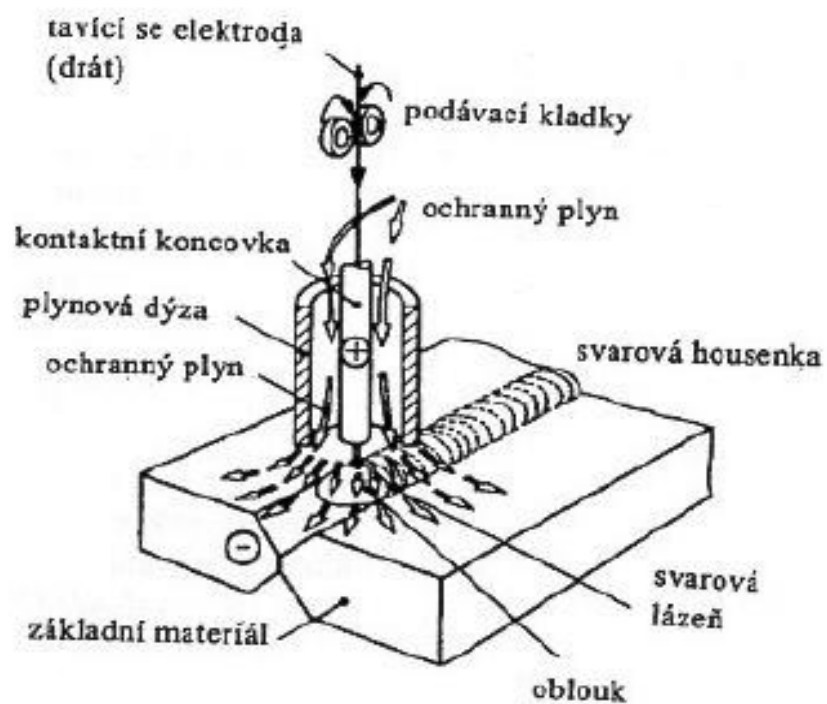
Používání směsí ochranných plynů argon nebo Ar + He jsou finančně náročné, proto se využívají jen u speciálního svařování, kde je nemůžeme nahradit oxidem uhlíčitým. Ten se používá u běžného svařování zejména konstrukčních uhlíkových ocelí. Vliv jednotlivých směsí ochranných plynů na svar je znázorněno na obr. 3.3 [14,16,17].



Obr. 3.3: Vliv ochranného plynu na tvar svaru [17]

Vzhledem k rozdílnému chemickému složení svařovaných materiálů se používají různé směsi ochranných plynů. Přehled jejich použití pro rozdílné materiály jsou uvedeny v tab. 3.4.

Pro svařování se používají svařovací poloautomaty a automaty. Svařování MIG/MAG jsou univerzální metody. Princip metod svařování je zobrazen na obr. 3.4 [17].



Obr. 3.4: Princip svařování MIG a MAG [12]

Tabulka 3.4 Ochranné plyny používané při svařování metodami MIG/MAG a WIG [8]

Druh a složení plynů a jejich směsí	Použití, výhody
Argon (Ar)	WIG, MIG, neželezné kovy, vysocelegované oceli
Oxid uhličitý (CO ₂)	svařování MAG nízkouhlíkových ocelí
Ar + 1,0 % O ₂	korozivzdorné, žáruvzdorné a žárovevné oceli, snížením viskozity tavné lázně dochází k zlepšení přechodu ve vrstvy svaru
Ar + 3,0 % O ₂	nízkouhlíkové a nízkolegované oceli, jemnozrnné oceli, výhody jako u Ar + 1,0 % O ₂
Ar + 15,0 % CO ₂ + 5,0 % O ₂	nízkouhlíkové a nízkolegované oceli, dociluje se maléhorozstřiku
Ar + 5,0 % CO ₂ + 2,0 % O ₂	nízkouhlíkové oceli, dociluje se dobré kresby povrchu svaru
Ar + 15,0 až 20,0 % O ₂	nízkouhlíkové, nízkolegované oceli, oceli s vyšším obsahem uhlíku, klidné hoření oblouku, pro malé tloušťky
Ar + 5,0 až 10,0 % H ₂	automatické svařování vysoko legovaných ocelí, dociluje se vyšší tekutost tavné lázně a záváru
Ar + 5,0 až 7,0 % H ₂	vysoko legované oceli, lepší stabilita plazmového paprsku

3.4.3 Svařování metodou WIG (TIG)

Svařování metodou WIG (TIG) se taktéž řadí mezi metody svařování v ochranné atmosféře. I zde se používají inertní plyny. Vzhledem k jejich vysoké ceně se metoda používá výhradně pro nejnáročnější konstrukce. Nejvíce se uplatňuje v jaderné energetice, letectví a kosmonautice, dále na svařování korozivzdorných a vysoko legovaných ocelí, ale i na hliník, hořčík, titan a jejich slitiny [14,16].

- WIG – (Wolfram Insertgas welding)
- TIG – (Tungsten Insertgas welding)

Elektrický oblouk hoří mezi netavicí se elektrodou z wolframu a základním materiálem. Ta nepřichází do styku se svarovou lázní. Přídavný materiál ve formě drátu nebo jiného profilu se přidává do oblouku ze strany buď ručně, nebo automaticky z cívky [17,18].

Hlavní předností této metody je dokonalé provaření kořene svaru a zároveň čistý a velmi kvalitní svarový spoj. Na tom má největší podíl proud inertního plynu. U svařování legovaných ocelí se používá čistý argon, aby byl svar co nejlépe ochráněn od působení atmosféry.

Používaná netavicí se elektroda obsahuje čistý wolfram nebo wolfram s určitým procentem přidávaného prvku. Ty jsou thorium, cerium, lanthan nebo zirkon. Druhy wolframových elektrod a hm % procento přidávaného prvku najdete v tab. 3.5 [14,16].

Tabulka 3.5 Druhy wolframových elektrod [7]

Označení elektrody	Barva	Legující prvky
WP	zelená	čistý wolfram 99,8 %
WT 10	žlutá	thorium 1 % ThO_2
WT 20	červená	thorium 2 % ThO_2
WT 30	fialová	thorium 3 % ThO_2
WT 40	oranžová	thorium 4 % ThO_2
WC 20	šedá	cerium 2,0 % CeO_2
WL 10	černá	lanthan 1,0 % LaO_2
WL 15	zlatá	lanthan 1,5 % LaO_2
WL 20	modrá	lanthan 2,0 % LaO_2
WZ 08	bílá	zirkon 0,8 % ZrO_2

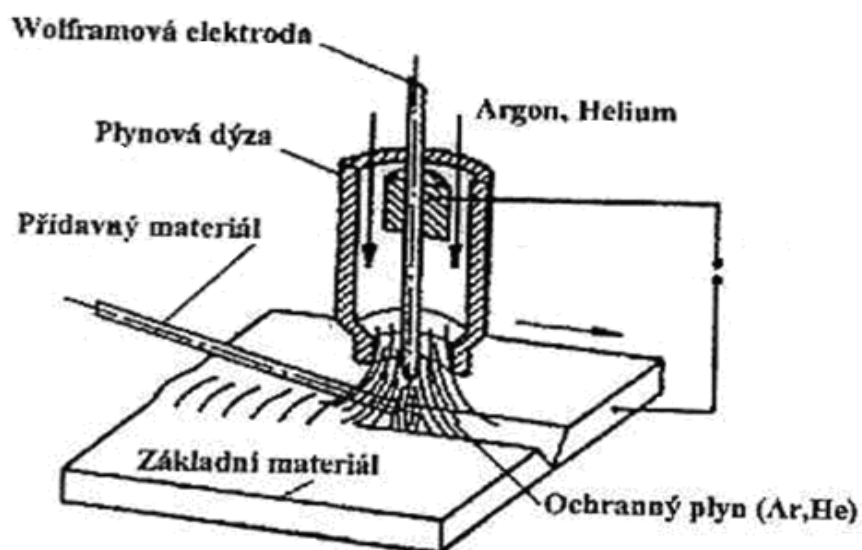
Nejvíce jsou používány elektrody WC 20 a WL 15. Průměry jsou od 0,5 až 6,4 mm. Vzdálenost hrotu (různých tvarů) od svařeného materiálu musí být 1 až 1,5 krát průměr elektrody [10].

Hořáky používané při svařování se rozdělují na dva základní druhy podle chlazení.

- chlazené proudícím plynem – maximální proud do 200 A
- chlazené průtokem vody – maximální proud do 500 A, zřídka i do 1000 A

Volbu hořáku podřizujeme druhu materiálu, který budeme svařovat. Pro materiály, které vytvářejí na povrchu nízkotavitelné oxidy, používáme stejnosměrný proud. Stabilní elektrický oblouk a výsledný svarový spoj má vyhovující vlastnosti. U materiálů vytvářejících na povrchu vysokotavitelné oxidy je zapotřebí použití střídavého proudu. Oxidová vrstva má výrazně vyšší teplotu tavení a zamezuje metalurgické spojení svaru. Střídavý proud působí jako čistící prvek pro odstranění této vrstvy.

Svařování metodou WIG zajišťuje výjimečně čisté a vysoce kvalitní svary. Lze s ní svařovat téměř všechny kovy. Oproti metodám MIG/MAG je však méně účinnější. Princip metody najdete na obr. 3.5 [8,17].



Obr. 3.5: Princip svařování WIG [12]

3.4.4 Svařování plazmatem

Svařování probíhá pomocí plazmového paprsku. Jde o proud silně ionizovaného plynu. Používají se jednoatomové plyny (argon, helium) nebo dvouatomové plyny (dusík, vodík a kyslík). Nejprve proběhne disociace plynu, kdy dochází k rozložení molekul plynu na atomy. Stupeň následné ionizace je závislý na teplotě. Asi při 17 000°C vzniká plazma. Využívá se tam, kde nemohou být splněny podmínky kvality a vakuové těsnosti sváru, zejména u vysokolegované žárovevných a korozivzdorných ocelí. Při svařování plazmatem se dosahuje vysoké rychlosti svařování a produktivity při minimálním ovlivnění základního materiálu [14,16,17].

3.4.5 Laserové svařování

Jedná se o druh svařování, při kterém dochází ke spojení materiálů s využitím tepla. To vzniká působením koncentrovaného koherentního světelného záření na povrch materiálů. Laserový paprsek je usměrňován na velmi malou plochu s nejvyšší koncentrací energie. Teploty dosahují až 15 000°C [14,16,17].

Laserové zařízení se skládá ze dvou hlavních částí, z rezonátoru a optické soustavy. V rezonátoru dochází v aktivním prostředí k vyřazování fotonů. Optická soustava usměrňuje světelný tok do požadovaného místa. Ke svařování se používají plynové lasery, kde je aktivní prostředí tvořeno plynem nebo směsí plynů. K buzení se nejčastěji používá doutnavý výboj. Podle použitého plynu, můžeme rozdělit plynové lasery:

- helium neonový laser
- argonový iontový laser
- helium - kadmiový laser
- dusíkový laser
- CO₂ – nejvýkonnější plynové lasery, určené výhradně pro svařování

Při svařování dochází k ohřevu materiálu přeměnou světelné energie na tepelnou. Na povrchu jsou vypařovány tzv. aktivní prvky a tím dochází k určitému čištění kovu. Výsledkem je, že přetavený materiál je čistější než základní materiál [17].

3.5 Metalurgie svaru

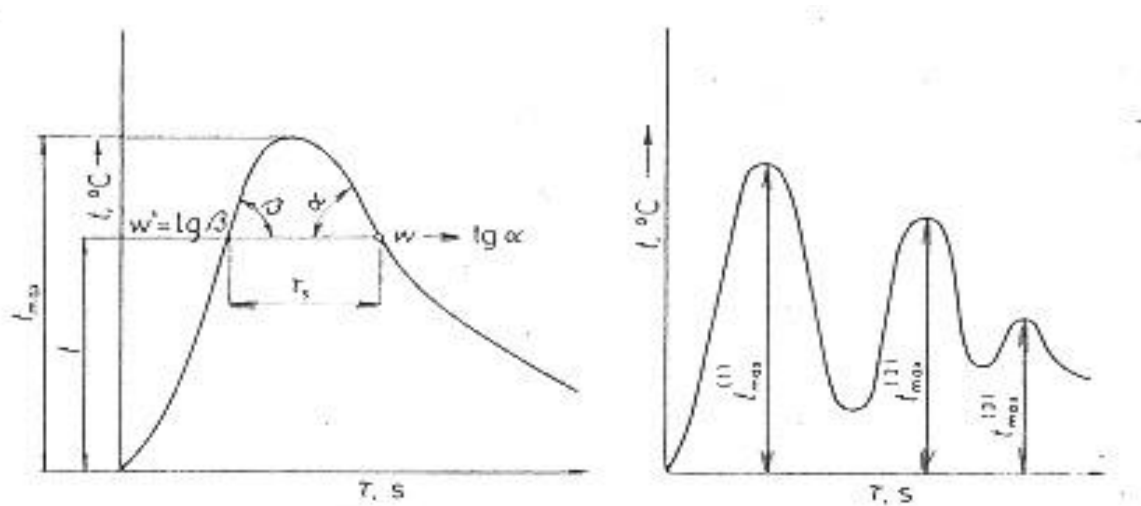
3.5.1 Teplotní cyklus svařování

Působením tepla při svařování, dochází krátkodobě k místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty. Vlivem tepelné vodivosti se ohřívá i základní materiál, u kterého můžeme důsledkem působení vysokých teplot pozorovat změny:

- fázové přeměny
- fyzikálně chemické reakce
- změny struktury v oblasti svarového spoje
- změny objemu, které ve svarovém spoji způsobují vnitřní napětí a deformace

Výše uvedené změny závisí na vlastnostech základního materiálu (fyzikálních a chemických), metodě svařování.

Teplotní cyklus svařování udává změnu teploty v závislosti na čase v daném bodě svařovaného spoje, především v tepelně ovlivněné oblasti viz obr. 3.6 [15,19].

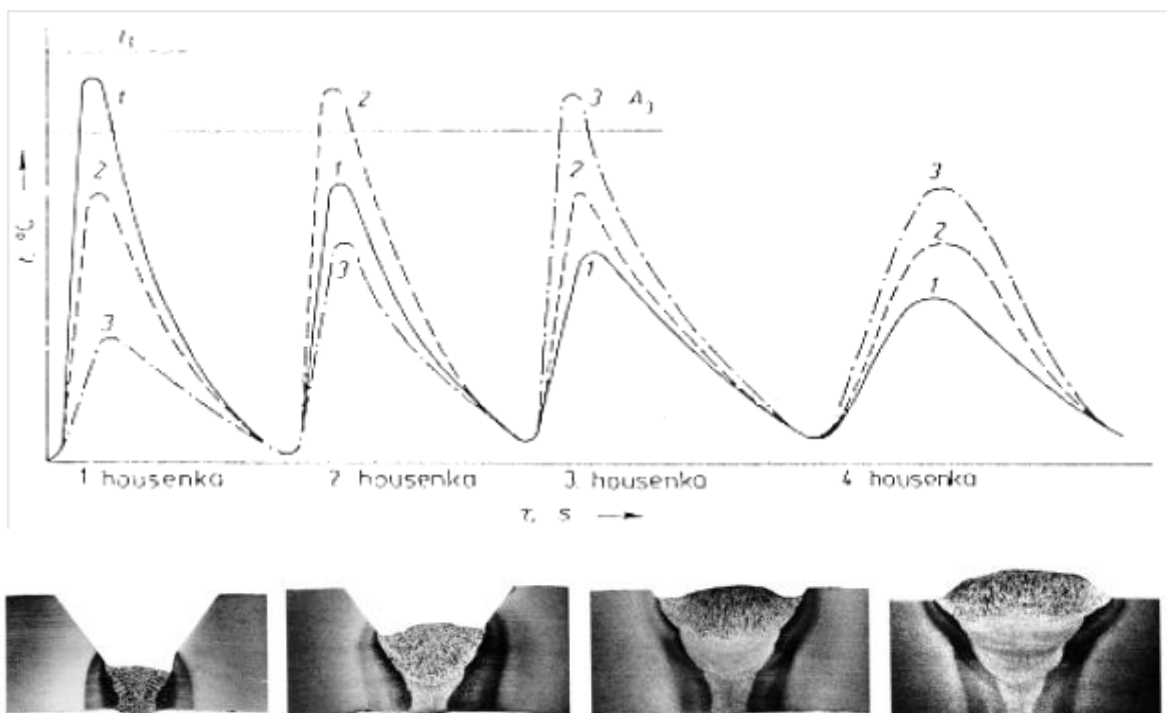


Obr. 3.6: Teplotní cyklus [15]

Vlivem teplotní cyklu dochází ke změnám struktury a vlastností materiálu, které hodnotíme podle následujících charakteristik:

- čas ohřevu na maximální teplotu, nebo rychlost ohřevu
- maximální teplota cyklu T_{max}
- doba výdrže na dané teplotě (např. A_{c1} , A_{c3} atp)
- rychlost ochlazování

Průběh teplotních cyklů čtyřvrstvého svaru najdeme na obr. 3.7



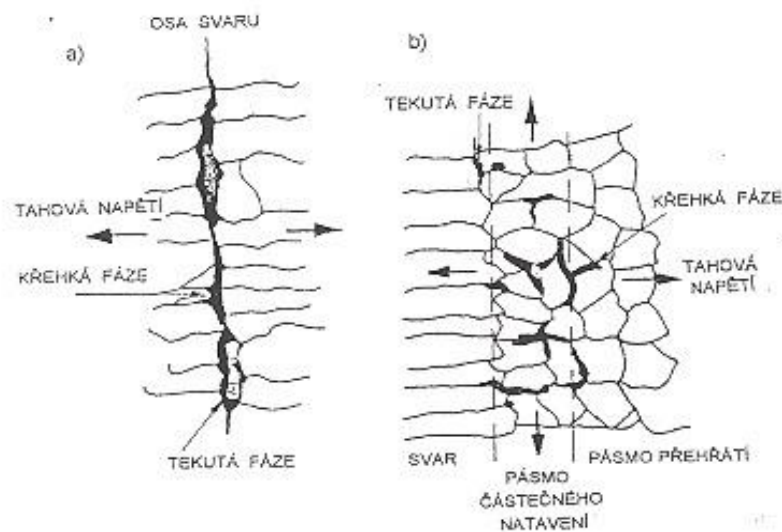
Obr. 3.7: Průběh teplotních cyklů čtyřvrstvého svaru [15]

3.6 Trhliny ve svarovém spoji

3.6.1 Teplé trhliny

Teplé trhliny (trhliny za horka, horké trhliny) vznikají při razantním ochlazení svarových spojů. Tyto trhliny lze rozdělit na:

- Krystalizační – vznikají v průběhu krystalizace, znázorněné na obr. 3.8
- Likvační – vznikají ve vysoce ohřátém tepelně ovlivněné oblasti při vícevrstevném svařování
- Polygonizační – vznikají za nižších teplot a vedou k poklesu tažnosti



Obr. 3.8: Oblast vzniku krystalizačních trhlin [15]

U ocelí hodnotíme náchylnost k horkým trhlinám v tepelně ovlivněné oblasti. Můžeme ji určit parametrickou rovnicí (3.6) H.C.S.:

$$H. C. S. = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V} \quad [-] \quad (3.6)$$

Vzniku teplých trhlin můžeme zabránit:

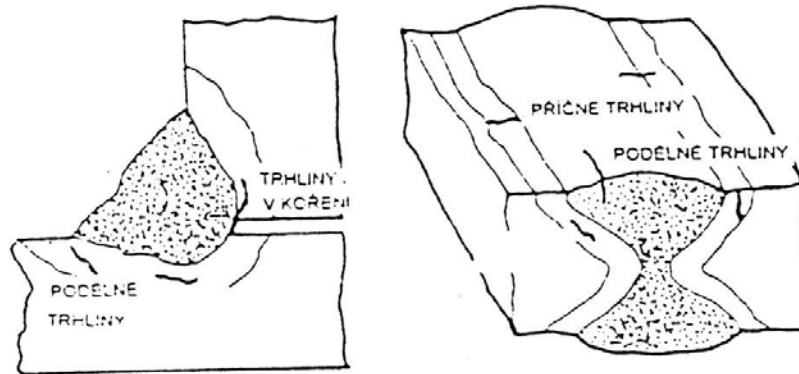
- Snížením měrného příkonu svařování
- Použitím přídavného materiálu vysoké čistoty
- Omezit deformace a napětí použitím vhodných technik svařování, tvaru svarového spoje, předehřevu
- Nepoužívat housenky s velkým tvarovým koeficientem svaru a malým průřezem, zejména v kořenové oblasti [15,19]

3.6.2 Studené trhliny

Nejčastěji se vyskytují v podhousenkové oblasti svarového spoje. Jedná se o trhliny způsobené vodíkem při nižších teplotách pod 200 °C. Hlavními příčinami jejího vzniku je:

- Přítomnost vodíku ve svarovém spoji
- Přítomnost struktury citlivé na účinek vodíku
- Přítomnost tahových zbytkových napětí

Studené trhliny se mohou vyskytovat v kořenové oblasti nebo v koncových oblastech, jak je uvedeno Znárodně je to na obr. 3.9.



Obr. 3.9: Typy studených trhlín [6]

K hodnocení svarů proti náchylnosti ke studeným trhlinám používáme empirického vztahu. Ten se nazývá parametr praskání. Vyjádřen je vztahy (3.7, 3.8):

$$P_W = P_{CM} + \frac{H_{D(GI)}}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4} \quad [\%] \quad (3.7)$$

$$K = K_0 \cdot h \quad \left[\frac{10N}{mm^2} \right] \quad (3.8)$$

kde: P_{cm} – uhlíkový ekvivalent

K – intenzita tuhosti

K_0 – měrná tuhost

$H_{D(GI)}$ – obsah difusního vodíku

h – tloušťka svařovaného materiálu v mm

Vzniku trhlín za studena předejdeme:

- Používání nízkovodíkové metody svařování
- Pečlivé sušení přídavných materiálů před použitím
- Zabránit navlhnutí přídavných materiálů v průběhu skladování a manipulace
- Aplikovat předehřev, dohřev, používat vyšší měrný příkon svařování
- Minimalizovat vznik zbytkových napětí po svařování volbou vhodné techniky svařování
- Vyvarovat se ostrých vad zejména v kořenové oblasti jako jsou neprůvary, studené spoje, zápaly, které jsou koncentrací napětí a iniciací trhlín

3.6.3 Lamelární trhliny

Vznikají v tepelně ovlivněné oblasti vlivem namáhání materiálu. Jejich tvar je kaskádovitý a většinou jsou rovnoběžné s povrchem. Mohou vznik v důsledcích následujících vlivů [15,19]:

- Přítomnost velkého počtu plochých rozválcovaných plastických vměstků
- Plastické vlastnosti oceli
- Způsob svařování
- Konstrukce svarového spoje
- Množství difuzního vodíku
- Tahové namáhání

Použitím empirické rovnice zjistíme náchylnost svarového spoje k vzniku lamelárních trhlin. Parametr dle množství vměstků (3.9):

$$P_l = P_{CM} + \frac{H_{D(g)}}{60} + \frac{l}{1000} \quad (3.9)$$

kde: P_{CM} – uhlíkový ekvivalent

$H_{D(g)}$ – obsah difuzního vodíku

S – obsah síry v hm %

l – součet délek plošných vměstků v μm^2

K zamezení vzniku lamelárních trhlin musíme:

- Používat základní materiály se zaručenou koncentrací
- Čistota oceli, snížení podílu difuzního vodíku
- Změnou tvaru spoje
- Použití polštářování
- Použití techniky, která vytváří minimální napětí ve svaru

3.6.4 Žihací trhliny

Vznikají při tepelném zpracování, kdy je při vysoká rychlost ohřevu na žihací teploty.

Mohou vnikat:

- za nízkých teplot kolem 200 až 300 °C,
- v oblasti žihacích teplot kolem 600 až 650 °C
- při plátování austenitickou páskou

Náchylnost ke vzniku žihacích trhlin udává tzv. parametr praskavosti (3.10):

$$P_{SR} = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2 \quad (3.10)$$

Citlivost je v případě, že $P_{SR} > 0$.

Příčiny náchylnosti lze minimalizovat snížením rychlosti ohřevu v oblasti teplot do 400 °C. Další možností je mezi svařováním a žiháním nechat svarový spoj při mezioperační teplotě 150 až 300 °C [15,19].

4 POHLED DO BUDOUCNOSTI ZDOKONALOVÁNÍ PARNÍCH TURBÍN

Výzvou pro následující léta pro techniky, inženýry a konstruktéry hlavně do budoucnosti je další zdokonalování účinnosti turbín, materiálu při výrobě a progresivity při svařování.

Za zmínku stojí zrození nejvýkonnější parní turbíny nesoucí název „ARABELLE“. Detailní pohled na rotor znázorňuje (obr. 4.1). Vyrobená bude společností Alstom pro francouzskou jadernou elektrárnu Flamanville 3. Doba zahájení provozu se odsouvá z roku 2012 na rok 2014. Výkon turbíny má mít úctyhodných 1 750 MW a bude se skládat ze čtyř modulů. Každý z nich bude mít průměr sedm metrů a celková hmotnost bude činit 3 000 tun [20].



Obr. 4. 1: Arabelle parní turbína. Detailní pohled na rotor nízkotlaké akční parní turbíny [20]

ZÁVĚR

S rozvíjejícím se průmyslem a životní úrovní lidské společnosti dochází k vyšší poptávce po elektrické energii. Zvyšující se automatizací průmyslu a zároveň i větší spotřebou elektrické energie v domácnostech, je vyvíjen tlak na množství vyráběných celků a zároveň i na jejich ekonomickou výrobu. V době, kdy postupují nové technologie mílovými kroky kupředu, stále jsou a budou hrát parní turbíny klíčovou roli při výrobě elektrické energie. Pro uspokojení zvyšující se poptávky této energie se rozšiřují stávající elektrárny nebo vznikají zcela nové energetické celky, ve kterých je jednou ze součástí právě ta nejmodernější parní turbína. Při její výrobě jsou použity nejnovější poznatky z metalurgie, technologie svařování a obrábění. Využitím uvedených poznatků jsou dány předpoklady kvality, spolehlivosti a maximálního využití vlastnosti páry, která prochází důmyslnou soustavou lopatek turbíny.

Ve své bakalářské práci jsem se snažil shrnout vývoj a vlastnosti používaných materiálů při výrobě rotorů parních turbín. Popsal jsem způsoby technologie svařování a zároveň si také rozšířil vědomosti v dané problematice, která bude mít stále přední místo v ekonomice státu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KLÁG, Josef. *Parní turbíny s dodatkem o plynových turbínách*. 2. vyd. Praha: Jednota Československých matematiků a fyziků, 1936. 276 s.
- [2] Uhlí. [online]. [cit. 2012-03-1]. Dostupné z WWW: <http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.2.1>
- [3] GRUBER, Josef. *Ve stínu Jamese Watta*. [online]. 10. 2011 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z WWW: <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/kotle.pdf>
- [4] GRUBER, Josef. *Otcové parních turbín*. [online]. 10. 2010 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z WWW: <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/steamturb1.pdf>
- [5] *Parní stroj – úžasná síla zdroj*. [online]. 2011 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.li.vutbr.cz/data/files/parni-stroj-378.ppt>>
- [6] *Parní stroj*. [online]. 2011 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.parnistroj.cz/web.org/historie.html>>
- [7] GRUBER, Josef. *Otcové parních turbín II*. [online]. 11. 2010 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z WWW: <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/steamturb2.pdf>
- [8] ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. 248 s. ISBN: 978-80-7043-862-6.
- [9] *Parní turbíny*. [online]. 27.11. 2010 [cit. 2012-03-1]. Dostupné z WWW: <<http://strojirenstvi.studentske.cz/2010/11/27-parni-turbiny.html>>
- [10] KOUTSKÝ, Jaroslav. *Slitinové oceli pro energetické strojírenství*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981. 340 s. ISBN: 04-416-81.
- [11] HERNAS, A., JOŠTA, Z., TVRDÝ, M., ČÍŽEK, L., PURMENSKÝ, J. *Žárupevné oceli a slitiny*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, 2009. 389 s. ISBN: 978-80-248-2187-0.
- [12] MACHALA, Jan. *Struktura a vlastnosti svarového spoje rotoru parní turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.
- [13] PILOUS, Václav. Materiály a jejich svařitelnost In: *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2002, s. 17-72. ISBN 80-85771-97-7.
- [14] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vydanie. Bratislava: STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6.

- [15] KOUKAL, Jaroslav, ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I.* dotisk 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2009. 136 str. ISBN 978-80-248-0870-3.
- [16] HRIVŇÁK, Ivan. *Zvariteľnosť ocelí.* 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979. 240 s. MDT 621. 791.011.
- [17] KOVAŘÍK, R., ČERNÝ, F. *Technologie svařování.* 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. 186 s. ISBN: 80-7082-697-5.
- [18] BARTÁK, Jiří. Svařování pod tavidlem, In: *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory.* 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2002, s. 127-134. ISBN80-85771-97-7.
- [19] KOPEC, Bernard a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí.* 1. vyd. Brno: CERM, 2008. 571 s. ISBN: 978-80-7204-591-4.
- [20] ALSTOM, Arabelle – nejvýkonnější parní turbína na světě, [online]. 16.10.2009 [cit. 2012 – 05 - 20]. Dostupné z WWW:< <http://www.allforpower.cz/clanek/arabelle-nejvykonnejsi-parni-turbina-na-svete/>>
- [21] ČSN EN 1011-2 (052210) – Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů
Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí
- [22] ČSN 05 0211 – Svařování – Tepelné a mechanické zpracování svarových spojů nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Všeobecné zásady
- [23] ČSN EN 1708 (050026) – Svařování – Detaily základních svarových spojů oceli –
Část 1: Tlakové součásti