



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA SVAŘOVÁNÍ ROTORU TURBÍNY

WELDING ANALYSIS OF TURBINE ROTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUDĚK MINÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Luděk Minář

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:

Analýza svařování rotoru turbíny

v anglickém jazyce:

Welding analysis of turbine rotor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Energetika je nosným oborem celé ekonomiky. Důležitost spolehlivosti energetických zařízení je velmi vysoká a výroba turbín je z hlediska složitosti prvořadá. Svařované rotory musí vyhovovat dlouhodobé životnosti zařízení.

Cíle bakalářské práce:

Provedení analýzy požadavků materiálových charakteristik turbínových ocelí. Stanovení vhodných metod a postupů svařování rotorů. Výběr vhodných přídavných materiálů. Analýza provozních rizik svarových spojů. Zpracování WPS.

Seznam odborné literatury:

1. DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
2. PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009
3. BARTÁK, J. Výroba a aplikované inženýrství, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5
7. 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 2010/11.


V Brně, dne 18.11.2010

L.S.





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

MINÁŘ Luděk: Analýza svařování rotoru turbíny.

Rešeršní bakalářská práce analyzuje možnosti svařování rotorů parních turbín s důrazem na efektivnost, produktivitu a ekonomičnost svarového postupu. Práce hodnotí možný výskyt defektů ve svarovém spoji a snahu jim předejít. Na základě literárních zdrojů je uvedena charakteristika materiálů turbín odolávajícím vysokým provozním teplotám. Svařovaný koncept rotoru je vyzdvihnut, protože má řadu výhod při užití u velkých parních turbín pro energetiku.

Klíčová slova: Turbína, svarový spoj, svařování pod tavidlem, žárupevná ocel

ABSTRACT

MINÁŘ Luděk: Welding analysis of turbine rotor.

A research bachelor thesis analyzes possibilities of welding on turbine rotors with emphasis on efficiency, productivity and economy of welding procedure. The work evaluates presence of failures in weld joint and effort to prevent them. Characteristics of turbine materials, which resist to high service temperatures are presented on the literature sources basis. Concept of welded turbine rotor is preferred, because it has many advantages in using big steam turbines for power industry.

Keywords: Turbine, weld joint, submerged arc welding, heat resisting steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MINÁŘ Luděk: *Analýza svařování rotoru turbíny*. Brno, 2011. 35 s., CD. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí 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 20.5.2011

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Čestné prohlášení

Bibliografická citace

Poděkování

Obsah

	str.
1 ÚVOD	10
2 DRUHY ROTORŮ	11
2.1 Celokovaný rotor.....	11
2.2 Složený rotor.....	11
2.3 Svařovaný rotor.....	11
2.3.1 Výhody konceptu svařovaného rotoru.....	12
3 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY TURBÍNOVÝCH OCELÍ	14
3.1 Korozivzdorné a žárovzdorné oceli.....	14
3.1.1 Korozivzdorné oceli.....	15
3.1.2 Žárovzdorné oceli.....	16
3.2 Žárupevné oceli	16
3.2.1 Mechanismy zpevnění.....	17
3.2.2 Degradáční procesy.....	20
3.2.3 Dělení žárupevných ocelí.....	20
3.3 Svařitelnost žárupevných ocelí.....	22
4 SVAŘOVÁNÍ ROTORŮ	24
4.1 Návrh technologie svařování.....	24
4.2 Svařování pod tavidlem.....	25
4.2.1 Svařování do úzkého úkosu.....	28
4.3 Svařování metodou WIG.....	28
4.4 Navařování.....	29
4.5 Tepeln� zpracování.....	30
5 RIZIKA SVAROVÝCH SPOJŮ	32
5.1 Trhliny za horka.....	32
5.1.1 Krystalizační trhliny.....	32
5.1.2 Likvační trhliny.....	33
5.1.3 Polygonizační trhliny.....	33
5.2 Studen� trhliny.....	33
5.3 Lamelární trhliny.....	33
5.4 Ź�hac� trhliny.....	34
5.5 Korozní praskání.....	34
6 ZÁVĚR	35

Seznam použité literatury

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam p loh

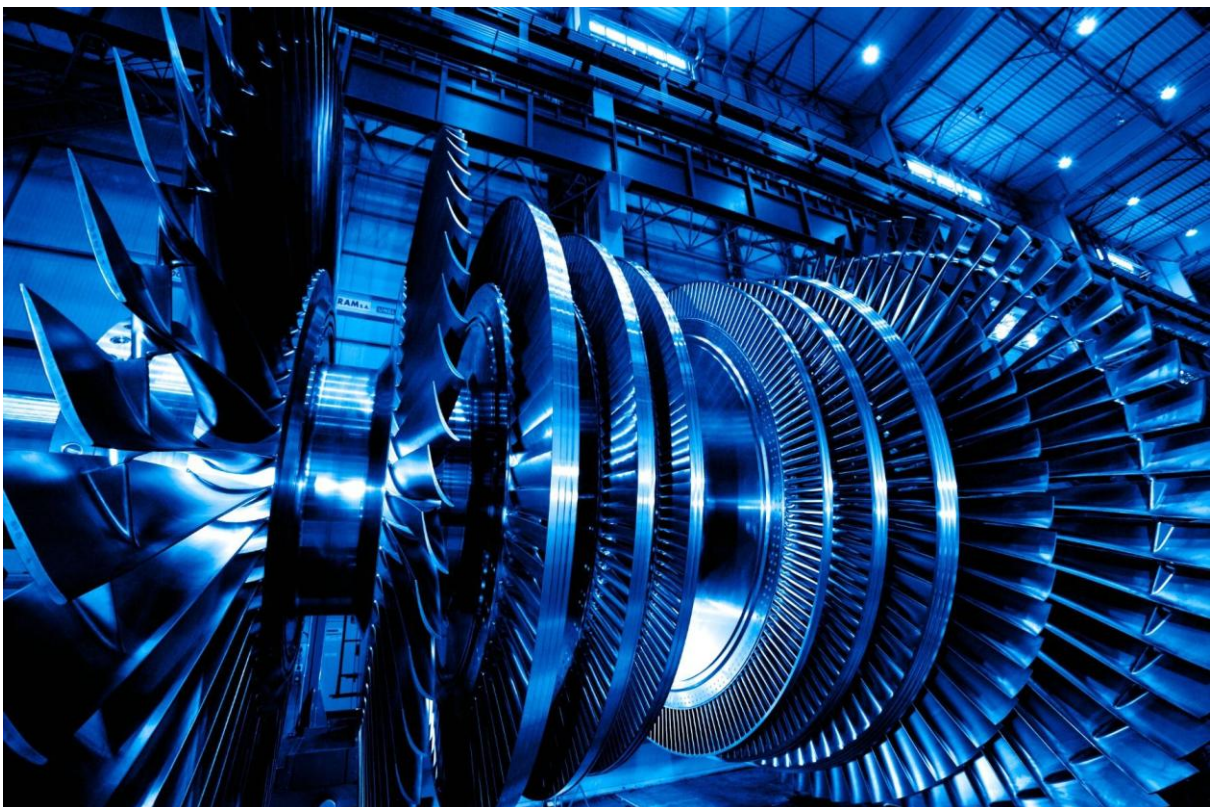
1 ÚVOD [2][23]

Turbína je rotační stroj, který se skládá z lopatkových kol upevněných na společném hřídeli. Turbína přeměňuje tepelnou a kinetickou energii tekutiny proudící mezi lopatkovými koly na rotační pohyb hřídele.

Malé turbíny se vyrábějí v jednodílném provedení z tvářeného rotoru, který třískovým obráběním dostane finální podobu. Hlavním použitím malých turbín jsou průmyslové aplikace. Větší turbíny jsou složeny z kovaného rotoru, na který se nasazují lopatky nebo z více tvářených rotorových částí, které se pomocí svařování spojují v jeden celistvý rotor. Velké turbíny dosahují značných výkonů a těžištěm jejich použití je zejména výroba elektřiny.

Novodobá lidská společnost spotřebuje velké množství elektrické energie. Elektrická energie se z největší míry vyrábí v generátorech, které jsou spojeny s parní turbínou. Parní turbína je tedy významný mechanický stroj, který ovlivňuje efektivitu a produktivitu při výrobě elektrické energie. Snahou výrobců velkých parních turbín je zvyšovat jejich výkon a efektivitu. Ke zvýšení výkonu a efektivitě přispívá svařovaný koncept rotoru. Svařování umožňuje použít materiál s optimálními vlastnostmi pro jednotlivé části rotoru při daných provozních podmínkách. Rotor velkých turbín zpravidla sestává z vysokotlaké, středotlaké a nízkotlaké části.

Pevnost každé svařované konstrukce je citlivá na kvalitu svarového spoje. Svarový spoj je místem možného vzniku defektů, které významně snižují mechanické vlastnosti. Turbína je velmi namáhané zařízení, a proto musí být kvalita svarového spoje dokonalá.



Obr 1.1 turbína Arabelle společnosti Alstom [2]

2 DRUHY ROTORŮ [4][10][21]

Rotory turbín jsou různorodé, lišící se ve velikosti, v průměru lopatkových kol, počtu oběžných lopatkových kol, maximálními provozními otáčkami, teplotou páry a dalšími parametry. Standardně je lze dělit do dvou základních skupin. A to na rotory pro akční a reakční turbíny. Rotory reakčních turbín jsou zpravidla jednodílné nebo svařované. Rotory akčních turbín lze dále rozdělit na jednodílný rotor, složený rotor a kombinaci celistvého a složeného rotoru.

2.1 Jednodílný rotor

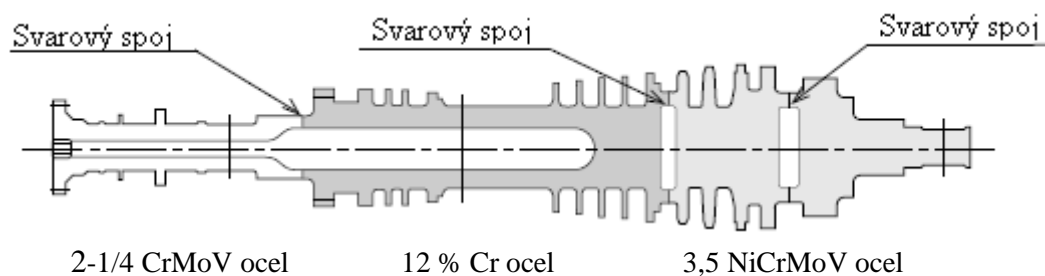
Jednodílný rotor je celý kován z jednoho kusu. Tento rotor je po rozsáhlém testování dále zpracováván třískovým obráběním, pomocí kterého se zhotoví požadovaný tvar lopatkových kol a kompletně tvar celého rotoru. Volba, zda zvolit jednodílný rotor, závisí zejména na rozběhu stroje. Při rozběhu se teplota a zatížení postupně zvyšuje vlivem proudící horké páry. Horká pára reaguje se studeným rotorem a intenzivně ho zahřívá. Teplotní namáhání způsobené rozdílem teploty povrchu a středu rotoru je hlavním kritériem, na základě kterého se vyrábí jednodílný rotor. Mezi faktory ovlivňující napětí patří teplota páry, geometrie rotoru a obzvláště doba rozběhu. Jakmile uvažované pracovní podmínky přesáhnou limitní hodnoty pro jednodílný rotor, na řadu přichází volba rotoru svařovaného.

2.2 Složený rotor

Tento typ rotoru se skládá ze samotného rotoru, na který se nasazují další funkční součásti (lopatky, lopatková kola). Kovaný rotor se třískově obrábí na požadovaný tvar. Po finálních operacích se na rotoru vytváří obvodová drážka pro nasazení lopatek. Tato drážka je velmi citlivým místem rotoru a proto vyžaduje speciální péči. Nejčastěji se vytváří stromečkový nebo rybinový profil drážky. Souběžně se vyrábí lopatky a lopatková kola. Lopatky se posléze jednotlivě nasazují do drážky, která je v jednom místě speciálně vyfrézována tak, aby se do ní lopatky daly lehce nasadit. Po nasazení a umístění všech lopatek na své místo se nasadí poslední lopatka se specifickým ukotvovacím systémem. Jsou-li lopatky vystaveny velkému namáhání a hrozí jejich rozkmitání, používá se k jejich vzájemnému ukotvení drát nebo věnec, do kterého se upínají konce lopatek.

2.3 Svařovaný rotor

Svařovaný rotor se začal používat od poloviny třicátých let 20. století. Jednotlivé kované díly se spojují svařováním v jeden celistvý rotor. Tím se zamezilo rizikům při výrobě velkých celokovaných rotorů. Každá relativně menší část rotoru se totiž může podrobit testování mnohem snadněji než celokovaný velký rotor. Při výrobě turbín pro jadernou energetiku mohou rotory vážit i několik stovek tun. S takto těžkými rotory má svařovaný rotor mnohé výhody. Jednotlivé svařované části mají nižší hmotnost a mohou být pečlivěji vykovány než celý velký díl. Vyšší metalurgická přesnost se dá mnohem lépe dodržet při výrobě menších dílů.



Obr. 2.1 Konstrukce svařovaného rotoru [21]

Tab. č. 2.1 Jednodílný a svařovaný rotor [21]

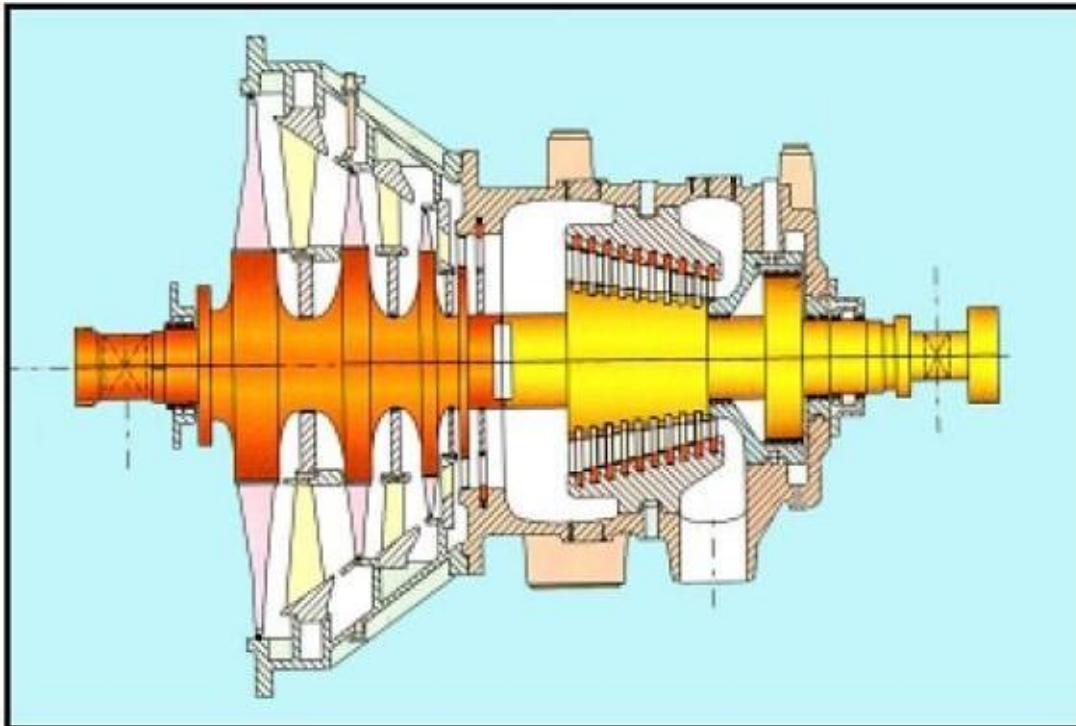
	Jednodílný rotor	Svařovaný rotor	Vlastnosti svařovaného rotoru
Vysoko- středo- nízkotlaký rotor	 Materiál: 2-1/4 CrMoV ocel	 Svarové spoje Materiály: Vysokoteplotní zóna: 12 % Cr ocel Nízkoteplotní zóna: 3,5 NiCrMoV ocel	Použití 12% Cr oceli ve vysokoteplotní části a 3,5 NiCrMoV ocel pro část vyžadující velkou houževnatost má za následek zvýšení výkonu a rychlejší výrobu. Velké dutiny uvnitř rotoru umožňují rychlé startovací operace
Vysoko- středotlaký rotor	 Navařování Materiál: 12%Cr ocel	 Materiály: Vysokoteplotní zóna: 12% Cr ocel Nízkoteplotní zóna: 2-1/4 CrMoV ocel	Použití 12% Cr oceli jen ve vysokoteplotní zóně má za následek zvýšení výkonu a zkrácení doby výroby.
Velký nízkotlaký rotor	 Materiál: 3,5 NiCrMoV ocel	 Materiál: 3,5 NiCrMoV ocel	Použití malých částí má za následek podstatné zkrácení doby výroby

2.3.1 Výhody konceptu svařovaného rotoru

Výhodou svařovaného rotoru oproti celokovanému rotoru je optimalizování materiálových požadavků, ekonomicky zajímavější řešení a rozšířené možnosti pro volbu tvářecích materiálů, ze kterých se rotor svařuje. Svařování rotoru skládajícího se z více částí je výhodné proto, že se tlak a teplota páry v závislosti na délce turbíny mění. Svařování totiž umožňuje použít pro každou část materiály, které nejlépe splňují požadavky dány tepelným a mechanickým zatížením. Zatím žádná slitina, ze které by se celistvý rotor dal kovat, nespĺňuje všechny materiálové vlastnosti ideálně. Tato technologie se používá i při opravách a servisních pracích pro svařování úplně nových částí ke starým rotorům, které byly poškozeny během provozu.

Celokované rotory se mohou vyrobit plné nebo s malým otvorem. Svařované rotory mohou být vyrobeny s velkým vnitřním otvorem. Tloušťka stěny svarového spoje musí být dostatečná, aby byla schopná přenést požadované zatížení. Důsledkem užší stěny svařovaného dutého rotoru je rychlejší uvedení do provozu než v případě plného profilu celokovaného rotoru. Je to dáno tím, že plný rotor je namáhán extrémním tepelným napětím. Musí se tedy zahřívat postupně, aby v materiálu nevznikaly velké teplotní rozdíly. Zatímco koncepce svařovaného dutého rotoru umožňuje podstatné snížení tepelného zatížení. Výhodou je samozřejmě menší spotřeba materiálu, která hraje důležitou ekonomickou roli v celkové ceně celé parní turbíny.

Rotory z nízkoalloyovaných ocelí se běžně vyrábějí z velkých kovaných částí, jejichž zhotovení je poměrně časově náročné. Snížení této časové náročnosti výroby je možné svařováním menších kovaných částí místo použití celistvého velkého kovaného rotoru.



Obr. 2.2 Schéma svařované středotlaké a nízkotlaké části turbínového rotoru [10]

Svařovaný rotor má následující výhody: [4]

- Nižší hodnoty napětí svařovaného dutého rotoru v porovnání s celokovaným plným rotorem.
- Dobrá kvalita všech vysoce namáhaných částí jelikož menší části mohou být pečlivěji vyrobeny.
- Jednodušší kontrola jednotlivých částí před svařováním a snížení rizik defektů.

Každý rotor před vstupem do výroby by měl být řádně otestován. Zhotovený rotor se podrobuje ultrazvukové zkoušce. Mechanické vlastnosti jsou většinou kontrolovány před samotnou dodávkou výkovku. K tomuto účelu se používají testovací kusy, které se odebírají z vybraných míst zhotoveného rotoru. Hodnoty všech mechanických charakteristik se musí shodovat s požadavky na rotor turbíny. Je-li to nezbytné, provádí se zkouška rozběhu. Pokud je struktura nehomogenní a nachází se v ní nepravidelné rozmístění zbytkových napětí, potom se rotor vlivem vysokých teplot během zkoušky má tendenci ohýbat a je nevyvážený.

3 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY TURBÍNOVÝCH OCELÍ [10][12][15][19][20][21]

Ve snaze o co největší účinnost turbín a tím pádem celých elektráren je třeba pečlivě volit materiál turbíny. Termická účinnost se z termomechaniky měří poměrem vykonané práce ku přivedenému teplu. Z toho vyplývá, že zvýšení účinnosti dosáhneme buď zvýšením přivedeného tepla a tlaku páry do turbíny nebo snížením množství odpadního tepla (popř. přehříváním páry po částečné expanzi, regenerací). Odpadní teplo můžeme snižovat i pod teplotu zkapalnění páry avšak za cenu tvoření kapiček při kondenzaci páry v turbíně. Kapičky potom narážejí na lopatky turbín a tím pádem roste jejich opotřebení. Další možností zvýšení efektivity je zvýšení přivedeného tepla. Tato cesta vyžaduje výrobu materiálů odolávajícím velmi vysokým teplotám a tlakům. V současné době se staví elektrárny s tzv. nadkritickým a testují se materiály pro ultrakritický parní cyklus. Tyto elektrárny umožňují navýšení účinnosti v ideálním případě až na 45%. Kritickými podmínkami jsou tlak páry 22,13MPa a teplota 374,15 °C. Přičemž se pára ještě přehřívá a u ultrakritického cyklu se uvažuje její teplota až 700 °C. Těmto podmínkám musí vyhovovat turbínové oceli, zejména lopatky turbín. Ve vývoji materiálů pro tyto tlaky a teploty budou hrát vyspělé žárupevné oceli a niklové slitiny velmi významnou roli.

Použitý materiál musí odolávat vůči tepelnému, mechanickému a koroznímu poškození a je snahou co nejvíce oddálit degradační procesy, které vznikají při provozu a vedou k únavě, křehnutí a porušování materiálu. Požadujeme, aby materiál měl po celou dobu provozu takové fyzikální, mechanické a antikorozi vlastnosti, které získal výrobou. Tuto odolnost materiálu proti působení vnějších vlivů nazýváme strukturní stálost. Strukturní stálost zásadně ovlivňují difúzní procesy probíhající mezi svarovým kovem a základním materiálem. Nejvýznamnějším degradačním procesem je redistribuce intersticiálních prvků v oceli. V největší míře je to přerozdělování uhlíku, v menší míře dusíku a vodíku.

K výrobě rotorů turbín se používají především žárupevné a částečně korozivzdorné a žárovzdorné oceli. Turbína se nachází v korozním prostředí, které má navíc vysokou teplotu a právě proto užití těchto typů oceli je zcela nezbytné. Běžně používaným materiálem na nejvíce zatíženou vysokotlakou část jsou vysokolegované 12% Cr oceli. Jejich užití je významné z důvodu lepší pevnosti za zvýšených teplot, zatímco použití nízkolegovaných ocelí na středotlaké a nízkotlaké části je voleno kvůli lepší houževnatosti.

Materiály parních turbín pro práci za vysokých teplot a tlaků musí obecně splňovat následující požadavky:

- Vysoká odolnost proti tečení,
- vysoká korozní odolnost v prostředí páry a vody,
- dobrá tepelná vodivost,
- dobrá zpracovatelnost, obrobitelnost a svařitelnost.

3.1 Korozivzdorné a žárovzdorné oceli [18][22]

Korozivzdornost je vlastnost materiálu odolávat korozi za normálních teplot. Žárovzdornost je vlastnost materiálu odolávat korozi za zvýšených teplot (nad 600 °C) Základním legujícím prvkem těchto ocelí je chróm. U korozivzdorných ocelí způsobuje pasivaci. Podmínkou pasivace je výskyt min. 11,5% volného Cr v matici. Chróm u žárovzdorných ocelí vytváří ochranný povlak oxidů zamezující korozi. Obsah chrómu se snižuje vznikem chrómových karbidů. Z toho důvodu je nutné, aby byl obsah uhlíku u těchto

oceli nízký obvykle do 0,08% C. V oblastech sníženého množství Cr v matrici může docházet k mezikrystalické korozi. Ta se obzvláště vyskytuje po svařování v tepelně ovlivněné oblasti. Ochranou vůči mezikrystalické korozi je snížení obsahu uhlíku nebo stabilizace oceli. Stabilizace je proces, kdy se ocel leguje prvky s vyšší afinitou k uhlíku než je afinita chromu. Jedná se většinou o Nb, Ti, Ta. Takto legované oceli se nazývají stabilizované.

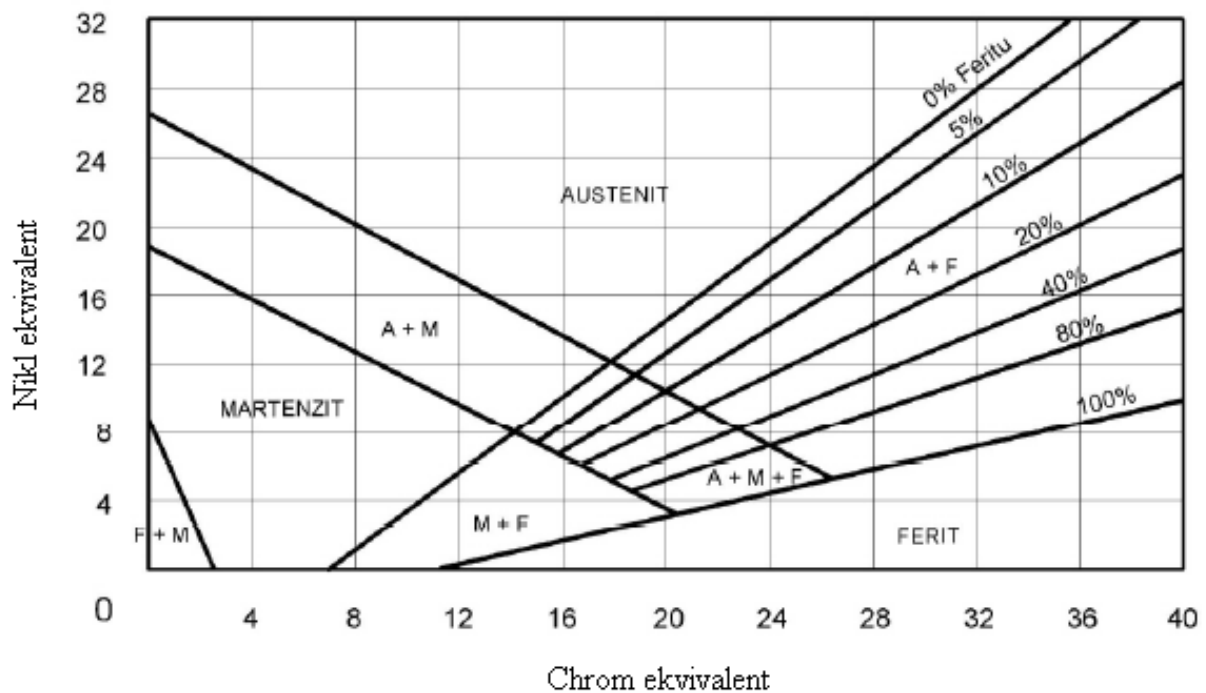
Významným prvkem, který zvyšuje odolnost vůči korozi je nikl. Působení dalších legur na strukturu zohledňuje chrom ekvivalent a nikl ekvivalent.

$$Cr_{ek} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb + 5 V + 3 Al \quad [\%] \quad [18] \quad (3.1)$$

$$Ni_{ek} = Ni + 30 C + 0,74 Mn + 0,33 Cu + A(N - 0,045) \quad [\%] \quad [18] \quad (3.2)$$

Kde A je konstanta, která závisí na obsahu dusíku. Je-li $N < 0,2\%$ pak je $A=30$, $N=0,21-0,25\%$ potom $A=22$ a pro $N=0,26-0,36\%$ je $A=20$ [18]

Vliv chemického složení na strukturu nerezavějících ocelí lze vyjádřit Schaefflerovým diagramem



Obr 3.1 Schaefflerův diagram [22]

3.1.1 Korozivzdorné oceli

Korozivzdorné oceli lze dělit podle struktury na: [18]

- Feritické,
- martenzitické a vytvrditelné
- austenitické,
- austeniticko-feritické oceli (duplexní).

Pro rotory parních turbín se z korozivzdorných ocelí používají pouze austenitické oceli a to zejména při opravách a renovacích.

Austenitické oceli

Obsahují nejčastěji 18-20% Cr a 8-11% Ni [18]. Austenitické oceli jsou houževnaté, mají vysokou odolnost proti korozi, nevýhodou je nízká mez kluzu (okolo 200MPa) a horší obrábitelnost. Oceli s koncentrací uhlíku vyšší než 0,1% jsou obtížně svařitelné, jelikož se na hranici zrn vylučují karbidy chrómu, které mají za následek zvýšenou náchylnost k mezikrystalické korozi. Pro svařování je vhodná stabilizace těchto ocelí.

3.1.2 Žárovzdorné oceli

Značná část korozivzdorných ocelí se používá i jako oceli žárovzdorné. Jsou to zejména oceli feritické a austenitické oceli s vyšším obsahem uhlíku. Podle chemické struktury se dělí na oceli feritické, austenitické a feriticko-austenitické.

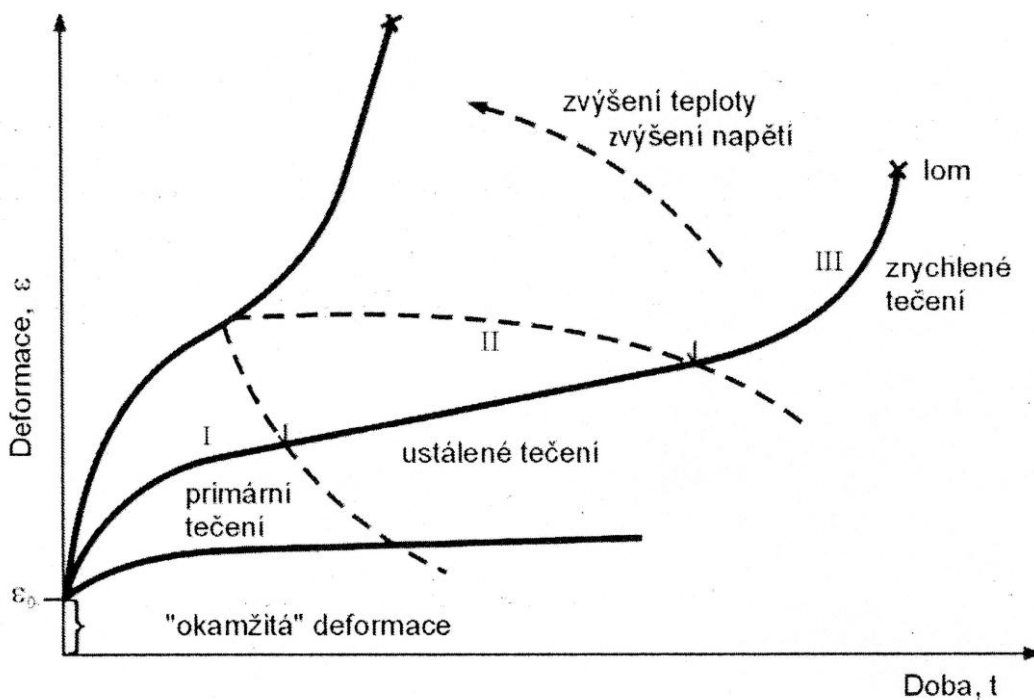
3.2 Žárupevné oceli [11][12][14][19]

Nejpoužívanější skupinou ocelí pro výrobu rotorů turbín jsou žárupevné oceli. Žárupevné oceli jsou oceli, které odolávají tečení materiálu (creepu) při vysokých teplotách cca do 650 °C. V oblasti takto vysokých teplot již nestačí hodnotit odolnost materiálu jen na základě pevnostních charakteristik, jakými jsou mez kluzu a mez pevnosti. Dominantním procesem poškozování celistvosti materiálu za vysokých teplot je tečení materiálu. Žárupevné oceli a slitiny si i při těchto teplotách dostatečně zachovávají své mechanické vlastnosti. Důležitou charakteristikou používanou pro dovolené napětí je časová pevnost při tečení. Odolnosti vůči creepu ve slitinách Fe výrazně napomáhají mechanismy substitučního a precipitačního zpevnění. Použití žárupevných slitin a ocelí je převážně v energetickém průmyslu. Výroba kotlů, parních rozvodů, turbín atd.

Odolnost materiálu proti tečení lze znázornit křivkou tečení pro danou teplotu a hodnotu napětí. Křivka tečení je závislost deformace ε na čase t . Křivka vysokoteplotního tečení má tři stádia deformace.

- I. stádium je oblast charakterizovaná neustáleným tečením, tzv. primárním tečením.
- II. stádium je tečení ustálené. Pro návrh životnosti materiálu je toto stádium nejdůležitější
- III. stádium znázorňuje tečení zrychlené. Dochází k výraznému zvýšení rychlosti tečení, vzniku mikrotrhlin, trhlin a lomu.

Jednotlivá stádia jsou závislá na teplotě a napětí v materiálu. Obr. 3.2 poukazuje na změnu tvarů křivek při zvyšující se teplotě a napětí. Rychlost tečení roste při vyšších teplotách a napětích. Oblast II. stádia se podstatně zužuje, až postupně zanikne.



Obr 3.2 Křivka tečení [11]

3.2.1 Mechanismy zpevnění

Žárupevné oceli vděčí své odolnosti vůči tečení za vysokých teplot zejména mechanismům substitučního a precipitačního zpevnění.

Substituční zpevnění

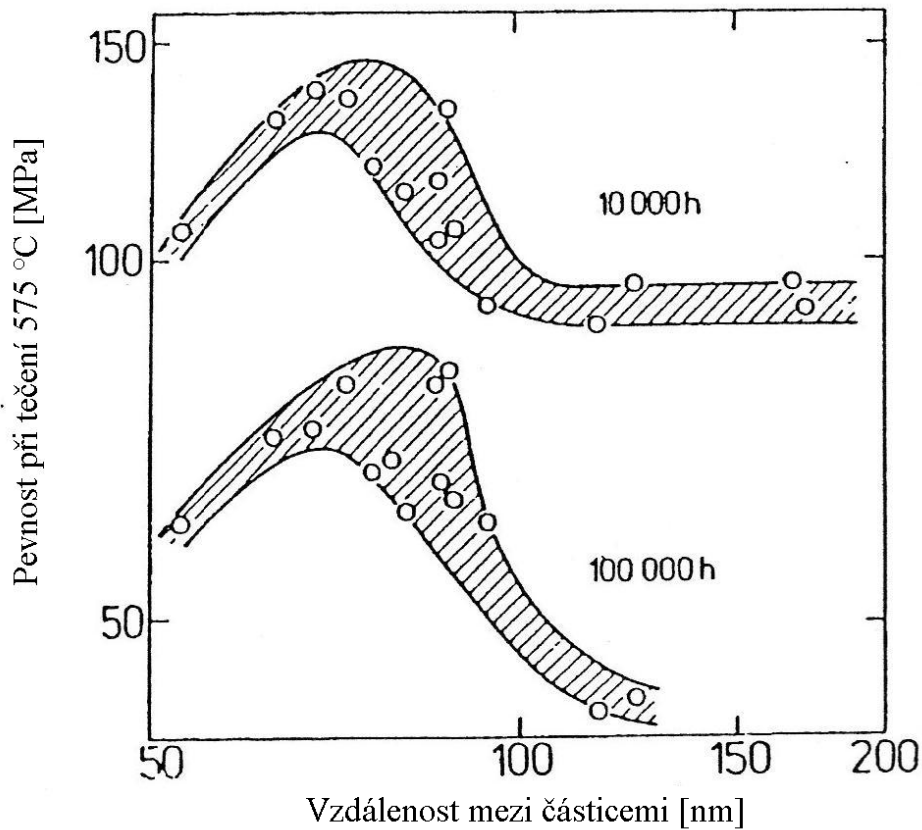
Substituční zpevnění zamezuje pohybu dislokací vhodným legováním. Nejčastěji se používá molybden a wolfram. Zpevnění tuhého roztoku je závislé na molybden ekvivalentu $Mo_{ekv} = Mo + 0,5W$. Nízkouhlíkové CrMoV oceli reagují na Mo tak, že pouze do obsahu 0,5% Mo se zvyšuje creepová pevnost. U vysokolegovaných 9% Cr ocelí má Mo taktéž významný pozitivní účinek na creepovou pevnost a to až do obsahu 1%. Další zvyšování obsahu Mo případně W nemá význam. Jsou-li obsaženy v tuhém roztoku ve velkém množství, dochází ke vzniku nežádoucích fází (M_6C , Fe_2Mo). Významné zvýšení odolnosti proti tečení u nízkolegovaných i vysokolegovaných žárupevných ocelí lze dosáhnout legováním dusíku. Zpevnění mají na svědomí stabilní nitridy vanadu VN u 9% Cr ocelí. V případě CrMo a CrMoV ocelí vytváří dusík stabilnější karbonitridy.

Precipitační zpevnění

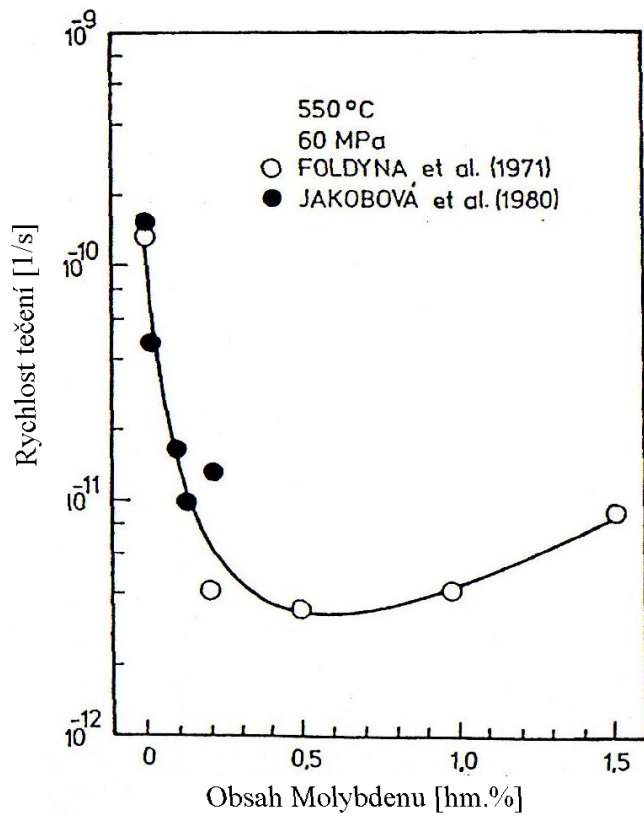
Precipitace spočívá v rozpadu přesyceného tuhého roztoku a vzniku precipitátů v matici původního materiálu. Na creepovou odolnost má vliv precipitace jemných částic karbidů, nitridů a karbidonitridů. Tyto částice brání pohybu dislokací při vysokých teplotách. U žárupevných materiálů vystavených dlouhému působení vysokých teplot dochází k degradaci struktury a snížení odolnosti vůči creepu. Vliv precipitačního zpevnění na žárupevnost lze hodnotit vzájemnou vzdáleností částic disperzní fáze. Precipitační zpevnění ovlivňuje rychlost tečení materiálu pouze v případě, kdy vzájemná vzdálenost částic disperzní fáze je menší než velikost subzrn. Se zmenšující se vzdáleností se zvyšuje mez kluzu za normální teploty a výrazně roste mez pevnosti při tečení. Rychlost creepové deformace se snižuje. Dosáhnou-li částice disperzní fáze velmi nízkých vzdáleností (pod cca 70 nm), pak žárupevnost klesá vlivem rozdílného mechanismu blokování pohybu dislokací. Je-li vzájemná vzdálenost částic disperzní fáze větší než velikost subzrn, potom se mechanismus

precipitačního zpevnění nepodílí na zvýšení žárupevnosti. Optimální vzdálenost mezi precipitujícími částicemi je 50-70 nm, maximálně 100 nm. U nízkolegovaných CrMoV ocelí jsou zpevňujícími precipitáty karbidy nebo karbidonitridy vanadu (V_4C_3 nebo VCN). U chromových ocelí jsou zpevňující převážně karbidy $M_{23}C_6$.

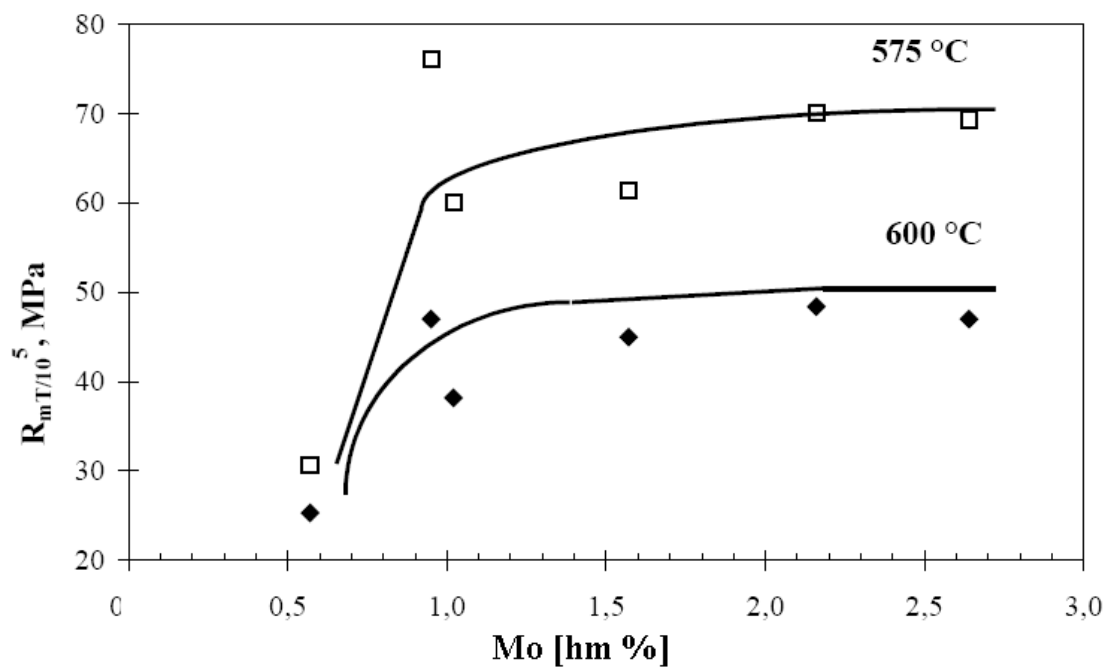
Z hlediska struktury nízkolegovaných ocelí je nejpříznivější struktura feriticko-bainitická. Přítomnost perlitu a martenzitu je nevhodná z důvodu vylučování hrubých karbidů. Vysokolegované feritické Cr oceli jsou převážně bainitické popřípadě nízkouhlíkové martenzitické.



Obr. 3.3 Vliv vzájemné vzdálenosti částic V_4C_3 a VCN na žárupevnost CrMoV ocelí [12]



Obr. 3.4 Vliv obsahu Mo na rychlost tečení nízkolegované CrMoV oceli [12]



Obr. 3.5 Závislost creepové pevnosti na obsahu Mo v 9% Cr oceli [12]

3.2.2 Degradáční procesy

Degradáční procesy nep zniv  ovlivňují žárupevnost během tepelného namáhání materiálu. V principu se jedná o dva procesy a to sni en  precipitačního zpevnění a sni en  substitučního zpevnění.

Sn ien  precipitačního zpevnění je zp soben  hrubnutím precipitujících zrn nebo rozpouštěním jemných disperzních  stic. Hrubnutí karbidů, nitridů a karbidonitrid  m  za následek rozpoušt n  malých jemných  stic a růstu velkých  stic. Vzdálenosti mezi  sticemi se zvětšují a t m se snižuje precipita n  zpevnění. Rychlost hrubnutí sekundárních f zi můžeme porovnat podle konstanty rychlosti hrubnutí. Např. rychlosti hrubnutí jednotlivých karbidů v nízkolegovaných ocelích při teplotě 600 C jsou v poměru $M_7C_3:Mo_2C:V_4C_3:VCN$ 2206:44:18:1. [12]

Sn ien  substitučního zpevnění se projevuje při obsahu Mo a W vy  m než je obsah těchto prvků v rovnov bn m stavu. Materiál během pracovního zat en  při vysokých teplotách má tendenci dosahovat rovnov bn ho stavu, a proto dochází k vylučování Mo a W f zi, které snižují obsah těchto prvků v tuhém roztoku a t m pádem snižují i žárupevnost. Výsledkem rozsáhlého testování žárupevných materiálů bylo zji t n , že p li  vysok  legování Mo a W nemá prakticky velk  smysl. [12]

3.2.3 D len  žárupevných ocelí

Dle strukturn  fáze je mo n  žárupevn  oceli takto rozdělit:

- Feriticko-perlitick  a bainitick  oceli.
- Martenzitick  oceli.
- Austenitické oceli.

Oceli feriticko-perlitick  a bainitick  mohou být nelegovan , n zkolegovan , ale i vysokolegované. Martenzitick  a austenitické oceli jsou vysokolegované.

Feriticko-perlitick  a bainitick  oceli

Oceli s feritickou, perlitickou a bainitickou strukturou tvo r  rozsáhlou skupinu ocelí s r zn m druhem legování. Nelegovan  oceli jsou charakterizovány n zk m obsahem uhlíku (max. 0,22%), obsah některých legovacích prvků je limitován ($Cr + Cu + Mo + Ni = \text{max. } 0,70 \%$). Oceli bývají dezoxidov ny hliníkem a mají vy  i obsah manganu (max. 1,7 %). Nízký obsah uhlíku a legur je p zniv  pro svařitelnost. Nejvy  i pracovní teplotou pro nelegovan  oceli je 400-450 C. N zkolegovan  oceli mají nízký obsah uhlíku (do 0,2%), bývají legovány Cr, Mo, V a W. (Cr max. 3%, Mo + V + W max. 1%). Mo n  pou it  nízkolegovaných ocelí je omezeno nejvy  imi teplotami cca 450  C. [14] Obvykl  tepeln  zpracování těchto ocelí je normalizační z h n  a vysokoteplotní popoušt n .

Martenzitick  oceli

Martenzitick  oceli představují skupinu žárupevných materiálů s v hledov  p zniv mi vlastnostmi pro u it  v nadkritických a ultrakritick ch parních systémech. Vy  i obsah Cr oproti předchozí skupině ocelí zaručuje lep i odolnost proti korozi. Legování Mo, V, W, Ti a Nb vede k vytv r n  stabilních karbidů MC a M_2C . Významnou skupinou jsou vysokolegované 9-12% Cr oceli pou ivan  pro vysokotlak   sti parních turbín. Obvykl  tepeln  zpracování je zušlechtování.

Austenitické oceli

Vlivem fcc mřížky probíhá difúze pomaleji než u ocelí s bcc mřížkou. Díky fcc mřížce mají austenitické oceli větší strukturní stabilitu. Touto změnou struktury taktéž dosáhneme znatelného nárůstu žárupevnosti a charakteristik tečení avšak za cenu snížení hodnoty meze kluzu. Precipitační zpevnění v austenitických ocelích je způsobeno nejen karbidy, ale i intermetalickými fázemi. Obecně austenitické oceli mají nevýhodnější fyzikální vlastnosti, vykazují však lepší odolnost vůči koroznímu praskání a mezikrystalické korozi. Austenitické žárupevné oceli lze používat až do teplot 700°C. Významného nárůstu žárupevnosti lze dosáhnout legujícími prvky Mo,Nb,Ti,W,N,B,Co. Austenitické oceli jsou nejčastěji chrom niklové a jsou úzce spjaty s korozivzdornými austenitickými oceli.

V tabulce č. 3.1 jsou uvedeny materiály rotorů turbín s jejich vybranými vlastnostmi používanými ve společnosti Siemens.

Tabulka č. 3.1 [10]

Typ rotoru	Materiál	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	Prodlo- užení A5 [%]	Náraz. práce (20°C)[J]	Pracovní teplota [°C]
Vysokotlaký, Středotlaký rotor	30 CrMoNiV 5 11	≥ 550	≤ 850	15	≥ 24	≤ 560
	21 CrMoNiV 5 9					
	X 22 CrMoV 12 1	≥ 590	≤ 930	13	≥ 24	≤ 600
	X 12 CrMoWVNbN 10 1 1	≥ 700	≤ 1000	13	≥ 24	≤ 630
Vysokotlaký, Nízkotlaký rotor	23 CrMoNiWV 8 8	≥ 550	≤ 850	15	≥ 80	≤ 530
Rotor pro nasycenou páru	26 NiCrMoV 10 10	≥ 580	≤ 820	16	≥ 100	≤ 350
Nízkotlaký rotor, Generátor	26 NiCrMoV 11 5	≥ 630	≤ 870	15	≥ 100	≤ 350
	26 NiCrMoV 14 5	≥ 705	≤ 980	15	≥ 100	≤ 350
Nízkotlaký disk	26 NiCrMoV 14 5	≥ 780	≤ 970	15	≥ 100	≤ 350

Materiálové inženýrství a metalurgie jsou dynamicky se rozvíjející obory, které napomáhají k vysvětlení procesů ve struktuře a odolnosti žárupevných ocelí. S těmito novými poznatky lze přehodnotit stávající energetické zařízení a v mnoha případech se zjišťuje, že dané zařízení může překročit svou plánovanou životnost z důvodu nadhodnocení parametrů při tehdejší výrobě. Tento vývoj nových poznatků zásadně ovlivňuje ekonomičnost energetických zařízení prodloužením jejich použitelnosti. Je ovšem nutné dané komponenty sledovat, protože během provozu dochází k nejrůznějším vadám materiálu a nestandardním podmínkám provozu, které mohou iniciovat různé trhliny a vruby. [19]

Současný výzkum taktéž napomáhá v použití nových vysoce odolných materiálů pro nadkritické a ultrakritické parní cykly.

3.3 Svařitelnost žárupevných ocelí [6] [13][16]

Svařitelnost je složitá charakteristika materiálu vytvořit svarový spoj požadovaných vlastností. Svařitelnost závisí zejména na chemickém složení základního materiálu a svarového kovu, struktuře spojovaných materiálů, mechanických vlastnostech, použité metodě svařování a konstrukci svařence.

Velmi důležitým faktorem pro úspěšné svařování žárupevných ocelí je výběr vhodných teplot pro tepelné zpracování před svařováním, správná volba teplot při svařování a následném tepelném zpracování po svařování. Volba přídavných materiálů by měla být založena na velmi podobných mechanických a chemických vlastnostech jako základní materiál. Tímto postupem se co možná nejvíce eliminuje pokles žárupevnosti při svařování. Samotná svařitelnost dále závisí a čistotě, struktuře a chemickém složení svarového kovu. Při svařování je nutné brát v potaz vysokou pracovní teplotu rotorů a tudíž zohlednit a pokud možno potlačit difúzi uhlíku a vznik nauhličených a oduhličených oblastí ve svarovém spoji. Velmi vhodnou strukturou, která značně odolává vzniku trhlin při svařování je bainit.

Studené praskání je jedna z nejčastějších možností porušení svaru, kterému je třeba předejít. Náchylnost k studenému praskání je ovlivněna chemickým složením základního materiálu, svařovanou tloušťkou, obsahem vodíku, tepelným příkonem vneseným do svaru během svařování a vnitřním napětím.

Vliv základního materiálu

Uhlíkový ekvivalent

Vliv chemického složení na svařitelnost daného materiálu významně ovlivňuje uhlík a legury. Uhlíkový ekvivalent CET vyjadřuje zastoupení uhlíku a legujících prvků. Nejvýznamnějším prvkem zásadně ovlivňujícím svařitelnost je uhlík. Čím vyšší hodnota uhlíkového ekvivalentu, tím hůře se materiál dá svařit. Snadnější zakalení oceli má za následek vznik martenzitu a bainitu v TOO i při nižších rychlostech ochlazování a tím vzniká větší náchylnost k tvorbě trhlin. Materiál se hůře svařuje.

Uhlíkový ekvivalent CET lze vypočítat: [6]

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} (\%) \quad (3.3) [13]$$

Platnost uvedeného vztahu je pro tyto obsahy prvků: [6]

Uhlík 0,05 až 0,25% Mangan 0,50 až 1,90 % Křemík max. 0,80%, Chrom max. 1,50%, Měď max. 0,70%, Molybden max. 0,75%, Niob max. 0,06%, Nikl max. 2,50%, Titan max. 0,12%, Vanad max. 0,18%, Bór max. 0,005%

Teplota předehřevu je lineárně závislá na uhlíkovém ekvivalentu. Zvýšení uhlíkového ekvivalentu o 0,01 % zvýší teplotu předehřevu o 7,5 °C

Vliv tloušťky

Nárůst teploty předehřevu se nejvíce projevuje u tenčích plechů. U tloušťek nad 60 mm se nárůst teploty předehřevu neprojevuje

Vliv obsahu vodíku

Vliv vodíku na teplotu předehřevu se výrazněji projeví při nižších koncentracích. Při vyšších koncentracích vodíku se jeho vliv na teplotu předehřevu snižuje.

Vliv tepelného příkonu

Teplota předehřevu je lineárně závislá na velikosti tepelného příkonu. Strmost přímky ovlivňuje uhlíkový ekvivalent. Větší vnesený tepelný příkon snižuje teplotu předehřevu.

Vliv vnitřního napětí

Kvantitativní vyjádření teploty předehřevu na velikosti vnitřního napětí není doposud možné. Teplota předehřevu roste se zvyšujícími se hodnotami vnitřního zbytkového napětí

Výsledná teplota předehřevu zahrnující výše uvedené vlivy je rovna součtu teplot předehřevů u jednotlivých vlivů. Lze ji vypočítat i ze vzorce (3.4)

$$T_{př} = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,53} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.4) \quad [6]$$

HD – obsah vodíku, Q – vnesený tepelný výkon

Rovnice platí je – li: [6]

CET = 0,2 až 0,5%

d = 10 až 90 mm

HD = 1 až 20 ml/100g

Q = 0,5 až 4,0 kJ/mm

Dále musí být splněny tyto podmínky: [6]

- Velikost uhlíkový ekvivalentu základního materiálu je větší o 0,03 % než uhlíkový ekvivalent svarového kovu.
- Délka svarů je větší než 50 mm a při tloušťce nad 25 mm musí být kořenové svary dvouvrstvé.
- Při vícevrstvěm svařování se provádí ochlazení na teplotu interpass od 1/3 tloušťky svaru
- Musí se eliminovat plastické deformace při částečném průvaru spoje

4 SVAŘOVÁNÍ ROTORU

4.1 Návrh technologie svařování [3][7]

Svařování metodou MIG, MAG

Obě metody využívají energie elektrického oblouku ke svařování. Metody se liší použitým druhem ochranného plynu. V případě MIGu se jedná o netečný plyn, který neovlivňuje proces svařování. U metody MAG se ochranná vrstva atmosféry aktivně podílí na tvorbě svarového spoje. Uplatnění metody MIG spočívá hlavně při svařování neželezných kovů, zejména hliníku a mědi. Svařování metodou MIG je produktivní, avšak kvalita svaru bývá nižší a je náchylnější k defektům. Metoda MAG vytváří poměrně jakostní svarový spoj. Obě metody neposkytují dostatečnou hloubku průvaru pro použití ke svařování rotorů parních turbín.

Svařování metodou WIG

Metoda WIG patří mezi metody svařování elektrickým obloukem. Elektrický oblouk hoří mezi základním materiálem a netavicí se wolframovou elektrodou pod ochrannou atmosférou netečného plynu. Tato metoda je charakteristická velmi vysokou kvalitou svarového spoje. Její nevýhodou je poměrně nízká produktivita.

Svařování pod tavidlem

Svařování pod tavidlem představuje velmi produktivní metodou svařování využívající energii elektrického oblouku hořícího mezi základním materiálem a elektrodou pod vrstvou tavidla. Svařování pod tavidlem má vysoký výkon odtavení a svary jsou velmi jakostní. Touto metodou lze svařovat profily o značné tloušťce.

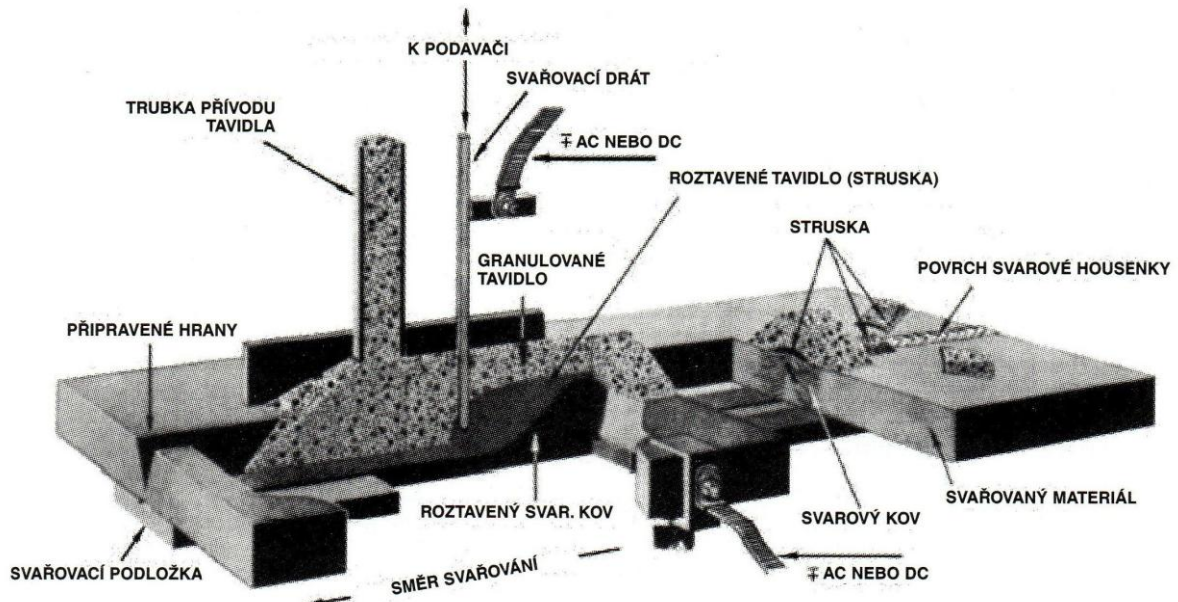
Shrnutí

Rotory parních turbín jsou velmi namáhané strojní součásti, a proto se požaduje velmi vysoká kvalita svarů bez jakýchkoli defektů. Z toho důvodu není vhodné použít metodu MIG a MAG, navíc obě tyto metody neposkytují dostatečnou hloubku průvaru. Svařování celého rotoru metodou WIG se používá spíše okrajově z důvodu nízké produktivity. Její hlavní využití spočívá ve vytvoření velmi jakostního svaru v kořenové mezeře. Nejpoužívanější a nejproduktivnější metodou je svařování automaticky pod tavidlem. Správný výběr a užití tavidla výrazně zvyšuje jakost svarového spoje a chrání svar lépe než je tomu pod ochrannou atmosférou plynů v případě metod MIG a MAG. Produktivita svařování automaticky pod tavidlem se mnohem zvýší při svařování do velmi úzkého úkosu. Z těchto důvodů je pro svařování rotorů parních turbín nejpoužívanější metoda svařování automaticky pod tavidlem do úzkého úkosu.

V praxi se běžně postupuje tak, že se metodou WIG velmi jakostně svaří oblast kořenové mezery úzkého úkosu a potom se zbylý profil svaří automaticky pod tavidlem.

4.2 Svařování pod tavidlem [1][17]

Svařování pod tavidlem patří mezi metody svařování elektrickým obloukem. Tato technologie je velmi produktivní a pokroková. Elektrický oblouk hoří mezi elektrodou a základním materiálem pod vrstvou tavidla. Metoda je specifická velkým množstvím odtaveného svarového kovu. Používá se pro svařování velmi namáhaných dílů. Svařují se nejčastěji materiály o velkých tloušťkách.



Obr 4.1 Svařování automatem pod tavidlem [17]

Výhody svařování pod tavidlem:

- Vysoká produktivita,
- velký průvar základního materiálu,
- vysoká tepelná účinnost
- zvýšená kvalita svarů.

Nevýhody:

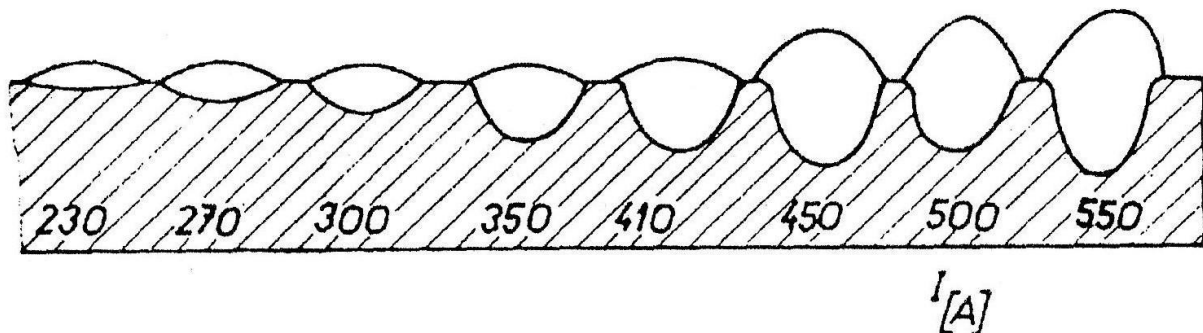
- Obtížná kontrola svaru,
- omezená možnost svařování v polohách (lze pouze v PA nebo PB, výjimečně PC),
- vysoké náklady,
- vysoké požadavky na přípravu svarové plochy.

Princip metody

Hoření elektrického oblouku mezi základním materiálem a elektrodou natavuje jak elektrodu, tak samotný základní materiál. Během svařování je do místa svaru přiváděno tavidlo, pod jehož vrstvou se uskutečňuje samotný svařovací proces. Svarový kov vyplňuje část prostoru pod tavidlem. Plynulé posouvání svařovacího drátu do místa hoření elektrického oblouku a přísun požadované vrstvy tavidla je zprostředkováno automatem. Roztavené tavidlo ihned po vytvoření svaru chladne a vytváří sklovitou ochrannou vrstvou, která svar chrání při chladnutí. Vrstva tavidla je posléze odstraněna.

Vliv svařovacího proudu

S rostoucí intenzitou proudu se zvětšuje množství nataveného kovu. Růst intenzity proudu je spojen s růstem proudové hustoty, která vytváří více tepla v kuželi elektrického oblouku. To má za následek vznik hlubšího průvaru do základního materiálu a dochází k většímu převyšování svarového kovu.



Obr 4.2 Vliv svařovacího proudu [1]

Vliv svařovacího napětí

Větší svařovací napětí způsobuje zvětšení obloukového sloupce a tím dochází k přenosu tepla na větší plochu, což má za následek zmenšení hloubky průvaru a zvětšení šířky housenky.

Vliv velikosti rychlosti

Změna rychlosti s sebou přináší změnu doby působení hoření elektrického oblouku na svarový kov. Zvyšování rychlosti způsobuje snižování průvaru. Při vysokých rychlostech svařování dochází ke špatnému natavení svarových ploch.

Přídavné materiály

Přídavnými materiály pro svařování pod tavidlem jsou tavidlo a svařovací drát. Jejich kombinací se dosahuje optimálních chemických a mechanických vlastností svarového kovu, které by se měli co nejvíce blížit vlastnostem základního materiálu. Přídavné materiály spolu z technologií pokládání vrstev housenek musí zabezpečit svarový spoj bez defektů.

Svařovací dráty

Svařovací drát má významný vliv na chemické vlastnosti svarového kovu. Vyrábí se ve formě drátů, trubiček a pásek. Dráty se vyrábějí tažením za studena a jsou charakteristicky lesklé. Trubičkové elektrody jsou tvořené pláštěm z měkké oceli, ve kterém je prášek. Trubičky lépe legují svarový kov než plný drát. Vzhledem k tomu, že je proud veden pouze obalem tak dochází k navýšení proudové hustoty a tím pádem i k většímu odtavení. Použití plněné elektrody zvyšuje efektivitu. Nevýhodou je zvýšený propal legur a nižší hloubka průvaru ve srovnání s plnými dráty.

Tavidla

Účelem tavidel je zajištění vhodného svařovacího procesu. Tavidlo musí formovat svarovou housenku tak, aby v ní nebyly vady způsobující vrubový účinek. Velmi důležité je udržovat během svařování požadovanou vrstvu tavidla. Je-li vrstva tavidla větší, vzniká vlivem jeho tíhy hrubý povrch housenky. Je-li vrstva příliš tenká, neochrání dostatečně svarový kov a na povrchu housenky bude zaznamenána zvýšená porezita. Vrstva strusky by

měla být tenká, aby se lépe samovolně uvolňovala během kladení více vrstev na sebe. Tavidlo plní tyto další funkce:

- Chrání roztavenou lázeň před okolní atmosférou,
- zlepšuje ionizace a tím pádem elektrický oblouk klidněji hoří,
- rafinuje svarovou lázeň,
- leguje svarový kov,
- brání rychlému odvodu tepla z místa svařování.

rozdělení tavidel dle chemického složení

- křemičitá
- fluoridová
- manganatá

rozdělení dle metalurgického procesu

- bazická
- kyselá
- neutrální

rozdělení dle výroby

- aglomerovaná
- tavená

Aglomerovaná tavidla se vyrábějí nabalováním jednotlivých složek na sebe za použití pojiva. Aglomerovaná tavidla jsou heterogenní. Mají nižší hustotu než tavidla tavená. Aglomerovaná tavidla jsou hygroskopická, a proto před jejich použitím je nutné vysušení.

Tavená tavidla se vyrábějí roztavením surovin v peci. Následně se odlijí a po ztuhnutí rozemelou. Tavená tavidla jsou homogenní. Ve srovnání s aglomerovanými tavidly vykazují větší pevnost zrn a nejsou hygroskopická.

rozdělení dle aktivity

- neutrální
- aktivní
- legující

Neutrální tavidla jsou určena zejména pro vícevrstvé svařování, kde požadujeme stejné chemické vlastnosti pro každou vrstvu.

Aktivní tavidla aktivně reagují se svarovým kovem. Dodávají do něj Si a Mn, což zlepšuje odolnost proti porezitě a zvyšuje houževnatost. Použití je spíše pro jednovrstvé svary (max. 3-5 vrstev).

Legující tavidla dodávají do svarového kovu legury. Nejčastěji C, Cr, Mn, Si.

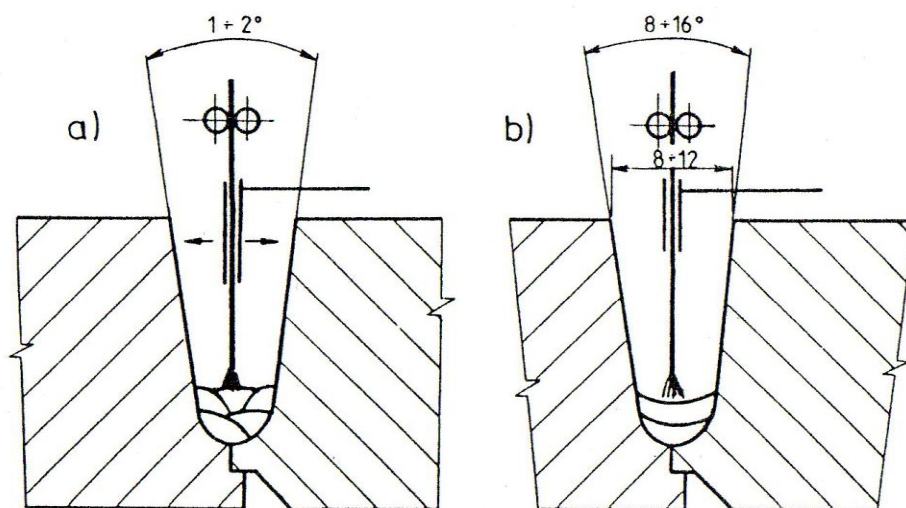
Příručka pro svařování pod tavidlem společnosti ESAB [17] uvádí, že při výběru tavidla dle oblasti použití lze pro rotory turbín vybrat tavidla OK Flux 10.61, OK Flux 10.62, OK Flux 10.63. Jsou to tavidla aglomerovaná, vysoce bazická, neutrální, jsou vhodná pro neomezené tloušťky plechu a pro svařování do úzkého úkosu (kromě OK Flux 10.61)

4.2.1 Svařování do úzkého úkosu



Velmi produktivní metoda pro svařování tlustostěnných svařenců spočívající v mnohavrstvěném kladení svarové housenky do úzkého úkosu. Tím se značně zkrátí svařovací časy a ušetří významné množství svarového kovu. Výhodou také je, že jednotlivé vrstvy lze pokládat při stejných parametrech svařování (kromě kořenové a krycí vrstvy). Používají se zejména dvě varianty. První variantou (obr 4.4 a) je svařování do velmi malého úkosu (1 až 2°). Svarové housenky jsou pokládány do koutů, což umožňuje lepší odstraňování strusky z housenek. V druhé variantě (obr 4.4 b) hoří oblouk uprostřed úzké mezery a housenky bývají pokládány přes celou šířku úkosu. Nevýhoda této produktivní metody spočívá ve vysokých nárocích na přesnost opracování svařovacích ploch. Při vícevrstvěném svařování je kladen požadavek na dobrou odstranitelnost strusky.

Obr 4.3 Úzký úkos [17]



Obr. 4.4 Svařování do úzkého úkosu varianta a), varianta b) [1]

4.3 Svařování metodou WIG [1][3]

Metoda WIG (Wolfram Inert Gas) se řadí k metodám svařování využívající energii elektrického oblouku. Metoda WIG používá netavící se elektrodu pod ochrannou atmosférou netečného plynu. Výhody této metody spočívají zejména ve velmi vysoké kvalitě a čistotě svarového spoje. Oproti svařování pod tavidlem lze svařovat ve všech polohách. Nevýhodou je její nižší produktivita.

Princip metody

Elektrický oblouk hoří mezi základním materiálem a netavící se wolframovou elektrodou. Svarová lázeň je ochráněna atmosférou inertního plynu. Následným ztuhnutím svarové lázně vzniká svarový spoj.

Při svařování metodou WIG lze použít stejnosměrný proud, pulzující proud s přímou a nepřímou polaritou nebo proud střídavý.

Přídavné materiály

Přídavný materiál se volí s ohledem na chemické složení, mechanické vlastnosti základního materiálu a požadovaných vlastností svarového spoje. Svarový spoj se volí tak, aby měl stejné nebo lepší mechanické vlastnosti než základní materiál. Přídavné materiály zlepšují formování svarového kovu, mohou svar dolegovat a ovlivňují metalurgické děje. Přídavné materiály jsou ve formě svařovacích drátů a svařovacích tyček.

Elektrody

Elektrody se vyrábějí z čistého wolframu, který může být legován oxidy thoria, yttria zirkonu, lanthalu a ceru. Legury zvyšují životnost a zlepšují hoření oblouku.

Svařování do úzkého úkosu

Metodou WIG lze taktéž svařovat do úzkého úkosu. Opět dochází k velkému zefektivnění celého výrobního procesu a velmi výrobě velmi jakostního svaru. Nevýhodou je menší produktivita oproti svařování automatickým pod tavidlem do úzkého úkosu.

4.4 Navařování [8][10]

Svařovací postup, kdy se na základní materiál navařuje vrstva svarového kovu, která vylepšuje jeho vlastnosti (zpravidla se používá za účelem zlepšení antikoročních vlastností). Rotor parní turbíny je náchylný vůči korozi a to zejména v oblasti těsnění. Parní turbínou protéká velké množství korozního média, proto je nutné použít materiál, který je značně odolný vůči korozi. Materiál, ze kterého se rotor vyrábí, běžně nespĺňuje tak náročné požadavky v této oblasti a je nutné navařit na něj materiál odolnější.

Nejběžnější metodou navařování je svařování pod tavidlem. K redukci difúze uhlíku po navařování je potřeba vybrat přídavný materiál a elektrodu s vlastnostmi velmi podobnými materiálu základnímu. Pokud se vlastnosti liší je nutno zvážit, jestli navařování neovlivní strukturní pevnost, popřípadě je možné použít vhodnou mezivrstvu.

Navařování má často své využití při opravách turbíny a obnovení její použitelnosti. Renovuje-li se turbína, je nutné důkladně prozkoumat, které části z bezpečnostních důvodů nevyhovují provoznímu zatížení a určit celkový rozsah poškození. Důležité je najít a odstranit příčinu objevujících se vad. Část, kde se vyskytuje defekt, je třeba odstranit a za pomoci navařování ji nahradit. Po této operaci zpravidla nastupuje obrábění a daný navařený materiál se obrobí na požadovaný tvar. Velmi náročnou operací je navaření poškozeného závěsu lopatek. Závěs lopatek je velmi namáhanou částí rotoru, zatíženou extrémními tahovými odstředivými silami.



Obr. 4.5 Uložení rotoru v termoboxu během navařování [8]

4.5 Tepelné zpracování [10][21]

Rotory se po svařování tepelně zpracovávají. Tepelné zpracování se skládá z přehřevu, výdrži na požadované teplotě a ochlazení. Rotory jsou tepelně zpracovávány v peci. Je-li to možné, rotor se pouze lokálně tepelně zpracovává. Tak se koná zejména při opravách rotorů. Tím se významně sníží náklady. K těmto účelům slouží na míru vytvořené pece. Rozdíly teplot při ohřevu a ochlazování způsobují tepelné namáhání, které nesmí překročit mez kluzu. Překročení meze kluzu má za následek vznik plastické deformace a následné pokřivení nebo zkroucení rotoru. Rozdělení tepelného namáhání a výpočet teplotního pole se provádí metodou konečných prvků, aby se zamezilo vzniku plastických deformací během tepelného zpracování. Otáčením rotoru během celého tepelného zpracování lze rovněž předejít výskytu nevratných deformací.

Oblast svaru se nachází na rozhraní dvou tvářených částí rotoru rozdílného chemického složení. Jedno tepelné zpracování nemusí být tudíž zároveň účinné pro obě slitiny. Vhodné je použít odlišné tepelné zpracování pro každou část. Pevnost svaru a základního materiálu by se neměla snížit. Jsou-li slitiny značně odlišné, je účelné navařit mezi dané části rotoru mezivrstvu, která zabrání nebo alespoň omezí difúzi uhlíku. Tepelné zpracování po svařování lze použít ve svislé poloze rotoru a tím zamezit možným deformacím. Svar se po tepelném svařování dále kontroluje mnoha nedestruktivními zkouškami (ultrazvuk, povrchová kontrola), aby měl výrobce jistotu, že neobsahuje nějaké nepovolené vady. Zkoušky ultrazvukem jsou schopné odhalit defekty o rozměrech 1-2mm. Jestliže je svar vadný je ho nutné odstranit a vytvořit svar nový. Přítomnost jakýchkoli vad větších než 1,5 mm je nepřijatelná, kvůli možnému místu iniciace únavové trhliny

Druhy tepelného zpracování[18]

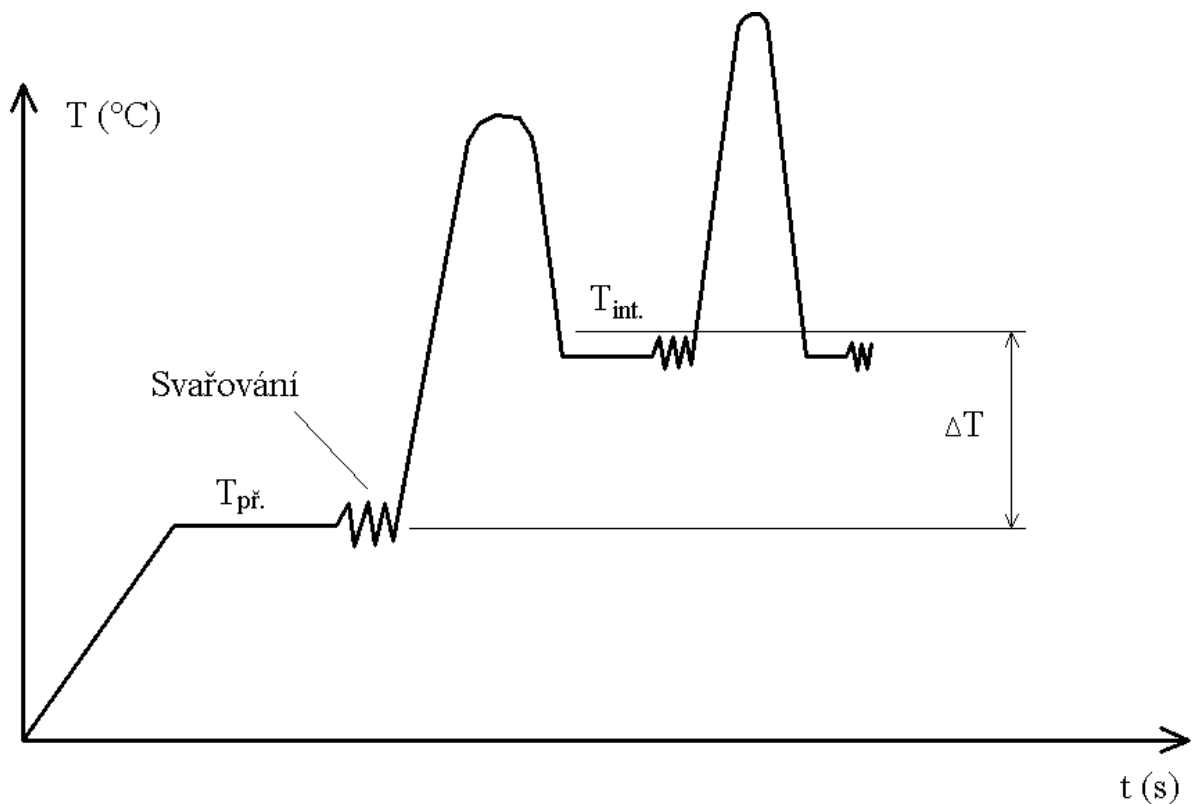
Tepelné zpracování můžeme rozdělit na zpracování s překrytalizací a bez překrytalizace.

Tepelnými zpracováními bez překrytalizace jsou:

- Popouštění – snižuje tvrdost a napjatost
- Žihání ke snížení vnitřního pnutí
- Rozpouštěcí žihání

Mezi tepelné zpracování s překrytalizací patří:

- Normalizační žihání – účelem je zrovnoměnit a zjemnit strukturu
- Homogenizační žihání – zrovnoměňuje strukturu



Svařovací diagram

$T_{př.}$ – teplota předehřevu

$T_{int.}$ – teplota interpass

ΔT – rozsah teplot pro pokládání housenek

Svarové housenky lze pokládat pouze mezi teplotou předehřevu a teplotou interpass

5 RIZIKA SVAROVÝCH SPOJŮ [3][13]

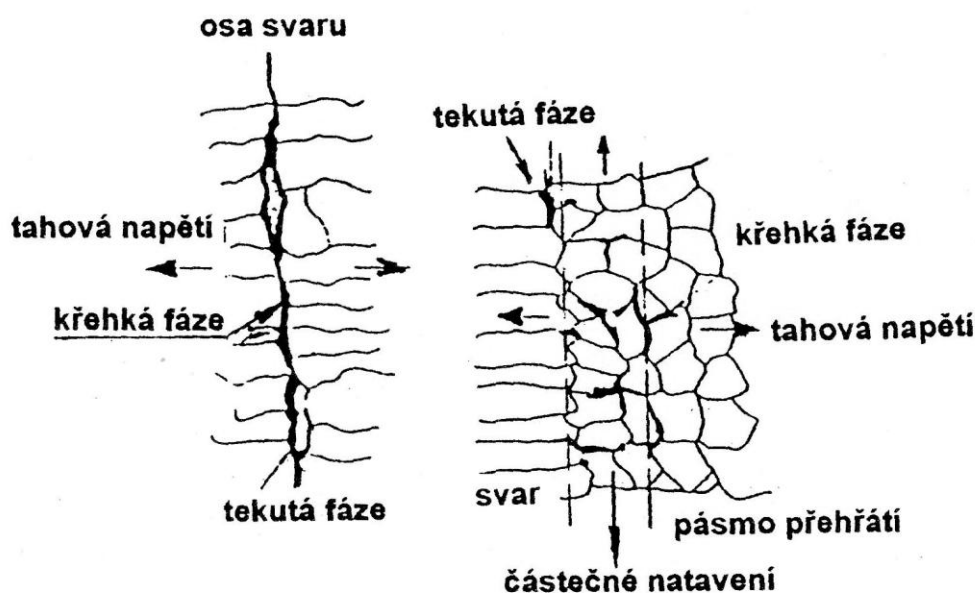
Ve svarových spojích vzniká vlivem technologie výroby k vadám. Podle tvaru rozlišujeme ve svarech vady bodové (vměstky, mikropóry), plošné (trhliny, nespojitosti návaru) a prostorové (bubliny, vměstky, staženiny).

Napětí a deformace vznikají při svařování v důsledku přivodu energie do místa vzniku svarového spoje. Napětí a deformace jsou přítomny u každého svarového spoje a nelze jim zabránit, lze je pouze korigovat technologickými operacemi a konstrukčním řešením.

Jedním z velmi častých příčin nevyhovujících vlastností svarových spojů jsou trhliny. Jejich vznik je nepřijatelný ve všech svarových spojích. Trhliny jsou vždy místem koncentrace napětí. Při časově proměnném namáhání bývají často iniciátory únavového poškození vedoucímu až k lomu. Rozlišujeme různé druhy trhlin ve svarových spojích.

5.1 Trhliny za horka

Teplé trhliny vznikají ve svarovém kovu nebo v TOO. Teplé trhliny jsou charakterizovány teplotou v oblasti mezi solidem a likvidem a projevují se mezikrystalickou trhlinou. Lze je dále dělit na trhliny krystalizační, likvační a polygonizační.



Obr. 5.1 Trhliny za horka [3]

5.1.1 Krystalizační trhliny

Jejich vznik je podmíněn krystalizací, která probíhá v oblasti teploty solidu. Zvýšený obsah síry je hlavním vznikem krystalizačních trhlin. Trhliny vznikají v místech, které tuhnou jako poslední (střed svarové housenky, kořen housenky). Trhlina bývá různě tvarově větvená. Zejména metodou svařování pod tavidlem se tento druh trhlin hojně vyskytuje. Svarové kovy s fcc mřížkou jsou obzvláště náchylné na vznik krystalizačních trhlin.

5.1.2 Likvační trhliny

Likvační trhliny se tvoří v TOO svarového spoje nebo v oblasti, která se znovu natavuje. Tyto trhliny jsou časté v oblasti kladení více svarových housenek na sebe. Housenky dříve položené a částečně vychladlé se opět natavují nově se na nich vytvářející svarovou housenkou. Ve znovu nataveném materiálu v důsledku likvačního procesu vzniká trhlina.

5.1.3 Polygonizační trhliny

Vznikají z poklesu tažnosti a vytvářejí polygonizační síť, která brání pohybu dislokací a tím oslabuje svarový materiál. Polygonizační trhliny se objevují v austenitických ocelích a u slitin s niklem. Trhliny probíhají po hranicích zrn.

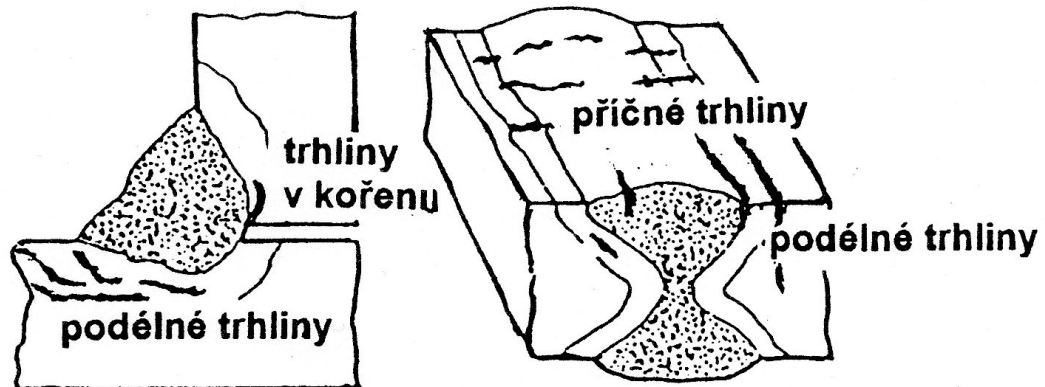
Zamezení vzniku horkých trhlín spočívá:

- Ve snížení tepelného příkonu dodaného do svaru,
- v používání čistých přídatných materiálů,
- v omezení napětí a deformace vhodnou volbou svařovacího procesu a předehřevu.

5.2 Studené trhliny

Studené trhliny jsou trhliny vznikající při nízkých teplotách okolo 200 °C. Příčinou jejich vzniku je vodík nacházející se ve svarovém spoji. Vodík se může dostat do svaru z atmosférické vlhkosti. Trhliny vznikají za spolupůsobení tahových napětí. Charakteristickým místem výskytu je podhousenková oblast svarového spoje a kořenová oblast v koncové části svaru. Studené trhliny jsou lesklé a šíří se transkrystalicky. Náhylnost oceli na vznik studených trhlín souvisí s kalitelností materiálu. Nejcitlivější strukturou je martenzit. Abychom zamezili vzniku studených trhlín je nutné:

- Používat svařovací materiály s nízkým obsahem vodíku,
- dokonale vysušit přídatné materiály před svařováním,
- použít předehřev, dohřev a zvýšit tepelný příkon do svarového spoje

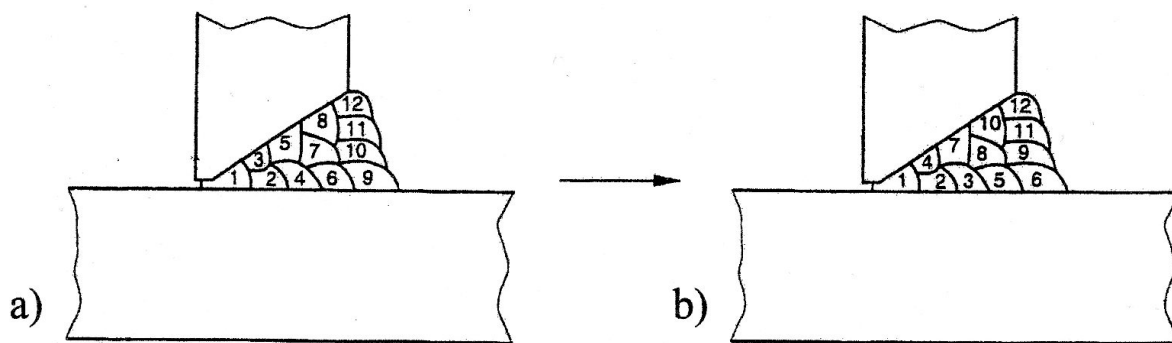


Obr. 5.2 Typy trhlín za studena [3]

5.3 Lamelární trhliny

Lamelární trhliny se vyskytují v základním materiálu nebo TOO při působení tahového napětí ve směru kolmém na povrch. Trhliny mají stupňovitý tvar a jsou rovnoběžně orientovány s povrchem. Příčinami jejich vzniku může být: [13]

- zvýšený obsah difúzního vodíku
- velké množství plasticky rozválcovaných vměstků
- plastické vlastnosti ve směru kolmém na povrch



Obr. 5.3 Snížení citlivosti na lamelární praskání pořadím kladení housenek: a) Citlivé b) Méně citlivé [13]

5.4 Žíhací trhliny

Žíhací trhliny jsou charakteristické při tepelném zpracování svarového spoje nebo při svařování více vrstev. Žíhací trhliny mohou vzniknout za nízkých teplot při předehřevu na teploty žíhací nebo za teplot žíhacích. Trhliny během předehřevu bývají často způsobeny velkou rychlostí předehřevu. Dochází k velkým teplotním rozdílům mezi povrchem a středem žíhaného materiálu. Toho se lze v mnoha případech vyvarovat řízeným pomalým ohřevem a ochlazováním. U velkých tloušťek svařenců se doporučuje volit rychlost ohřevu 30 – 80 °C/h, popřípadě použít dvoustupňového ohřevu. Trhliny při žíhacích teplotách vznikají v podhousenkové oblasti, kde se vyskytují hrubší zrna a martenzitické a bainitické základní struktura. Hrubá zrna vznikají v důsledku snížení plasticity na hranici zrn substitučního a precipitačního zpevnění precipitáty Cr, Mo a V. Žíhací trhliny jsou proto nebezpečné zejména u nízkolegovaných CrMoV a CrMo ocelí.

5.5 Korozní praskání

Svarové spoje vystavené koroznímu médiu pod tlakem jsou náchylné ke koroznímu praskání. Trhliny vznikají v TOO svarového spoje, která je nejvíce oslabena vznikem základních struktur a zbytkových tahových napětí.

6 ZÁVĚR

Svařovaný koncept rotoru přináší efektivní možnost výroby velké parní turbíny. Takto vyrobené parní turbíny umožňují podstatné zvýšení účinnosti a výkonu. Lze totiž použít pro každou část turbíny ty nevhodnější materiály. Tyto části rotoru se následně svaří a vytvoří jeden celistvý rotor parní turbíny.

Rotory parních turbín se ve výrobě svařují automaticky pod tavidlem a metodou WIG. Postupuje se tak, že metodou WIG se svaří kořenová mezera, která je velmi citlivým místem celého svarového spoje. Metoda WIG poskytuje vynikající kvalitu svaru. Následně je použito svařování automaticky pod tavidlem do úzkého úkosu a celý profil rotoru se svaří.

Materiálem pro výrobu parních turbín jsou zejména žárupevné oceli, které odolávají vysokému teplotnímu pracovnímu zatížení. Při vysokých teplotách je hlavním způsobem deformace creepové porušení. Žárupevné oceli jsou odolné vůči creepu. Použití žáruvzdorných a korozivzdorných ocelí nachází uplatnění spíše během navařování při opravách turbínových rotorů.

Ve svarovém spoji rotoru turbíny se mohou nacházet různé defekty, kterými jsou póry, vměstky, mikrostaženiny, staženiny a hlavně trhliny. Mezi nejčastější vady ve svarových spojích rotorů parních turbín patří trhliny za studena a žíhací trhliny. Veškerým vadám je nutno předcházet optimalizovaným svařovacím postupem. Kvalita svaru musí být bezdefektní.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY [5]

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK, . *Technologie svařování a zařízení*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. 394 s. ISBN 80-85771-81-0.
2. *Alstom* [online]. c2010 [cit. 2011-04-16]. Alstom Executives Discuss Importance of New Chattanooga Facility. Dostupné z WWW: <<http://www.alstom.com/power/news-and-events/news/Alstom-Executives-Discuss-Importance-of-New-Chattanooga-Facility-20100720/>>.
3. BARTÁK, Jiří, et al. *Učební texty: Pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2002. 417 s. ISBN 80-85771-97-7.
4. BLOCH, Heinz P. *A Practical Guide to Steam Turbine Technology*. 2. ed. United States of America: McGraw-Hill, 1996. 348 s. ISBN 0-07-005924-1
5. *Citace.com* [online]. c2004 [cit. 2011-04-12]. Citace.com. Dostupné z WWW: <<http://citace.com>>.
6. ČSN EN 1011-2. b.m.: Český normalizační institut, 1.4.2002. 56 s.
7. DVOŘÁK, Milan, et al. *Technologie II*. 3.doplňené. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
8. FOLKOVÁ, Eva, Pavel HRÁNEK a Jiří ŠTUMBAUER. Navařování rotorů ve Škoda Power a.s.. *Metal* [online]. 2006, [cit. 2011-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2006/sbornik/papers/209.pdf>>.
9. HUTCHINSON, J; CONROY, R; STALKER, R. Fabricated turbine rotors - Advanced steam turbines. *Siemens Power Generation* [online]. 2004, [cit. 2011-04-18]. Dostupný z WWW: <http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/DTICC148_file19122.pdf>.
10. JANSSEN, Wolfgang. Welding on rotors for power plant turbo sets state of the art. *Siemens AG* [online]. 2005, [cit. 2011-04-12]. Dostupný z: <http://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/steam-turbines-power-plants/2_Welding_on_Rotors.pdf>
11. JONŠTA, Zdeněk, et al. *Žárupevné oceli a slitiny*. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava , 2009. 392 s. ISBN 978-80-248-2187-0.
12. KOLEKTIV autorů *Materiály pro namáhané svařované konstrukce výrobků provozované v tepelně energetických zařízeních*. Brno: TDS Brno - SMS, s.r.o., 2008. 266 s. ISBN 978-80-87102-01-5.
13. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HÁJEK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1.vyd. Ostrava: Český svářečský ústav: VŠB - Technická univerzita s.r.o. Ostrava, VŠB technická univerzita Ostrava, 2009., s. 241. ISBN 978-80-248-2025-5.

14. MACEK, Karel, et al. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 164 s. ISBN 80-01-03513-1.
15. PILOUS, Václav a Karel STRÁNSKÝ. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. 1.vyd. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1989. Struktura a mechanické vlastnosti ocelí pro energetické strojírenství, s. 208. ISBN 80-200-0007-0
16. PILOUS, Václav. Nové nízkouhlíkové oceli feritické báze a jejich vzájemná svařitelnost. *Konstrukce* [online]. 2009, 5/2009, [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/nove-nizkouhlikove-oceli-feriticke-baze-a-jejich-vzajemna-svaritelnost/>>. ISSN 1803-8433.
17. *Příručka pro svařování pod tavidlem: Technická příručka*. b.m.: ESAB Vamberk, 2009. 96 s. reg. č. XA00136020.
18. PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu II.*. 2.opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. s. 392. ISBN 80-7204-248-3.
19. PURMENSKÝ, Jaroslav; Václav FOLDYNA a Karel MATOCHA. Perspektivní žárupevné oceli a jejich vlastnosti a praktické využití. *Metal* [online]. 2006, [cit. 2011-04-12]. Dostupný z: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2006/sbornik/papers/162.pdf>>
20. SCHAARSCHMIDT, Andreas; Eduard JENIKEJEW a Greg NITCH. Performance increase through world class technology and implementation. *Siemens AG* [online]. 2005, [cit. 2011-04-12]. Dostupný z: <http://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/steam-turbines-power-plants/1_Performance_Increase.pdf>
21. SHIGE, Takashi, et al. Development of large-capacity, Highly efficient welded rotor for steam turbines. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd* [online]. 2001, No.1, [cit. 2011-4-12]. Dostupný z: <<http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e381/e381006.pdf>>.
22. *Welco.cz* [online]. b.r. [cit. 2011-05-18]. Schafflerův diagram. Dostupné z WWW: <http://www.welco.cz/my_files/dokumenty/schaeffler_diagram.pdf>
23. *Wikipedia.org* [online]. b.r, 8.4.2011 [cit. 2011-05-18]. Wikipedie. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Turbína>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A5	Prodloužení	[-]
bcc	Krychlová prostorově středěná mřížka	
CET	Uhlíkový ekvivalent	[-]
fcc	Krychlová plošně středěná mřížka	
HD	Obsah vodíku	[m ³ /kg]
Mo _{ekv}	Molybden ekvivalent	[-]
PA	Svařovací poloha vodorovná shora	
PB	Svařovací poloha vodorovná šikmo shora	
PC	Svařovací poloha vodorovná	
Q	Vnesený tepelný výkon	[J]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
t	Čas	[s]
T _{int}	Teplota interpass	[°C]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
T _{př.}	Teplota přehřevu	[°C]
ε	Poměrné přetvoření	[-]
ΔT	Rozsah teplot pro pokládání housenek	[°C]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1

Zpracování WPS