

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OVĚŘENÍ VLIVU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA VLASTNOSTI
PROGRESÍVNÍCH ŽÁRUPEVNÝCH
OCELÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ VOLF

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Volf

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Ověření vlivu tepelného zpracování na vlastnosti progresivních žárupevných ocelí

v anglickém jazyce:

Verification of heat treatment on properties of progressive heat resisting steels

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nové typy žárupevných ocelí umožňují konstrukční řešení s tenčí stěnou namáhaných částí, což výrazně ovlivňuje hmotnost konstrukce. K tomu, aby bylo užití těchto ocelí ještě efektivnější je třeba posoudit nutnost tepelného zpracování po svaření.

Cíle diplomové práce:

- 1) Popis moderních žárupevných ocelí. Teorie žáruvzdornosti.
- 2) Hodnocení vlastností svarů (zejména TOO) tepelně zpracovaných a nezpracovaných. Metalografická dokumentace makro a mikrostruktury, průběh mikrotvrdosti.
- 3) Vyhodnocení experimentů, závěry pro praxi.

Seznam odborné literatury:

1. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6.
USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
2. FREMUNT, P., PODRÁBSKÝ, T. Konstrukční oceli, CERM, Brno:
1996. 261 s. ISBN 80-85867-95-8
3. PECHA J., VÝROSTKOVÁ A., JEDINÁKOVÁ M. Zváranie
martenzitickéj ocele P92 v energetike. Zváranie. 2005.
no. 3, p. 68-75. ISSN 0044-5525
4. JONŠTA Z., HERNAS A., TVRDÝ M., ČÍŽEK L., PURMENSKÝ J.
Žárupevné oceli a slitiny, Žilina: ZUSI Žilina. 2002.
ISBN 80-968605-6-9

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 19.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

VOLF Ondřej: Ověření vlivu tepelného zpracování na vlastnosti progresivních žárupevných ocelí

Předmětem diplomové práce je zkouška postupu svařování žáropevné oceli T24 metodou TIG. V praxi se jedná o spojování membránových stěn při stavbě parních elektrárenských kotlů. Hlavní výhoda oceli T24 kromě vysoké žáropevnosti je ta, že její svařování nevyžaduje přehřev ani konečné tepelné zpracování. V rámci experimentu byly natupo svařeny trubky z oceli T24 a několika zkouškami byl hodnocen svarový kov. Zadavatelem tématu je ALSTOM Power, s.r.o.

Klíčová slova: Ocel T24, svařování, žáropevné oceli, membránové stěny

ABSTRACT

VOLF Ondřej: Verification of heat treatment on properties of progressive heat resisting steels

The topic of this thesis is pre-welding process specification for heat resisting T24 steel with TIG method. This is concerned welding waterwalls during construction electrical steam boilers. The main advantage T24 steel, except high heat resistance, is T24 doesn't need to pre-heating neither post-welding heat treatment. Two tubes from T24 steel was flash welding and evaluating weld metal with several tests in this experiment. ALSTOM Power, s.r.o is submitter of this project.

Key words: T24 steel, welding, heat resisting steel, waterwall

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOLF Ondřej: Ověření vlivu tepelného zpracování na vlastnosti progresivních žárovevných ocelí; Brno, 2009. 63 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce: Doc. Ing. Ladislav Daněk, Csc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 28.5.2009

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé práce Doc. Ing. Ladislavu Daňkovi a CSc, Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné rady a připomínky při tvorbě, dále Ing. Romanu Bohátkovi Ph.D. z Alstom Power za vznik tohoto zajímavého diplomového tématu a možnost na něm pracovat. Velký dík patří i Petru Vašíčkovi za vedení a pomoc s praktickou částí práce, Ing. Janu Buriánovi za další cenné rady a panu Novotnému za svaření vzorků. Děkuji metalografické laboratoři firmy Alstom Power za provedené mechanické zkoušky a sepsání zkušebního protokolu. Vděčný jsem také Bc. Martině Růžičkové za pomoc při zpracování použité literatury a Bc. Radku Kristovi za grafický přínos této práci.

OBSAH

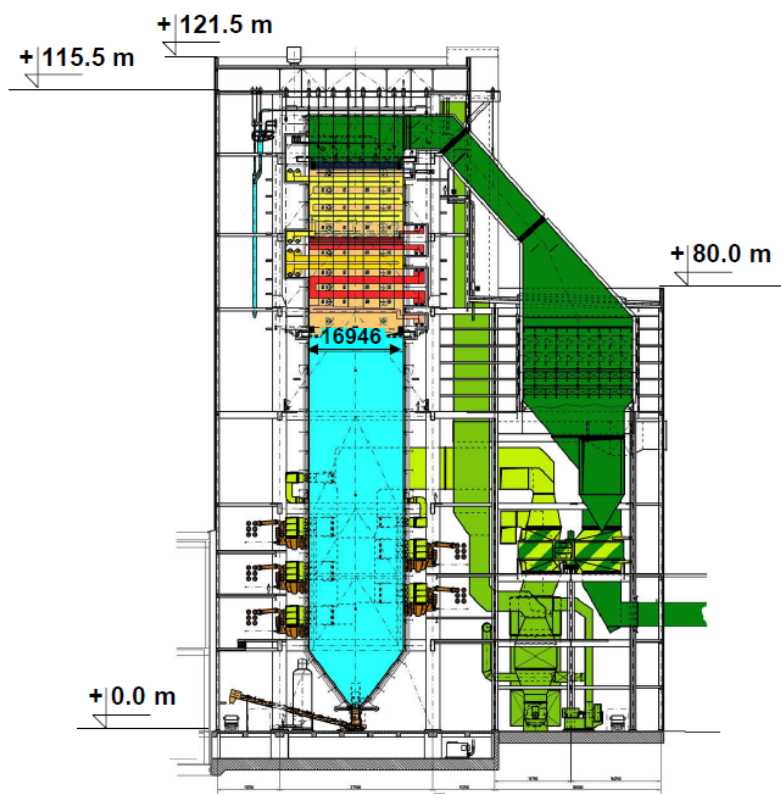
Oficiální zadání.....	2
Abstrakt.....	3
Bibliografická citace.....	4
Čestné prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
1. Úvod	9
2. Kotle a membránové stěny kotlů.....	12
3. Žáropevné oceli.....	15
3.1. Podstata žárovevnosti.....	15
3.1.1. Precipitační zpevnění	15
3.1.2. Substituční zpevnění	16
3.2. Historie a současnost žárovevných ocelí.....	18
3.3. Rozdělení žárovevných ocelí	18
3.3.1. Rozdělení dle použití	18
3.3.2. Rozdělení dle chemického složení.....	22
3.4. Ocel T24	23
3.4.1. Chemické složení a struktura	24
3.4.2. Mechanické vlastnosti	26
3.4.3. Creepové vlastnosti	28
4. Svařování žárovevných ocelí	29
4.1. Historie svařování.....	29
4.2. Metody svařování používané u parních kotlů.....	30
4.3. Svařitelnost žárovevných ocelí.....	32
4.4. Svařitelnost oceli T24.....	32
4.4.1. Svařování obvodových svarů.....	33
4.4.2. Svařování podélných svarů.....	35
5. Zkouška postupu svařování – experimentální část.....	37
5.1 Svařování zkušebních kusů.....	37
5.2 Mechanické zkoušky svarového kovu.....	40
5.2.1 Příčná zkouška tahem.....	40
5.2.2 Zkouška lámavosti.....	41
5.2.3 Zkouška rázem v ohybu.....	44
5.2.4 Fraktografie lomu tělísek ze zkoušky rázem v ohybu.....	45
5.2.5 Zkouška tvrdosti.....	48
5.2.6 Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů.....	51
5.2.7 Diskuze výsledků zkoušky.....	57
5.3 Opakované mechanické zkoušky svarového kovu.....	57
5.3.1 Opakovaná zkouška rázem v ohybu.....	57
5.3.2 Diskuze výsledků opakované zkoušky.....	58
6. Závěr.....	59

Seznam použitých zdrojů.....	60
Seznam příloh.....	63
Přílohy	

1. ÚVOD

[1] [2] [3] [4] [5] [11] [12] [13]

V posledních 10 až 15 letech vedl levný zemní plyn ve spojení s technickými a ekonomickými parametry plynových turbín a paroplynových zařízení, k jejich rozsáhlému využívání, čímž došlo k útlumu výstavby uhelných elektráren. Zvýšením cen zemního plynu a ropy je vývoj uhelných bloků opět na pořadu dne. Mimo to ekonomické tlaky a náklady na ochranu životního prostředí odůvodňují přechod k ekologicky šetrnějším zařízením, než jsou ta stávající. To je dosažitelné nejen díky snížení vsázky paliva, tedy díky snížení specifické spotřeby palivo-tepla pro výrobu jedné kilowatthodiny, ale především zvýšením parametrů tlaku a teploty páry, což s sebou přináší zvýšení účinnosti a snížení zatížení životního prostředí. Vysoké účinnosti může být dosaženo pouze použitím nadkritických parametrů páry. Jen tak jí lze zvýšit nad 40%.



Obr. 1.1 Rozměry moderního parního kotle [11]

Za nadkritické parametry páry jsou považovány provozní tlaky nad tzv. kritickým bodem, tj. tlakem 22,1 MPa a teplotou 374,15 °C, kdy sytá voda přechází přímo v sytou páru, aniž by při tom vznikla dvofázová směs běžně označovaná jako mokrá pára. Elektrárenské bloky pracující s párou nad kritickým bodem se dají ještě dále rozdělit na bloky nadkritické s tlakem ostré páry 24-25 MPa a teplotou 540-560 °C, a ultrakritické s tlakem ostré páry 25-31,5 MPa a teplotou 580-600°C/600-650°C.

Nadkritické bloky jsou ekologicky, provozně i ekonomicky plně srovnatelné s paroplynovými zařízeními na zemní plyn. Uhlí, navzdory velkému pokroku ve využití alternativních zdrojů energie, je a zůstane celosvětově hlavním zdrojem energie, který je nutno s maximální efektivností zužít.

	Japonsko	USA	Evropa
dnes	605°C-613°C 25 MPa	593°C 27MPa	600°C-605°C 28 - 30MPa
nejbližší budoucnost	630°C 25MPa	620°C-650°C 28MPa	600-625°C 28 - 30MPa
cíl 2014/15	~700°C 35MPa	760°C 35MPa	700-720°C 35MPa

Tab. 1.1 Vývoj parametrů parních kotlů [3]

S vývojem tepelných elektráren musí korespondovat vývoj žárovevých ocelí. U těch je požadována vyšší mez pevnosti při tečení, vynikající odolnost proti oxidaci a také lepší odolnost proti korozi za zvýšených teplot. Tyto vlastnosti jsou požadovány především u teplotně nejvíce namáhaných přehřívákových trubek, ale potažmo i dalších komponent kotle včetně membránových stěn, tvořících jeho obálku. Celosvětově rozšířené oceli 10CrMo9-10 (T22), a 13CrMo4-4 nemají dostatečnou žárovevnost pro membránové stěny ultrakritických kotlů. Byly proto vyvinuty nové perspektivní oceli a to v Japonsku ocel T23 a téměř současně v Německu ocel T24. Ocel T24 bude použita i při výstavbě nového kotle pro severočeskou elektrárnu Ledvice. Do roku 2012 zde bude instalován zcela nový blok o výkonu 660 MW místo dvou ze současných třech 110 MW bloků. Účinnost bude, především díky věžovému granulačnímu kotli o produkci cca 1678 tun páry za hodinu, pracujícímu s nadkritickými parametry páry, okolo 47 %, čímž dojde k výraznému snížení spotřeby paliva i emisí. Tato stavba by měla dosahovat výšky 145 metrů, čímž téměř o 40 metrů překoná dosud nejvyšší stavbu Česka hotel City Tower v Praze.

Společnost ČEZ investuje do realizace tohoto projektu cca 26 mld. Kč. Spalováno bude hnědé uhlí z nedalekého dolu Bílina o výhřevnosti 11-13 MJ/kg. Nový blok bude spolu s dosluhujícím navíc sloužit jako zdroj tepla pro okolní obce a města. Výstavba již byla započata v listopadu 2007 a s uvedením do provozu se pak počítá okolo června 2012. Za dobu své životnosti by měl nový zdroj vyrobit cca 160 mld. kWh proudu, což odpovídá spotřebě ČR přibližně za tři roky. Díky 10 % nímu navýšení účinnosti klesne spotřeba uhlí i emise CO na 1 kWh o 26 %.

Dodavatelem tohoto největšího a nejmodernějšího kotle v České republice bude Alstom Stuttgart a Alstom Brno. Celková hodnota kontraktu pro Alstom je cca 400 milionů euro a začátek montáže je naplánován na polovinu roku 2010. Společnost ALSTOM je jedním z předních dodavatelů pro energetický a dopravní průmysl. Má svoje zastoupení v 70 zemích a pracuje pro ni téměř 80 tisíc zaměstnanců. Roční obrát firmy je v současné době 16,7 miliard EUR.



Obr. 1.2 Studie elektrárny Ledvice s novým nadkritickým blokem [12]

Parametry	Nový zdroj	Bloky B2 a B3
Výkon	660 MW _{el}	2 × 110 MW _{el}
Parametry přehřáté páry	27,3 MPa/600 °C	12,8 MPa/540 °C
Parametry přihřáté páry	4,9 MPa/610 °C	3,6 MPa/540 °C
Emisní limity NO _x	200 mg/Nm ³	650 mg/Nm ³
Emisní limity SO ₂	150 mg/Nm ³ (200 dle legislativy)	1.700 mg/Nm ³
TZL	20 mg/Nm ³ (30 dle legislativy)	100 mg/Nm ³
Účinnost bloku (brutto)	cca 47 %	cca 37 %
Spotřeba uhlí	656 kg/MWh	1.130 kg/MWh
Emise CO ₂	735 kg/MWh	1.356 kg/MWh
Emise NO _x	0,55 kg/MWh	2,11 kg/MWh
Emise SO ₂	0,41 kg/MWh	5,01 kg/MWh
TZL	0,06 kg/MWh	0,08 kg/MWh

Tab. 1.2 Srovnání technických údajů nového bloku elektrárny Ledvice a nahrazovaných bloků B2 a B3 [13]

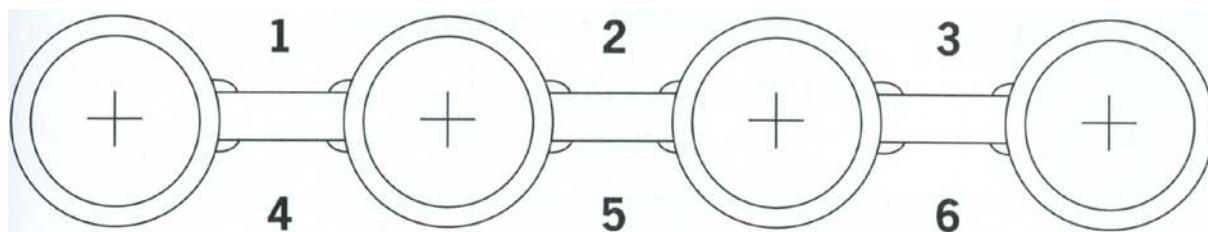
2. KOTLE A MEMBRÁNOVÉ STĚNY KOTLŮ [1] [2] [6] [7] [11] [14]

Kotel je uzavřená nádoba, ve které se ohřívá voda a mění na páru. Ta je poté přivedena na turbínu, kde expanduje a předává energii lopatkám. Materiály používané pro stavbu kotlů jsou především ocel, litina a měď.

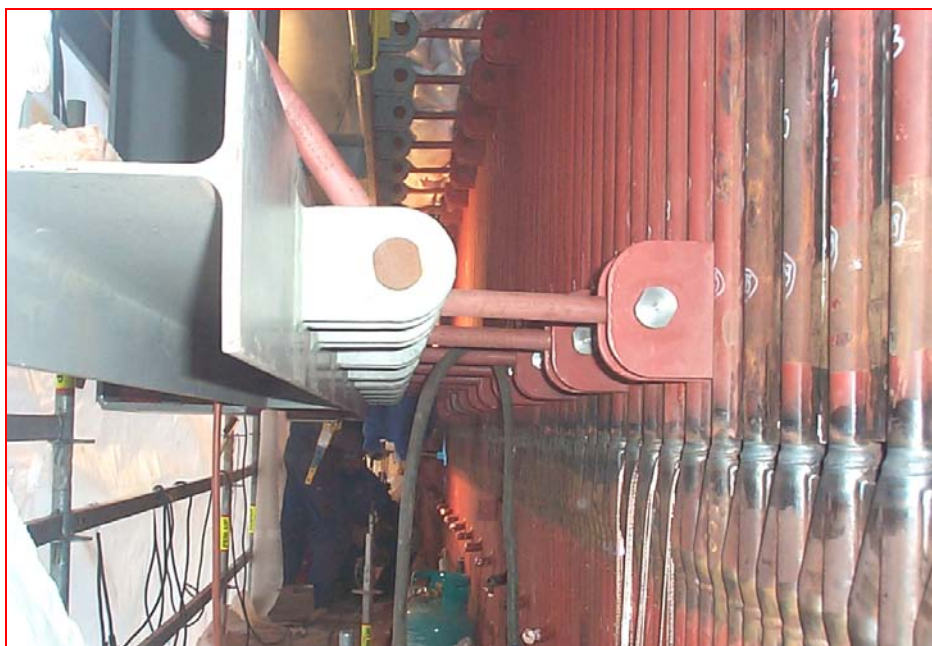
Kotle je možné rozdělit dle mnoha způsobů:

- dle použití: elektrárenské, teplárenské, kotle pro vytopny, pro spalovny, utilizační (na odpadní teplo)
- dle provedení: stacionární, mobilní, balené
- dle použitého paliva: kotle na tuhá paliva (roštové, práškové, granulační, výtavné, cyklónové, fluidní), kotle na kapalná paliva, kotle na plynná paliva
- dle pracovního média: teplovodní (horkovodní), parní
- dle konstrukce výparníku: velkoprostorové (válcové, plamencové, žárotrubné, kombinované, skříňové), článkové (sekcionální), strmotrubné (s přirozeným či nuceným oběhem, průtočné, se superponovanou cirkulací apod.)
- dle tlaku: nízkotlaké (do 2,5 MPa), středotlaké (do 6,4 MPa), vysokotlaké (do 22,5 MPa), s nadkritickým tlakem
- dle způsobu nasazení: špičkové, pološpičkové, pro základní zatížení

Začátkem 60-tých let se výparníkové části energetických celků konstruovaly výhradně ze sólo trubek s navařenými plochými částmi, které byly navzájem svařeny. Takové stěny byly sice kompaktní, ale málo plynotěsné což neumožňovalo pracovat s vysokými tlaky páry. Nástupcem se staly pod tavidlem svařované membránové stěny, které umožňují spalování pod určitým přetlakem. Membránovou stěnu tvoří střídavě trubka a plech svařené nejčastěji metodou APT. Délky trubek a plechů jsou např. 16metrů. Vznikají tak 16 metrové bloky, jenž jsou dopravovány na místo výstavby kotle a spojovány ručně metodou TIG.



Obr. 2.1 Profil svařované membránové stěny [14]



Obr. 2.2 Membránová stěna parního kotle

Parní kotle jsou charakterizovány těmito parametry:

- Jmenovitý hmotnostní tok vyrobené páry (dosažený v trvalém provozu při dodržení jmenovitých hodnot základních parametrů tj. tlaku a teploty páry a napájecí vody při spalování projektovaného paliva)
- Jmenovitý tlak
- Jmenovitá teplota páry (přehřáté i přihřáté)
- Jmenovitá teplota napájecí vody
- Druh a vlastnosti paliva.

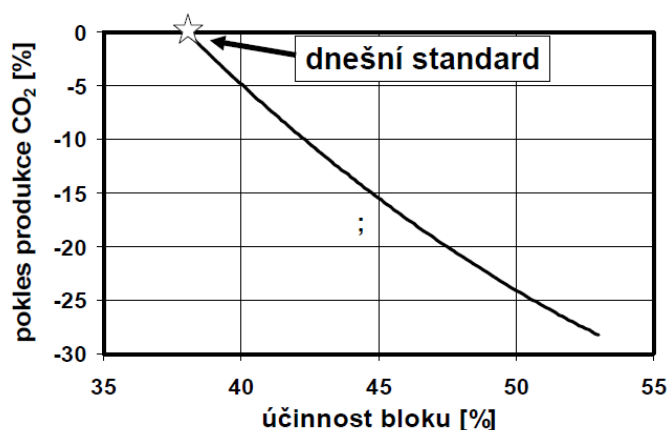
Další a zcela zásadní charakteristikou kotlů je jejich účinnost, která nejen ovlivňuje provozní náklady na výrobu energie, ale má i podstatný vliv na ekologické hledisko a šetrnost k životnímu prostředí. Při spotřebě uhlí nového ledvického bloku cca 600 tun uhlí za hodinu se úspory paliva díky zvýšení účinnosti pohybují okolo 150 tun za hodinu, tedy celých 70 vagónů uhlí denně při nepřetržitém provozu. Se zvyšováním teploty a tlaku páry přiváděné na turbínu roste i účinnost soustavy. Vývoj posouvá obě veličiny neustále nahoru. Nejstarší technologie výroby elektřiny byly založeny na termodynamických cyklech pára/voda. Počátkem 20. století dosahovala teplota páry uhelných kotlů kolem 200 °C při podkritických tlacích. Účinnost pracovních cyklů byla asi 12%. Koncem druhé světové války vývoj žárupevných materiálů a vývoj parních kotlů a turbín pokročil tak, že umožňovaly dlouhodobý spolehlivý provoz při tlaku a teplotě páry na vstupu do turbíny do 9 MPa/510 °C při čisté účinnosti kolem 30 %. Ke konci 50. let se začínají objevovat první bloky pracující s nadkritickými parametry. Jejich vývoj však byl na dlouhou dobu utlumen z důvodu extrémních nároků na drahé vysoce legované materiály, jejichž užití nemohlo ekonomicky obstát s ohledem na relativně nízké ceny paliv. Dvě ropné krize v roce 1973 a 1979 znovu iniciovaly větší

zájem o zvýšení účinnosti energetických přeměn. Vývoj nových modifikovaných materiálů (9-12 % Cr) s feriticko-martensitickou strukturou koncem 80. letech otevřel nové perspektivy pro nadkritické bloky. Horní mez parametrů páry se pohybovala okolo 18MPa/ 560 °C, s účinností kolem 36 %.

Dnes jsou již téměř standardní parametry stavěných bloků 28 MPa při teplotách kolem 600 °C s účinností 45%. Jedná se o tzv. „Generaci 600“. Aktuálně jsou vyvíjeny kotle „Generace 700“ s parametry 35-37,5 MPa /700°C dosahující účinnosti až 54%. S realizací se počítá po roce 2014. S výhledem po roce 2020 by měla nastoupit „Generace 800“ s maximální teplotou páry v oblasti 800°C a čistou účinností vyšší než 55%, tedy o polovinu vyšší než velká část instalovaných bloků na území ČR. Jako hlavní žáropevný materiál odolávající extrémním parametrům páry budou použity niklové slitiny.



Obr. 2.3 Použité materiály u kotlů (zleva) Generace 600, 700 a 800 [11]



Obr. 2.4 Vliv účinnosti uhlénného bloku na produkci CO₂ [6]

3. ŽÁROPEVNÉ OCELI

[2] [8] [9] [10] [11] [14] [15] [16] [17]

Zvyšování parametrů páry u kotlů musí být nutně doprovázeno vývojem nových ocelí. Komponenty tepelné energetiky, zejména tlakových částí parních kotlů, představují specifickou oblast vyžadující dlouhodobou odolnost proti působení vysokých teplot a tlaků. V reálném provozu se jedná o vnitřní přetlak páry až 35 MPa při teplotách 400 až 600°C. V těchto oblastech již nestačí pro definici odolnosti vůči vnějším vlivům krátkodobé pevnostní charakteristiky, jako mez kluzu resp. mez pevnosti, ale je nezbytné počítat s aplikací procesu tečení jako dominantního mechanismu porušení dané součásti. Tečení neboli creep je pomalá plastická deformace materiálu vyvolaná dlouhodobým napětím za vysokých teplot. Příčinou deformace je difúze atomů. Na základě tohoto jevu definujeme vlastnost oceli žárovevnost jako odolnost proti tečení za vysokých teplot. Žárovzdorné oceli narozdíl od žárovevných musí splňovat pouze podmínku minimální oxidace za vysokých teplot, odolnost vůči tečení není požadována. Vzhledem k velkým hmotnostním objemům komponent energetických zařízení pracujících v tzv. creepové oblasti je oprávněna snaha o jejich co nejlepší ekonomické využití.

3.1 Podstata žárovevnosti

Mikrostruktura žárovevných ocelí na feritické bázi a jí odpovídající užité vlastnosti včetně žárovevnosti jsou úzce závislé na typech a podílech přítomných mechanismů zpevnění. Za hlavní lze považovat precipitační zpevnění R_p a substituční zpevnění R_s , které můžeme vyjádřit pomocí vzorců jako:

$$R_p = f(l^{-1}) \quad [3.1]$$

$$R_s = f(x_\alpha) \quad [3.2]$$

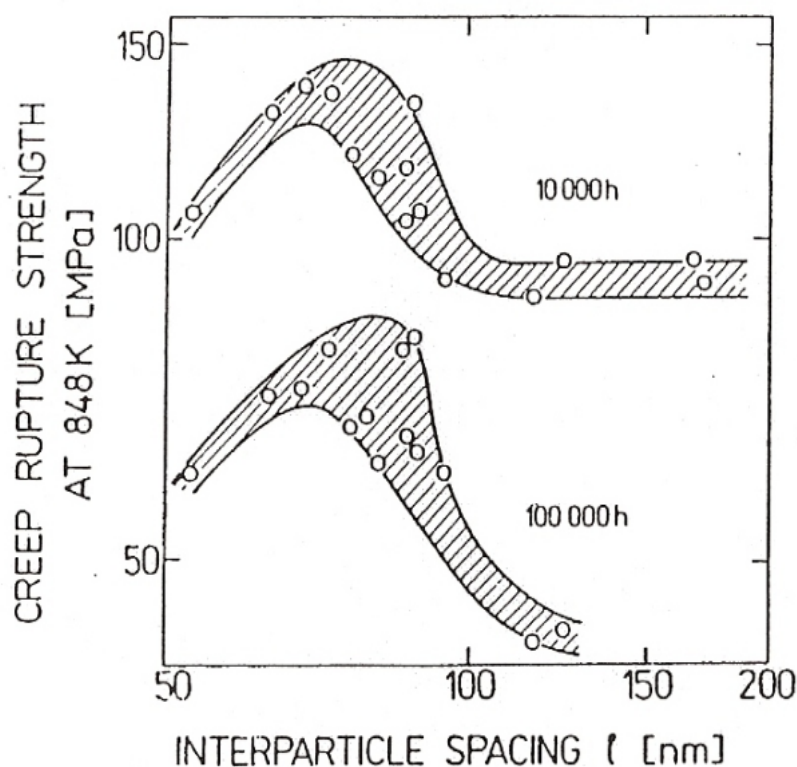
kde: l střední vzájemná vzdálenost částic vytvrzujících fází
 x_α obsah legujících prvků rozpuštěných v tuhém roztoku

Bylo jednoznačně prokázáno, že jemné částice precipitátu vyloučené ve struktuře v dostatečném množství (precipitační zpevnění) podobně jako optimální legování tuhého roztoku tzv. „velkými“ atomy Mo resp. W (substituční zpevnění) účinně omezují dislokační skluz nebo jejich difusní pohyb, které jsou nezbytné k realizaci procesu tečení při vysokoteplotní expozici.

3.1.1 Precipitační zpevnění

Je vyvoláno přítomností jemných precipitátů, které jsou překážkou v pohybu dislokační mřížkou. Vliv precipitačního zpevnění na žárovevnost je možno hodnotit tzv. vzájemnou vzdáleností částic disperzní fáze l_{ef} . Jestliže vzájemná vzdálenost částic l_{ef} je menší než velikost subzrn, rychlost creepu je přímo úměrná třetí mocnině

vzdálenosti částic, tj. $\epsilon_s = l_{ef}^3$. Pokud vzdálenost částic dosáhne velikosti subzrn, rychlost creepu ϵ_s již nezávisí na vzdálenosti částic l_{ef} . V tomto případě závisí žárovevnost oceli jen na substitučním zpevnění tuhého roztoku. Z toho vyplývá důležitost, jak množství a velikosti, tak rozměrově stálosti sekundárních fází ve feritických ocelích. Zpevnění nízkolegovaných CrMoV ocelí je určeno především disperzí karbidů nebo karbonitridů vanadu (V_4C_3 nebo VCN). Naproti tomu v nízkolegovaných CrMo ocelích se na zpevnění podílejí částice karbidu Mo_2C nebo Cr_7C_3 . V modifikovaných chromových ocelích s nízkým obsahem dusíku je zpevnění určeno převážně karbidy $M_{23}C_6$, zatímco v ocelích s vyšším obsahem dusíku se na zpevnění podílejí částice $M_{23}C_6$ a MX (VN, NbCN). Zmenšení vzájemné vzdálenosti částic l_{ef} vede, jak ke zvýšení meze kluzu za normální teploty, tak rovněž k výraznému zvýšení meze pevnosti při tečení. Zároveň se snižuje rychlost creepové deformace.



Obr. 3.1 Vliv vzájemné vzdálenosti částic V_4C_3 resp. VCN na žárovevnost nízkolegovaných CrMoV ocelí [8]

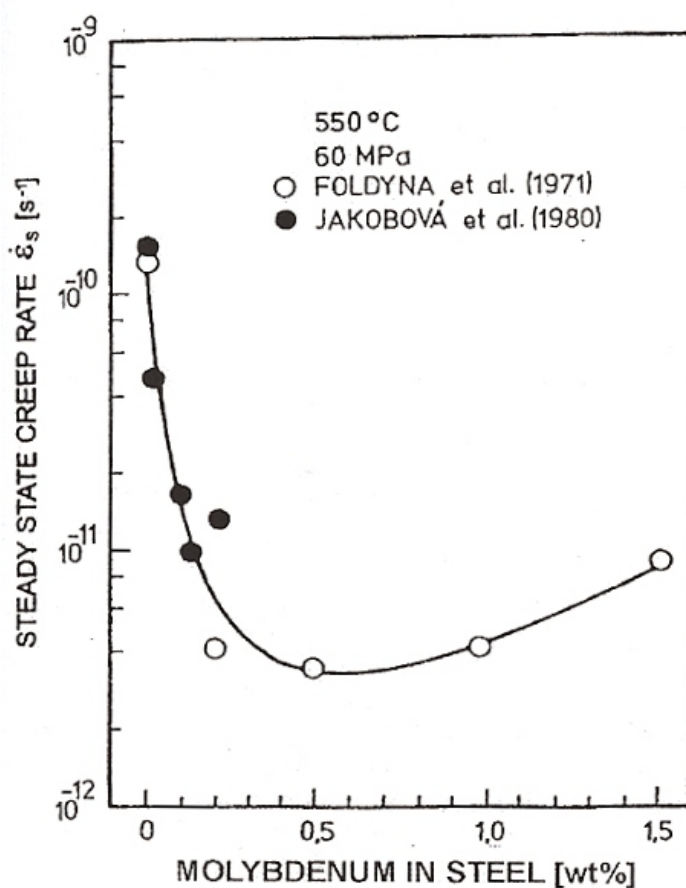
3.1.2 Substituční zpevnění

Vedle výše uvedeného precipitačního zpevnění je substituční druhým činitelem příznivě ovlivňujícím žárovevnost. Bylo zjištěno, že legování tuhého roztoku do tzv. limitu rozpustnosti atomy Mo resp. W snižuje rychlost sekundárního creepu a zvyšuje odolnost proti tečení. Tyto substitučně uložené atomy v základní mřížce kovu vyvolají její deformaci, čímž dojde k vytvoření účinné překážky proti creepu.

Obsahuje-li ocel wolfram je zpevnění tuhého roztoku závislé na molybdenovém ekvivalentu Mo_{eq} .

$$Mo_{eq} = Mo + 0,5 \quad [3.3]$$

Vliv obsahu Mo na rychlost tečení u nízkolegované CrMoV oceli je patrný z obr. 3.2, jenž ukazuje, že rychlost tečení se snižuje pouze do obsahu 0,5% Mo, čemuž odpovídá i růst creepové pevnosti. Úsilí zvýšit creepovou odolnost způsobem dalšího zvyšování obsahu Mo a W nad uvedené limity bude neúspěšné. Naopak přelegování oceli těmito prvky nad limit rozpustnosti může vést ve struktuře během vysokoteplotní expozice k tvorbě nežádoucích fází např. typu M_6C příp. Fe_2Mo (W) s nízkou rozměrovou stabilitou.



Obr. 3.2 Vliv obsahu Mo na rychlost tečení nízkolegované oceli 0,12%C - 0,5%Cr - 0,3% V [8]

3.2 Historie a současnost žárovevných ocelí

Zavedení slitinových ocelí jako trubkového materiálu spadá do období let 1920-1930, kdy dochází k rozvoji stavby moderních kotlů a vznikají požadavky na žárovevné vlastnosti vyšší, než byly schopny pokrýt uhlíkové oceli. V té době byla vyvinuta a používána ocel 15Mo3. Zprvu podobně jako u součástí parních turbín bylo použito jako hlavního legujícího prvku niklu.

Brzy poté přišla éra chrommolybdenových ocelí, která dala vzniknout ocelím 13CrMo4-4 nebo 10CrMo9-10. Začátkem čtyřicátých let se začíná stávat významným legovacím prvkem vanad. Příznivý vliv vanadu v nízkolegované oceli na její žárovevnost byl zjištěn později než u molybdenu. Vanadem legovaná ocel typu 0.5% Cr-0.5% Mo-0.3%V neboli 14MoV6-3 byla původně použita v Anglii. Bylo zjištěno, že výrazné zlepšení creepové odolnosti u této oceli je způsobeno precipitačním zpevněním částicemi karbidu vanadu V_4C_3 .

Nízkolegované feritické oceli v 60. letech byly svými vlastnostmi nedostačující pro konstrukci v té době prvních nadkritických kotlů. Pro tento účel se začala vyvíjet skupina 9-12% Cr ocelí, ze které byla jako první použita ocel X20CrMoV11-1. Mez pevnosti při tečení za teploty páry 540°C po expozici 10^5 hodin byla 147 MPa oproti 78 MPa u oceli 10CrMo9-10, v té době ještě často používané. Nízká cena paliv v této době způsobila nerentabilitu vysokolegovaných ocelí, tudíž byl další vývoj nadkritických kotlů utlumen. Vývoj nových modifikovaných materiálů (9-12 % Cr) s feriticko-martensitickou strukturou pokračoval až v 80. letech. V této skupině byla vyvinuta v USA ocel X10CrMoVNb9-1, známá jako P91. O 10 let později vzniká její nástupce X10CrWMoVNb9-2 tedy P92.

Ve skupině nízkolegovaných žárovevných ocelí byly v 90. letech vyvinuty japonská P23 a německá P24. V Japonsku byl vývoj nových ocelí tohoto typu založený na dolegování wolframem zatímco v Německu titanem. Obě oceli mají přídavek vanadu a boru. Jejich odolnost vůči tečení je značně vyšší než u 10CrMo9-10, a to cca na úrovni vysokolegovaných 9-12% Cr ocelí, zatímco cena díky úspornému legování je podstatně nižší. Vedle požadavku na vyšší mez pevnosti tečení bude použití vysokolegovaných 9-12%Cr ocelí limitováno jejich odolností proti vysokoteplotní korozi. Z toho důvodu byla v současnosti vyvinuta 12% Cr ocel VM 12, která se vyznačuje zlepšenými vlastnostmi v odolnosti proti vysokoteplotní korozi. Do budoucna se bude vývoj teplotně nejvíce namáhaných ocelí ubírat cestou niklových slitin, jako jsou: Alloy 617, Alloy 740 a Alloy 263.

3.3 Rozdělení žárovevných ocelí

3.3.1 Rozdělení dle použití

Níže je zachycen výčet žárovevných ocelí používaných pro jednotlivé komponenty kotlů, včetně jejich maximálních teplotních limitů dle EN 12952 a hodnot meze pevnosti v tečení v N/mm^2 po 100 000 hodinách.

Materiály pro membránové stěny:

13CrMo4-5 (T1) (feritická)

540°C

7CrMoVTiB10-10 (P24) (feritická)

550°C

X10CrWMoVNb9-2 (P92) (martenzitická)

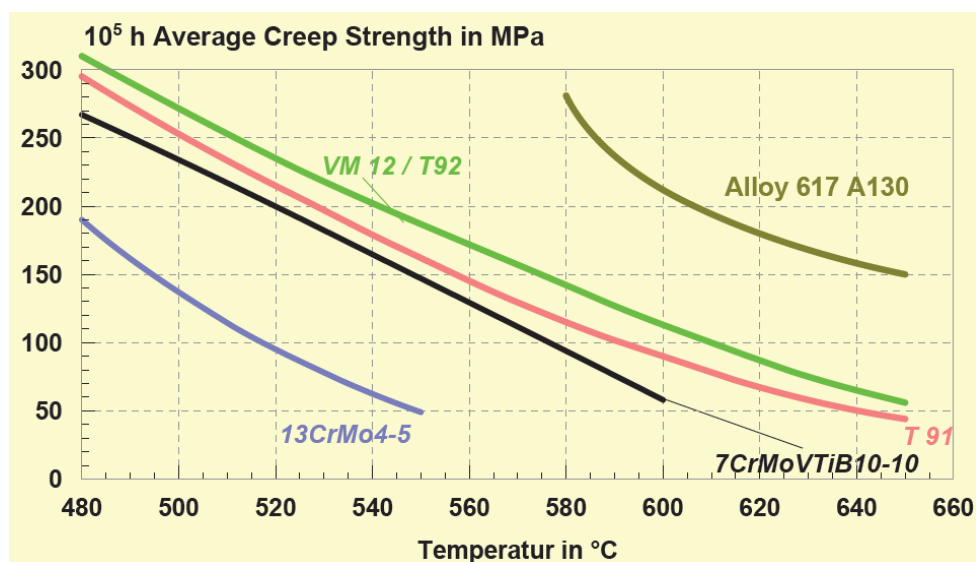
590°C

VM12SHC (martenzitická)

600°C

Alloy 617 mod. (niklová slitina)

650°C



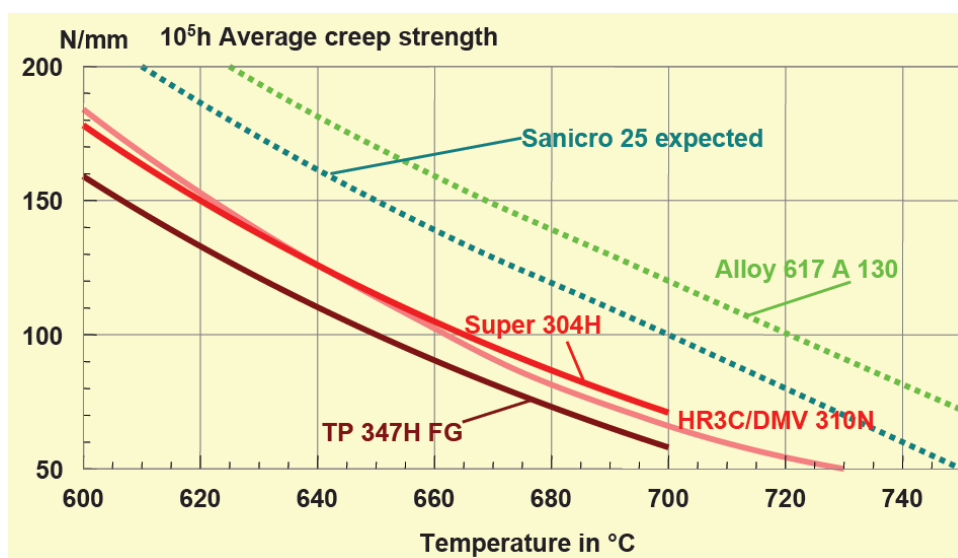
Obr. 3.3 Průměrné hodnoty meze pevnosti v tečení v N/mm² po 100000 h u ocelí pro membránové stěny [15]



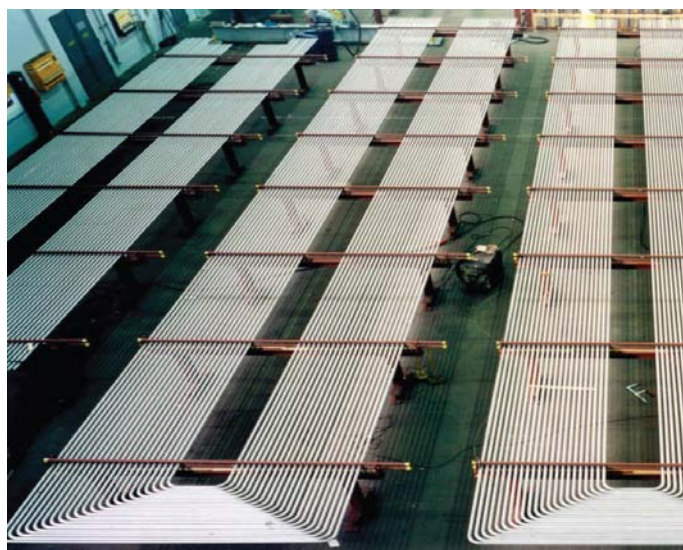
Obr. 3.4 Svařovaná membránová stěna parního kotle [11]

Materiály pro ohříváky a přehříváky:

VM12SHC (martenzitická)	610°C
TP 347H FG (austenitická)	615°C
S 304H (austenitická)	660°C
HR3C (austenitická)	670°C
Sanicro 25 (austenitická)	700°C
Alloy 617(mod) (niklová slitina)	770°C
Alloy 740 (niklová slitina)	770°C



Obr. 3.5 Průměrné hodnoty meze pevnosti v tečení v N/mm² po 100000 h u ocelí pro ohříváky a přehříváky [15]



Obr. 3.6 Přehřívákové trubky parního kotle [11]

Materiály pro parovody, sběrače páry a potrubí:

X10CrMoVNb91(P91) (martenzitická)

580°C

X11CrMoWVNb9-1-1(E911) (martenzitická)

600°C

X10CrWMoVNb9-2 (P92) (martenzitická)

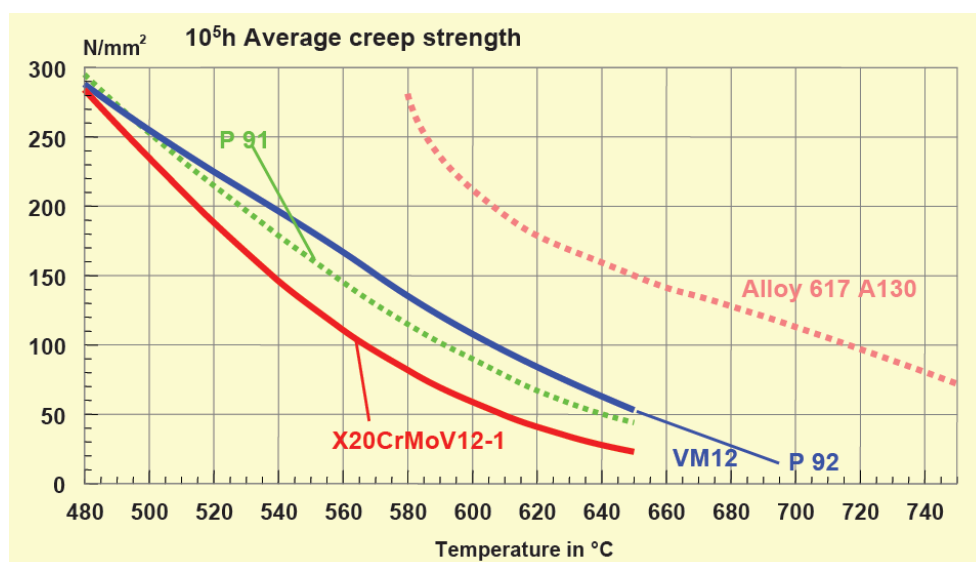
625°C (635°C pro přehříváky)

Alloy 617 (mod) (niklová slitina)

735°C

Alloy 263 (niklová slitina)

735°C



Obr. 3.7 Průměrné hodnoty meze pevnosti v tečení v N/mm² po 100000 h u ocelí pro parovody, sběrače páry a potrubí [15]



Obr. 3.8 Sběrač páry u membránového parního kotle [11]

3.3.2 Rozdělení dle chemického složení

Nelegované žárovevné oceli

Maximální pracovní teplota nelegovaných ocelí je omezena hranicí opalu a mezí tečení. Z hlediska opalu by bylo možné použít nelegované oceli až do 520°C, ale za této teploty mají již nízké mechanické vlastnosti a tloušťka stěny trubek by musela být příliš velká. Z toho důvodu se používají jen do teplot cca 350-400°C.

Nízkolegované žárovevné oceli

Dělíme je na oceli pro použití v oblasti meze kluzu a meze tečení. U ocelí první skupiny se zaručuje mez kluzu za normální i zvýšené teploty a dobré plastické vlastnosti. U ocelí druhé skupiny se požaduje mez tečení resp. mez pevnosti při tečení. Mez tečení za teploty např. 425°C byla definována jako napětí, které vyvolalo 1% deformaci po výdrži 10^4 hodin za teploty 425°C. Nízkolegované oceli se používají obvykle do teploty 550°C. Jsou legovány těmito prvky zvyšujícími žárovevnost:

- **Mo, W** - substitučně zpevňují tuhý roztok a zpomalují difúzní pochody
- **Mo, W, V, Ti, B, Nb** - vytvářejí jemně dispergované fáze tj. karbidy, nitridy a intermetalické fáze

Obsah uhlíku a legujících prvků musí být volen tak, aby se netvořil cementit, ale pouze speciální karbidy, které zpomalují tečení. Za teploty vyšší než 500°C příznivý vliv molybdenu klesá. Žárovevné oceli legované jen molybdenem se používají zřídka, protože po dlouhé výdrži za zvýšených teplot probíhá grafitizace cementitu a vyloučený jemný lupínkový grafit podstatně snižuje plastické vlastnosti oceli. Oceli se tedy legují ještě chromem, který cementit stabilizuje. Chrom zvyšuje mez pevnosti při tečení, pokud mají oceli po tepelném zpracování bainitickou matici. Většina dnešních žárovevných ocelí obsahuje vanad, který tvoří velmi stabilní drobné karbidy. Pokud jsou karbidy rozloženy rovnoměrně v matici a vzdálenosti mezi nimi jsou malé, blokují účinně pohyb dislokací. Nejlepší vlastnosti vykazuje poměr C/V = 1/3 až 1/4. Mez tečení nízkolegovaných ocelí zvyšuje také bor. Protože se hromadí na hranicích austenitických zrn a posouvá transformační křivku doprava, transformuje austenit na bainit za nižších teplot. Bor vyloučený na hranicích zrn omezuje také výskyt kavit a trhlinek, takže zpomaluje třetí stadium tečení. Přísada boru má význam především u součástí s větší tloušťkou stěny, protože umožňuje získat bainitickou matici i při ochlazování na vzduchu. Některé žárovevné oceli jsou stabilizovány niobem, jenž rozpuštěný v austenitu posouvá v diagramu ARA oblast feritu doprava. Protože se karbidy a karbonitridy niobu rozpouštějí až za vysokých teplot, závisí mez tečení na austenitizační teplotě.

Vysokolegované žárovevné oceli

Oceli této skupiny se používají v rozmezí teplot 600 až 650°C, kdy se kromě žárovevnosti požaduje také žáruvzdornost. Postupně nahradily austenitické žárovevné oceli, které nejsou za těchto teplot ještě plně využity, takže jejich použití je nevhodné. Na součástky petrochemických zařízení, na přehřívákové trubky parních kotlů apod. se používají oceli s obsahem 9% Cr a cca 1% Mo.

Žáropevnost zde zvyšuje vanad, jehož optimální obsah je 0,2 – 0,25%. Dalším legujícím prvkem je Mo. Při obsahu 3% se objevují v matici ostrůvky delta feritu, který zlepšuje svařitelnost.

Žáropevné oceli s obsahem 11% Cr byly odvozeny od martenzitických korozivzdorných ocelí, které mají dobrou odolnost proti korozi až do teploty 850°C. Protože však mají nízkou žáropevnost, bylo nutno je legovat dalšími prvky, jako jsou Mo, Nb, V, W, Co. Obsah uhlíku těchto ocelí je okolo 0,2% C.

Austenitické žáropevné oceli

Mají vyšší mez tečení, protože v hustě uspořádané plošně středěné mřížce probíhají difuzní pochody i za zvýšených teplot pomaleji. Austenitické oceli je možno použít až do teploty 700°C.

Chromniklové austenitické oceli

Základními legujícími prvky jsou chrom a nikl. Obsah chromu se pohybuje mezi 12 - 20%. Ke zvýšení žáropevnosti se přidává wolfram (2%), molybden (1-3%), někdy niob, titan, vanad a dusík. Vanad zvyšuje mez pevnosti při tečení zejména za nižších teplot. Za teploty 700°C je jeho vliv již malý. Přísada vanadu je účinná zejména za přítomnosti dusíku, protože při tečení precipitují na dislokacích nitridy vanadu, které hrubnou i po dlouhých výdržích na teplotě pouze nepatrně. Niob a titan v malém množství tvoří s uhlíkem stabilní karbidy. Nevýhodou ocelí s přísadou niobu je jejich sklon ke vzniku trhlin v okolí svaru a pokles houževnatosti po dlouhých výdržích na pracovní teplotě. Přísada boru se u austenitických ocelí neosvědčila. V množství 0,01% zpomaluje sice vylučování intermetalických fází a karbidů na hranicích zrn, po delší době se však vylučuje komplexní karbid $M_{23}(C,B)_6$, takže příznivý účinek zaniká. Bor zhoršuje kromě toho svařitelnost a tvařitelnost.

Manganchromové austenitické oceli

Tyto oceli neobsahují drahý nikl, tudíž jsou lacinější. Ke zvýšení stability austenitu se přidává malé množství dusíku, ke zvýšení meze tečení tantal, niob, titan a vanad.

Vytvrditelné žáropevné oceli

Tyto oceli jsou vhodné na pracovní teploty 650 – 700°C, kdy již nevyhovují austenitické chromniklové oceli. Vhodnou kombinací legujících prvků (Ti, Al, B, Mo) je možno získat ocel, která se za teploty 750°C vyrovná slitinám NIMONIC.

3.4 Ocel T24

Ocel T24 je nízkolegovaná žáropevná ocel, jejíž hlavní oblastí použití je konstrukce membránových stěn kotlů s nadkritickými parametry páry. Tato ocel má být použita i při výstavbě nového ledvického parního kotle a to poprvé v české republice. Byla vyvinuta na počátku devadesátých let v Německu, jako odpověď na japonskou ocel T23.

3.4.1 Chemické složení a struktura

Oceli T23 a T24 představují nástupce parametricky již nevyhovující oceli T22 (10CrMo9-10), ze které vycházejí. Japonská T23 byla dolegována ještě wolframem, německá T24 titanem. Obě oceli obsahují jako legující prvek vanad, který tvoří stabilní karbidy či karbonitridy o velice jemné disperzi. Kromě toho vstupují do hry intersticiální prvky bor a dusík, které mají rovněž prokázaný příznivý vliv na zvýšení žáropevnosti oceli. Chemické složení oceli T24, jejího předchůdce T22, konkurenta T23 a alternativy T91 je uvedeno v tabulce 3.1.

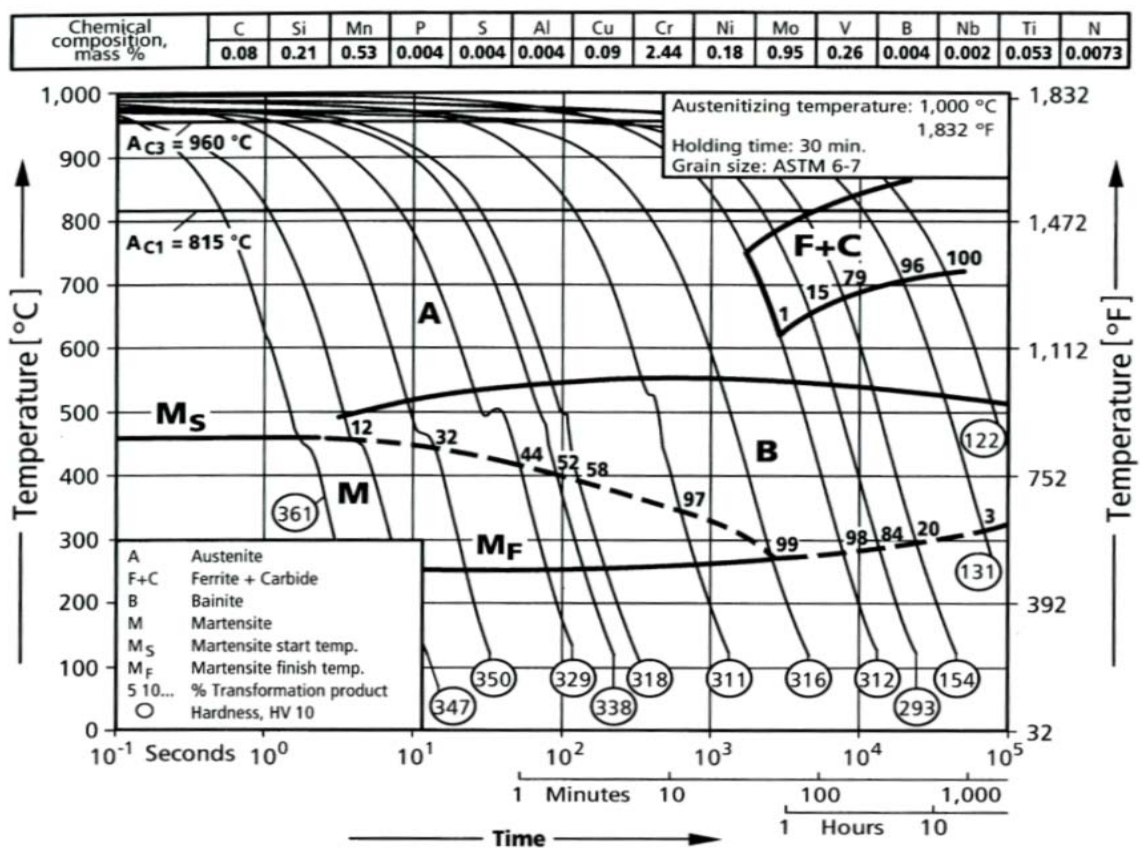
Standard	Grade	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ti	V	W	Cb	B	N	Ni	Al
ASTM A 213	T22	max. 0.15	0.30 0.60	max. 0.030	max. 0.030	0.25 1.00	1.9 2.6	0.87 1.13	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.
ASTM A 213 (Code Case 2199)	T23	0.04 0.10	0.10 0.60	max. 0.030	max. 0.010	max. 0.50	1.9 2.6	0.05 0.30	n.s. n.s.	0.20 0.30	1.45 1.75	0.02 0.08	0.0005 0.0060	max. 0.030	n.s. n.s.	max. 0.030
ASTM A 213 (Draft)	T24	0.05 0.10	0.30 0.70	max. 0.020	max. 0.010	0.15 0.45	2.2 2.6	0.90 1.10	0.05 0.10	0.20 0.30	n.s. n.s.	n.s. n.s.	0.0015 0.0070	max. 0.012	n.s. n.s.	max. 0.020
ASTM A 213	T91	0.08 0.12	0.30 0.60	max. 0.020	max. 0.010	0.20 0.50	8.0 9.5	0.85 1.05	n.s. n.s.	0.18 0.25	n.s. n.s.	0.06 0.10	n.s. n.s.	0.030 0.070	max. 0.40	max. 0.040

n.s. = not specified

Tab. 3.1 Chemické složení žárovevých ocelí T22, T23, T24 a T91 [14]

Filozofie vývoje oceli T24 sleduje dva základní směry. V první řadě jde o zvýšení žáropevnosti oproti konvenční oceli T22. Neméně důležitým cílem je zlepšení svařitelnosti oceli, čehož by se mělo dosáhnout snížením obsahu uhlíku pod hranici 0,10% a "úsporným" legováním oceli T24. Snížení obsahu legujících prvků v oceli T24 na hranici nezbytně nutnou pro zajištění žáropevnosti snižuje hodnotu uhlíkového ekvivalentu a tím i potřebnou teplotu předehřevu při svařování. Z ekonomického hlediska je však žádoucí, aby bylo možno membránové stěny konstruovat zcela bez nutnosti aplikace předehřevu a pokud možno i bez tepelného zpracování. Mimo to rozměrné membránové stěny by po tepelném zpracování vyžadovaly složité rovnání. Membránové stěny z oceli T24 předehřev ani tepelné zpracování po svaření nevyžadují.

Díky svému chemickému složení, vzniká u oceli T24 bainiticko-martensitická struktura v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí. Tvrdost se pohybuje okolo 350 HV v závislosti na obsahu uhlíku. ARA diagram oceli T24 je na obrázku 3.9.



Obr. 3.9 ARA diagram oceli T24 [14]



Obr. 3.10 Popuštěná bainiticko-martenzitická struktura oceli T24 [14]

3.4.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti za pokojových teplot oceli T24 v porovnání s dalšími ocelmi jsou uvedeny v tabulce 3.2. Mez kluzu a pevnosti za teplot zvýšených jsou potom na obrázku 3.11 a 3.12

Standard	Grades	Y.S. min. [MPa (ksi)]	U.T.S. min. [MPa (ksi)]	Elong. min. 2" [%]	Hardness max. [HB]
ASTM A 213	T22	205 (30)	415 (60)	30	163
ASTM A 213 Code Case 2199	T23	400 (58)	510 (74)	20	220
ASTM A 213 (Draft)	T24	450 (65)	585 (85)	20	250
ASTM A 213	T91	415 (60)	585 (85)	20	250
ASTM A 213	TP304 H	205 (30)	515 (75)	35	192

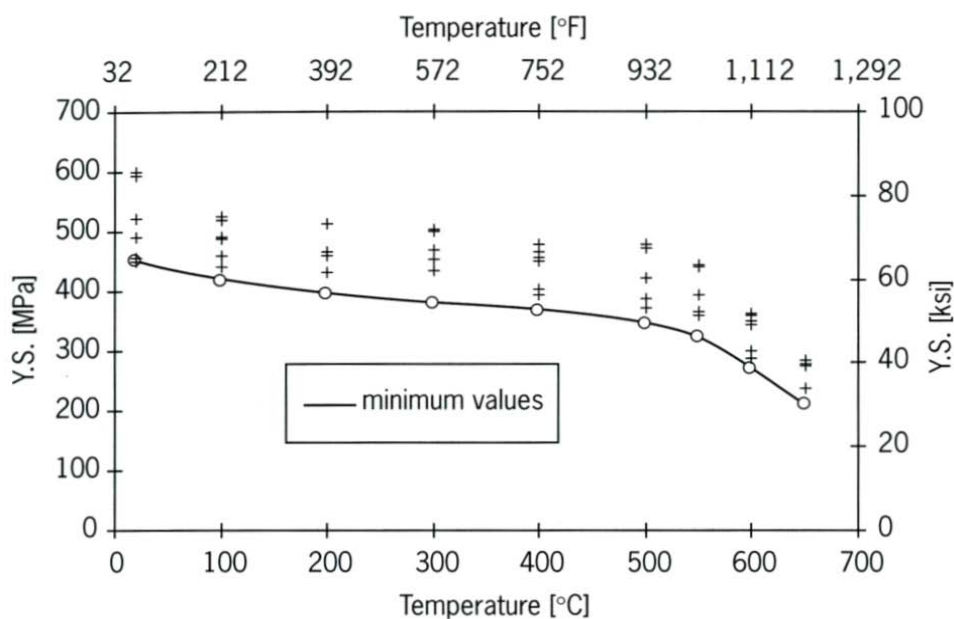
Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti oceli T24 a dalších ocelí za pokojových teplot [14]

Y.S. (yield stress) = mez kluzu v tahu

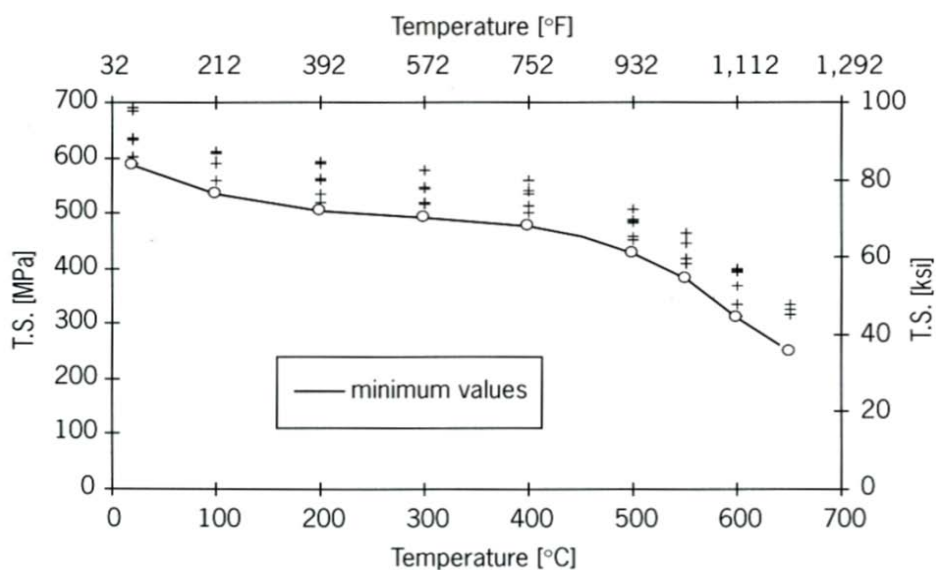
U.T.S. (ultimate tensile strength) = mez pevnosti v tahu

Elongation = tažnost

Hardness = tvrdost

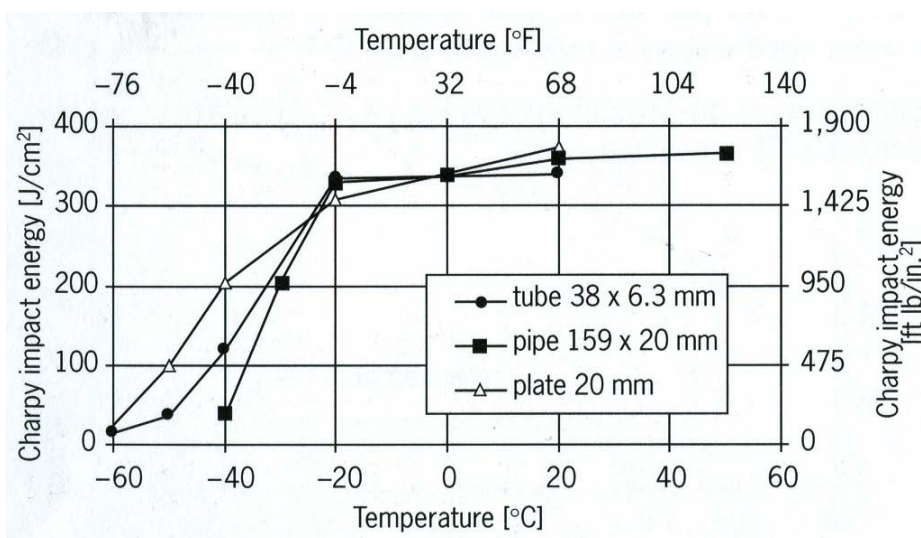


Obr. 3.11 Mez kluzu oceli T24 za zvýšených teplot [14]



Obr. 3.12 Pevnost v tahu oceli T24 za zvýšených teplot [14]

Výsledky zkoušek vrubové houževnatosti na vzorcích z desky, trubky a potrubí z oceli T24 jsou na obrázku 3.13.

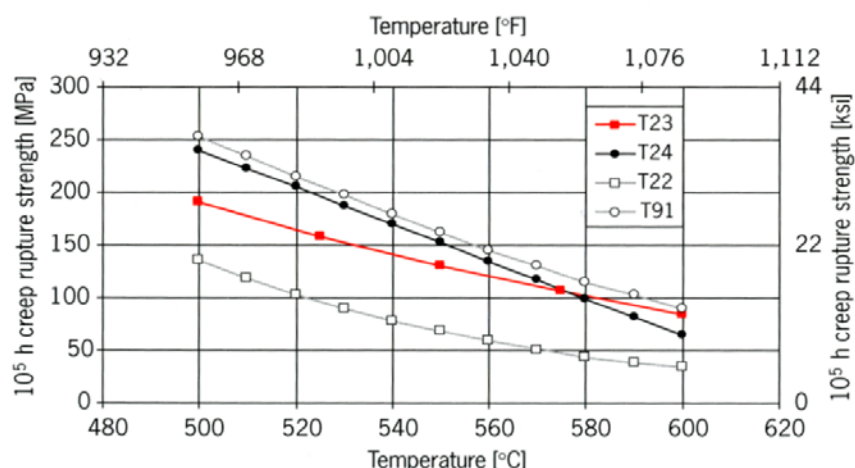


Obr. 3.13 Výsledky zkoušek vrubové houževnatosti na vzorcích trubky, potrubí a desky s V-vrubem z oceli T24 [14]

Dále byly pro ocel T24, provedeny zkoušky mechanických vlastností po umělém stárnutí. Vzorky byly nechány stárnout při 500, 550 a 600 ° C (930, 1020 a 1110 ° F) po dobu 100 až 50000 hodin. Výsledky se nijak významně nelišily od hodnot získaných před stárnutím.

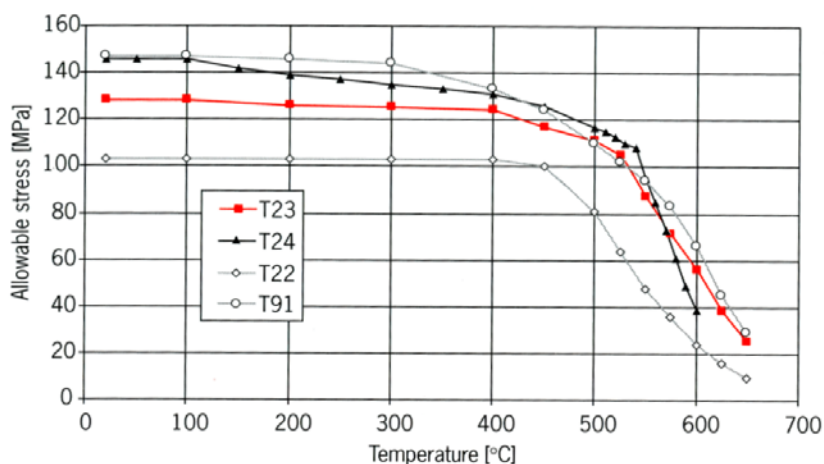
3.4.3 Creepové vlastnosti

Creepové zkoušky byly provedeny pro vzorky z oceli T24 při teplotách 500, 550 a 600 ° C (930, 1020 a 1110 ° F) v časech až 100.000 hodin. Byly zjištěny pouze minimální hodnoty tečení, stejně jako u konkurenční oceli T23. Obrázek 3.14 znázorňuje porovnání creepové pevnosti oceli T23 a T24 v porovnání s jinými běžně používanými oceli (T22 a T91).



Obr. 3.14 Creepová pevnost oceli T24 v porovnání s ostatními používanými oceli [14]

Obrázek 3.15 porovnává dovolené namáhání u T23 dle ASME 2199 a T24 s ostatními běžnými oceli.



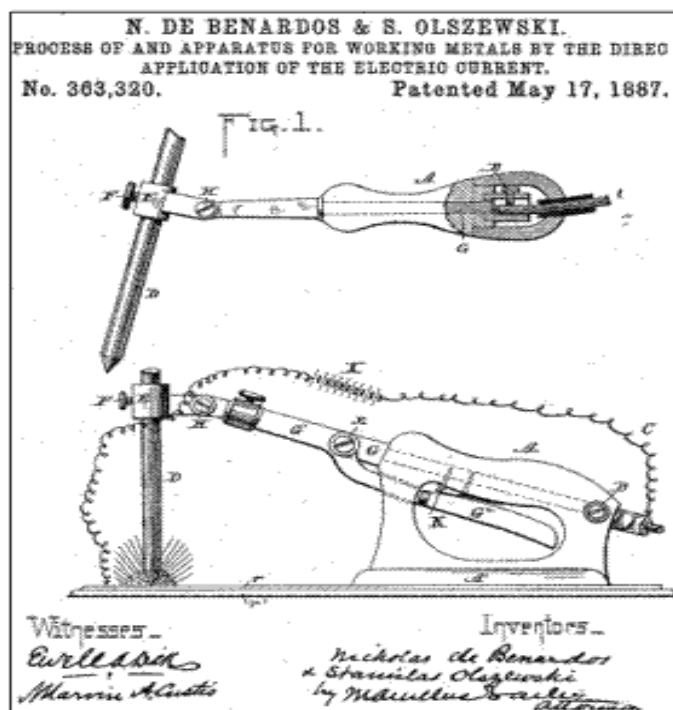
Obr. 3.15 Dovolené namáhání oceli T24 v porovnání s ostatními používanými oceli [14]

4. SVAŘOVÁNÍ ŽÁROPEVNÝCH OCELÍ [17] [18] [19] [20] [21]

Svařování můžeme zařadit do skupiny výrobních technologií vedle obrábění, tváření, či odlévání. Je jím zpracováváno 26% objemu kovových materiálů, což je ze všech technologií nejvíce.

4.1. Historie svařování

Historie svařování se počíná ve starověku, kdy již v době bronzové byla snaha o spojení kovů. Větší množství svařovaných železných nástrojů, které byly nalezeny, pocházejí z doby kolem roku 1 000 př. n. l. Ve středověku, bylo vyrobeno mnoho předmětů tzv. kovářským svařováním, kdy se oba spojované předměty do žhava zahřály a skoaly dohromady. Svařování, tak jak je známe dnes, bylo objeveno až v 18. století. Nejprve to bylo svařování a řezání plynem. První, kdo použil teplo elektrického oblouku ke svařování, byl zřejmě Auguste De Meritens ve Francii a to v roce 1881 při svařování olověných akumulátorových desek. První patent na svařování však získal Rus Nikolaj Nikolajevič Benardos se svým kolegou Stanislavem Olszewským roku 1885 v Anglii a 1887 v Americe. Jednalo se o svařování uhlíkovými elektrodami, které se rozšířilo koncem 19. století a začátkem století 20.



Obr. 4.1 Benardosův a Olszewského patent obloukového svařování [19]

Roku 1890 C. L. Coffin z Detroitu obdržel první americký patent pro svařování elektrickým obloukem za použití kovové elektrody. Kolem roku 1900 byla představena první obalená kovová elektroda. Byla silně obalena jílem nebo vápnem a výrazně stabilizovala oblouk. O několik let později (1907-1914) Švéd Oscar Kjellberg vynalezl obalenou elektrodu namáčenou ve směsi oxidů, tedy podobnou té dnešní. Mezitím bylo také objeveno Thompsonem odporové, bodové, švové a výstupkové svařování. V roce 1903 vynalezl Němec Goldschmidt svařování termitem za účelem spojování železničních kolejí. V roce 1920 bylo představeno automatické svařování. Vynalezl ho P. O. Nobel ze společnosti *General Electric*. Používalo se k navařování opotřeбенých hřidelů motorů, kol jeřábů a v automobilovém průmyslu. V roce 1926 obdrželi patent H. M. Hobard a P. K. Devers na svařování v ochranné atmosféře argonu a hélia. Tento způsob svařování byl dopracován ve 40. letech 20. století a používán pro svařování hořčíkových a hliníkových slitin a nerezové oceli. V roce 1948 byl podobný způsob odzkoušen s ocelovou tenkou elektrodou ve formě drátu. K význačnému objevu došlo v roce 1953, když Ljubavskij a Novošilov oznámili použití ocelových elektrod v atmosféře CO₂. Metoda se velmi rychle ujala, protože představovala velice výhodný kompromis mezi kvalitou a ekonomikou. V roce 1957 Gage vynalezl plazmové svařování a téhož roku bylo předvedeno i svařování elektronovým paprskem ve vakuu, které vyvinul J. A. Stohr ve Francii. V 80. letech minulého století bylo prvně použito ke svařování laseru.

4.2. Metody svařování používané u parních kotlů

Tak jak stoupaly parametry páry energetických bloků a měnila se legující složka žárovevých ocelí, objevovaly se nové problémy s jejich svařitelností. Svarové spoje na tlakových částech musí čelit stejným vlivům jako základní materiál. Svarový kov se tedy snaží základnímu materiálu co nejvíce přiblížit, což je pro vývoj jeden z hlavních úkolů. Jen pro ilustraci na membránových stěnách kotle o výkonu 460 tun páry za hodinu je přibližně 127 km svarů a v celém tlakovém systému bloku se nachází více jak 38 tisíc obvodových svarů.

V počátcích výroby kotlů metodou svařování bylo užíváno výhradně ruční metody obalenou elektrodou. Snaha o vyšší produktivitu přinesla razantní nástup metody odporového stykového svařování, která však zahrnovala i nevýhody v podobě oblastí svarového kovu s vysokou tvrdostí a tvorbu nadměrného výronku zhoršujícího proudění média. V 70 letech minulého století nastal rozmach obloukových metod v inertních atmosférách. Tyto metody se velmi rychle ujaly i v energetice a staly se nepostradatelnými dokonce i při svařování kořenových oblastí tlustostěnných potrubí. Zaručovaly vhodnou geometrii svaru a dobrou schopnost formování kořene, což je pro životnost spoje rozhodující. Při svařování menších tloušťek se svařování v ochranné atmosféře argonu časem podařilo automatizovat, což minimalizovalo vliv lidského činitele.

Při výrobě membránových stěn jednoznačně dominuje automatické svařování pod tavidlem (121, SAW). Geometrie svaru, především velikost nenatavené části trubky se pravidelně kontroluje na makro-výbrusech. Jako přídatného materiálu bylo dlouho používáno plného 2mm drátu.

V poslední době je možno zaznamenat snahu o zvýšení rychlosti svařování pod tavidlem. Jedna z cest je použití trubičkového plněného drátu, kde je optimální rychlost svařování 1,1-1,4 m/min. V Japonsku při svařování membránových stěn je využívána především metoda svařování MAG.



Obr. 4.2 Linka na svařování membránových stěn metodou APT

V oblasti svařování přehříváků a přehříváků z trubek s rovinnými a prostorovými ohyby dominuje metoda TIG (141, GTAW). Nenahraditelné místo má tato technologie hlavně ve stísněných prostorových podmínkách. I zde je však snaha proces automatizovat. Vznikla tak linka na výrobu tzv. "nekonečného trubkového hada". V lince je rozhodující svářecí automat TIG. Trubky se zarovnaným čelem se upnou do čelistí automatu bez mezery. Pevně fixovaný hořák za otáčení trubek zhotoví obvodový svar až do tloušťky stěny trubky 5,6 mm. Další možnosti jsou orbitální svařovací hlavy, kdy se naopak otáčí hořák kolem trubky. Ty jsou velice mobilní, tudíž jsou nezastupitelné především u trubek s ohyby.

Sběrné a rozváděcí komory kotlů jsou dimenzovány vzhledem k vysokým vnitřním tlakům jako tlustostěnné. Dna uzavírací komory se přivařují kombinací metod 141+111. Svařování metodou 121 by přineslo zvýšení produktivity, avšak je třeba vyřešit problém s udržení tavidla v oblasti svařování u malých průměrů. Budoucnost však bude patřit svařování v plynových atmosférách s trubičkovým drátem.

4.3 Svařitelnost žárovevných ocelí

Na svařování žárovevných ocelí je možno použít všechny technologie, které se používají u nelegovaných ocelí. V současné době se již upustilo od použití svařování plamenem z důvodu obtížné kontroly chemického složení a celistvosti svarů.

Nejlepších vlastností svarových spojů dosáhneme po tepelném zpracování, kterým je normalizační žíhání a popouštění nebo zušlechťování. Požadavkem moderních nízkolegovaných žárovevných ocelí je však nepřekročení tvrdosti 350 HV10 a absence trhlin, tedy dosažení vyhovujících vlastností svarového kovu i v nežíhaném stavu. A to především u materiálů určených k výrobě membránových stěn, kde po svaření již technicky není možné provést tepelné zpracování. Z ekonomického hlediska je žádoucí svařovat membránové stěny i bez předehřevu což je extrémně náročné na přídatný materiál, který musí mít velkou plasticitu a zároveň i dostačující žárovevnost.

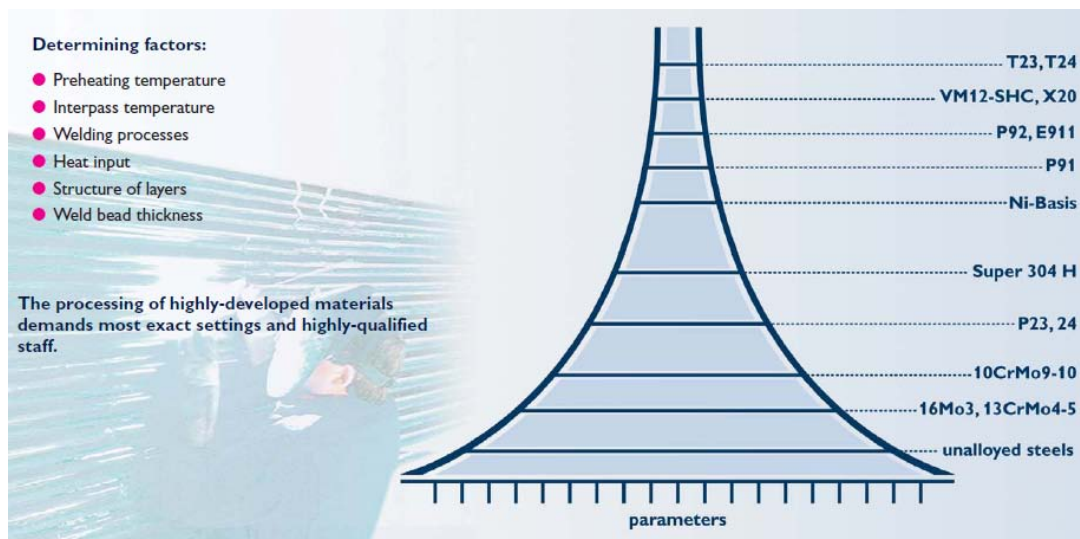
Materiálová svařitelnost nízkolegovaných žárovevných ocelí souvisí s chemickým složením, metalurgií výroby, čistotou a strukturním stavem oceli, svarového kovu a teplem ovlivněných oblastí. Bylo potvrzeno, že důležité jsou pochody, probíhající v oblasti chladnutí svarového spoje v rozsahu teplot 800-500°C na teploty interpass v TOO. Řízené postupy svařování potlačují vznik trhlin a v návaznosti na ARA diagram zajišťují tvorbu požadované struktury v TOO. Tou je především struktura bainitická, která je určující pro dosažení požadované hodnoty meze pevnosti v tečení.

Při studiu svařitelných mikrolegovaných ocelí se ukázal jako velmi vhodný prvek titan. Jeho přítomnost v základní oceli za shodných podmínek tepelného zpracování měla na žárovevnost jen velmi malý vliv, ale na druhé straně se titan projevil v jeho schopnosti zvyšovat plasticitu oceli, zejména v TOO svarových spojů. Z hlediska spolehlivosti svarových spojů žárovevných ocelí to lze považovat za významné zlepšení jakosti moderních nízkolegovaných žárovevných ocelí (T/P24 a 15CrMoV5-10). Při svařování nízkolegovaných žárovevných ocelí je všeobecně kladen důraz na celistvost svarů. Nesmí obsahovat poškození vzniklé při přípravě a v procesu svařování. Je třeba se vyhnout jak neprůvarům a špatnému formování svaru, tak i ostrým přechodům mezi svarem a základním materiálem. Všechny nerovnosti mohou absorbovat nečistoty, které mohou způsobit korozní poškození, především nízkotavitelné komponenty jako jsou oxidy vanadu, sodíku a zinku. Mohou také způsobit rozrušení ochranného oxidického povlaku na povrchu. Ostré přechody a špatná kresba mohou mít i vrubový účinek a mohou vést k lokální koncentraci deformace a k následnému lomu.

4.4 Svařitelnost oceli T24

Dobrá svařitelnost byla jedním z cílů ve vývoji oceli T24. Bylo jí dosaženo snížením obsahu uhlíku pod 0,1% a tzv. úsporným legováním, tedy snížením obsahu legujících prvků na hodnotu nezbytně nutnou k zajištění žárovevnosti, což dále snižuje hodnotu uhlíkového ekvivalentu a snižuje teplotu předehřevu. I přes tyto kroky jsou mikrolegované oceli T23 a T24 velice náročné na stanovení optimálních

svařovacích parametrů. Na obr. 4.3 je graf, kde vodorovná osa zahrnuje rozsahy nebo obtížnost dosažení jednotlivých kritérií (teplota předehřevu, teplota interpass, metoda svařování, vnesené teplo, struktura jednotlivých vrstev a tloušťka housenky). Oceli T23 a T24 mají nejužší pásmo kritérií (parametrů), tedy jejich parametry vedoucí k vyhovujícím svarům jsou nejobtížněji určitelné.



Obr. 4.3 Rozsah parametrů a kritérií při svařování jednotlivých ocelí [21]

Přesto praktické zkoušky svařování oceli T24 vedly k dobrým výsledkům a vyhovujícím svarům a to i bez předehřevu a konečného tepelného zpracování.

4.4.1 Svařování obvodových svarů

U této zkoušky byly svařovány obvodově trubky z oceli T24 o průměru 38 mm a tloušťce stěny 6,3 mm metodou TIG.

Parametry:

Materiál trubky: ocel T24

Přídavný materiál: Böhler SW 564, průměr drátu 2,4 mm

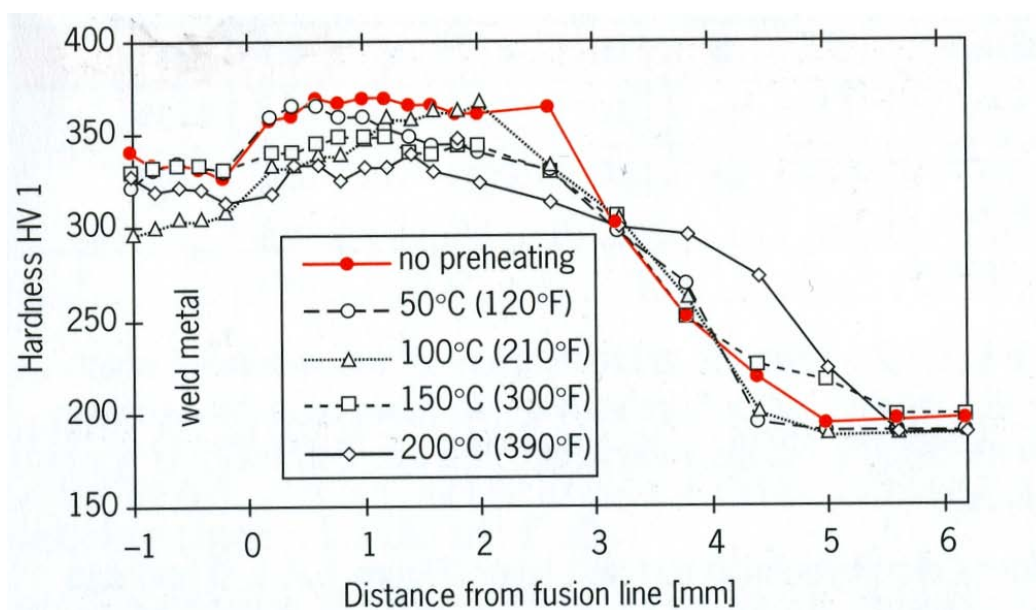
Teplota předehřevu: 0 - 200 ° C

Max. Teplota interpass: 350 ° C

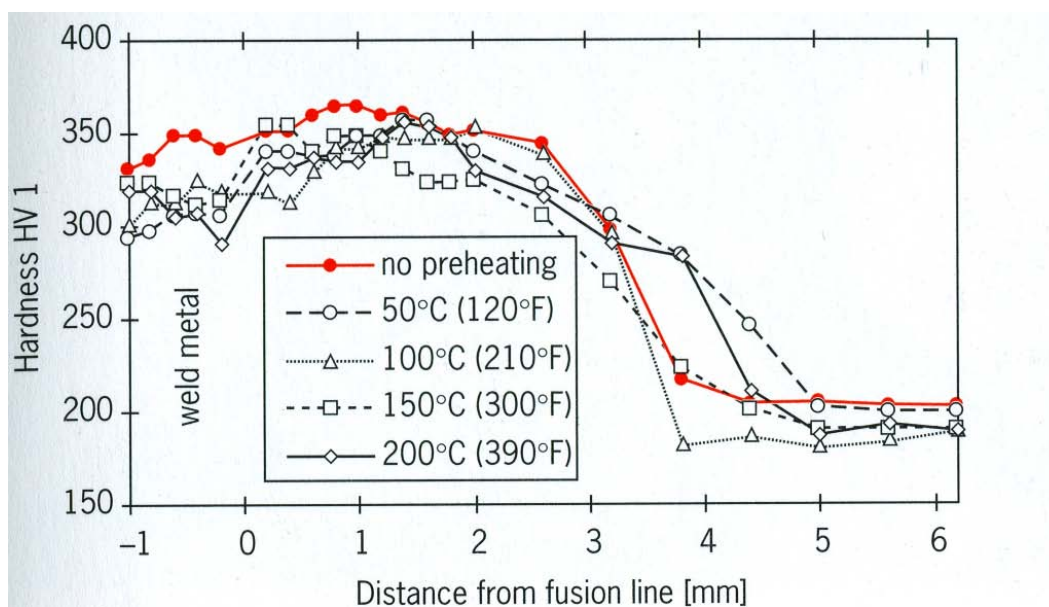
Tep. zpracování: ne

U mikrostruktury zkoušeného svarového kovu oceli T24 svařovaného bez předehřevu nebyly zaznamenány žádné vady či nehomogenity struktury. Rozložení tvrdosti v kořenové vrstvě (obr. 4.4) a povrchové vrstvě zkoušeného svaru (obr. 4.5) nevykazují

žádné vlivy předehřevu na tvrdost svarového kovu a TOO. Z toho je možno usoudit, že pro obvodové svary předehřev není nutný.



Obr. 4.4 Rozložení tvrdostí v kořenové vrstvě zkoušeného svaru pro různé tep. předehřevu [14]



Obr. 4.6 Rozložení tvrdostí v povrchové vrstvě zkoušeného svaru pro různé tep. předehřevu [14]

4.4.2 Svařování podélných svarů

Ve druhém kroku byl testován vliv předehřevu na podélném svařování membránové stěny. Pás oceli T22 (20 x 6 mm) byl přivařován ke dvěma trubkám z oceli T24 (Ø38 x 6,3 mm), jak je na obr. 4.7.

Parametry:

Materiál trubky: ocel T24

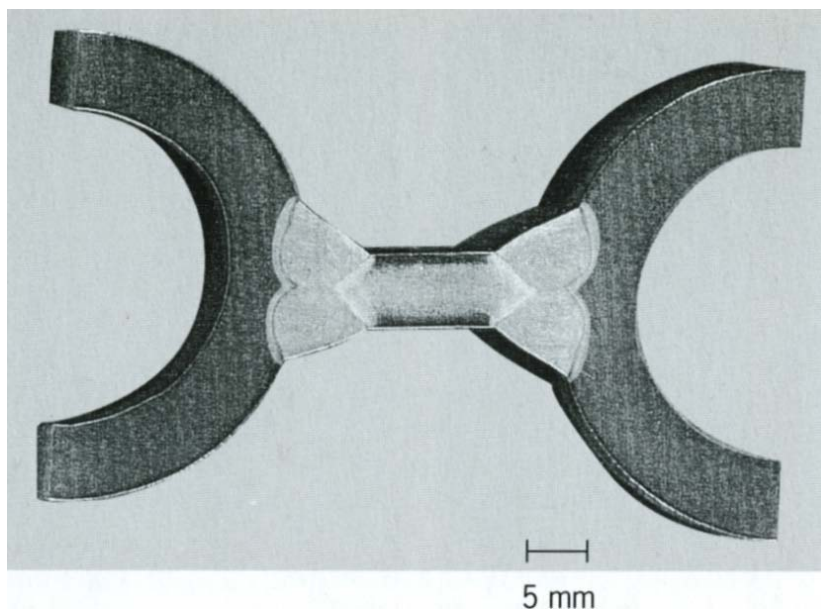
Materiál pásu: ocel T22

Přídavný drát: S1CrMo2, průměr 2,0 mm

Tavidlo: Lincoln 780

Předehřev: 50, 100, 150, 200, 250 ° C

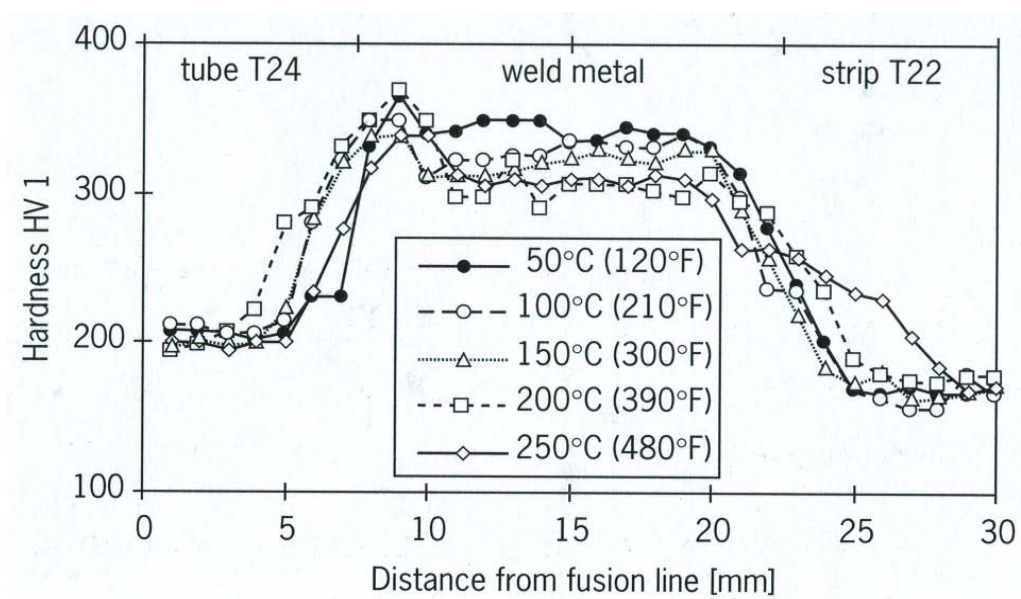
Tep. zpracování: ne



Obr. 4.7 Schéma zkoušeného modelu membránové stěny [14]

Ani u těchto svarů nebyl zaznamenán žádný vliv teploty předehřevu na tvrdost svarového kovu. Rozložení tvrdosti v povrchové vrstvě svarového kovu v závislosti na teplotě předehřevu je na obr. 4.8. Mikrostruktura byla homogenní a bez vad.

Tyto zkoušky provedené v minulých letech dokazují možnost svařování membránových stěn z oceli T24 bez předehřevu a tepelného zpracování.



Obr. 4.8 Rozložení tvrdostí v povrchové vrstvě zkoušeného svaru pro různé tep. předehřevu [14]

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Ing. František Michele, CSc.: *Parní bloky výkonových tříd 600 až 1000 MW s nadkritickými parametry páry*. Technický týdeník. Dostupné na: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1762&mark=>
- [2] *Technické parametry moderních uhelných bloků*. www.tlakinfo.cz, studie
- [3] Petr Hrachovina: *Nové směry a trendy ve vývoji materiálů pro energetiku*. Sborník přednášek 2008, Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování, ISBN 978-80-248-1825-2
- [4] Ing. Petr Mohyla Ph.D, prof. Ing. Jaroslav Koukal, CSc: *Perspektivní žárovevné oceli a jejich svařitelnost, Dny svařovací techniky 2005*
- [5] *V Ledvicích podle východoněmeckého modelu*. Technický týdeník. Dostupné na: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1746&mark=kotle>
- [6] *Stavba kotlů-přednáška č.1*. Přednášky, Klasická energetika ČVUT Praha Fakulta strojní, 2008, 36 s. Dostupné na: http://fermi.fsid.cvut.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=41&Itemid
- [7] Jozef Pecha, Ondrej Peleš: *Súčasnosc' a budúcnosc' zvarania v energetických zariadeniach*. Sborník přednášek 2008, Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování, ISBN 978-80-248-1825-2
- [8] Prof. Ing. Jaroslav Purmenský, Ing. Václav Foldyna DrSc. : *Význam žárovevnosti pro životnost energetických zařízení*. Sborník přednášek 2008, Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování, ISBN 978-80-248-1825-2
- [9] Jaroslav Koutský : *Slitinové oceli pro energetické strojírenství*. Praha, SNTL 1981
- [10] Ing. Václav Foldyna DrSc: *Perspektivní nízkolegované a feritické Cr oceli pro jednotky velkých výkonů*. All for power.cz, 2008, dostupné na: <http://www.allforpower.cz/clanek/perspektivni-nizkolegovane-a-feriticke-cr-oceli-pro-jednotky-velkych-vykonu/>
- [11] Hitachi Power Systems America: *Boiler design of innovative 600°C – and 700°C – Power Plants*, 2008, dostupné na: [:http://www.hitachipowersystems.us/technical_papers/index.html](http://www.hitachipowersystems.us/technical_papers/index.html)

- [12] Ondřej Čermák, Blesk.cz: *ČEZ staví nejvyšší budovu Česka! Za 30 miliard!* 2009 dostupné na:
<http://www.blesk.cz/clanek/zpravy-domaci/111103/cez-stavi-nejvyssi-budovu-ceska-za-30-miliard.html>

- [13] All for power: *V rámci výstavby a obnovy uhelných zdrojů energie budou realizovány moderní technologie s maximálním ohledem na dosažení vysoké účinnosti nového zdroje*, 2009 dostupné na:
<http://www.allforpower.cz/clanek/v-ramci-vystavby-a-obnovy-uhelných-zdroju-energie-budou-realizovany-moderni-technologie-s-maximalnim-ohledem-na-dosazeni-vysoke-ucinnosti-noveho-zdroje/>

- [14] Vallourec Mannesmann tubes: *The T23/T24 Book*, 1998

- [15] Petr Hrachovina: *Nové směry a trendy ve vývoji materiálů pro energetiku*.
www.allforpower.cz ,2009 dostupné na:
<http://www.allforpower.cz/clanek/nove-smery-a-trendy-ve-vyvoji-materialu-pro-energetiku/>

- [16] FREMUNT P. PODRÁBSKÝ T.: *Konstrukční oceli* , 1996, Akademické nakladatelství CERM, ISBN 80-85867-95-8

- [17] Petr Hrachovina: *Trubkové oceli T/P23 a T/P24 pro moderní elektrárny s vysokým výkonem, svařování těchto ocelí a provedení různorodých spojů*, Sborník konference, Hrotovice 2008

- [18] AMBROŽ Oldřich, KANDUS Bohumil, KUBÍČEK Jaroslav. *Technologie svařování a zařízení*: Ostrava: ZEROSS, 2001. 398 s. ISBN 80-85771-81-0.

- [19] Svarinfo.cz : *Historie svařování* , 2006 dostupné na:
<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006061401>

- [20] Jozef Pecha, Ondrej Peleš: *Súčasnosc' a budúcnosc' zvarania v energetických zariadeniach*. Sborník přednášek 2008, Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování, ISBN 978-80-248-1825-2

- [21] <http://www.t-put.com> : *Power conference flyer* ,dostupné na:
http://www.t-put.com/PowerConferenceFlyer_EN.pdf

- [22] <http://www.bohler-uddeholm.cz>: *Přídavné materiály pro svařování nelegovaných a legovaných ocelí*

[23] ČSN EN ISO 15614-1: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování- Část 1 : Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu, 2005 Český normalizační institut, Praha

[24] ČSN EN 895 Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem, 2005 Český normalizační institut, Praha

[25] ČSN EN 910 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky lámavosti, 2005 Český normalizační institut, Praha

[26] ČSN EN 875 Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Zkoušky rázem v ohybu – Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení, 2005 Český normalizační institut, Praha

[27] ČSN EN 1043-1 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním, 2005 Český normalizační institut, Praha