

## Materiálové riešenie tlakových častí energetických zariadení

### I. Úvodné poznámky

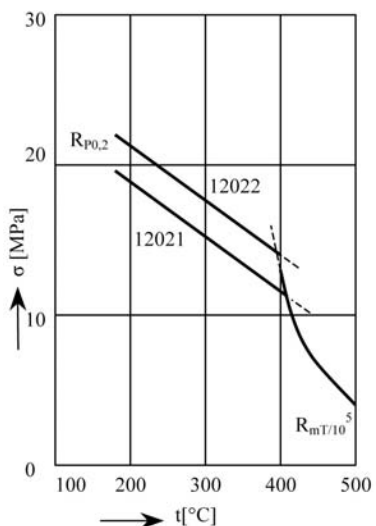
Prevádzkové parametre elektrárenských blokov kladú značné požiadavky na materiál tlakových častí. Zvlášť sa to prejavuje v súčasnej dobe, keď ekonomické hľadiska využitia primárnych zdrojov energie nie sú jediné a najdôležitejšie pri posudzovaní účinnosti tepelných elektrární ako celku. Práve dnes viditeľné a z časti už nevrátne poškodenie životného prostredia núti hľadať nové cesty v energetickej stratégii každého spoločenstva. Zreálne zvýšenie stupňa účinnosti konvenčných elektrární z terajších cca 37 % na 45 % [1] v začiatkoch nového milénia bude možné iba vtedy, keď budú k dispozícii nové vhodné materiály. V príspevku bude diskutovaná problematika súčasne používaných žiarupevných ocelí v energetike. Hlavný dôraz bude však položený na energetické ocele novej generácie.

### II. Využitie žiarupevných ocelí v energetickom strojárstve

Volba vhodného typu ocele pre tlakové komponenty energetického zariadenia musí zohľadňovať predovšetkým prevádzkové parametre pracovného média (teplota, tlak).

Nemenej dôležitá je odolnosť voči agresivite spalín obsahujúcich tlakové časti. Samozrejme, nemôže sa obísť ekonomické hľadisko. Je zrejme, že čím je oceľ viac legovaná, tým je cena vyššia, aj technológia spracovania náročnejšia. Ako protiváha však pôsobí fakt, že použitie ocelí vyššej legurickej báze prináša veľké úspory na hmotnosti rúrových komponentov, s priaznivým dopadom na dimenzovanie prvkov nosných a podporných konštrukcií. Preto sa musí k voľbe materiálov v energetickom zariadení pristupovať komplexne.

Žiarupevné ocele sa veľmi často používajú aj podcrepovej oblasti. O optimálnom materiálovom riešení rozhodujú pritom dve základné výpočtové hodnoty, t. j. medza klzu za vyšších teplôt ( $R_e$ ) a medza pevnosti pri tečení ( $R_mT$ ). Z hľadiska spoľahlivosti sa v pevnostných výpočtoch volí vždy tá veľičina, ktorá je nižšia. Ilustruje to obrázok 1, ktorý znázorňuje priesečník hodnôt  $R_e$  a  $R_mT$  pre uhlíkovú oceľ bežne používanú na výparníky parných kotlov.



Obr. 1 - Výpočtové hodnoty uhlíkových ocelí v závislosti na teplote [2].

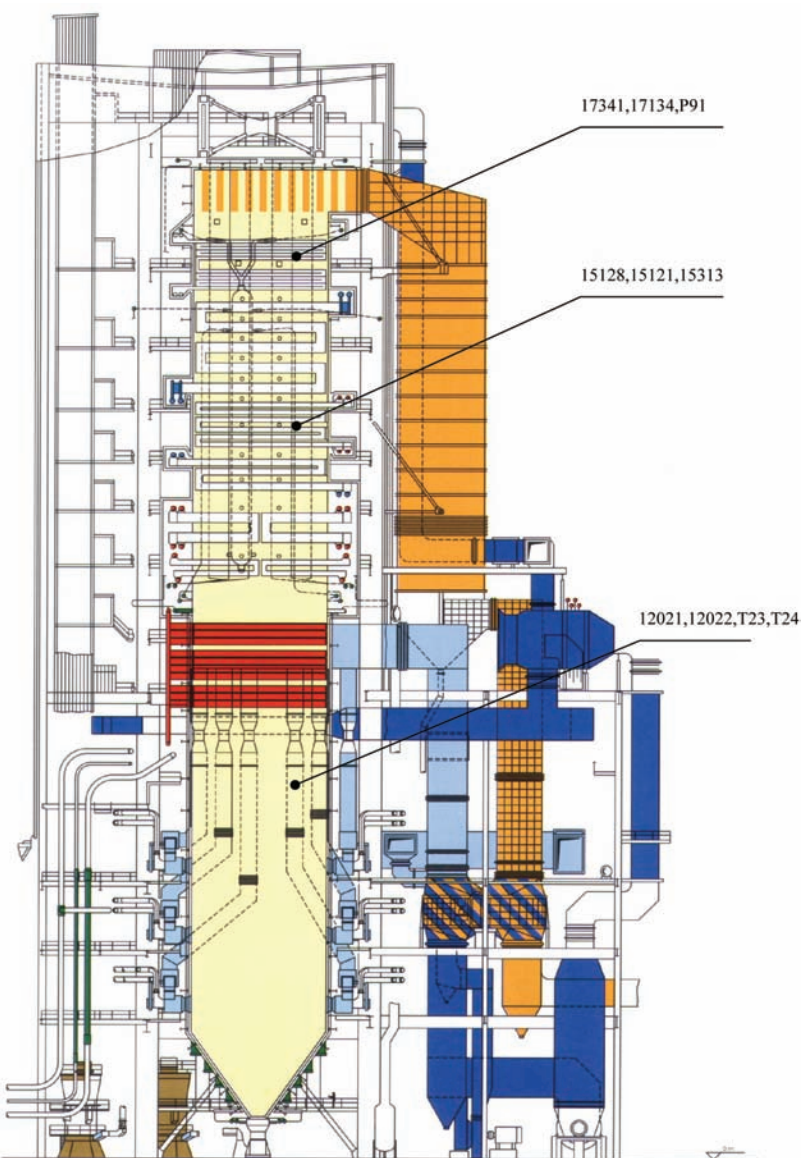
Ako je vidno z tohto obrázku pri pracovných teplotách pod teplotou cca 420 °C bude rozhodujúca hodnota medze klzu pri vyšších teplotách naopak medza pevnosti pri tečení.

So stúpajúcou teplotnou expozíciou sa mení aj stupeň legovania používaných ocelí. Z tohto hľadiska možno ocele pre žiarupevné účely rozdeliť na skupiny:

Typ ocele	Teplota použitia max. [°C ]
Ušľachtilé uhlíkové ocele	450 /480/
Nízkolegované ocele Feritické chrómové ocele /Mo, V, Nb, N/	560 /580/
Austenitické Cr-No ocele	600 /620/

Tab. 1 - Prehľad súčasne používaných skupín žiarupevných ocelí [3].

Energetické zariadenie v užšom slova zmysle predstavuje parný kotol, ktorého produktom je ostrá para vystupujúca na turbínu. Výstupné parametre bežne konštruovaných kotlov dosahujú hodnôt 580 °C pri vnútornom pretlaku média až 25 MPa. Pre kotly s nadkritickými parametrami sú tieto hodnoty ešte vyššie: 620 °C, tlak až 28 MPa.

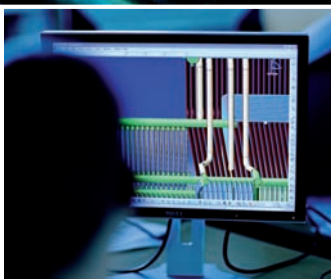


Obr. 2 - Nasadenie žiarupevných ocelí v kotloch veľkých výkonov.



## Poznáme svet a svet pozná nás

Pôsobíme v energetike takmer 60 rokov.  
Referencie vo viac ako 450-tich projektoch v 55 štátoch.  
Projekty kotlov a kotolní pre elektrárne, teplárne a spaľovne odpadov.  
Tlakové systémy kotlov rozhodujúca súčasť výrobného programu.



### Ponúkame:

- Komplexné dodávky (inžiniering, nákup subdodávok, výroba, montáž, uvádzanie do prevádzky).
- Silné inžinierske kapacity - zo súčasných viac ako 2000 zamestnancov je približne 300 inžinierov (projektantov a konštruktérov).
- Vlastné výrobné kapacity v Tlmačoch a Želiezovciach.
- Garancia spoľahlivých overených certifikovaných dodávateľov.
- Vlastné montážne kapacity patria medzi najväčšie v strednej Európe.

[www.ses.sk](http://www.ses.sk)

SLOVENSKÉ ENERGETICKÉ STROJÁRNE a.s.  
Továrenská 210, 935 28 Tlmače, Slovensko

ses tmače

Typický príklad materiálového riešenia tlakového systému parného kotla predstavuje obr. 2

Uhlíkové, jemnozrné ocele s nízkym obsahom uhlíka sú známe pod značkou 12021, 12022. Zvyčajne sú používané vo výparníkoch, ohrievačoch vody kotlov nižších výkonov. Z radu ušľachtilých uhlíkových ocelí pre žiarupevné použitie treba spomenúť značku 12025. Oceľ mikrolegovaná buď Nb alebo V aj napriek tomu, že bola vyvinutá v rokoch 1979-80 nenašla výrazného uplatnenia v parných kotloch. Bránila tomu nedôvera konštruktérov plynúca z nedostatku referencií [4].

Nízkolegované ocele sú najviac zastúpené v konštrukciách tlakových častí. Oceľ legovaná 0,5 % Mo sa stala veľmi rozšírenou nielen vo výparníkoch ale aj v prehrievačoch. Pri teplotách okolo 530 °C počas dlhodobej prevádzky sa začal prejavovať ku grafítizácii cementitu [5]. Preto jej použitie sa obmedzilo na teploty 450 - 480 °C. Výborne je prepracovaná skupina ocelí na báze Cr-Mo, resp. Cr-Mo-V. Za najznámejšiu z tejto skupiny ocelí je možné menovať oceľ s 2,25 % Cr a 1 % Mo. V Európe je známa pod značkou 10CrMo9-10, v USA T 22, na Slovensku 15313. Špičková oceľ českého pôvodu je značka 15128, legovaná okrem Cr, Mo aj 0,25 % V. Z nej bola konštruovaná podstatná časť prehrievačov elektrárenských blokov česko-slovenskej energetiky. V ostatnom svete sa táto vynikajúca oceľ tak ďaleko neuplatnila. Za vysokú žiarupevnosť vďaka tejto oceli vysokému podielu precipitačného spevnenia štruktúry časticami karbidu V<sub>4</sub>C<sub>3</sub>. Pri správnom technologickom spracovaní sa dosiahne vysoká štruktúrna stabilita. Z toho plynie náročnosť hlavne tých operácií, ktoré prebiehajú pri vyšších teplotách [6].

Úplne zvláštne miesto v skupine nízkolegovaných ocelí má oceľ legovaná meďou. Ich použitie najmä na kotlové bubny prinieslo značné úspory na hrúbke steny. Uvedené ocele /napr. WB 36, resp. DIWA 373/ našli použitie aj v napájacích potrubíach, plášťoch vysokotlakových ohrievačov vody, separátoroch a pod [7]. Med zvyšuje pevnosť ocele najmä precipitáciou zhlukov Cu vo forme  $\Sigma$  fázy. Pretože vylučovanie častíc voľnej medi najmä na hraniciach zŕn spôsobuje krehkosť za červeného žiaru, leguje sa oceľ niklom v množstvách % Ni = 2x % Cu, čo udržuje precipitáty v zrnách v koherentnej alebo semikoherentnej forme [8].

Chrómové martenzitické ocele sú určené pre stredné teploty steny rúrok 590 - 600 °C. V stave vysokopopusteneho martenzitu majú výbornú nielen žiarupevnosť, ale aj dobrú odolnosť voči korózií ako zo strany média, tak aj spalín. Obsah chrómu v týchto oceliach sa pohybuje v rozmedzí 9 - 12 %. Legovaciú konštitúciu ďalej tvoria prvky Mo, V. Typickými predstaviteľmi ocelí tejto skupiny je oceľ 9Cr - 1Mo a 9Cr-1Mo-0,5 V /17116, resp. 17117/. S obsahom chrómu 12 % je doteraz z časti používaná oceľ značky 17134 /X20CrMoV11-1 v Európe/. Pomerne vysoký obsah chrómu aj relatívne vysoký obsah uhlíka spôsoboval značné problémy pri technologickej spracovateľnosti 12 Cr ocelí [9].

V snahe riešiť tieto problémy sa v 30-tich rokoch začali pokusy s legurickou kompozíciou na báze 9 % Cr. Tak vznikla, dnes veľmi úspešná oceľ 9 Cr-No-V-Nb známa vo svete pod značkou P 91 /X10CrMoVNb 9-1/. Pri jej vývoji sa využilo všetkých mechanizmov spevňovaniu tuhého roztoku.

Austenitické žiarupevné ocele tvoria skupinu s najväčšou odolnosťou proti tečeniu. Proti ich širokému nasadeniu však stojí ich vysoká cena, obťažná a veľmi náročná technologická spracovateľnosť. Dôležité sú pritom odlišné fyzikálne vlastnosti. V energetických zariadeniach sa na rúrkové systémy často používala 16Cr-12Ni-2Mo nestabilizovaná oceľ zn. 17341. Vysokou náchylnosťou k scitlivieniu, tým aj medzikryštalickej korózií je potrebné výrobcom z tejto oceli venovať veľkú pozornosť nielen pri výrobe, ale i pri prevádzkovaní. Náhrady deficitného Ni v austenitických žiarupevných oceliach Mn neboli úspešné [10].

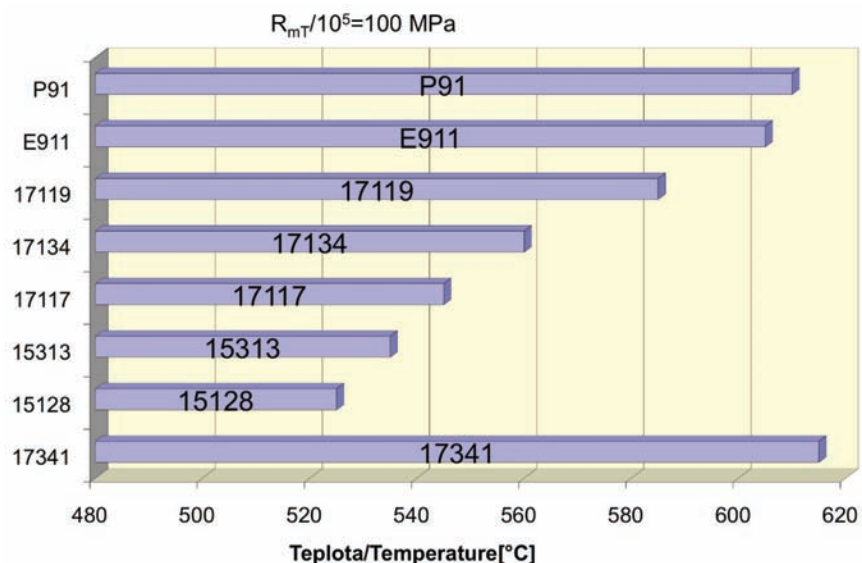
### III. Vývoj moderných žiarupevných ocelí

Uznávaným merítkom žiarupevnosti je medza pevnosti pri tečení 100 MPa za dobu 100 000 hodín. Snahou pri vývoji moderných ocelí je posunúť túto veličinu pokiaľ možno do čo najvyšších teplôt. Najväčší predpoklad v tomto smere majú modifikované 9-12% Cr a austenitické

razne ovplyvňovaná precipitáciou sekundárnych fáz typu Laves, M<sub>6</sub>X a ich hrubnutiu za dlhších časov expozície. Dôležitá pritom je kinetika hrubnutia precipitujúcich častíc. Kým jemné častice nitridu vanádu zostávajú relatívne dlho stabilné, Lavesova fáza hrubne rýchlo a odčerpáva Mo, resp. W z tuhého roztoku. Z tohto dôvodu sa moderné 9Cr, 12Cr ocele zamerne legujú dusíkom do hodnoty 0,06%, čo vedie ku zvýšeniu žiarupevnosti až o 60 %.

Možnosti zvyšovania parametrov pary sú značne ohraničené ak nebude možné zároveň zvyšovať tlak a teplotu v stenách výparníka. Nedá sa pritom vyhnúť potrebnému prechodu z oblasti medze klzu za vyšších teplôt do priestoru creepového namáhania. CrMo ocele (15121,15313), ktoré sú síce k dispozícii, sú nutné po zvarení do membránových stien výparníkov žihať.

Vývoj ocelí pre tento účel sa uberal v Japonsku s ocelou zn. HCM 2S (v ASME T23), v Nemecku so značkou 7CrMoVTiB 10-10 (v ASME T24). Obe ocele vychádzajú z kompozície



Obr. 3 - Závislosť medze pevnosti pri tečení 100 MPa na teplote u vybraných žiarupevných ocelí [11]

ké žiarupevné ocele, ako je zrejme z obrázku 3.

Z vývoja žiarupevných ocelí na báze 9-12%Cr možno pozorovať tri tendencie [12]:

- pridávanie wolfrámu do oceli typu 9CrMoVNB
- optimalizácia obsahu karbidotvorných prvkov (V, Nb) a pridávanie bóru, medi alebo kobaltu do oceli
- zvyšovanie obsahu molybdénu, ocele typu HCM 12

Najväčšia pozornosť 9Cr oceliam dolegovaným wolfrámom sa venovala v Japonsku. Tak vznikla oceľ NF 616 známejšia skôr pod označením P/T 92 podľa ASME Codu.

Oceľ P92 pracujúca v energetických zariadeniach vyrábaných podľa ASME Codu je dolegovaná 2%W. Európsky vývoj v W-modifikácii 9%Cr oceli predstavuje oceľ E 911 (X11CrMoVNB 9-1-1, WNr. 1.4905). Má obsah W 1% s vyšším obsahom Ni.

Systematické štúdium štruktúrnej stability a zmien prebiehajúcich počas creepovej expozície však ukazuje, že očakávaný priaznivý vplyv Mo a / alebo W sa nie tak významne prejavuje, ako sa očakávalo. Rozpustnosť týchto prvkov v tuhom roztoku je totiž vý-

legúr 2,25Cr1Mo. Japonská cesta vývoja spočíva v prísade 1,5%W, nemecká verzia v mikrolegovaní V, Ti.

Chemické zloženie diskutovaných moderných žiarupevných ocelí možno vidieť v tab.2

Analýzy ocelí novej generácie pre energetiku ukazujú, že hodnoty žiarupevnosti 105hod. dosahujú u ocelí 9Cr + wolfrám hodnôt 110-120MPa pri 600°C. Mikrolegované ocele na báze 2,25Cr-1Mo dosahujú tiež pomerne vysokých hodnôt žiarupevnosti pri teplotách 550-580°C, čo ich predurčuje nielen pre použitie vo výparníkoch, ale i v prehrievačových systémoch.

### IV. Záver

Predložený stručný prehľad žiarupevných ocelí vo výrobe energetických zariadení ukazuje, že je nutné stále sa zaoberať ich vývojom. Tlaky na koncepciu moderných, ekologicky čistých tepelno-energetických zariadení budú neustále vzrastať. To, ale bez zvyšovania účinnosti zariadení nebude možné. Preto aj nové, moderné materiály majú v tomto cykle nezastupiteľné mi-

esto. Aby ich aplikácia do energetických systémov bola čo najrýchlejšia, je potrebná intenzívnejšia spolupráca výskumu, výrobcov ocelí, výrobcov a prevádzkovateľov tepelno-energetických zariadení.

#### SÚHRN

Predložená práca poukazuje na zásady, ktorými sa riadi materiálové riešenie energetických zariadení. Je v nej zahrnutý prehľad hlavných skupín žiarupevných ocelí pre konštrukciu komponentov energetických celkov podľa teplotného zaťaženia. V príspevku sú uvádzané vývojové trendy v oblasti žiarupevných materiálov. S ohľadom na stále sa zvyšujúce tlaky na ekologizáciu prevádzky energetických zariadení.

#### KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Medza klzu za vyšších teplôt, medza pevnosti pri tečení, energetické zariadenia, štruktúrna stabilita.

#### Literatúra

- [1] Bendick, W., et al : Neue Werkstoffe den Kessel-und Rohrleitungsbereich von Kraftwerken mit erhöhten Dampfparametern. Graz 1999, 6. Werkstoffagung, s.4
- [2] Vodsedalek, J., Vystyd, M., Pech, R. : Vlastnosti a použití žiarupevných ocelí a slitin. STNL Praha 1974, s.202
- [3] Kolektív autorov : Učebné texty pre kurzy zvaračských inžinierov. Zeross, Ostrava 2001, s.252
- [4] Pecha, J.: Charakteristika materiálov v JEZ. Učebné texty pre PGŠ na SJF STU Bratislava 1987, s.48
- [5] Kuzičkin, D., Fremunt, P., Mišek, B. : Konštrukčné ocele tvárnené a na odliatky. Alfa Bratislava 1987, s.48
- [6] Prnka, T., Foldyna, V., Kučera, J., Heinrich, V. : Technologické spracovanie výrobkov z oceli 15128. VUM, Ostrava 1968, s. 44-57
- [7] Pecha, J. et. al : Niektoré aspekty zvarania medzi legovanej ocele pre energetiku. Zváranie – Svarování 48 (1999) č.9, s. 197-200
- [8] Shick, M. et. al : VGB Kraftwerkstechnik, 67, Heft 9, 1987, s.901
- [9] Niederhoff, K. : Werstofftechnische Besonderheiten beim Schweißen warmfester martensitischer Cr-stahle für den Kraftwerksbau. 6. Werkstoffagung 1999 der TU Graz s.1-12
- [10] Prnka, T. et al : Závěrečná správa o vývoji ocele 17341. VUHŽ Dobrá 1974, s.23
- [11] Bendick, W. et al : Eigenschaften und Entwicklungsstand neuer hochwertiger Kraftwerksrohren - stahle im Vergleich 3R internat. 33 (1994), s. 411-417
- [12] Kuboň, Z. : Rozhodujúce faktory ovplyvňujúce žiarupevnosť 9-12%Cr ocelí. Kotle a kotlové zariadenia Brno 2000, s.158-162 [13] Pecha, J. : Moderné žiarupevné ocele v energetike. Energia 2000, s.17-18

**Doc. Ing. Jozef Pecha, CSc.,** jozef\_pecha@ses.sk,  
Slovenské energetické strojárne a. s. Tlmače

## Summary Aj

Operational parameters of power plant units lay down significant requirements on pressure part materials. It is especially clear nowadays when the economic aspects of using primary energy sources are not the only and the most important ones when assessing thermal power stations efficiency as such. Nowadays especially obvious and partly irreversible environmental deterioration makes us look for new ways in energy strategies

of each community. Obvious increase in the efficiency level of conventional power plants from current 37 % to 45 % [1] at the beginning of the new millennium may only be possible when new suitable materials are available. The article discusses the issues of currently used heat-resisting steels in power engineering. The main proof shall be placed on new generation energy steels.

## Summary Rj

Эксплуатационные параметры блоков электростанций предъявляют повышенные требования к материалу напорных частей. В особенности это проявляется в настоящее время, когда точки зрения на экономическое использование первичных источников энергии различаются и, главным образом, при оценке КПД тепловых электростанций, как единого целого. Именно сегодня видимая и частично необратимо нарушенная окружающая среда вынуждает искать новые пути в энергетической

стратегии каждой страны. Видимое повышение уровня КПД конвенционных электростанций с порядка нынешних 37 % до 45 % [1] в начале нового тысячелетия будет возможно только тогда, когда будут в распоряжении новые подходящие материалы. В статье будет рассматриваться проблематика жаропрочной стали, применяемой в настоящее время в энергетике. Главный упор, однако, будет сделан на энергетическую сталь нового поколения.