

# VLIV DEGRADAČNÍHO STÁRNUTÍ NA ZMĚNY MODULU PRUŽNOSTI A POISSONOVA POMĚRU PRO OCEL SUPER304H

## INFLUENCE OF DEGRADATION AGING ON CHANGES IN THE MODULE OF FLEXIBILITY AND POISSON RATIO FOR SUPER304H STEEL

Jakub Horváth <sup>a),b)</sup>, Ladislav Horváth <sup>a)</sup>, Eva Chvostová <sup>c)</sup>, Marie Horváthová <sup>b)</sup>, Vojtěch Smola <sup>b)</sup> a Lucie Pilsová <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> UJP PRAHA a.s., Nad Kamínkou 1345, 156 10 Praha – Zbraslav

<sup>b)</sup> ČVUT FS, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2

<sup>c)</sup> COMTES FHT a.s. Průmyslová 995, 334 41 Dobřany

### Abstrakt

V literatuře začínají být dohledatelné publikace týkající se precipitačních změn a s nimi spojené změny mechanických vlastností jako je nárazová práce u žárovevné komplexně legované austenitické oceli SUPER 304H. Tato ocel je v českých podmínkách použita na modernizovaných blocích tepelných elektráren. Tento příspěvek se zabývá vlivem precipitačních změn na experimentálně stanovený modul pružnosti a Poissonův poměr, které tvoří elementární vstupy pro pevnostní výpočty. Jedná se tak o získání podkladů pro následné konečno-prvkové simulace na degradované oceli SUPER 304H.

### Abstract

Publications concerning precipitation changes and the associated changes in mechanical properties, such as impact work on refractory complex-alloyed austenitic steel SUPER 304H, are beginning to be found in the literature. This steel is used in Czech conditions on modernized thermal power plant units. This paper deals with the influence of precipitation changes on the experimentally determined modulus of elasticity and Poisson's ratio, which form the elementary inputs for strength calculations. It is thus a matter of obtaining data for subsequent finite-element simulations on degraded steel SUPER 304H.

### Úvod

Mechanickými vlastnostmi je kvantitativně hodnoceno chování materiálu za působení vnějších mechanických sil. Mezi tyto základní vlastnosti patří pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost, zatímco další vlastnosti jako tvrdost, odolnost proti únavě, odolnost proti tečení jsou považovány za odvozené od těchto základních, za určitých podmínek namáhání. Pružnost je schopnost materiálu vykazovat před porušením elastickou deformaci, obvykle hodnocenou modulem pružnosti, mezi pružnosti a energií plastické napjatosti.

Ocel SUPER 304H byla použita na přestupní plochy trubkových přehříváků v rámci retrofitů uhelných kotlů ČEZ, a. s. i na přehřívákové trubky nadkritického kotle v ELE. Jedná se o zařízení, na která budou v období přechodu k jiným zdrojům elektrické energie kladeny zvýšené požadavky na bezporuchový provoz. Proto byla této oceli věnována odpovídající pozornost a byly hodnoceny vlivy a dopady výrobních technologických operací. Kromě toho byl zjišťován i vliv provozního zatížení na strukturní změny a potažmo i na změny mechanických vlastností. Byly provedeny práce vedoucí ke sjednocení variantních postupů přípravy vzorků pro světelnou i elektronovou mikroskopii i popis rozložení sigma fáze po tloušťce stěny od místa styku se spaliny po místo styku s párou. Výsledky těchto prací je možné (kvantifikovaně) shrnout tak, že u oceli SUPER 304H dochází díky teplotní expozici ke vzniku křehkých fází jak po hranicích zrn, tak v samotných zrnech, což má za následek celkové zkřehnutí. Cílem tohoto příspěvku je upozornit na to, že vlivem provozního zatížení dochází i ke změnám hodnot použitých pro pevnostní návrh přehříváků. U experimentálně zjišťovaných

hodnot mohou vzniknout výrazné rozdíly vyvolané rozdílným stupněm strukturních změn po tloušťce stěny a místem odběru vzorku. Postupy získávání hodnot mechanických vlastností s použitím mikrovzorků umožní podrobnější modelování a na něj navazující pevnostní hodnocení.

## Experimentální část

### Vliv teplotní degradace na hodnotu modulu pružnosti

Vliv teplotní degradace byl posuzován pro dva teplotně degradované stavy, a to pro degradaci při teplotě 675 °C po dobu 12 000 hodin (v grafech označeno jako degradace I) a pro degradaci při teplotě 675 °C po dobu 27 000 hodin (v grafech označeno jako degradace II). Modul pružnosti byl stanovován jednak z tahové zkoušky, jednak jako dynamický s použitím vzorků o rozměru 3 x 10 x 20 mm vyrobených ze středu stěny. Vzhledem k degradačním změnám přehřívákových trubek (viz obr. 1 pro expozici 650 °C / 18500 hodin) je oprávněné předpokládat, že změny mechanických vlastností u vnějšího povrchu, který je ve styku se spalinami i u vnitřního povrchu, který je ve styku s přehřátou parou budou větší než ze středu.



Stav u vnějšího povrchu

Stav uprostřed stěny

Stav u vnitřního povrchu

Obr. 1: Strukturní stav SUPER 304H po teplotní expozici po dobu 650 °C / 18500 hodin

### Princip stanovení dynamického modulu pružnosti

Měření dynamického modulu pružnosti je nedestruktivní měření založené na analýze vibrací měřeného materiálu. Vibrace jsou indukovány malým mechanickým impulsem, po kterém dochází k disipaci energie materiálu do vibrací. Tyto vibrace mají frekvenční spektrum dle jejich rezonanční frekvence, která je závislá na elastických vlastnostech materiálu, geometrii vzorku a jeho hustotě. Vzorek se položí na 2 podpory tak, aby podélná osa vzorku byla kolmá na obě podpory. Vzdálenost podpor je závislá na největším rozměru vzorku, tedy na jeho délce. Předností této metody je možnost používat pro měření malé vzorky, a tudíž získat lokální hodnoty a ty následně použít pro pevnostní hodnocení stěny modelované se skutečnými mechanickými vlastnostmi po tloušťce. Jedná se tedy o další příspěvek k vytvoření uceleného souboru použití mikrovzorků k získání lokálních materiálových vlastností.

### Normové hodnoty používané pro pevnostní návrh

V době, kdy byla provedena pevnostní hodnocení částí tlakového systému kotlů, u kterých byla použita ocel SUPER 304H, byl k dispozici jako normový podklad uvádějící minimální garantované hodnoty VdTüV-Werkstoffblatt 550 [1], [2]. Hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Hodnoty dynamického modulu pružnosti uvedené v [1]

Modul pružnosti – dynamický									
Teplota (°C)	20	100	200	300	400	500	600	700	750
Modul pružnosti (GPa)	189	182	174	165	156	149	141	134	130

## Změřené hodnoty u trubek v dodaném stavu

Následující tabulka (tab. 2) uvádí porovnání rezonanční metody a výsledků převzatých z tahových zkoušek materiálu. Obecně lze konstatovat velmi dobrou shodu mezi výsledky, která je prokázána procentuální odlišností naměřených dat. Pro předmět tohoto příspěvku bylo ověření použito z důvodu, že u teplotně degradované oceli SUPER 304H dochází ke změnám mechanických vlastností, konkrétně modulu pružnosti. Zhodnocený rozdíl mezi naměřenou a normovou hodnotou (tab. 1 a tab. 2) je nižší než 5 % pro 25 °C a nižší než 3 % pro 600 °C, z tohoto důvodu je možné považovat změřené hodnoty za přijatelné a námi použité měřicí zařízení a postup stanovení dynamického modulu pružnosti za vyhovující. Pro další potřeby článku bude použito měření rezonanční metodou.

Naměřené hodnoty modulu pružnosti jsou mírně nižší než hodnoty uvedené v normě [1]. Za předpokladu, že normové hodnoty byly stanoveny s použitím [3] je nutné vzít v úvahu, že rovnice pro stanovení modulu pružnosti vyvažuje mezi sebou hmotnost, šířku, délku a tloušťku zkušební vzorku i jeho základní rezonanční frekvenci. Vysvětlení je možné hledat kromě jiného i v tom, že námi hodnocené malé vzorky byly vyrobeny ze středu stěny trubky, přičemž už z provedených měření tvrdosti a mikrotvrdosti napříč stěnou je možné usuzovat na rozdíly pevnosti po tloušťce nové trubky.

Hodnoty E, G a  $\mu$  uvedené v tab. 2 byly vypočteny jako aritmetický průměr z minimálně tří naměřených hodnot.

Tab. 2: Průměrné hodnoty modulu pružnosti, G a Poissonova poměru, změřené ze zkoušek tahem a měřených dynamickou metodou

Materiál	Označení	E-tah	E-dyn	Procentuální rozdíl
		GPa	GPa	
SUPER304H	degr_0_600 °C	130,1	137,5	5,69
	degr_I_600 °C	147,1	147,3	0,09
	degr_II_600 °C	141,9	149,1	5,08

Pro další posouzení vlivu stárnutí oceli SUPER 304H bylo provedeno měření sumarizované výsledky uvedenými v tab. 3.

Tab. 3: Naměřená data rezonanční metodou

Vzorky 3x10x20 mm							
Vzorek	E [GPa]		G [GPa]		$\mu$ [-]		Označení vzorku
	25 °C	600 °C	25 °C	600 °C	25 °C	600 °C	
S304H_vychoz	182,02	137,49	76,34	56,84	0,192	0,209	SUPER_304H
S304H_exp1	193,54	147,27	76,86	57,43	0,259	0,282	3_1
S304H_exp2	194,93	149,11	77,22	58,05	0,262	0,284	7_1

## Pevnostní hodnocení a aplikace změřených dat SUPER 304H

Následující kapitola se opírá o teoretické základy návrhových výpočtů v elastické oblasti dle literatury [4]. Použité základní vzorce jsou pro válcové těleso, což přímo odpovídá aplikaci materiálu SUPER 304H. Základní vztahy pro výpočet definuje obr. 2. Z těchto rovnic řešením přímé úlohy pružnosti získáme vztahy pro hlavní napětí (obr. 3). Kde integrační konstanty (obr. 4) A, B a deformaci  $\varepsilon_a$  z obr. 3 určíme dle konkrétních okrajových podmínek.

Jedná se tak o matematický základ pro výpočet napětí ve stěně, kde hodnota E vystupuje ve všech třech hlavních napětí v čitateli. Což ve zkratce znamená, že nárůst modulu pružnosti v průběhu degradace materiálu SUPER 304H povede k nárůstu všech složek hlavních napětí a tím i k nárůstu celkového napětí ve stěně.

1. rovnice rovnováhy:

$$\sigma_r - \sigma_t + r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} = 0, \quad \sigma_o = p_z \quad (8.7, 8.8)$$

2. Geometrické rovnice

$$\varepsilon_t = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_o = \frac{dw}{dz} \quad (8.9 - 8.11)$$

3. Konstitutivní vztahy

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_r + \frac{\mu}{1-2\mu} \nu \right), \quad \sigma_t = \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_t + \frac{\mu}{1-2\mu} \nu \right), \quad \sigma_o = \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_o + \frac{\mu}{1-2\mu} \nu \right)$$

Obr. 2: Základní rovnice pro výpočet válcového tělesa z pohledu pevnosti [4]

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_t &= A + \frac{B}{r^2} + \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon_a \\ \sigma_2 = \sigma_a &= 2\mu A + \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon_a \\ \sigma_3 = \sigma_r &= A - \frac{B}{r^2} + \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon_a \end{aligned}$$

Obr. 3: Výpočtové vztahy pro hlavní napětí [4]

$$A = \frac{EC_1}{(1+\mu)(1-2\mu)}, \quad B = \frac{EC_2}{1+\mu}$$

Obr. 4: Výpočtové vztahy pro okrajové podmínky dle geometrie úlohy [4]

## Závěr

Vezměme si modelový příklad návrhu výpočtu napětí ve stěně přehřívákové trubky z oceli SUPER 340H, která bude postupně vystavena degradačním procesům, které byly simulovány v tomto příspěvku laboratorní expozicí. Návrhově bude stanoveno napětí ve stěně, které bude sledováno a porovnáváno s hodnotami napětí při tečení z pohledu popisu stavu degradace materiálu. Během expozice však dochází k nárůstu materiálové konstanty, která figuruje ve všech složkách napětí v čitateli o hodnoty 7,1 potažmo 8,5 %. To způsobí celkový nárůst reálného napětí a tím akceleraci degradace materiálu, která ovšem z pohledu výpočtářů nebude sledována, protože nebyly k dispozici stanovené materiálové hodnoty pro degradovanou ocel SUPER 304H. Výstupem tohoto příspěvku by mělo být zvážení přepočtu skutečných napětí v přehřívákových systémech ve vazbě na jejich degradaci.

## Poděkování

Práce byly řešeny s finanční podporou MPO, Projekt FV40166 „Hodnocení degradovaných ocelí pro stavbu turbín a přehříváků elektrárenských kotlů pro potřebu predikce zbytkové životnosti a lokálních oprav“.

## Literatura

- [1] VdTÜV (2012): *Warmfester Walz- und Schmiedestahl X10CrNiCuNb 18-9-3. Werkstoff-Nr. 1.4907. Nahtloses Rohr.* VdTÜV-Werkstoffblatt 550.
- [2] VdTÜV (2012): *Warmfester Walz- und Schmiedestahl X10CrNiCuNb 18-9-3. Werkstoff-Nr. 1.4907. Hersteller: Nahtloses Rohr.* VdTÜV-Werkstoffblatt 550- Beiblatt.
- [3] ASTM (2013): *ASTM E1875, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance.* Standard, ASTM E1875, ASTM International, West Conshohocken (PA).
- [4] Ondráček, E. (2006): *Mechanika těles – pružnost a pevnost II, 4. přeprac. vyd.* Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno. ISBN 80-214-3260-8