

# ZBYTKOVÁ NAPJATOST POVRCHOVÝCH VRSTEV OCELI OPRACOVANÉ METODOU SPONGE-JET

## SURFACE RESIDUAL STRESSES OF SPONGE-JET TREATED STEEL

Nikolaj Ganev <sup>a)</sup>, Jiří Čapek <sup>a)</sup>, Karel Trojan <sup>a)</sup>, Jiří Žďárek <sup>b)</sup> a Kamil Kolařík <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra inženýrství pevných látek

<sup>b)</sup> ÚJV Řež, a. s.

### Abstrakt

Príspevek prezentuje výsledky rentgenografického difrakčného výzkumu reálné struktury povrchových vrstev vzorků opracovaných metodou Sponge-Jet archivního materiálu tlakové nádoby jaderného reaktoru. Analýzy byly provedeny v rámci širšího výzkumu zabývajícího se těžkými haváriemi jaderného reaktoru VVER 1000 s cílem zabránit protavení roztavené aktivní zóny ven z tlakové nádoby. Byl stanoven hloubkový průběh makroskopických zbytkových napětí, povrchové fázové složení a parametry reálné struktury. V podpovrchových vrstvách vzorků opracovaných pomocí metody Sponge-Jet byla zjištěna významná tlaková zbytková napětí, naopak referenční broušený vzorek vykazoval zbytková napětí tahová. Obecně lze říci, že tlaková zbytková napětí zlepšují mechanické vlastnosti a zvyšují únavou životnost.

### Abstract

The paper presents the results of X-ray diffraction research of the real structure of the samples' surface processed by the Sponge-Jet method of the archive material of the nuclear reactor pressure vessel. The analyses were performed as part of a broader study concerning severe accidents at the VVER 1000 nuclear reactor in order to prevent the molten core from melting out of the pressure vessel. The gradients of macroscopic residual stresses, surface phase composition and parameters of the real structure were determined. Significant compressive residual stresses were found in the subsurface layers of the samples treated by the Sponge-Jet method, whereas the reference ground sample showed tensile residual stresses. In general, compressive stresses improve mechanical properties and increase fatigue life.

### Úvod

Jakmile se kvůli havárii přeruší průtok chladicí vody reaktorem, prudce vzroste teplota palivových článků. Na dně tlakové nádoby se vytvoří tavenina podobná lávě, v níž dále probíhá štěpná reakce. U reaktoru VVER 1000 v první sekundě po havárii vzniká tepelný výkon 240 MW. Jak reakce vyhasíná, tepelný výkon klesá na 30 MW po první hodině od havárie. Pokud se toto teplo zvnějšku reaktoru neodvede, tavenina se rychle protaví skrz tlakovou nádobu a během pár hodin pronikne i několikametrovými betonovými základy. Do prostoru mezi nádobou a okolní betonovou šachtou je zapotřebí pustit chladicí vodu, která odvede vzniklé teplo a udrží tlakovou nádobu neporušenou. Žádoucí je dosáhnout takzvaného bublinkového varu, kdy vznikající pára odchází vzhůru v bublinách a k povrchu reaktoru se dostává nová voda. Nejhorší situace by nastala, kdyby se mezi povrchem a chladicí vodou vytvořila vrstva páry, která by bránila průniku vody k povrchu a dalšímu chlazení [1].

Pro povrchovou úpravu nádoby reaktoru, která by modifikovala povrch z výše zmíněného důvodu, byla zvolena metoda Sponge-Jet, která zvyšuje účinnost a produktivitu při provádění tryskacích prací. Tato technologie je šetrná k životnímu prostředí, jelikož nepoužívá oxid křemičitý, vykazuje nízké emise prachu i hluku. Metoda využívá kompozitní brusiva, která spojují abrazivní částice s polyuretanovou pěnou.

Při přenosu kinetické energie dopadajících částic abraziva do tryskaného materiálu dochází k plastické deformaci povrchových vrstev opracovávaného materiálu. Při předání dostatečné kinetické energie dochází ke změně mikrostruktury a ke generaci tlakových zbytkových napětí [2]. V podpovrchových vrstvách vzniká gradient jak strukturních parametrů, tak zbytkových napětí, které mohou významně ovlivnit mechanické vlastnosti, únavovou životnost i korozi-vzdornost.

Zbytková napětí jsou napětí, která existují v tuhém tělese, aniž by na něj působili další vnější síly. Rozlišujeme tzv. makroskopická napětí, která jsou ve velkých oblastech homogenní. Dosahují rovnováhy v celém objemu tělesa. Přítomnost makroskopických zbytkových napětí lze pozorovat změnou tvaru materiálu po narušení napěťové rovnováhy vnějším zásahem. Naopak mikroskopická napětí (popř. mikrodeformace) jsou homogenní v objemech o velikosti jednotlivých krystalitů, kde se vzrůstající přítomností poruch mřížky roste mikrodeformace, a tedy i zpevnění. Krystalit (neboli oblast koherentního rozptylu rentgenového záření) v difrakčním smyslu rozumíme monokrystalek, který nemá svou vlastní mozaikovou strukturu. Zrno z hlediska metalografického může zahrnovat naproti tomu obecně i agregát většího počtu různě orientovaných monokrystalků. Parametry reálné struktury jsou výše zmíněné mikrodeformace a velikost krystalitů [3]. Zpevněný povrch a tlaková zbytková napětí v podpovrchové vrstvě zvyšují mechanické, ale i korozi-vzdornost. Zlepšuje se vrubová houževnatost, odolnost proti únavě, opotřebení, naopak se snižuje rychlost šíření trhlin, nebezpečí korozi-vzdorného praskání, náchylnost k mezikrystalové korozi apod. Tyto závěry jsou velmi důležité pro hodnocení integrity tlakových nádob reaktoru.

## Experiment

Pro opracování povrchu archivního materiálu tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 byla vybrána dvě abrazivní média od firmy Sponge-Jet – Silver 30 a Silver 80. První využívá jako abraziva oxid hlinitý (korund) zrnitosti 30, druhá zrnitosti 80.

Analýzy byly provedeny na referenčním broušeném vzorku (označeném jako BR) a dvou vzorcích po prvotním broušení opracovaných metodou Sponge-Jet (označených jako SJ30 a SJ80). Zbytková napětí byla analyzována ve dvou navzájem kolmých směrech označených jako L a T.

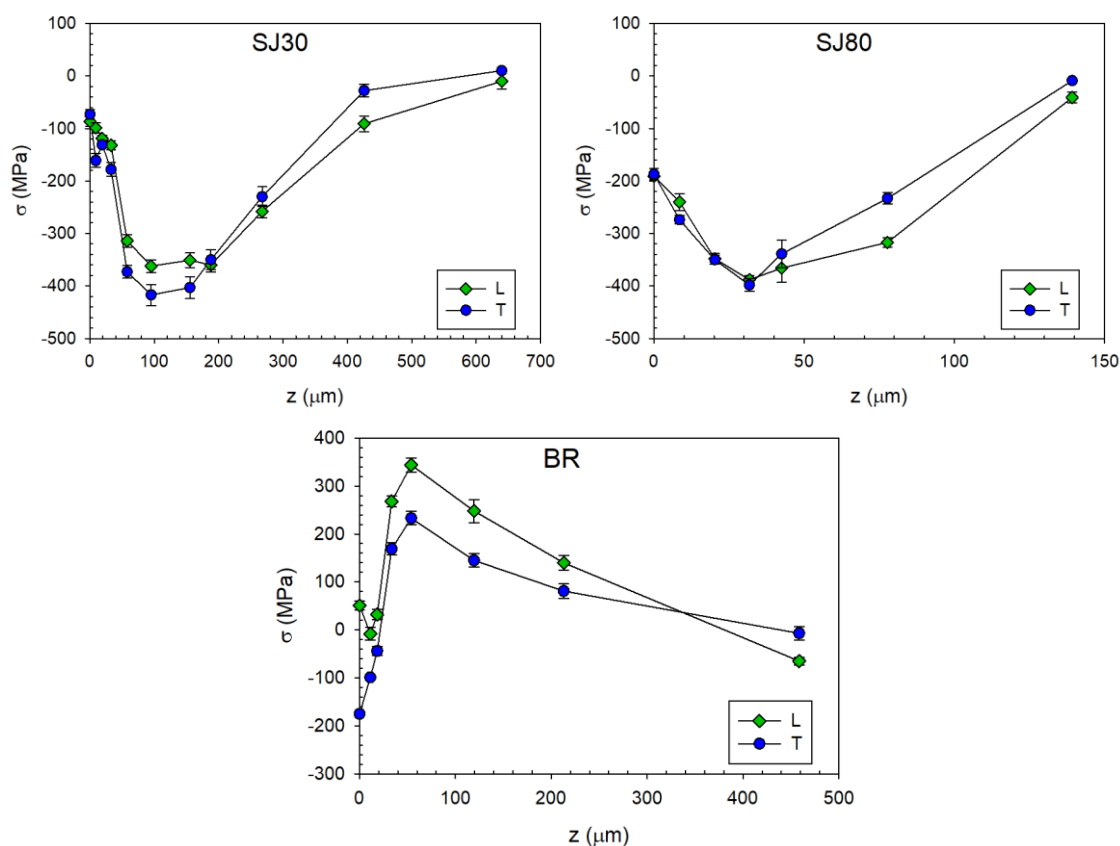
Difrakční měření pro určení makroskopických zbytkových napětí bylo prováděno na  $\theta$ - $\theta$  goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical s rentgenkou s chromovou anodou. Byla analyzována difrakční linie  $\{211\}$  fáze  $\alpha$ -Fe. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí  $2\theta(\sin^2\psi)$  za předpokladu dvouosého stavu zbytkové napjatosti ( $\theta$  je difrakční úhel,  $\psi$  – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel  $2\theta^{211}$  byl určen pomocí profilové funkce Pearson VII a Rachiingerovy metody na separaci difrakčních maxim  $CrK\alpha_1$ . Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty  $\frac{1}{2}S_2 = 5,76 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $S_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$ . Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [3]. Velikost difraktujícího objemu je dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami  $2 \times 0,5 \text{ mm}^2$ , geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání použitého rentgenografického záření do zkoumaného materiálu ca 3–5,5  $\mu\text{m}$ .

Pro určení fázového složení povrchových vrstev, byly získány difrakční obrazce v klasické Braggově-Brentanově konfiguraci s kobaltovým zářením. Naměřené difrakční diagramy byly zpracovány programem X'Pert HighScore Plus a krystalické fáze byly identifikovány pomocí databáze PDF-2. Kvantitativní analýza byla vyhodnocena pomocí Rietveldovy analýzy v softwaru MStruct. Efektivní hloubka vnikání byla v tom případě 2–10  $\mu\text{m}$ .

Pro stanovení hloubkových průběhů makroskopických zbytkových napětí bylo zvoleno bezsilové odebrání povrchových vrstev materiálu pomocí elektrolytického leštění realizovaného na zařízení PROTO Electrolytic Polisher s elektrolytem A2. Odlešťovaná oblast byla definována pomocí krycí masky o  $\varnothing$  15 mm. Tloušťka odebrané vrstvy byla určena pomocí digitálního mikrometrického úchylkoměru a statisticky určena z devíti měření.

## Výsledky a diskuze

Hloubkové průběhy makroskopických zbytkových napětí vzorků BR, SJ30 a SJ80 jsou uvedeny na následujících obrázcích, viz obr. 1. V podpovrchových vrstvách vzorků opracovaných pomocí metody Sponge-Jet byla zjištěna významná tlaková zbytková napětí, naopak kontrolní broušený vzorek vykazuje tahová zbytková napětí. Oba analyzované směry vykazují pro všechny vzorky podobné průběhy. Tloušťka napětově ovlivněné povrchové vrstvy je u vzorku SJ30 cca 450  $\mu\text{m}$  a největších tlakových napětí (cca  $-400$  MPa) bylo dosaženo v hloubce 100-200  $\mu\text{m}$ . Pro vzorek SJ80 je ovlivněná hloubka cca 140  $\mu\text{m}$  a maximum tlakových zbytkových napětí bylo dosaženo v hloubce 40  $\mu\text{m}$ . Maxima tahových napětí kontrolního broušeného vzorku BR bylo dosaženo v hloubce cca 50  $\mu\text{m}$ . Je patrné, že povrchovou úpravou metodou Sponge-Jet došlo k úplnému potlačení efektu broušení.



Obr. 1: Hloubkové průběhy makroskopických zbytkových napětí na vzorcích SJ30, SJ80 a BR, kde  $z$  je hloubka od povrchu

Pomocí kvalitativní fázové analýzy byly na povrchu vzorků nalezeny pouze dvě fáze – ferit a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , viz tab. 1. Parametry reálné struktury feritické fáze získané pomocí Rietveldovy analýzy jsou také uvedeny v tab. 1. Z výsledků je patrné, že na povrchu broušeného vzorku byla fázovou analýzou určena pouze feritická fáze. U vzorků SJ byl nalezen i korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), jeho zastoupení je u obou vzorků SJ v rámci chyby stejné. Korund se dostal do povrchové vrstvy z abrazivního média. Díky plastické deformaci povrchu došlo tryskáním k mírnému poklesu

velikostí krystalitů. Naopak hodnota mikrodeformace dosahuje několikanásobně vyšších hodnot pro vzorky SJ, kdy tyto oba vzorky vykazují podobné hodnoty. Vyšší mikrodeformace je způsobena dopadajícími abrazivními částicemi, které zvýšily hustotu poruch krystalové mřížky.

Tab. 1: Hmotnostní zastoupení jednotlivých krystalických fází v povrchové vrstvě a parametry reálné struktury (velikost krystalitů D, mikrodeformace e) feritické fáze v povrchové vrstvě

Vzorek	Ferit [hm. %]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [hm. %]	D [nm]	e [10 <sup>-4</sup> ]
BR	100	0	49,6±0,7	5,7±0,6
SJ30	86,3±0,2	13,7±2,7	45,8±0,7	20,6±0,3
SJ80	85,7±0,1	14,3±2,3	42,4±0,5	19,8±0,2

## Závěr

V podpovrchových vrstvách vzorků opracovaných pomocí metody Sponge-Jet byla zjištěna významná tlaková zbytková napětí. Naopak broušený vzorek vykazuje nežádoucí tahová napětí.

Tloušťka napěťově ovlivněné povrchové vrstvy je u vzorku SJ30 ca 450 μm a největších tlakových napětí bylo dosaženo v hloubce 100–200 μm. Pro vzorek SJ80 je ovlivněná hloubka ca 3× menší. Lze tedy konstatovat, že parametry opracování povrchu metodou Sponge-Jet výrazně ovlivňují podpovrchový stav zbytkové napjatosti.

Fázovou analýzou bylo zjištěno, že povrchová vrstva vzorků SJ obsahuje zbytky abrazivního korundu a vykazuje vyšší hodnotu mikrodeformace, která popisuje hustotu defektů – dochází tedy k většímu deformačnímu zpevnění.

Trend zbytkových napětí u vzorků SJ je podobný jako u deformačně zpevněných povrchů (např. kuličkování, válečkování apod.). Takto zpevněný povrch a tlaková zbytková napětí v podpovrchové vrstvě zvyšují mechanické, ale i korozní vlastnosti.

## Poděkování

Autoři děkují projektu TITSSUJB 830 „Zvýšení bezpečnostní rezervy aplikací IVMR pro VVER 1000“. Práce byla podpořena projektem CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000778 „Centrum pokročilých aplikovaných přírodních věd“ v rámci Operačního programu výzkum, vývoj, vzdělávání pod dohledem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky a grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS19/190/OHK4/3T/14.

## Literatura

- [1] Stuchlík, J. (2018): *Vědci simulují v Řeži jadernou havárii*. E15.cz. Dostupné na: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/vedci-simuluji-v-rezi-jadernou-havarii-1343925#>
- [2] El-Hofy, H. A. G. (2005): *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. McGraw Hill. ISBN 0-07-145334-2
- [3] Kraus, I., Ganev, N. (2004): *Technické aplikace difrakční analýzy*. Vydavatelství ČVUT, Praha. ISBN 80-01-03099-7