

# Determination of Residual Stress Tensor in Textured Rolled Steel

## URČENÍ TENZORU MAKROSKOPICKÉ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI V TEXTUROVANÉ VÁLCOVANÉ OCELI

Jiří Čapek<sup>1</sup>, Zdeněk Pala<sup>1</sup>, Martin Černík<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra inženýrství pevných látek, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

<sup>2</sup>U. S. Steel Košice, s.r.o., Slovensko

**Keywords:** residual stresses, texture, Winholtz-Cohen method

### Abstract

The goal of this contribution was to choose an appropriate method for the calculation of macroscopic stress tensor in textured steel material and subsequently put forward a procedure of diffraction data acquisition and evaluation. The main result of the work done is *stress.m* program using a method of calculation of anisotropic elastic constants as a weighted average between single-crystal and X-ray elastic constants. This model method is suitable only for materials with very strong or very weak texture. Hence, we used the *stress.m* program in order to determine macroscopic stress tensor in a strongly textured rolled steel sample. Considering a presence of texture, shear stresses stayed unchanged within the experimental inaccuracies, values of compressive normal stresses  $\sigma_{11}$  and  $\sigma_{22}$  increased by approximately 40 MPa and the value of component of stress tensor  $\sigma_{33}$  decreased to zero.

### Abstrakt

Cílem této práce bylo vybrat vhodnou metodu pro výpočet tenzoru makroskopické zbytkové napjatosti v texturovaném ocelovém materiálu a následně navrhnout postup měření i vyhodnocení difrakčních dat. Hlavním výsledkem je program *stress.m*, využívající metody výpočtu anizotropních elastických konstant jako vážený průměr mezi monokrystalickými a rentgenografickými elastickými konstantami. Tato modelová metoda je ovšem vhodná pouze pro velmi silně, nebo velmi slabě texturované materiály. Program *stress.m* byl proto aplikován pro výpočet tenzoru napětí v silně texturovaném válcovaném ocelovém vzorku. Výsledkem bylo, že pokud se přihlíželo k přítomnosti textury, smyková napětí zůstala v rámci chyby nezměněná, tlaková normálová napětí  $\sigma_{11}$  a  $\sigma_{22}$  se zvýšila cca o 40 MPa a hodnota složky tenzoru napětí  $\sigma_{33}$  se snížila v rámci chyby na statisticky nevýznamnou.

### 1. Úvod

Určení stavu zbytkové napjatosti v pevných látkách rentgenovou difrakcí představuje příkladné využití fyzikálního inženýrství, tedy aplikaci fyzikálních metod na řešení inženýrské problematiky. Problematika reálné struktury pevných látek nabývá v posledních letech na aktuálnosti, neboť je úzce spojena s poruchami v materiálu. Textura neboli přednostní orientace je často skloňovaným pojmem v různých oblastech průmyslu. Její význam je značný,

jelikož při její existenci má materiál v různých směrech různé vlastnosti.

Většina doposud v praxi využívaných metod difrakčních měření a algoritmů výpočtu zbytkových napětí předpokládá ideální případ izotropního polykrystalického materiálu, což není splněno v případě existence krystalografické textury neboli přednostní orientace. Vzhledem k relativně častému výskytu přednostní orientace nejen v kovových materiálech je více než žádoucí mít k dispozici metodu, postup a případně též výpočetní program pro korektní určení zbytkových napětí. Ovšem každá metoda má určité meze použitelnosti.

### 2. Teorie/experiment

V praxi se s ideálně polykrystalickým materiálem téměř nelze setkat. Většina polykrystalických materiálů má v určitém směru orientovaný větší počet krystalitů než v ostatních (tj. určitý krystalografický směr v krystalitech je přednostně orientován vůči geometrickému směru ve vzorku). Texturovaný materiál si lze proto představit jako mezistupeň uspořádání krystalitů neboli stav mezi polykrystalickým a monokrystalickým charakterem pevné látky.

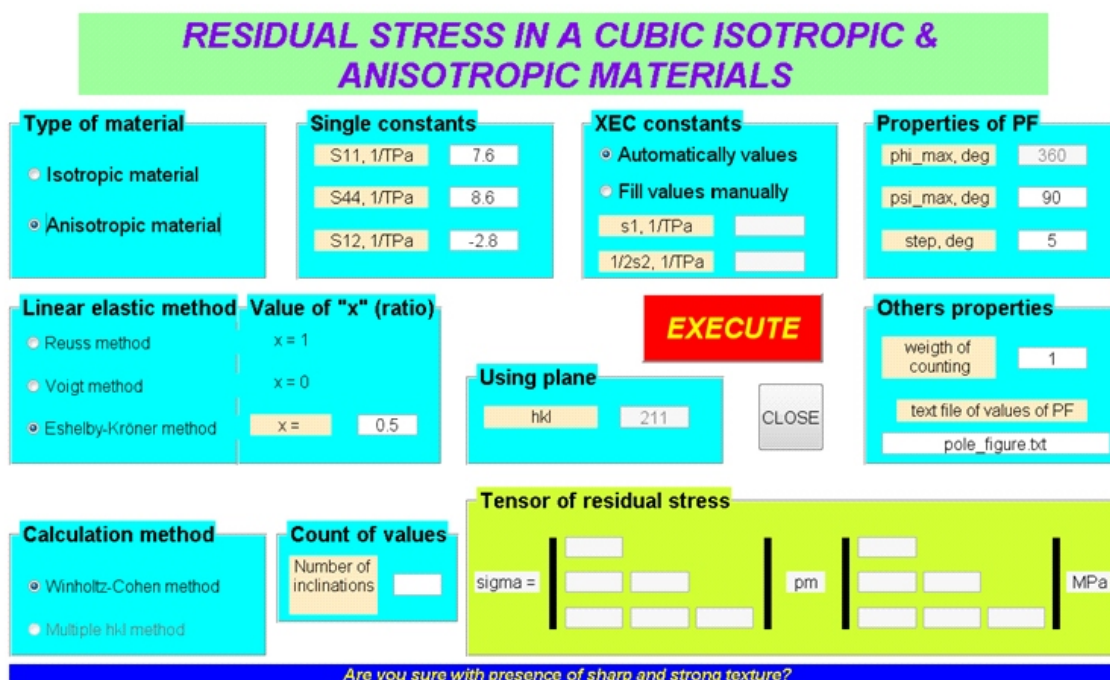
Při vytváření programu *stress.m*, viz obr. 1, na výpočet stavu zbytkové napjatosti v texturovaných materiálech bylo čerpáno z [1], kde H. Dölle uvádí vztah pro určení XSF konstant (X-ray stress factor – anizotropní elastické konstanty):

$$R_{ij}(hkl, \theta, \phi) = \frac{r_{ij}(hkl)}{i} \frac{a(s_{33ij})}{a}, \quad (1)$$

kde  $R_{ij}$  jsou XSF konstanty závislé na  $hkl$  a úhlech  $\theta, \phi$ . Dále  $i$  (resp.  $a$ ) je objemový podíl netexturované (resp. texturované) složky ve vzorku,  $r_{ij}$  jsou kombinace XEC konstant (X-ray elastic constants – rentgenografické elastické konstanty) vypočítané na základě některého ze zvolených modelů a  $s_{33ij}$  jsou monokrystalické elastické konstanty v laboratorní souřadné soustavě  $L$ , váhově průměrované přes ideální orientace.

Váha se určuje z naměřených PPO (přímých pólových obrazců), konkrétněji z relativních intenzit jednotlivých náklonů a rotací vzorku, které jsou zvoleny na základě známých ideálních orientací rovin  $\{211\}$  železa, viz [2] str. 191. Převod konstant z laboratorní souřadné soustavy  $L$ , která je spojena s difraktujícími krystalitami, do soustavy souřadné vzorku  $S$  je podrobně popsán v [1, 3].

Pro takto zvolený postup je nutností splnit určitou podmínku, při jejíž zanedbání chyba výpočtu rapidně roste. Jedná se o limitní případy textury. Buď musí být přítomen

Obrázek 1. Grafické prostředí programu *stress.m*.

malý počet silných reflexí (tedy přítomnost silné a ostré textury), nebo samozřejmě naopak vzorek bez textury (nebo s velmi slabou).

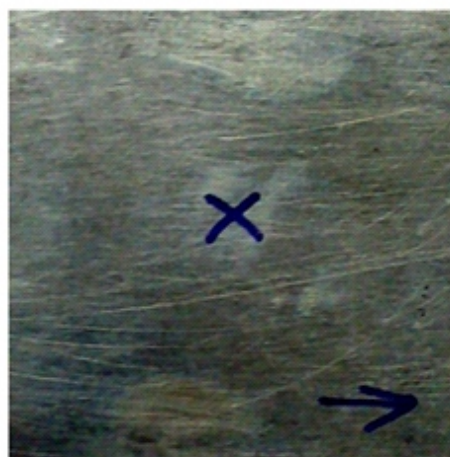
Samotný výpočet tenzoru zbytkových napětí se provádí dle zobecněné napěťové rovnice (2) *metodou Winholtz-Cohena* [4],

$${}^{hkl} R_{ij}(hkl, \theta) = \sigma_{ij} \quad (2)$$

Program *stress.m*, viz obr. 1, vyžaduje výběr mezi texturovaným a netexturovaným kubickým materiálem, zadání monokrystalických a XEC konstant. Existuje možnost zadat výpočet XEC konstant pomocí lineárních elastických metod (*Reussova*, *Voigtova* nebo *Eshelbyho-Krönerova*). Dále je nutné zadat celkový počet náklonu  $\theta$ , ve kterých se materiál měřil, a do připraveného souboru parametry měření a naměřené hodnoty difrakčních úhlů rovin  $\{hkl\}$ . Nakonec do textového souboru je nutné vložit relativní intenzity PPO rovin  $\{hkl\}$ , z jejichž deformací se vypočte napětí. Je důležité, aby tyto roviny vykazovaly silnou texturu a materiál nebyl hrubozrnný, jelikož z těchto relativních intenzit program určuje jak váhové faktory ideálních orientací, tak objemový podíl texturované části v materiálu.

Pro nutnost přítomnosti velmi silné textury byl použit vzorek válcovaného plechu na výrobu konzerv, viz obr. 2.

Určování zbytkových napětí vzorku probíhalo na vertikálním difraktometru *X'Pert PRO* v Braggově-Brentanově geometrii s rentgenkou s chromovou anodou ( $\lambda(\text{CrK}\alpha) = 0,2291062 \text{ nm}$ ) a s čárovým ohniskem. Texturní měření také probíhalo na difraktometru *X'Pert PRO* ovšem v Schulzově reflexní geometrii s rentgenkou s kobaltovou anodou ( $\lambda(\text{CoK}\alpha) = 0,1790307 \text{ nm}$ ) a s bodovým ohniskem.

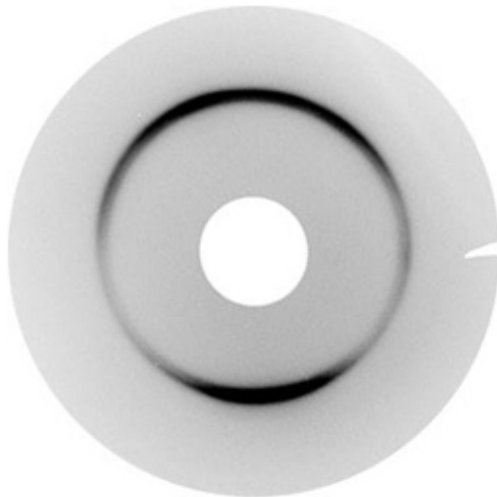


Obrázek 2. Vzorek plechu na výrobu konzerv s vyznačeným směrem válcování.

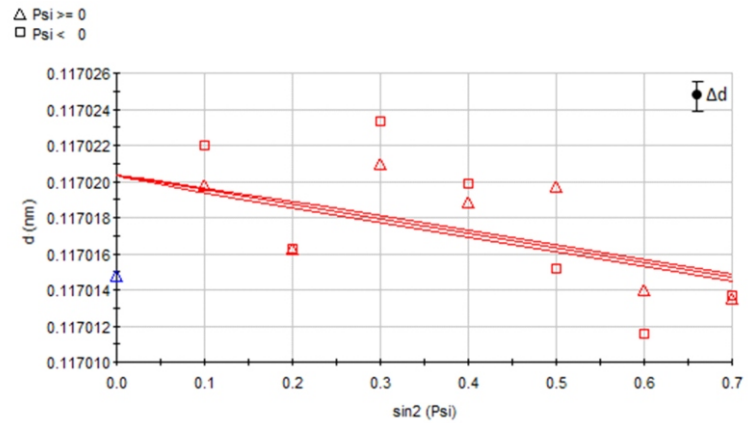
### 3. Výsledky/diskuze

Fázovou analýzou byly v cca 10  $\mu\text{m}$  povrchové vrstvě zjištěny fáze:  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\text{FeSn}_2$ ,  $\text{SnO}$ . Z jejich relativních intenzit je patrná přítomnost silné textury. Z Debyeova-Scherrerova experimentu na zpětný odraz, viz obr. 3, plyne silná textura rovin  $\{211\}$  a vhodná velikost krystalitů pro texturní i napěťovou analýzu.

XEC konstanty byly vypočítány na základě *Eshelbyho-Krönerova modelu*, z [5] byly vybrány monokrystalické elastické konstanty  $\alpha\text{-Fe}$ :  $s_{1111} = 7,6 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $s_{1122} = -2,8 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $s_{1212} = 2,15 \text{ TPa}^{-1}$  (dle Voigtovy notace je  $s_{1111} = s_{11}$ ,  $s_{1122} = s_{12}$ ,  $4s_{1212} = s_{44}$ ). S ohledem na značný vliv hodnoty mezirovinné vzdálenosti rovin  $\{hkl\}$  nenapjatého materiálu na hodnotu složky tenzoru zbytkových napětí  $\sigma_{33}$ , byla hodnota  $d_0$  určena v témže vzorku na základě nalezení tzv. beznapěťového směru  $\theta^*$  pomocí algoritmu zabudovaného



**Obrázek 3.** Debyeův kroužek roviny  $\{211\}$  vzorku plechu na výrobu konzerv.



**Obrázek 4.** Graf závislosti  $d(\sin^2)$  vzorku plechu na výrobu konzerv při úhlu  $= 90^\circ$  s odhadem přesnosti  $d$  a proložením lineární závislosti odpovídající zpracování dat bez zahrnutí vlivu textury.

v komerčním programu *X'Pert Stress*, což vedlo k získání hodnoty  $d_0^{211} = 0,11702$  nm.

Pro pozdější porovnání výsledků byl ovšem nejdříve určen tenzor zbytkové napjatosti bez uvažování přítomnosti textury (standardní výpočet trojosého stavu napjatosti metodou *Winholtze-Cohena* a s použitím XEC konstant vypočítaných dle Eshelbyho a Krönera, tedy pomocí modelu zahrnujícího vliv interakce mezi krystalitem a jeho okolím), viz následující tenzor (3).

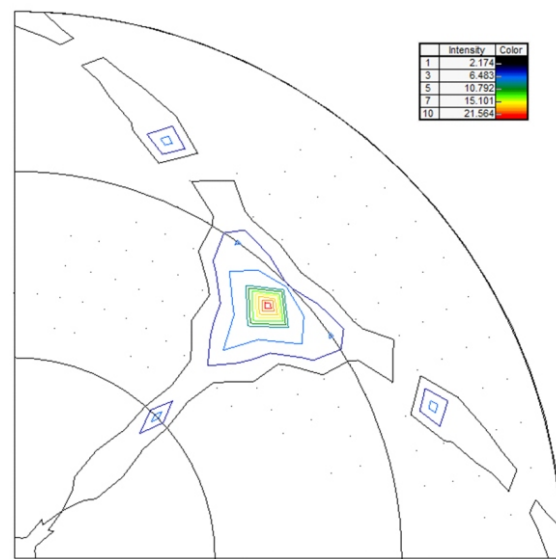
$$\begin{pmatrix} 124 & & & & 5 \\ & 8 & 62 & & & \\ & & & 1 & 3 & \\ & & & & & & \text{MPa} \\ 1 & 0 & 52 & 1 & 2 & 5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Z tohoto výsledku je patrné, že stav napjatosti v ozářeném objemu vzorku je trojosý s nenulovou hodnotou tzv. hydrostatického napětí  $\sigma_{33}$ .

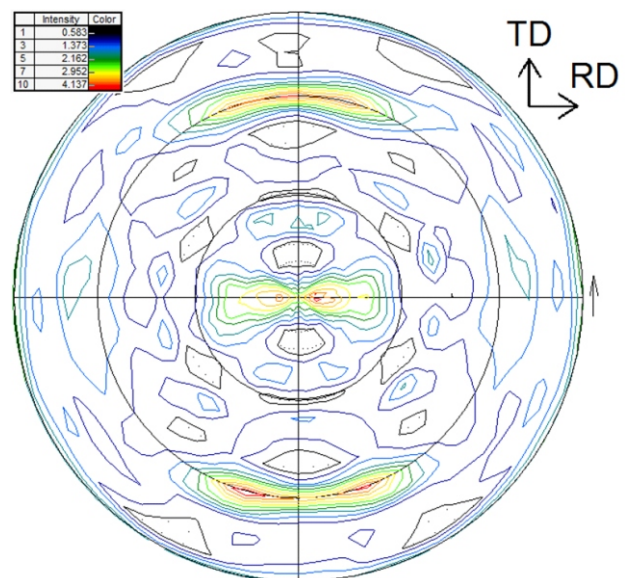
Z obr. 4, kde je závislost  $d^{211}(\sin^2)$  pro azimut  $= 90^\circ$ , je patrná nevhodnost postupu použitého při výpočtu tenzoru (3), neboť hodnoty  $d^{211}$  v závislosti na  $\sin^2$  oscilují. Jedná se tedy o nelineární závislost, která se charakteristicky pozoruje v případě existence přednostní orientace v ozářeném objemu. Je zřejmé, že standardní metoda výpočtu tenzoru zbytkových napětí byla v tomto případě zcela nekorektní.

Pro kvantitativní určení přednostní orientace byly určeny IPO (inverzní pólové obrazce) a PPO. Důkaz stupně přítomné textury roviny  $\{211\}$  ve vzorku je uveden na obr. 5, kde je IPO ve směru  $\theta$ , s majoritní orientací roviny  $\{211\}$  (a roviny s podobnou pozicí ve stereografické projekci). Pro výpočet stavu zbytkové napjatosti texturovaného vzorku programem *stress.m* je zapotřebí PPO roviny  $\{211\}$ , viz obr. 6. Ze škály intenzit tohoto PPO je patrná silná textura.

Nyní již byla k dispozici všechna potřebná vstupní data pro výpočet tenzoru zbytkové napjatosti se započítáním přítomnosti textury (určení trojosého stavu napjatosti metodou *Winholtze-Cohena*, ovšem s použitím XSF konstant), viz následující tenzor (4). V námi použitém modelu je zahrnut vliv interakce mezi krystalitem a jeho



**Obrázek 5.** Inverzní pólový obrazec (001).



**Obrázek 6.** Přímý pólový obrazec roviny  $\{211\}$  s vyznačeným válcovacím (RD) a transverzálním (TD) směrem.

