EAN '96

34th Conference of Experimental Stress Analysis
34. konference o experimentální analýze napětí
3. - 6.6. 1996, Plzeň, Czech Republic

X-RAY INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES DUE TO NON-CONVENTIONAL TECHNOLOGIES OF CUTTING

RENTGENOGRAFICKÝ VÝZKUM ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ VYVOLANÝCH NEKONVENČNÍMI TECHNOLOGIEMI ŘEZÁNÍ

Ganev Nikolaj, Kraus Ivo, Pfeiffer Lothar, Tietz H.-D.

The subject of the investigation was the X-ray analysis of residual stresses due to different cutting technologies (laser cutting, abrasive water jet cutting, cutting with a disk cutter) in surface layers of the steel of the Czech grade CSN 11 373. Besides, a comparative measurement have been performed on a reference bulk steel specimen and on an α-Fe powder specimen. Residual stresses were measured by $\sin^2\psi$-method (ω-goniometer and ψ-goniometer Siemens). Only compressive macroscopic surface stresses were determined.

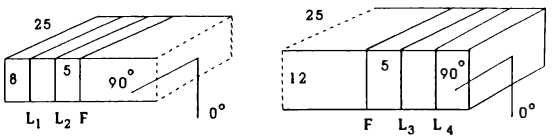
1. Tvar a rozměry zkoumaných vzorků

Způsob dělení výchozích hranolků oceli ČSN 11 373 laserem (L) a kotoučovou frézou (F) je patrný z obr.1. Na něm je také uvedeno označení řezných ploch L_1, L_2, L_3, L_4, F a směry $\varphi=0°$ a 90° měření napětí.

Vzorky C_{AWJ}, na nichž byl zkoumán vliv řezání vodním paprskem, měly tvar hranolků o rozměrech 5x25x15mm^3.

Standardní vzorek S_{AE} oceli ČSN 11 373 (broušený povrch, žíhání 2 hod. při 650°C, elektrolytické odleptání povrchové vrstvy o tloušťce 0,1mm) měl stejný tvar a rozměry jako vzorky C_{AWJ}.

Kromě kompaktního vzorku S_{AE} byl připraven i práškový standard S_P z čistého karbonylového α-Fe.



Obr.1 Schéma dělení výchozího materiálu laserem a frézou; při řezání laserem se ocelový hranolek pohyboval ve směru azimutálního úhlu $\varphi=90°$

2. Charakteristika použitých technologií řezání vzorků

Řezání laserem (vzorky C_L, řezné plochy L_1, L_2, L_3, L_4). Použitý kontinuální laser CO_2 s průměrem svazku 0,5mm ve fokusu měl výkon 2,5kW; ztráty na 4 zrcadlech dosahovaly hodnot 4x(2,5÷3)%. Rychlost řezání laserem v kyslíkové atmosféře:

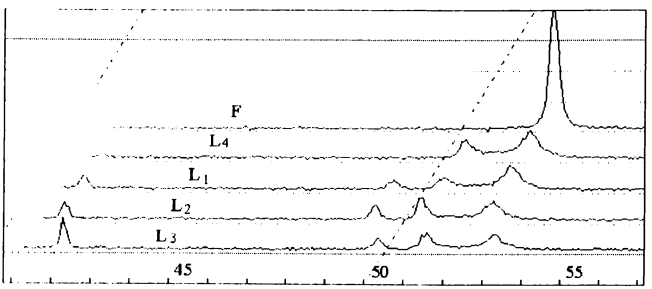
1200mm/min u řezů L_1, L_2 a 800mm/min u řezů L_3, L_4.

Řezání kotoučovou frézou (vzorek C_F): posuv 28mm/min, 90 otáček/min, chladící emulze.

Řezání abrazivním vodním paprskem (vzorky C_{AWJ}, řezné plochy C_{AWJ1-1}, C_{AWJ1-2}, C_{AWJ2}, C_{AWJ3}): tlak vody 250MPa, průměr trysky 0.325mm, rychlost řezání 14mm/min, velikost zrna abraziva (0.12÷0.35)mm; řezy C_{AWJ1-1}, C_{AWJ1-2}-granátový písek, průtok 630g/min, řez C_{AWJ2}-křemenný písek, průtok 560g/min, řez C_{AWJ3}-křemenný písek, průtok 240g/min.

3. Aplikovaná difrakční technika

Fázová analýza řezných ploch F, L_1, L_2, L_3, L_4. Podkladem pro kvalitativní fázovou analýzu byly difrakční diagramy zhotovené pomocí záření CoKα v oboru úhlů $2\theta = 41^o \div 57^o$ (obr.2).



Obr.2 Difrakční diagramy získané zářením CoKα z řezných ploch F, L_1, L_2, L_3, L_4

Měření zbytkových napětí rentgenografickou tenzometrickou metodou "$\sin^2\psi$" [1,2] pomocí záření CrKα na goniometrech firmy Siemens v uspořádáních "ω" (FJFI ČVUT Praha) a "ψ" (HTW Zwickau) byla realizována za těchto podmínek:

a) ω-goniometr; analyzovaná difrakční linie {211}, úhlový obor $2\theta = 149° \div 162°$, krok měření $\Delta 2\theta = 0{,}2°$, expoziční doba 10s. Poloha difrakčních linií byla určována ve všech případech jako hodnota úhlu těžiště profilu Kα. Naměřené hodnoty se vztahují k teplotě 25°C. Výpočet napětí byl proveden pomocí rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5{,}76.10^{-6}MPa^{-1}$. Kromě závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$ byla na všech vzorcích stanovena také závislost integrální intenzity linie {211} na $\sin^2\psi$. Ozářený povrch měl plochu 45mm^2 při $\psi = 0°$ a 75mm^2 při $\psi = 63{,}43°$

b) ψ-goniometr; experimentální podmínky se lišily pouze dobou expozice (5s) a velikostí ozářené plochy povrchu (5,5mm^2 při $\psi = 0°$ a 9,0mm^2 při $\psi = 63{,}43°$).

4.1 Výsledky měření na ω-goniometru

a) Fázová analýza řezných ploch F, L_1, L_2, L_3, L_4. Z difrakčních diagramů na obr.2 je zřejmé, že v povrchové vrstvě všech řezů jsou přítomné krystalky α-Fe. Plochy L_1, L_2, L_3, L_4 obsahují kromě *austenitu* navíc ještě tyto další fáze:

wustit (kubický FeO)... L_1, L_2, L_3,
magnetit (kubický Fe_3O_4)... L_1, L_2, L_3,
hematit (romboedrický Fe_2O_3)... L_2, L_3.

b) Makroskopické napětí na plochách L_1, L_2, L_3, L_4.

- Ve všech případech byla zjištěna pouze tlaková napětí.
- Makroskopická napětí σ(MPa) naměřená na plochách L_1, L_2, L_2, L_3 jsou směrově závislá (tabulka 1).

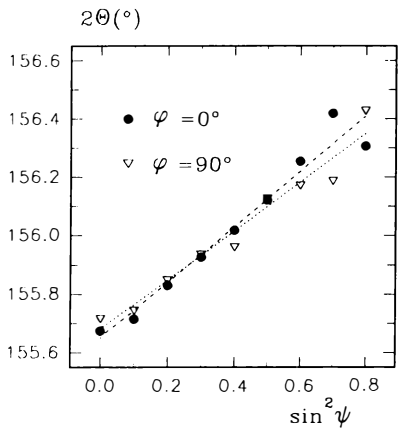
Použitý způsob řezání vedl k větší směrové závislosti těchto napětí na *krajních* řezných plochách (L_1, L_4) než na plochách *vnitřních* (L_2, L_3). Z této skutečnosti vyplývá, že zbytková napjatost řezných ploch na různých vzorcích oddělovaných postupně z téhož hranolku není navzájem nezávislá. Ilustrace získaných průběhů $2\theta(\sin^2\psi)$ je uvedena na obr.3 a 4.

Tabulka 1

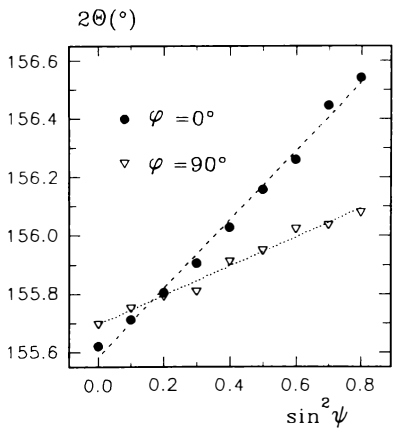
Napětí σ(MPa) naměřená na plochách L_1, L_2, L_3, L_4, v azimutech φ = 0° a 90°

Plocha	$\varphi=0°$	$\varphi=90°$
L_1	-293± 7	-203± 7
L_4	-374±12	-159± 8
L_2	-222±11	-263±25
L_3	-313±14	-255±19

Jak vyplývá ze závislosti integrální intezity $I(\sin^2\psi)$ na řezné ploše L_3(obr.5), není dělení daného materiálu pomocí laserového svazku doprovázeno vznikem výrazné přednostní orientace krystalků. Pokles intenzity s růstem úhlu ψ je důsledkem absorpce v povrchové oxidické vrstvě. Kvalitativně stejné průběhy byly zjištěny i na ostatních plochách L_1, L_2, L_4.



Obr.3 Závislosti $2\theta(\sin^2\psi)$ naměřené na řezné ploše L_4 ve směrech φ = 0° a 90°



Obr.4 Závislosti $2\theta(\sin^2\psi)$ naměřené na řezné ploše L_3 ve směrech φ = 0° a 90°

Závislosti $2\theta(\sin^2\psi)$ naměřené na řezných plochách C_F, C_{AWJ1-1}, C_{AWJ1-2}, C_{AWJ2}, C_{AWJ3} byly interpretovány napětím za předpokladu, že stav napjatosti je
- dvojosý centrálně symetrický (izotropní v rovině povrchu),
- nebo trojosý nehomogenní, v rovině povrchu izotropní.

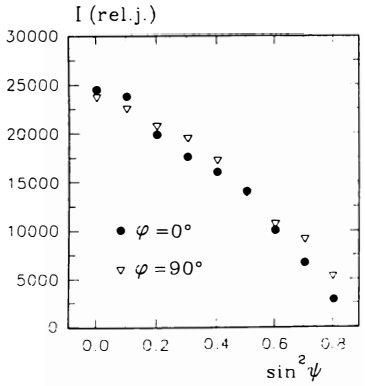
Charakter průběhů $2\theta(\sin\psi^2)$ je zřejmý z obr 6 a 7.

Hodnoty napětí vypočtené za obou uvedených předpokladů jsou shrnuty v tabulkách 2 a 3. (Ke stanovení součtu hlavních napětí $\sigma_1+\sigma_2$ byla použita hodnota $2\theta_0(K\alpha)=156.406°$, která je aritmetickým průměrem hodnot naměřených na vzorku S_{AE} při různých úhlech ψ.)

Tabulka 2

Hlavní napětí $\sigma_1 = \sigma_2$ a součty $\sigma_1 + \sigma_2$ vypočtené za předpokladu existence dvojosého centrálně symetrického stavu napjatosti v rovině povrchu zkoumaných vzorků; hodnoty napětí jsou doplněny směrodatnou odchylkou a velikostí 90%. intervalu spolehlivosti (údaj v závorce)

Vzorek	σ_1, MPa	$\sigma_1+\sigma_2$, MPa
S_F	-5±1 (± 3)	
C_{AWJ1-1}	-254±8 (±20)	-597±18 (±42)
C_{AWJ1-2}	-186±6 (±15)	-434±13 (±33)
C_{AWJ2}	-276±3 (± 6)	-612± 6 (±14)
C_{AWJ3}	-336±5 (±12)	-740±10 (±26)
C_F	-463±9 (±21)	-961±20 (±47)
S_{AE}	-25±7 (±16)	-46±15 (±35)



Obr.5 Závislost I(sin²ψ) stanovená na řezné ploše L_3 v azimutech φ = 0° a 90°

Tabulka 3

Povrchová složka tenzoru napětí $\sigma_{11}(0)$ a gradienty g_{11}, g_{33} vypočtené za předpokladu existence trojosého nehomogenního stavu napjatosti, který je v rovině povrchu izotropní; hodnoty uvedených veličin jsou doplněny směrodatnou odchylkou a velikostí 90%. intervalu spolehlivosti (údaj v závorce)

Vzorek	$\sigma_{11}(0)$, MPa	g_{11}, MPa.μm^{-1}	g_{33}, MPa.μm^{-1}
C_{AWJ1-1}	-146.6± 7.0 (±17.4)	-14.1±2.2 (± 5.5)	9.3±0.5 (±1.3)
C_{AWJ1-2}	-117.5±16.4 (±40.5)	-7.7±5.2 (±12.7)	6.9±1.2 (±2.9)
C_{AWJ2}	-235.9± 6.9 (±17.0)	1.7±2.2 (± 5.3)	8.5±0.5 (±1.2)
C_{AWJ3}	-263.7± 3.6 (± 8.8)	-7.0±1.1 (± 2.8)	8.0±0.3 (±0.8)
C_F	-534.9± 9.2 (±22.6)	31.8±2.9 (± 7.1)	10.2±0.7 (±1.7)

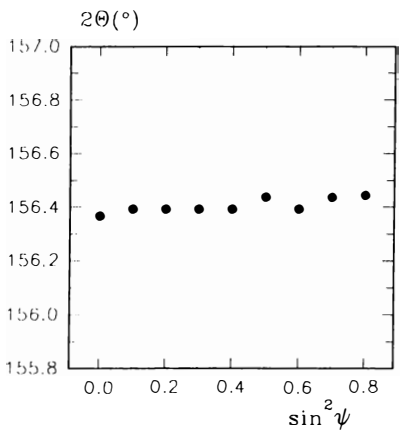
Šířky 2θ difrakční linie $\{211\}K\alpha_1$ naměřené při úhlu $\psi=0°$ se nezávisle na azimutu φ mění podle technologie řezání: C_F(1.46), L_1(3.8), L_2(3.7), L_3(4.0), L_4(4.09), C_{AWJ1-1}(1.83), C_{AWJ2}(1,77), C_{AWJ3}(1.74), S_{AE}(0.42).

4.2 Výsledky měření na ψ-goniometru

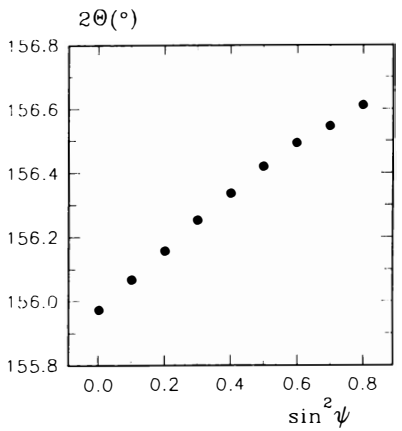
Hodnoty veličin charakterizující dvojosý resp. trojosý stav napjatosti naměřené na ψ-goniometru jsou obsaženy v tabulkách 4 a 5.

Tabulka 4
Hlavní napětí $\sigma_1 = \sigma_2$ a součty $\sigma_1 + \sigma_2$ vypočtené za předpokladu existence dvojosého centrálně symetrického stavu napjatosti v rovině povrchu zkoumaných vzorků; hodnoty napětí jsou doplněny směrodatnou odchylkou a velikostí 90%. intervalu spolehlivosti (údaj v závorce)

Vzorek	σ_1, MPa	$\sigma_1+\sigma_2$, MPa
S_P	-2± 2 (±6)	
C_{AWJ1-1}	-239± 8 (±19)	-554±21 (±47)
C_{AWJ1-2}	-155± 6 (±19)	-401±15 (±35)
C_{AWJ2}	-278±12 (±28)	-602±31 (±71)
C_{AWJ3}	-335± 8 (±19)	-705±21 (±47)
C_F	-432±12 (±27)	-858±30 (±67)
S_{AE}	-29± 5 (±11)	-63±12 (±26)



Obr.6 Závislost $2\theta(\sin^2\psi)$ naměřená na vzorku S_{AE}



Obr.7 Závislost $2\theta(\sin^2\psi)$ naměřená na vzorku C_{AWJ1-1}

Tabulka 5
Povrchová složka tenzoru napětí $\sigma_{11}(0)$ a gradienty g_{11}, g_{33} vypočtené za předpokladu existence trojosého nehomogenního stavu napjatosti, který je v rovině povrchu izotropní; hodnoty uvedených veličin jsou doplněny směrodatnou odchylkou a velikostí 90%. intervalu spolehlivosti (údaj v závorce)

Vzorek	$\sigma_{11}(0)$, MPa	g_{11}, MPa.μm^{-1}	g_{33}, MPa.μm^{-1}
C_{AWJ1-1}	-196.3±39.9 (±103.0)	-3.9± 9.9 (±25.5)	7.5±1.5 (±2.0)
C_{AWJ1-2}	-91.9± 8.5 (±21.8)	-2.3± 2.1 (±5.3)	10.8±0.3 (±0.8)
C_{AWJ2}	-243.7±63.6 (±164.2)	-8.1±15.8 (±40.7)	3.1±2.3 (±6.1)
C_{AWJ3}	-333.2±48.2 (±124.4)	0.2±11.9 (±30.8)	3.0±1.8 (±4.6)
C_F	-518.6±17.5 (±45.1)	28.8± 4.3 (±11.2)	4.7±0.6 (±1.7)

5. *Závěry*

Rentgenografickou tenzometrickou metodou $\sin^2\psi$ byla stanovena makroskopická zbytková napětí vyvolaná řezáním oceli ČSN 11 373 kotoučovou frézou, laserovým svazkem a abrazivním vodním paprskem. Všechny tyto technologie vedly pouze ke vzniku tlaků. Největších hodnot dosáhla napětí na frézovaném povrchu ($\approx$-500MPa), nejnižší tlaky (-200÷-340)MPa vznikaly po řezání vodním paprskem. Závěry tenzometrické analýzy získané na goniometrech v uspořádání "ω" i "ψ" b y ve velmi dobré shodě, a to jak při interpretaci naměřených mřížkových deformací (úhlů 2θ) dvojosým centrálně symetrickým stavem napjatosti, tak nehomogenním stavem trojosým.

Literatura

[1] Kraus I., Ganev N.: Difrakční analýza mechanických napětí. Skripta ČVUT, Praha 1995
[2] Kraus I.: Rentgenografie nehomogenních napěťových polí. Academia, Praha 1990

Tato práce je dílčím výsledkem řešení projektu podporovaného GAČR (grant č. 101/96/1181).

Prof. RNDr. Ivo Kraus, DrSc., Ing. Nikolaj Ganev, CSc.
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze
V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, tel. (02) 8576 2416

Dipl.-Ing. Lothar Pfeiffer, Prof.Dr.-Ing.habil.H.-D.Tietz
Hochschule für Technik und Wirtschaft (FH), Zwickau