

Rtg difrakční diagnostika povrchových vrstev obroběných strojních součástí

Kamil Kolařík¹, Nikolaj Ganev¹, Zdenek Pala¹, Totka Bakalova²

¹Katedra inženýrské výroby, FJFI ČVUT v Praze
tel.: +420 224358624, e-mail: kamil.kolarik@email.cz

²Katedra obrábění a montáže, FS TUL v Liberci

Růst nároků na bezpečnost a spolehlivost strojních komponent zejména v oblasti dopravní techniky a jaderné energetiky přímo souvisí s technologickými postupy jejich výroby a konečného opracování. Nové vysokopevnostní materiály, principy úběru a přetvoření konečného povrchu vytvářejí u řady uživatelů pochyby, zda velká energie vynaložená na vytvoření nového povrchu neovlivní negativně užité vlastnosti těchto výrobků.

Analýza zbytkových napětí má při diagnostice užitečných vlastností stále rostoucí význam a vhodně doplňuje klasické metody výzkumu materiálových charakteristik (pevnost, houževnatost, oteřuvzdornost).

V příspěvku jsou uvedeny vybrané zkušenosti laboratoře strukturní rentgenografie fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze s průmyslovými aplikacemi rtg difrakční analýzy při studiu mechanicky zpevněných povrchových vrstev, vlivu pracovního prostředí a parametrů konvenčních a nekonvenčních technologií obrábění.

Klíčová slova: rtg difrakce, zbytková napětí, kuličkování, frézování, EDM

1. Úvod

Interakce s materiálem při jeho opracování se realizuje přes jeho volný povrch, a proto může stav povrchových vrstev ovlivnit rozhodujícím způsobem užité vlastnosti celého objemu. Jedním z nejvýznamnějších faktorů, který musí být v této souvislosti uvažován, je distribuce zbytkových napětí doprovázejících každý technologický proces, při němž dochází k nehomogenní plastické deformaci.

Zbytková napjatost v povrchových vrstvách řezné plochy je důsledkem kombinovaného účinku mechanických a tepelných vlivů. Působí-li mechanické zatížení při nízkých teplotách, dochází v tenké povrchové vrstvě k plastickým deformacím a ve vrstvách pod ní k deformaci pružné. Po odlehčení se pružně deformovaná část snaží vrátit do svého původního stavu a při tom působí tlakem na vrstvu plasticky deformovanou. Tím vzniká ve zpevněné povrchové vrstvě napětí tlakové a ve vrstvách spodních tahové. Zároveň s plastickou deformací je povrchová vrstva obroběné plochy vystavena účinku tepla vznikajícího při obrábění. Plasticky deformovaná ohřátá povrchová vrstva se snaží při ochlazení zmenšit svůj objem, čemuž brání spodní studenější vrstvy; tak u povrchu vznikají tahy a hlouběji tlaky. Účinek plastické deformace a teploty na směr a velikost zbytkových napětí je tedy opačný. Při těch způsobech obrábění, kdy dominuje velké mechanické zatížení povrchu (při menší teplotě) bude pravděpodobně převažovat vliv plastické deformace a povrch zůstane napjatý tlakově. Při vysoké teplotě a malé zatěžující síle vzniknou naopak v povrchové vrstvě tahy [1].

Druh a velikost zbytkových napětí v povrchových vrstvách je vždy funkcí obráběného materiálu, způsobu a podmínek obrábění. Charakter zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku má vliv na jeho provozní vlastnosti. Tlaková napětí zpravidla zvyšují mez únavy a zlepšují odolnost povrchu obrobku proti opotřebení. Tahová napětí naopak mez únavy snižují a usnadňují rozrušení povrchových vrstev troucích se ploch [2].

Studium vlivu pracovních podmínek na druh a velikost zbytkových napětí v povrchových vrstvách obrobku je proto jedním z podkladů pro optimalizaci obráběcího procesu z hlediska kvality obrobku, a to zejména u součástí použitých v obtížných provozních podmínkách.

2. Možnosti využití rentgenové tenzometrie v diagnostice strojírenských technologií

Podstatou rentgenové tenzometrie je využití rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím [3].

Jedna z prakticky významných zvláštností rentgenové tenzometrie spočívá v tom, že povrch zkoumaného materiálu není třeba před vlastním měřením speciálně upravovat. Běžná drsnost s níž se obvykle po opracování nebo tváření setkáváme, není na závadu. Vždy je však třeba uvážit, jaké důsledky má pro řešení dané úlohy hloubka vnikání používaných rentgenových paprsků.

Závislosti složek tenzoru napětí σ_{ij} na vzdálenosti T od povrchu mohou mít pro předpověď pevnostních vlastností výrobku často větší význam než pouze povrchové hodnoty $\sigma_{ij}(0)$. Znalost funkce $\sigma_{ij}(T)$ umožňuje předpovědět provozní spolehlivost výrobku, resp. zvolit vhodné povrchové opracování, kterým se vytvoří potřebná tloušťka a dostatečné tlakové předpětí vrstvy představující bariéru proti trhlinám šířícím se od povrchu směrem dovnitř objemu. Z ekonomického hlediska je cílem optimalizovat výrobní technologii tak, aby povrchová vrstva zaručovala spolehlivou ochranu proti porušení výrobku, i když na něm budou pozorovány trhliny dosahující určitých podkritických hodnot.

U materiálu na bázi Fe je pro difrakční analýzu napětíových nehomogenit (průběhu zbytkových napětí měnících se výrazně již v několika málo desítkách μm pod povrchem) vhodné záření rentgenky s chrómovou anodou. Vzhledem k velké absorpci pronikají paprsky $\text{CrK}\alpha$ jen do nepatrné hloubky ($\approx 10^0 \mu\text{m}$); naměřená napětí jsou proto specificky povrchová. Závislost $\sigma(T)$ lze získat jako graf hodnot napětí σ přiřazených ke vzdálenostem T od původního povrchu k povrchům, které jsou na zvoleném místě zkoumaného vzorku postupně elektrolyticky obnažovány.

3. Vybrané výsledky průmyslových aplikací rtg difrakční analýzy

V posledních letech se rentgenová difrakční analýza rozložení napětí v povrchových vrstvách ovlivněnými různými způsoby opracování stává součástí kontroly a zavádění nových výrobních technologií. V následujícím textu jsou uvedeny vybrané výsledky průmyslových aplikací rtg difrakční analýzy provedené v laboratoři strukturální rentgenografie v průběhu posledních 3 let.

3.1 Rtg stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí broušeného a válečkového sedla náprav

Předmětem tohoto výzkumu bylo stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí dvou vzorků sedel náprav označených A1N a MA1N (obr. 3). Vzorek A1N byl pouze broušený. Zadavatel požadoval měření axiálních a tangenciálních napětí na povrchu a v hloubkách 0,1, 0,2 a 0,3 mm. U válečkového vzorku MA1N měl zadavatel zájem o stanovení zbytkových napětí v hloubkách 0,3 – 2 mm.

3.1.1 Použitá tenzometrická metoda

K rentgenografickému určení makroskopických zbytkových napětí na povrchu byla použita metoda *jedné expozice bez referenční látky* [3] s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii (obr. 2).

Hlavní parametry použité metody: úhel dopadu záření $CrK\alpha$ na analyzovaný povrch $\psi_0 = 45^\circ$, vzdálenost filmu od povrchu vzorku $D \approx 47$ mm, průměr cylindrického kolimátoru 1,7 mm, plocha ozářeného povrchu cca $2,5$ mm², symbol analyzované difrakční linie $\{211\}$. Chyba měření napětí nepřesahuje 40 MPa.

Pro stanovení hloubkových profilů makroskopických zbytkových napětí bylo použito destruktivní odebrání povrchových vrstev materiálu pomocí elektrolytického leptání. Odleptávaná oblast povrchu měla tvar kruhu o průměru cca 8 mm.



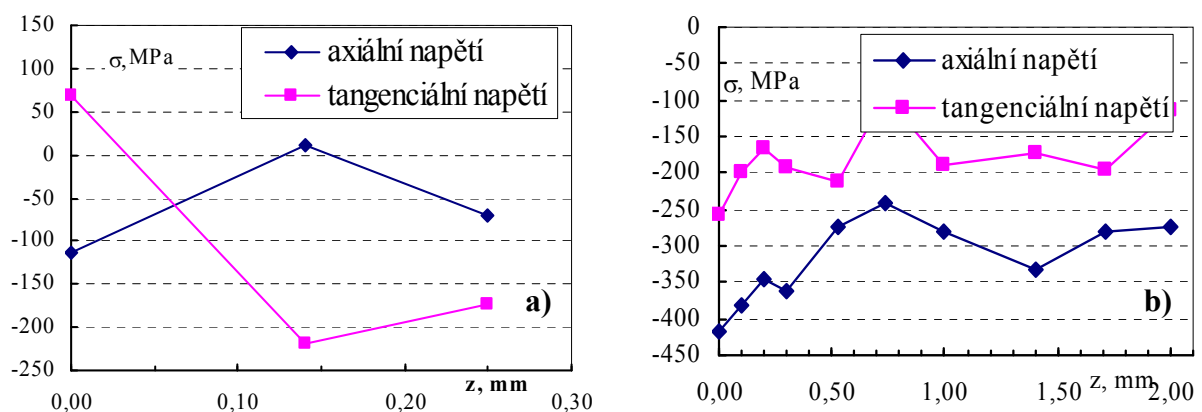
Obr. 2 Uspořádání rtg tenzometrické metody jedné expozice bez referenční látky.



Obr. 3 Rtg zařízení FJFI ČVUT v Praze pro difrakční analýzu rozměrných vzorků.

3.1.2 Vybrané výsledky měření

Hodnoty axiálních (σ_A) a tangenciálních (σ_T) zbytkových napětí naměřených uprostřed broušeného vzorku A1N a válečkovaného vzorku MA1N v různých vzdálenostech od povrchu jsou znázorněny na obr. 4.

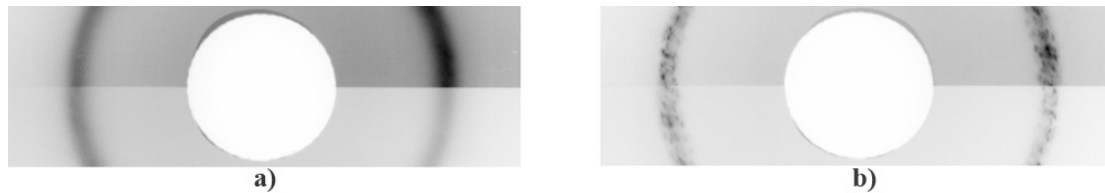


Obr. 4 Hloubkové profily axiálních (σ_A) a tangenciálních (σ_T) zbytkových napětí. (a) broušený vzorek A1N, (b) válečkovaný vzorek MA1N.

3.1.3 Hlavní závěry

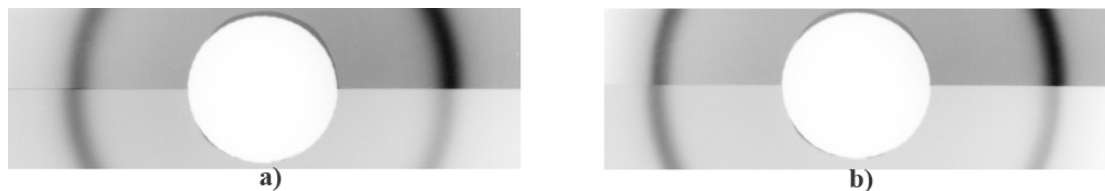
Při difrakčním tenzometrickém studiu hloubkového profilu zbytkových napětí dochází u broušeného vzorku A1N a okrajových oblastí válečkovaného vzorku MA1N k postupnému

„rozpadání“ spojité difrakční linie na diskretní stopy (obr. 5) odpovídající reflexím na jednotlivých krystalitech. Tento jev, limitující spolehlivou tenzometrickou interpretaci difrakčního obrazce, je zřejmě způsoben zvětšujícím se rozměru krystalků polykrystalického materiálu směrem do hloubky.



Obr. 5 Difrakční obrazce $\{211\}$ $CrK\alpha$ pořízené na povrchu (a) broušeného vzorku AlN a po odleptání vrstvy o tloušťce 0,4 mm (b).

Oproti tomu stav materiálu analyzované oblasti uprostřed válečkovaného sedla nápravy MA1N umožnil měření do hloubky 2,0 mm. V tomto místě bylo provedeno podrobné stanovení hloubkového profilu zbytkových napětí (viz obr. 4 vpravo). Díky spojité difrakční linie pozorované i v největší dosažené hloubce (viz obr. 6), jsou získané hodnoty napětí zatíženy minimální experimentální chybou nepřevyšující 40 MPa.



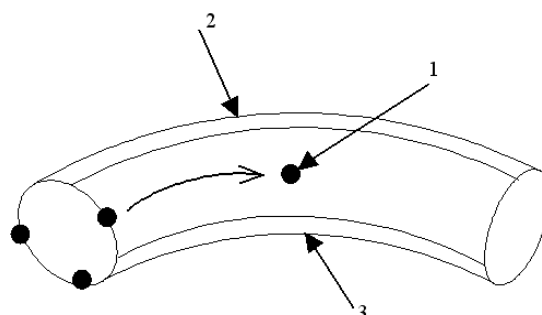
Obr. 6 Difrakční obrazce $\{211\}$ $CrK\alpha$ pořízené na povrchu (a) válečkovaného vzorku MA1N a v hloubce 2,0 mm (b).

Průběhy axiálních (σ_A) a tangenciálních (σ_T) zbytkových napětí naměřených uprostřed válečkovaného vzorku MA1N (obr. 4 vpravo) mají analogický charakter. Přitom jsou tlaky zjištěné v axiálním směru systematicky vyšší než tlaková napětí ve směru tangenciálním.

3.2 Rtg stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí vzorku z kuličkované šroubové pružiny SNCF 1 KAT

Předmětem tohoto zadání bylo stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí vzorku odebraného z kuličkované šroubové pružiny SNCF 1 KAT. Vzorek byl okuličkován a odměčknut na blok (závit na závit). Vnější strana byla kuličkována s intenzitou *Almen* $A = 0,54$, vnitřní při $A = 0,43$.

Tenzometrická měření byla provedena pomocí metody *jedné expozice bez referenční látky* s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii kombinované s postupným elektrolytickým odleptáváním (viz. kap. 3.1.1). Byla analyzována tři místa, a to na vnitřním (1), vnějším (2) a spodním (3) povrchu, vždy ve směru kolmém k vnitřnímu vláknu pružiny (obr. 7).



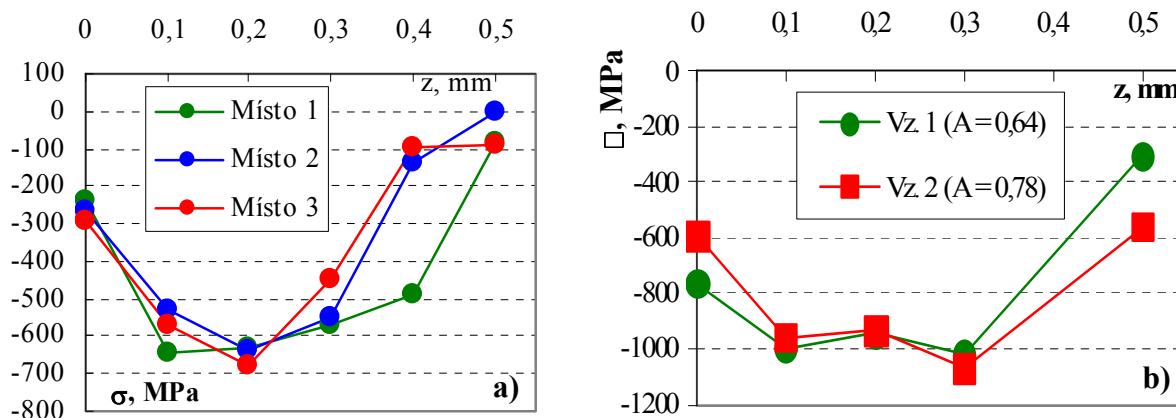
Obr. 7 Schéma umístění měřených míst na zkoumaném vzorku.

3.2.1 Výsledky měření

Zbytková napětí σ [MPa] stanovená ve místech 1, 2 a 3 ve směru kolmém k vnitřnímu vláknu pružiny ve vzdálenostech $z = 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$ a $0,5$ mm od povrchu jsou znázorněna na obr. 8 (a).

3.2.2 Hlavní závěry

- Průběhy zbytkových napětí zjištěných na všech analyzovaných vzorcích jsou kvalitativně i kvantitativně shodné.
- Největší zbytková tlaková napětí (-647 Mpa, -631 Mpa, -639 Mpa, -678 Mpa), stanovená v hloubce $0,1 - 0,2$ mm pod povrchem zkoumaných míst na analyzovaném vzorku, jsou vzhledem k uvedené experimentální chybě identická.
- Aplikovaný způsob kuličkování vede ke vzniku značných tlakových napětí; zbytkové tlaky naměřeny v hloubce $0,3$ mm pod povrchem jsou pro všechna místa větší než 450 Mpa.
- Stanovisko k odlišnosti zbytkového napětí v hloubce $0,4$ mm zjištěného v místě 1 oproti hodnotám v oblastech 2 a 3 je možné vyslovit na základě provedení statisticky podrobnější tenzometrické analýzy.



Obr. 8 Závislosti $\sigma(z)$ zkoumaných vzorků šroubová pružiny SNCF 1 KAT (kap 3.2),

3.3 Rtg měření průběhu zbytkových napětí v povrchových vrstvách kuličkováných parabolických pružin pro Fiat Ducato

Vzorky byly odebrány z kuličkované parabolické pružiny (Fiat Ducato). První list (vz. 1) byl kuličkován s intenzitou *Almen* $A = 0,64$, druhý (vz. 2) při $A = 0,78$. Zadavatelem bylo zjištěno, že tyto pružiny překračují požadovanou minimální životnost $100\,000$ kmitů.

Tenzometrická analýza byla provedena v podélném směru přibližně uprostřed na tahové straně listu. I v tomto případě byla použita metoda *jedné expozice bez referenční látky* s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii kombinovaná s postupným elektrolytickým odleptáváním (viz. kap. 3.1.1).

3.3.1 Výsledky měření

Zbytková napětí σ [MPa] stanovená ve středu vzorků na tahové straně pružiny v podélném směru ve vzdálenostech $z = 0, 0,1, 0,2, 0,3$ a $0,5$ mm od povrchu jsou znázorněny na obr. 8 (vpravo).

3.3.2 Hlavní závěry

- Průběhy zbytkových napětí zjištěných na dvou analyzovaných vzorcích jsou kvalitativně shodné.
- Při větší intenzitě kuličkování vzorku 2 ($A = 0,78$) pravděpodobně dochází k větší plastické deformaci, která se projevuje napětovou relaxací, a tudíž vede k nižší hodnotě povrchových tlaků než v případě vzorku 1 ($A = 0,64$).
- Největší zbytková tlaková napětí (-1020 MPa, resp. -1067 MPa) byla stanovena v hloubce 0, 30 mm pod povrchem zkoumaných vzorků 1 ($A = 0,64$), resp. 2 ($A = 0,78$).
- Stanovisko k průběhu zbytkových napětí v intervalu hloubek 0,1 – 0,3 mm kvalitativně shodného u obou vzorků je možné vyslovit na základě provedení detailnější tenzometrické analýze a bližší znalosti průběhu kuličkování.
- Aplikované způsoby kuličkování vedou ke vzniku značných tlakových napětí i v největší hloubce pod povrchem (0,5 mm), v níž byla zbytková napětí měřena. Větší intenzita kuličkování vede k vyšší hodnotě zbytkových tlaků.

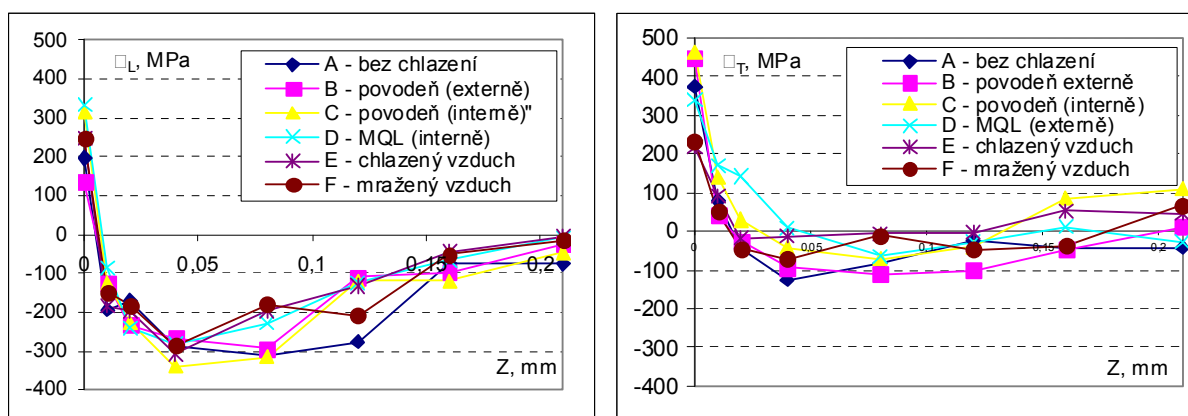
3.4 Vliv různých řezných prostředí na distribuci zbytkových napětí po čelním frézování

Předmětem těchto difrakčních experimentů bylo stanovení vlivu šesti rozdílných řezných prostředí na hloubkové profily zbytkových napětí v povrchových vrstvách vzorků z oceli 12050.9 (tvrdost cca 198 HB). Vzorky byly frézovány slinutým karbidem (stopková fréza s VBD $\varnothing 20$ mm) za stejných podmínek: $v_c = 120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0.15$ na zub, $a_p = 2$ mm, $a_e = 16$ mm kromě chlazení: vzorek A byl obroben na sucho, B intenzivně chlazen emulzí, C – intenzivně chlazen emulzí středem nástroje, D s mazáním místa řezu olejem, E – chlazení chladným vzduchem ($+4$ °C), F byl chlazen mraženým vzduchem (-8 °C).

Tenzometrická analýza byla provedena jak ve směru rovnoběžném se směrem pracovního posuvu nástroje (σ_L) tak i ve směru kolmém na směr posuvu nástroje (σ_T). V tomto případě byla také užita metoda *jedné expozice bez referenční látky* s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii (viz. kap. 3.1.1). Elektrolytické leštění, bylo realizováno na leštičce zn. *LectroPol-5* firmy *Struers* elektrolytem A2 dodávaným výrobcem přístroje.

3.4.1 Výsledky měření

Výsledky měření gradientů zbytkových napětí po použití jednotlivých řezných prostředích jsou znázorněny na obr. 9



Obr. 9 Makroskopická zbytková napětí (σ_L , resp. σ_T) ve směru pracovního posuvu, resp. kolmo k němu

3.4.2 Hlavní závěry

- Profily zbytkového napětí pro hloubky $z > 0.010$ mm jsou analogické pro všechny zkoumané vzorky a neliší se podstatně s chladicími podmínkami.

- Stav zbytkového napětí v hloubkách $z > 0.010$ mm je anizotropní a $\sigma_L < \sigma_T$, což je pravděpodobně následek řezné dráhy nástroje.
- U všech vzorků byly na povrchu naměřeny tahové hodnoty zbytkového napětí. U vzorků A, B a C je zbytkové napětí na povrchu anizotropní ($\sigma_L < \sigma_T$), zatímco u vzorků D, E a F chladičí podmínky (olejová mlha a stlačený chlazený vzduch) vedly k izotropnímu zbytkovému napětí ($\sigma_L \approx \sigma_T$). Navíc povrchové tahové hodnoty vzorků E a F byly celkově nižší.

3.5 Vliv různých řezných prostředí na distribuci zbytkových napětí po čelním frézování

Následující difrakční experimenty byly provedeny za účelem ověření zavedení nové technologie, která vedla ke snížení nákladů výroby leteckého difuzoru z Ni slitiny Inconel 718, který se do té doby vyráběl pomocí konvenční technologie frézování. Tato technologie tvořila podstatnou část nákladů z celkové výroby, proto zde vzniká potřeba inovovat část výroby, kde se frézování používalo. Klasická technologie by mohla být postupně nahrazena nekonvenční technologií EDM.

3.5.1 Použitá tenzometrická metoda - “ $\sin^2\psi$ ” [3]

Měření bylo prováděno na ω -goniometru *Siemens* se zářením rentgenky s chromovou anodou. Byla analyzována difrakční linie {220} Ni. Hodnoty mřížkových deformací byly interpretovány napětím za předpokladu dvojsového stavu zbytkové napjatosti z experimentálně stanovených závislostí difrakčního úhlu $2\theta(\sin^2\psi)$, kde ψ je úhel mezi povrchem vzorku a difrakujícími atomovými mřížkovými rovinami. Závislosti $2\theta^{220}(\sin^2\psi)$ byly měřeny ve dvou azimutech σ_T , σ_L . Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ”.

3.5.2 Výsledky měření

Hodnoty „povrchových“ rentgenografických měření získaných pomocí metody “ $\sin^2\psi$ ” jsou znázorněny v tabulce č. 1. Dále byl u všech zkoumaných vzorků stanoven mřížkový parametr. Měření mřížkového parametru bylo provedeno na goniometru *Siemens* se zářením rentgenky s kobaltovou anodou.

Tab. 1 Makroskopická zbytková napětí σ_T , σ_L a hodnota mřížkového parametru a_e [nm] z linie {220} stanovené rentgenograficky (střední hodnoty z vrstvy o tloušťce cca 3 μ m) na fázi Ni.

Zkoumaná technologie	σ_T , MPa	σ_L , MPa	a_e [nm]
EDM grafitová elektroda -dokončování	+483 \pm 64	+433 \pm 47	0,35973
EDM Cu elektroda -dokončování	0 \pm 15	-1 \pm 62	0,36034
EDM grafitová elektroda -hrubování	+388 \pm 59	+292 \pm 64	0,35936
EDM Cu elektroda -hrubování	+217 \pm 34	+321 \pm 77	0,35845
Čelní frézování - sousledné	-798 \pm 57	-343 \pm 24	0,36167
Čelní frézování - nesousledné	-546 \pm 47	-405 \pm 67	0,36170

3.5.3 Hlavní závěry

- Na všech analyzovaných řezných plochách opracovaných elektroerozivním obráběním (EDM) byl rtg metodou identifikován dvojsový izotropní stav zbytkové makroskopické napjatosti (viz. tab. 1), tj. $\sigma_L \approx \sigma_T$.
- Značně vyšší hodnoty tahových napětí u EDM v případech dokončování grafitovou elektrodou a hrubování měděnou elektrodou odpovídají vyššímu tepelnému zatížení při

obrábění vzorků. Je to důsledkem rozdělení energie ve výbojovém kanálu – vyšších počátečních proudů na elektrodě.

- Povrchy frézovaných vzorků vykazují značně anizotropní stav zbytkové napjatosti způsobený charakterem mechanické interakce nástroje s materiálem.
- Výsledky stanovení mřížkových parametrů povrchových vrstev zkoumaných vzorků uvedených v tab. 1 ukazují, že elektroerozivní hloubení vede ve všech případech k hodnotám nižším než frézování. To je zřejmě způsobeno difúzí atomů elektrody (grafit, měď) do povrchových vrstev obráběného vzorku.

4. Závěry

Hlavním záměrem tohoto příspěvku je uvedení příkladů aplikací rtg difrakční analýzy při studiu zbytkových napětí vznikajících v důsledku povrchového opracování (válečkování, broušení, balotínování, frézování a EDM) strojních komponent (sedla lokomotivních náprav, šroubové a parabolické pružiny, letecký difuzor) z různých druhů ocelí a Ni slitiny.

Rtg difrakce v kombinaci s elektrolytickým leštěním (bezsilový způsob odstranění materiálu) je vhodná převážně ke studiu gradientů tenkých povrchových vrstev, v tomto případě vniklých po technologických mechanických (válečkování, broušení, balotínování, frézování) a tepelných (EDM) „dokončovacích“ operací.

Závěrem je také nutné dodat, že rtg difrakční techniky nejsou omezené do takové míry tvarem a mechanickými vlastnostmi (např. tvrdost) strojních komponent jako je tomu u jiných tenzometrických metod. Navíc mohou poskytovat informace o zastoupení jednotlivých fází a textuře – přednostní orientaci zrn (vznikající např. při technologii válcování a protlačování) na analyzované řezné ploše.

Poděkování

Tento výzkum byl podpořen projekty GAČR 106/07/0805 a MSM 6840770021.

Literatura

- [1] KRAUS, I., GANEV, N.: Difrakční analýza mechanických napětí. Skriptum ČVUT, Vydavatelství ČVUT. Praha 1995.
- [2] Neckář F., Kvasnička I.: Vybrané statě z úběru materiálu, Skriptum FSI ČVUT, Vydavatelství ČVUT, Praha 1991.
- [3] KRAUS, I., GANEV, N.: Technické aplikace difrakční analýzy, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004.

