

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2005**

RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF SURFACE LAYERS OF SUPERALLOY INCONEL 718 AFTER ELECTRO DISCHARGE MACHINING (EDM)

STUDIUM ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI POVRCHOVÝCH VRSTEV VYSOKOPEVNOSTNÍ SLITINY INCONEL 718 PO ELEKTROEROZIVNÍM OBRÁBĚNÍ

Kamil Kolařík¹, Nikolaj Ganev¹, Jaroslav Barcal²

The topic of this paper is a comparison of residual stress states in the surface layers of nickel superalloy Inconel 718 which were examined using X-ray diffraction analysis (XRA) and electric etching method. Two parameters of the surface layer integrity were studied: polished section for determination of the affected layers of cutting area and phase changes, and surface roughness (Ra) obtained after each method of machining. The measurement was carried out on samples machined by EDM in following modes: finishing using graphite and copper electrodes leading to requested surface of high quality i.e. $Ra \approx 0,55 \mu m$, and stocking using graphite and copper electrodes. EDM was compared to classical milling technology both down-cut and up-cut.

Considering the results of both experimental methods of residual stress analysis, it was found out that the majority of EDM treated surfaces shows isotropic biaxial stress state, i.e. $\sigma_L \approx \sigma_T$, while the samples subjected to milling show anisotropic stress state due to the character of mechanical interaction between the tool and the material.

Keywords

Macroscopic residual stress, EDM - electro discharge machining, X-ray diffraction, Inconel 718

Klíčová slova

Makroskopické zbytkové napětí, EDM – elektroerozivní obrábění, rentgenová difrakce, Inconel 718

¹ Ing. Kamil Kolařík: Katedra inženýrství pevných látek, FJFI ČVUT v Praze, Trojanová 13, 120 00 Praha 2, tel. +420-2-24358624, e-mail: kamil.kolarik@email.cz

¹ Doc. Ing. Nikolaj Ganev, CSc.: Katedra inženýrství pevných látek, FJFI ČVUT v Praze, Trojanová 13, 120 00 Praha 2, tel. +420-2-24358604, e-mail: ganev@troja.fjfi.cvut.cz

² Ing. Jaroslav Barcal, CSc.: Ústav stojírenské technologie, FSI ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6, tel.: +420-22435-2601; e-mail: Jaroslav.Barcal@fs.cvut.cz

1. Zbytková napětí po nekonvenčních metodách obrábění

Rozvoj techniky je doprovázen stále rostoucími nároky na konstrukci komponent, a to zejména v oblastech dopravní techniky (automobilový a letecký průmysl) a jaderné energetiky. Tento rozvojový trend vede ke zvyšování podílu těžkoobrobitelných materiálů (žárovzdorné, žárovevné, vysokopevnostní materiály) u kterých je mnohdy jediným možným způsobem progresivní výroby uplatnění nekonvenčních metod obrábění. U těchto metod není obrobitelnost materiálu limitována mechanickými vlastnostmi (např. tvrdost nebo pevnost), ale je vázána především na fyzikální vlastnosti, jako je tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost a podobně.

Tyto progresivní metody výroby zahrnují oblast tvorby co nejpřesnějšího tvaru polotovaru (přesné lití, tvářením atd.) a následné nekonvenční způsoby obrábění finálního povrchu součástí. K nejčastějším aplikacím náleží elektroerozivní obrábění (EDM – electro discharge machining), obrábění pomocí laserů (LBM – laser beam machining), elektrochemické obrábění (ECM – electro chemical machining) a k těmto progresivním metodám tvorby konečného povrchu dnes jednoznačně náleží obrábění vysokými řeznými rychlostmi (HSC – high speed cutting). Tyto metody úběru materiálu se od obvyklých postupů odlišují zcela rozdílnými fyzikálními principy úběru materiálu (EDM, LBM, ECM) nebo velkými rychlostmi přetvoření povrchu (HSC) a vyznačují se odlišnými gradienty zejména teplotních a napěťových polí v oblasti tvorby nového povrchu.[1]

Z obsáhlých komplexů charakteristik se obvykle při optimalizaci výběru metody tvorby konečného povrchu posuzují tyto faktory:

- vliv obráběného materiálu na charakter vzniku nového povrchu a jeho mikrogeometrii,
- vliv pracovních podmínek, např. u EDM energie výboje, čas výboje, materiál nástrojové elektrody a dielektrikum, na mikrogeometrii a vlastnosti povrchové vrstvy,
- vliv mechanismu vzniku nového povrchu (poměr efektu plastické deformace a řízeného odtavení) na integritu povrchu,
- strukturní změny v povrchové vrstvě jako důsledku plastické deformace či teploty,
- velikost a charakter zbytkových napětí v povrchové vrstvě a tím i charakter a rozsah případných vad (mikrotrhliny),
- vliv mikrogeometrie a charakteru povrchu na další funkční vlastnosti povrchu, např. odolnost proti opotřebení, třecí vlastnosti, odolnost proti korozi apod.

Protože se jakákoliv interakce s materiálem realizuje přes jeho volný povrch, může stav povrchových vrstev součástí ovlivnit rozhodujícím způsobem užitkové vlastnosti celého objemu. Jedním z nejvýznamnějších faktorů, který musí být v této souvislosti uvažován, je distribuce zbytkových napětí doprovázející každý technologický proces, při němž dochází k plastické deformaci.

Pro analýzu stavu napjatosti existuje dnes velký počet experimentálních postupů založených na využití vztahu mezi napětím a určitou charakteristikou (fyzikální veličinou) zkoumaného objektu, vždy se tedy jedná o nepřímá měření, která nestanovují napětí, ale veličiny napětím ovlivnitelné. Podle toho do jaké míry se přitom vyžaduje zásah do celistvosti studovaného vzorku, lze tyto metody označit jako:

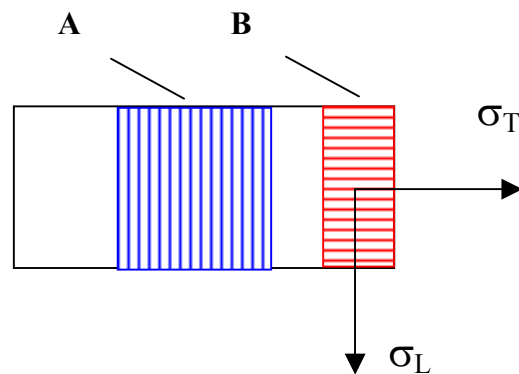
- **destruktivní**, které vyžadují obvykle vytvoření vzorku definovaného tvaru ze zkoumaného výrobku a pro následné zjištění průběhu napjatosti postupné odstraňování vrstev materiálu tak, aby bylo možno měřit vzniklé makrodeformace.
- **semidestruktivní** – vycházejí z měření deformací vyvolaných přerozdělením napětí v oblasti povrchu, do něhož byl vrtán otvor. Deformace snímané obvykle z tenzometrických růžic jsou registrovány jako změny elektrického odporu.

- **nedestruktivní metody**, při kterých nedojde k poškození zkoumaného materiálu. Přední místo mezi těmito metodami patří bezesporu difrakční tenzometrické analýze. Na rozdíl od ostatních uvedených metod se nedestruktivní deformační analýza omezuje pouze na vrstvu povrchu o tloušťce 5 – 10 μm , tj. na efektivní hloubku vnikání použitého záření.

Přestože byl do dnešní doby u nás i v zahraničí publikován velký počet prací věnovaných se problematice měření zbytkových napětí po procesu obrábění, systematický výzkum vzniku povrchových napětí pro různé mechanismy tvorby konečného povrchu postupy EDM (reprezentant nekonvenčních metod obrábění) a frézování („klasická“ strojírenská technologie), který by zohlednil též různé experimentální metody měření (destruktivní a nedestruktivní), chybí.

2. Zkoumané vzorky a použité technologie

Zkušební vzorky (obr.1) byly vyrobeny z vysokopevnostní slitiny INCONEL 718 (C 0,08%, Mg 0,35%, P 0,015%, S 0,015%, Cr 17 - 21%, Ni 50 - 55%, Mo 2,8 – 3,3%, Nb 4,75 -5,5%, Ti 0,65 – 1,15%, Al 0,2 – 0,8%, Co 1%, Ta 0,05%, B 0,06%, Cu 0,3%, Fe 19%). Pevnostní charakteristiky INCONELU 718 jsou uvedeny v tab.6.



Obr. 1 Schéma analyzovaného povrchu vzorků s vyznačenými směry měření zbytkových napětí. Metodou postupného odleptávání byla analyzována oblast A, rtg. difrakční měření byla aplikována na části povrchu B.

Tenzometrická analýza byla provedena pro dva způsoby obrábění:

Elektroerozivní hloubení (EDM)

Tato technologie byla realizována na vzorcích o rozměrech 30×30×7 mm³ pomocí zařízení AGIE – IMPAKT 3 s automatickou optimalizací pracovních podmínek pro nastavené vstupní parametry odpovídající požadované drsnosti obrobené plochy (viz. tab.1 – 4). Byly použity dva režimy obrábění:

a) *obrábění na čisto* (cílem dokončovacího cyklu bylo dosažení kvalitního povrchu, $R_a \approx 0,55 \mu\text{m}$), bylo provedeno grafitovou a měděnou elektrodou (označení vzorků: vzorek 1 – EDM Gr - D, vzorek 2 – EDM Cu - D),

b) *hrubování* (pracovní cyklus je charakterizován vyššími hodnotami doby výboje, napětím naprázdno a vybíjecího proudu). bylo provedeno grafitovou a měděnou elektrodou (označení vzorků: vzorek 3 – EDM Gr-H, vzorek 4 – EDM Cu - D).

Tab. 1. Pracovní podmínky při dokončování grafitovou elektrodou

Impuls	I [A]	Čas eroze
		Vzorek č.1 (EDM Gr-D)
Výška hloubené vrstvy		0,4 mm
Ra [μm] (dle stroje)		0,79
1	39	1 min 20s
2	29	30s
3	21	36s
4	17	40s
5	13	1 min 2s
6	10	1 min 12s
7	8	3 min 6s
8	6,2	3 min 22s
9	4,4	4 min 4s
10	3,2	4 min 40s
11	2,4	4 min 40s
12	1,8	5 min 12s
13	1,2	2 min 32s
Celková doba eroze		32 min 56s

Tab. 2. Pracovní podmínky při dokončování Cu elektrodou

Impuls	I [A]	Čas eroze
		Vzorek č. 2 (EDM Cu-D)
Výška hloubené vrstvy		0,5 mm
Ra [μm] (dle stroje)		0,56
1	17	12 min 16s
2	13	2 min 58s
3	10	4 min
4	8	3 min 8s
5	6,2	6 min 12s
6	4,4	4 min 58s
7	3,2	12 min 22s
8	2,4	22 min 34s
9	1,8	56 min 52a
10	1,2	1h 12min 30s
Celková doba eroze		3h 10min 50s

Tab. 3. Pracovní podmínky při hrubování grafitovou elektrodou

Impuls	I [A]	Čas eroze
		Vzorek č. 3 (EDM Cu-H)
Výška hloubené vrstvy		0,3 mm
Ra [μm] (dle stroje)		12,61
1	39	1 min 50s

Tab. 3. Pracovní podmínky při hrubování Cu elektrodou

Impuls	I [A]	Čas eroze
		Vzorek č. 4 (EDM Cu-H)
Výška hloubené vrstvy		0,5 mm
Ra [μm] (dle stroje)		20
1	52	3 min 19s

Tab. 5. Parametry nástroje $\varnothing 8$.

Délka řezné části l_2 [mm]	19
Celková délka l [mm]	63
Počet zubů z	4
Úhel čela [°]	8
Úhel šroubovice [°]	30
Materiál	MG 10
Povlak	TiAlN

Tab. 6. Pevnostní charakteristiky INCONELU 718

Tloušťka materiálu	do 4,75 mm	nad 4,75 mm
Pevnost	965 MPa	1034 MPa
Mez Kluzu	555 MPa	720 MPa
Tažnost	30%	

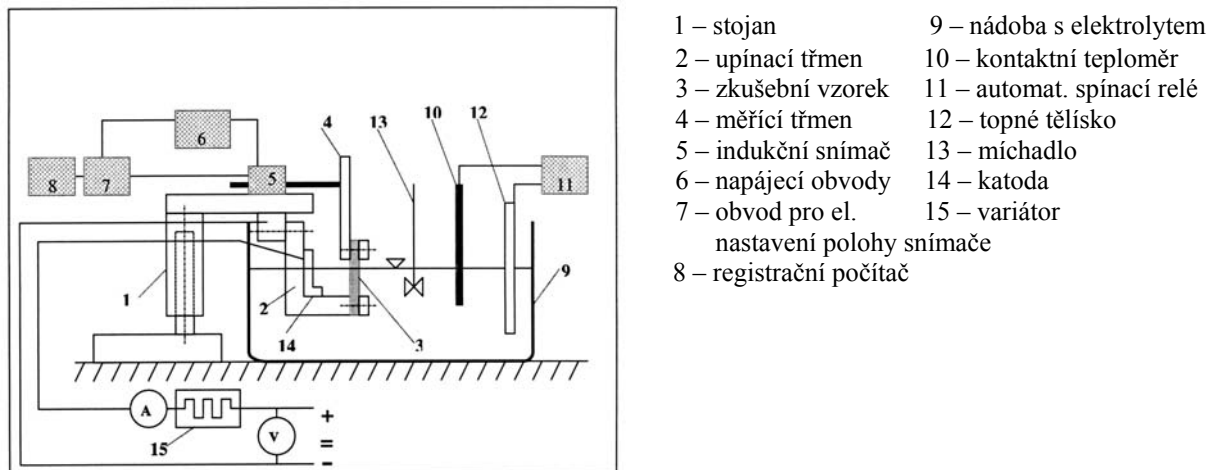
Frézování

Frézování bylo provedeno na stroji *HERMLE C 800* čelní válcovou frézou ($\varnothing 8$) se slinutých karbidů (tab.5). Při pracovních podmínkách: hloubka řezu $a_p = 0,35$ mm, šířka frézované plochy $a_e = 0,35$ mm, otáčky vřetena $n = 1600$ 1/min, posuv 180 mm/min. Pracovní podmínky byly zvoleny stejně pro dva druhy frézování: sousledné (vzorek 5 – FR-S), nesousledné (vzorek 6 – FR-N). Vzorky měly rozměry $30 \times 10 \times 7$ mm³.

3. Použité analytické metody

3.1 Destruktivní metoda postupného odebrání vrstev

Princip mechanické metody zjišťování průběhu zbytkových napětí vyvinuté v laboratořích katedry obrábění FS ČVUT (obr. 2) spočívá v kontinuálním měření deformace součásti (vzorku) při elektrolytickém odleptávání povrchových vrstev materiálu z analyzované plochy. Při odstraňování materiálu dochází k porušování rovnováhy vnitřních sil, které se projeví deformací vzorku. Smysl a velikost deformace jsou úměrné rozložení zbytkových napětí v odleptané vrstvě [2].



Obr. 2 Schéma zařízení pro měření zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání

3.2 Rentgenografická tenzometrická metoda “ $\sin^2\psi$ ”

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 (viz obr.1). K výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5.76 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹, $-s_1 = 25 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ”.

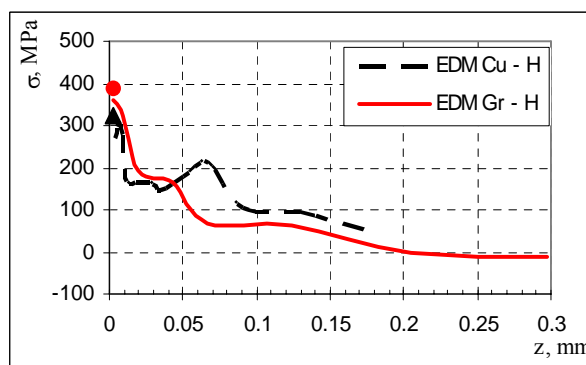
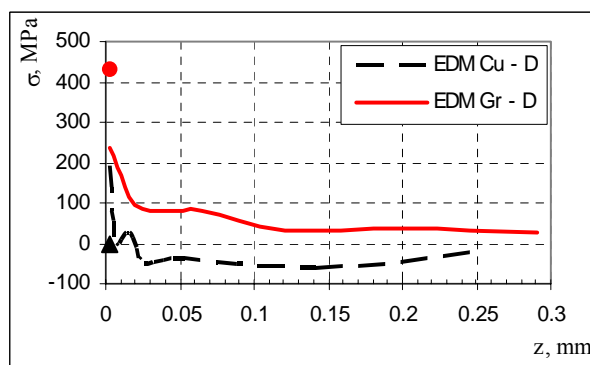
Veličina \bar{W} je průměrnou integrální šířkou difrakční linie {220} Ni z měření σ_L, σ_T při $\psi = 0^\circ$ a reprezentuje míru plastické deformace analyzovaných vzorků. Experimentální chyba jejího stanovení nepřevyšuje $0,05^\circ 2\theta$. [3].

4. Výsledky měření a jejich diskuse

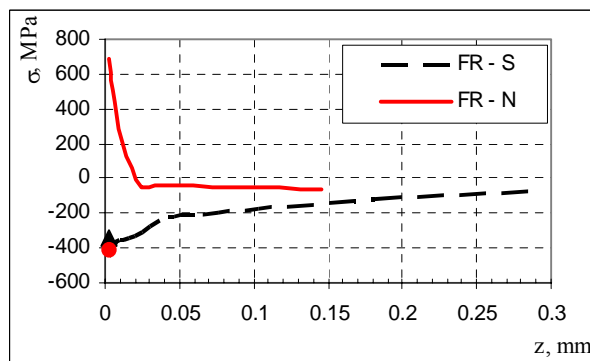
Hloubkové profily zbytkových makroskopických napětí získaných mechanickou destruktivní metodou jsou znázorněny na obr. 3 – 4, na nichž jsou rovněž vyneseny hodnoty „povrchových“ rentgenografických měření.

Tab. 7 Makroskopická zbytková napětí σ_T , σ_L a střední šířka difrakční linie $\{220\}$ stanovené rentgenograficky (střední hodnoty z vrstvy o tloušťce cca $3\mu\text{m}$) na fázi Ni a „povrchové“ hodnoty zbytkových napětí σ zjištěných mechanickou metodou.

Vzorek	Metoda rtg. difrakce			Mechanická metoda
	σ_T , MPa	σ_L , MPa	\bar{W} , °2 θ	σ , MPa
EDM Gr-D	+483 ± 64	+433 ± 47	1,306	+234
EDM Cu-D	0 ± 15	-1 ± 62	1,151	+195
EDM Gr-H	+388 ± 59	+292 ± 64	1,690	+362
EDM Cu-H	+217 ± 34	+321 ± 77	2,525	+268
FR-S	-798 ± 57	-343 ± 24	2,176	-452
FR-N	-546 ± 47	-405 ± 67	2,281	+686



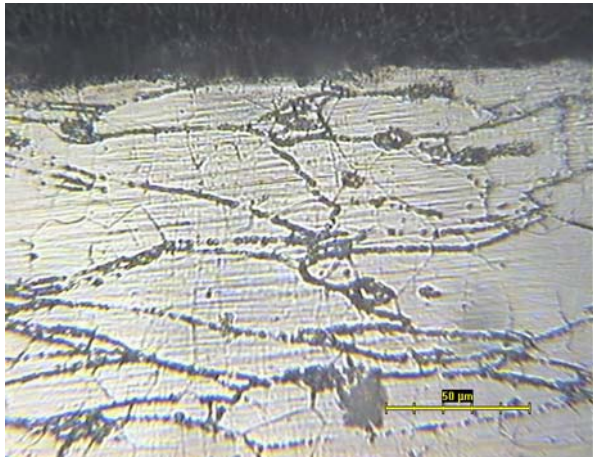
Obr. 3 Průběhy zbytkových napětí v povrchových vrstvách vzorků hloubených elektroerozivně měděnou a grafitovou elektrodou, na čisto – dokončování (a) a hrubováním (b). Diskrétními hodnotami v levé části obrázků jsou znázorněny výsledky získané rentgenograficky z vrstvy odpovídající hloubce vnikání použitého záření



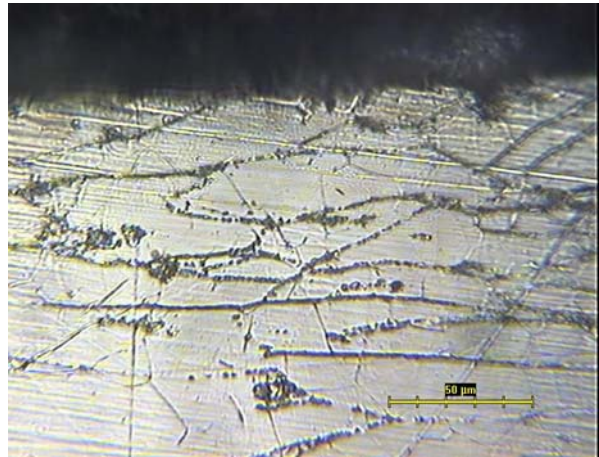
Tab. 8 Naměřené hodnoty drsnosti R_a

Vzorek	Označení vzorku	R_a [μm]
1.	EDM Gr-D	0,94
2.	EDM Cu-D	0,58
3.	EDM Gr-H	15,9
4.	EDM Cu-H	16,4
5.	FR-S	0,47
6.	FR-N	0,84

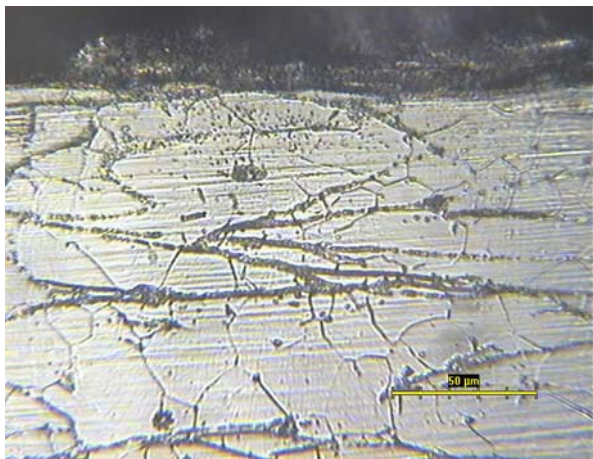
Obr. 4 Průběhy zbytkových napětí v povrchových vrstvách frézovaných vzorků. Diskrétními hodnotami v levé části obrázku jsou znázorněny výsledky získané rentgenograficky z vrstvy o tloušťce rovné hloubce vnikání použitého záření.



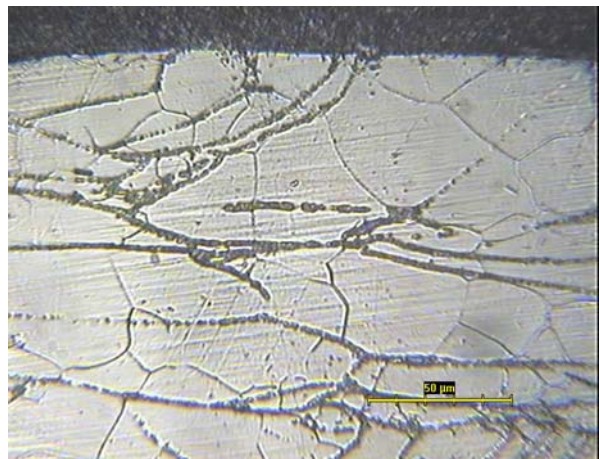
Vzorek EDM Gr-D



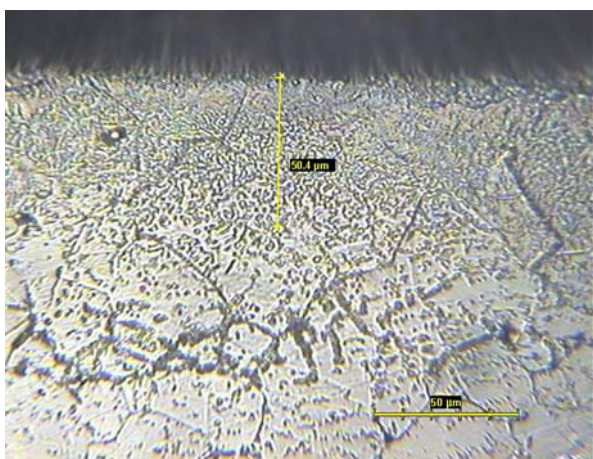
Vzorek EDM Cu-D



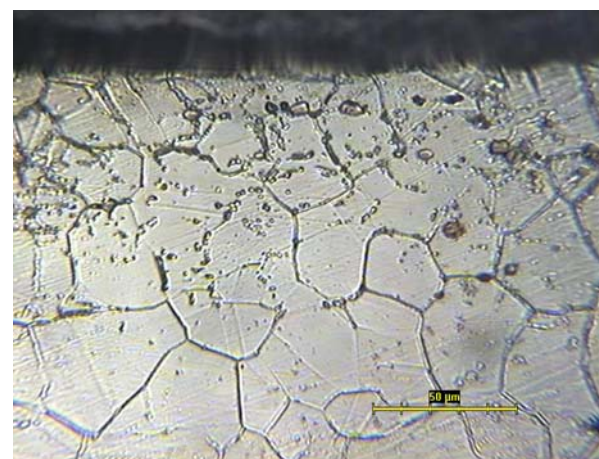
Vzorek EDM Gr-H



Vzorek EDM Cu-H



Vzorek FR-S



Vzorek FR-N

Obr. 6 Mikrostruktura bočních metalografických výbrusů zkoumaných vzorků pořízených na optickém mikroskopu Carl Zeiss Jenna s CCD kamerou JAI při zvětšení 600x

Při porovnávání výsledků obou experimentálních metod tenzometrické analýzy je třeba brát na zřetel skutečnost, že obě metody měření zbytkové napjatosti jsou založeny na zcela odlišných principech, a nejsou tedy navzájem zaměnitelné. Jestliže destruktivní metoda postupného odnímaní vrstev zjišťuje pouze zbytková pnutí I. druhu a podává informaci o průběhu v celém průřezu materiálu, pak metoda rentgenové difrakce nám podává informace o stavu povrchové vrstvy max. do hloubky 3 až 4 μm a na rozdíl od metody destruktivní rozlišuje i zbytková napětí II. a III. druhu. Zatím co mechanickou destruktivní metodu lze použít bez ohledu na strukturní složení kovu, je aplikace rentgenové metody výrazně limitována v případě texturovaných polykrystalických materiálů nebo materiálů s krystalitami o rozměrech větších než 10 μm , kdy se difrakční linie rozpadají na diskrétní stopy.

Na všech zkoumaných vzorcích byla pomocí dotykového profiloměru *TALIFUS 6 TAYSURF HOBSON* změřena drsnost povrchu R_a (viz. tab. 8). Dále byly zhotoveny boční metalografické výbrusy pro zjištění hloubky ovlivněné vrstvy řezných ploch získaných technologiemi EDM a frézování. Fotografie z optického mikroskopu *CARL ZEISS JENA* s CCD kamerou *JAI* při 600X zvětšení jsou na obr. 6.

5. Závěr

1. Na všech analyzovaných řezných plochách opracovaných elektroerozivním obráběním (EDM) byl rtg metodou identifikován dvojosý izotropní stav zbytkové makroskopické napjatosti (viz. tab. 1), tj. $\sigma_L \approx \sigma_T$.
2. 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 (viz. tab. 1 – 4).
3. Povrchy frézovaných vzorků vykazují značně anizotropní stav zbytkové napjatosti způsobený charakterem mechanické interakce nástroje s materiálem.
4. Na bočních metalografických výbrusech pořízených na vzorcích obrobených technologií EDM (viz. obr. 6) není zřejmá přítomnost podpovrchové tepelně ovlivněné oblasti. Zjištěná struktura odpovídá struktuře neobrobeného materiálu.
5. Mikrofotografie frézovaných vzorků 5 a 6 potvrzují účinek plastické deformace povrchových vrstev vzniklé mechanickou interakcí materiálu s nástrojem, která je v případě sousledného frézování výraznější a sahá do hloubky cca 50 μm .

6. Literatura

- [1] Barcal J.: Nekonvenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Vydavatelství ČVUT, Praha 1989
- [2] Neckář F., Kvasnička I.: Vybrané statě z úběru materiálu, Skriptum FSI ČVUT, Vydavatelství ČVUT, Praha 1991
- [3] Kraus I., Ganev N.: Difrakční analýza mechanických napětí. Skriptum ČVUT, Vydavatelství ČVUT. Praha 1995.
- [4] Sedláček T.: Obrábění difuzoru, Diplomová práce, FSI ČVUT, Praha 2004

Tato práce je dílčím výsledkem řešení projektu VZ MSM 6840770021