

STUDIUM ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI NÁSTROJOVÝCH VYSOKOLEGOVANÝCH OCELÍ PO ELEKTROEROZIVNÍM OBRÁBĚNÍ

STUDY OF RESIDUALS STRESS OF A HIGH – ALLOY TOOL STEELS AFTER ELECTRO DISCHARGE MACHINING

Kamil KOLAŘÍK¹, Nikolaj GANEV¹, Jaroslav BARCAL²

Abstrakt

Predmetom tohto príspevku je štúdium stavu zvyškových napätí a rozloženia mikrotvrdosti v povrchových vrstvách vzoriek spracovaných progresívnou nekonvenčnou technológiou elektroerozivneho obrábania. Experimentálne vzorky boli obrábané s použitím grafitových a elektrolytických medených elektród bežným technologickým postupom konečnej úpravy a hrubovania. Výsledky difrakčnej RTG metódy sú v zhode s predpokladom, že vzorky spracované elektroerozivným obrábaním vykazujú zvyškovú izotropnú biaxiálnu napätosť.

Kľúčové slová: zvyškové napätie, elektroerozivne obrábanie, RTG difrakcia.

Abstract

The objective of this contribution is investigation of residual stress state and distribution of microhardnes in surface layers of samples subjected to progressive unconventional technology electro discharge machining (EDM). Experimental samples were machined using graphite and electrolytic copper electrodes in common technological processes of finishing and stocking. Results of X - ray diffraction technique comply with the assumption that the layers machined by EDM exhibit isotropic biaxial residual stress state

Keywords: residual stress, electro discharge machining (EDM), X-ray diffraction.

ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ A NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Vzhledem k tomu, že se libovolná 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 doprovázejících každý technologický proces, při němž dochází k vzniku nového povrchu.

Zbytková napjatost v povrchových vrstvách řezné plochy je důsledkem kombinovaného účinku mechanických a tepelných příčin. 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 obrobenej plochy vystavena účinku tepla vznikajícího při obrábění. Plasticky deformovaná ohřátá

¹ Ing. Kamil KOLAŘÍK, doc. Ing. Nikolaj GANEV, CSc., KIPL, FJFI ČVUT v Praze, kamil.kolarik@email.cz, ganev@troja.fjfi.cvut.cz

² Ing. Jaroslav BARCAL, CSc., ÚST, FSI ČVUT v Praze, jaroslav.barcal@fs.cvut.cz
Lektoroval: prof. Ing. Marián BURŠÁK, PhD., KNoM, HF, TU v Košiciach, marian.bursak@tuke.sk

povrchová vrstva se snaží při ochlazování 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.

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 zvyšují mez únavy a zlepšují odolnost povrchu obrobku proti opotřeby. Tahová napětí naopak mez únavy snižují a negativně ovlivňují užité vlastnosti funkčních povrchů.

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 aplikovaných v obtížných provozních podmínkách.

Rentgenografický difrakční výzkum zbytkové napjatosti řezné plochy po nekonvenčních technologiích obrábění materiálu dosud nebyl systematicky prováděn. Přitom právě takové "nástroje" obrábění jako je elektroerozivní obrábění (EDM - electro discharge machining) [1] umožňují řešit úlohy na kvalitativně vyšší úrovni než klasické způsoby opracování kovů. K základním přednostem progresivních metod úběru materiálu pomocí elektroeroze (EDM), v oblastech moderní výroby tvarových ploch, dnes jednoznačně patří možnost spolehlivě obrábět elektricky vodivé materiály vysokých pevností a tvrdostí (nad 60 HRC), a to i velmi členitých tvarů jako jsou jemné profily a úzká žebra či tvarové drážky, při izotropní mikrogeometrii povrchu. V kombinaci s obráběním grafitovými elektrodami či třískovým předhrubováním tvaru patří dnes technologie EDM k nejrozšířenějším nekonvenčním metodám výroby tvarových ploch v oblastech nástrojářen. Vysoká přesnost elektroerozivních drátových řezacích strojů spolu s růstem plošného výkonu řezání má dnes zcela nezastupitelnou úlohu v progresivní výrobě tvarových otvorů při výrobě střížných nástrojů a celé řady komponent z vysoce pevnostních materiálů (ozubená kola, lopatky čerpadel a turbín).

Přes značné rozšíření a postupné osvojování EDM, není tato technologie vždy použitelná zejména v případě přísnějších požadavků na kvalitu povrchu a užité vlastnosti výrobku. Znalost charakteru a stavu povrchových vrstev a vyhodnocení změn, které v nich nastávají jako důsledek použití technologie EDM, je proto nezbytnou součástí jejího rozšíření v dalších oblastech průmyslové výroby.

ZMĚNY MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK

Intenzita tepelných, mechanických nebo chemických vlivů doprovázejících obráběcí proces určuje velikost případných změn mechanických vlastností nově vytvořené povrchové vrstvy. Podobně jako jiné parametry jakosti technických povrchů jsou i tyto změny přímým ukazatelem funkčních vlastností součástí, zejména v oblasti tribologie a únavy. Zmíněné charakteristiky povrchové vrstvy se nejčastěji posuzují podle změn tvrdosti. Protože se většinou jedná o změny ve velmi tenkých vrstvách, lze je nejlépe hodnotit podle *průběhu mikrotvrdosti* v závislosti na hloubce pod povrchem. Tento průběh může mít v podstatě tři varianty:

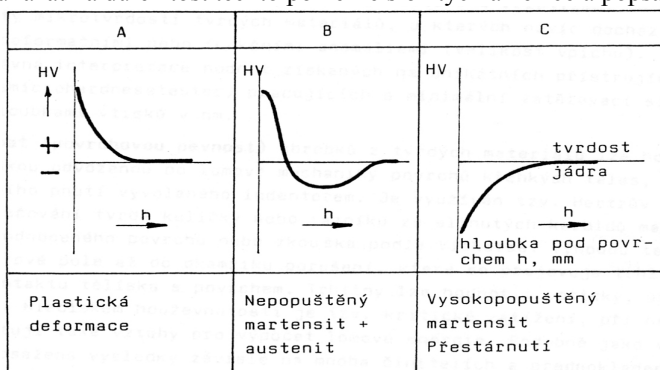
A – zpevnění, B – zpevnění s následným poklesem pod tvrdost jádra (tzv. sekundární zakalení vzniká např. při obrábění laserem atd.), C – odpevnění. Jednotlivé průběhy jsou znázorněny na obr.1.

Procesy zpevnění jsou většinou způsobeny přestavbou poruch krystalické mřížky, kdy roste pevnost a mez kluzu, ale klesá tažnost a rázová houževnatost. Odpevnovací pochody jsou důsledkem tepelných jevů během obrábění.

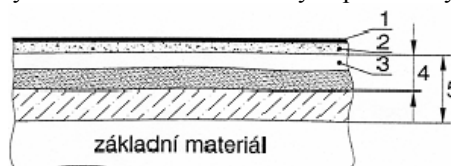
EDM a stav povrchové vrstvy

Dlouhodobé zkušenosti s aplikacemi EDM a studiem povrchové vrstvy obrobku ukazují na specifické změny v povrchu, jejichž obvyklé rozdělení je uvedeno na obr. 2.

Intenzita úběru materiálu při aplikaci EDM hloubení je určena především energií výbojů dodávaných generátorem obráběcího stroje. Mimo tyto prvotní energetické parametry (napětí, proud, doba výboje) rozhoduje o stavu nově vytvořeného povrchu řada dalších podmínek. Mezi důležité patří fyzikální vlastnosti dvojice elektrod nástroj – obrobek a s tím související volba polarity zapojení generátoru výbojů. Jelikož konstrukce a doporučení výrobců elektroerozivních strojů se liší a ve vztahu k stavu konečného povrchu je tato oblast málo publikována, je snahou tohoto příspěvku ukázat na důležitost těchto poměrně složitých a ne zcela popsaných procesů.



Obr.1 Průběhy mikrotvrdosti v ovlivněných povrchových zónách [2]



Obr.2 Ovlivněná vrstva při obrábění oceli technologií EDM [1]

1 - mikrovrstva tvořená chemickými sloučeninami vzniklými difúzí prvků dielektrika, 2 - vrstva obsahující materiál nástrojové elektrody, 3 - tzv. bílá vrstva, silně nauhličená znovu ztuhlá tavenina, jemná struktura charakteru martenzitu, tvrdost 60 HRC, tloušťka od 0,04mm až do několika desetin milimetru v závislosti na energii impulsů, 4 - pásmo tepelného ovlivnění (zakalený a popuštěný základní materiál obrobku), 5 - pásmo plastické deformace vyvolané rázy

ZKOUMANÉ VZORKY A POUŽITÉ TECHNOLOGIE

Zkušební vzorky o rozměrech 30×30×7 mm (obr. 3) byly vyrobeny z nástrojové vysokolegované chromové oceli pro práci za studena ČSN 19436 (C 1,8 - 2,05%, Mn 0,20 - 0,45%, Si 0,20 - 0,45%, P ≤ 0,03%, S ≤ 0,035%, Cr 11,0 - 12,5%, Ni ≤ 0,50%). Polovina vzorků byla ponechána v základním stavu a druhá polovina byla zakalena dle normy ČSN 41 436 [3] na sekundární tvrdost 58 - 60 HRC (ohřev ve vakuové peci na austenizační teplotu 1070°C, zakalení v olejové lázni a dvojitě popuštění za teploty 490°C).

Tenzometrická analýza a studium gradientu mikrotvrdosti bylo provedeno na vzorcích obrobených pomocí elektroerozivního obrábění a to s generátorem pracujícím s nepřímou polaritou (nástroj +/obrobek -). Tato technologie byla realizována na zařízení *WALTER Exeron*

S 204 s impulsním generátorem o výkonu 9 kW a maximálním použitelným pracovním proudem 180 A. Byly použity dva režimy obrábění:

a) *obrábění na čisto* bylo provedeno grafitovou a měděnou elektrodou. Cílem dokončovacího cyklu bylo dosažení povrchu $R_a \approx 1,8 \mu\text{m}$. Pracovní podmínky jsou uvedeny v tabulce 1.

Pracovní podmínky při dokončování grafitovou a Cu elektrodou (nepřímá polarita)

Tabulka 1

Grafitová elektroda, dokončovací podmínky (na čisto)							
Kód generátoru	Max. výboj. proud [A]	Zápalný proud [A]	Zápalné napětí [V]	Doba impulsu [μsec]	Doba pauzy [μsec]	Čas erodování [h:min:sec]	
						Zákl. stav	Kalená
40	5	6	180	100	40	0:07:48	0:05:33
39	2,5	6	180	63	25	0:08:50	0:08:25
38	1,5	6	180	63	25	0:12:50	0:13:30
37	1	6	180	40	16	0:18:45	0:19:56
36	0	6	180	40	16	0:26:58	0:33:53
35	0	5	180	12	6,5	0:36:50	0:46:33
Měděná elektroda, dokončovací podmínky (na čisto)							
Kód generátoru	Max. výboj. proud [A]	Zápalný proud [A]	Zápalné napětí [V]	Doba impulsu [μsec]	Doba pauzy [μsec]	Čas erodování [h:min:sec]	
						Zákl. stav	Kalená
8	1,5	6	180	63	16	0:06:30	0:10:50
7	1	6	180	63	16	0:09:15	0:21:55
6	0	6	180	40	16	0:16:25	0:35:35
5	0	5	180	12	6,5	0:27:50	0:49:30
4	0	4	180	6,5	4	0:51:15	1:12:20

Pracovní podmínky při hrubování grafitovou a měděnou elektrodou (nepřímá polarita)

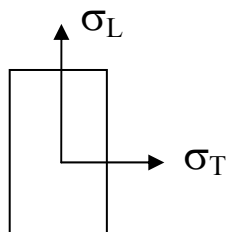
Tabulka 2

Grafitová elektroda, hrubovací podmínky							
Kód generátoru	Max. výboj. proud [A]	Zápalný proud [A]	Zápalné napětí [V]	Doba impulsu [μsec]	Doba pauzy [μsec]	Čas erodování [h:min:sec]	
						Zákl. stav	Kalená
44	12	6	180	160	40	0:05:30	0:03:05
43	10	6	180	160	40	0:08:05	0:05:50
42	7,5	6	180	160	40	0:11:10	0:07:33
41	6,5	6	180	100	40	0:14:25	0:10:40
Měděná elektroda, hrubovací podmínky							
Kód generátoru	Max. výboj. proud [A]	Zápalný proud [A]	Zápalné napětí [V]	Doba impulsu [μsec]	Doba pauzy [μsec]	Čas erodování [h:min:sec]	
						Zákl. stav	Kalená
13	10	6	180	250	40	0:09:30	0:06:15
12	7,5	6	180	200	25	0:10:55	0:08:03
11	6,5	6	180	200	25	0:13:20	0:11:3ě
10	5	5	180	160	25	0:17:10	0:15:35

b) *hrubování* bylo provedeno grafitovou a měděnou elektrodou. Na obráběcím systému byl nastavený kód odpovídající požadované drsnosti dle tabulek $R_a \approx 6,3 \mu\text{m}$. Pracovní cyklus je charakterizován vyššími hodnotami doby výboje, napětím naprázdno a vybíjecího proudu. Pracovní podmínky jsou uvedeny v tabulce 2. Označení obrobených zkušebních vzorků je znázorněno v tabulce 3.

Označení zkušebních vzorků

Tabulka 3



Obr.3 Schéma analyzovaného povrchu vzorků s vyznačenými směry měření zbytkových napětí

Označení vzorků	Materiál	Použitá elektroda režim obrábění
EDM (K) Gr-D	19 436 - kalená	Grafit - dokončování
EDM (K) Gr-H	19 436 - kalená	Grafit - hrubování
EDM (NK) Cu-D	19 436 - kalená	Měď - dokončování
EDM (K) Cu-H	19 436 - kalená	Měď - hrubování
EDM (NK) Gr-D	19 436 - nekalená	Grafit - dokončování
EDM (NK) Gr-H	19 436 - nekalená	Grafit - hrubování
EDM (NK) Cu-D	19 436 - nekalená	Měď - dokončování
EDM (NK) Cu-H	19 436 - nekalená	Měď - hrubování

POUŽITÉ ANALYTICKÉ METODY

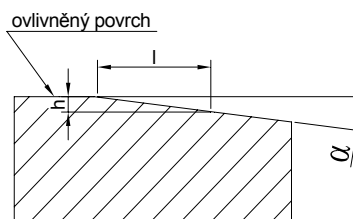
Rentgenografická tenzometrická metoda " $\sin^2\psi$ "

Měření bylo prováděno na ω -goniometru zn. Siemens se zářením rentgenky s chromovou anodou. Byla analyzována difrakční linie $\{211\}$ α -Fe. Hodnoty mřížkových deformací byly interpretovány napětím za předpokladu dvojosého stavu zbytkové napjatosti z experimentálně stanovených závislostí difrakčního úhlu $2\theta(\sin^2\psi)$, kde ψ je úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími atomovými mřížkovými rovinami. Závislosti $2\theta^{211}(\sin^2\psi)$ byly měřeny ve dvou azimutech σ_T a σ_L (viz. obr. 3). K výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5.76 \cdot 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$, $-s_1 = 1.25 \cdot 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$. Experimentální chybu jednotlivých naměřených hodnot představuje směrodatná odchylka výpočtu zbytkových napětí metodou " $\sin^2\psi$ "

Veličina \bar{W} je průměrnou integrální šířkou difrakční linie $\{211\}$ α -Fe z měření σ_L , σ_T při $\psi = 0^\circ$ a reprezentuje míru plastické deformace analyzovaných vzorků. Experimentální chyba jejího stanovení nepřevyšuje $0,05^\circ 2\theta$ [4].

Měření mikrotvrdoti metodou šikmých řezů

Pro měření mikrotvrdoti metodou šikmých řezů, byly nejprve všechny vzorky broušeny pod úhlem $\alpha = 4^\circ$ (viz. obr.4) na elektrochemické brusce WENDT (pracovní podmínky: diamantový kotouč, elektrolyt NaNO_3 , $v_k = 35 \text{ m/s}$, ruční přísuv). Následně bylo provedeno leštění analyzovaných ploch metalografickými papíry s hrubostí 300, 600, 800, 1000 a doleštění metalografickou pastou.



Obr.4 Vzorek připravený pro měření mikrotvrdoti

Měření bylo realizováno na mikrotvrdoměru *SHIMADZU HMV-2* ve Výzkumném centru pro strojírenskou výrobní techniku a technologii ČVUT v Praze. Podmínky měření mikrotvrdosti dle Vickerse (ČSN ISO 6507-2) HV 0,2 byly: zatěžovací síla 1,961 N, doba zátěže 12 s. Měření byla provedena po vzdálenosti $l = 0,2$ mm, hloubka h se počítala dle rovnice $h = l \cdot \tan \alpha$. Měření mikrotvrdoměru bylo vyhodnocováno pomocí softwaru LECO. Pro každý vzorek byly získány 3 řady experimentálních hodnot, z nichž byl spočítán aritmetický průměr. Výsledky průběhů mikrotvrdostí jsou znázorněny na obr.5 – 6.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH DISKUSE

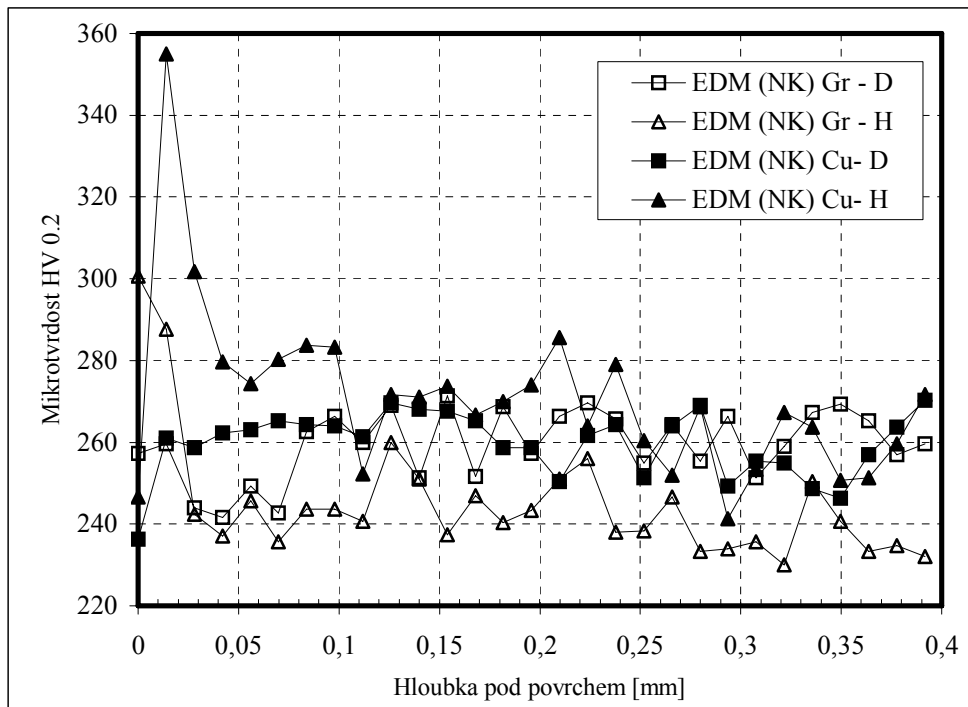
Metoda rentgenové difrakce je obtížně použitelná u materiálů s krystalitami velkých rozměrů ($>10 \mu\text{m}$), kdy se difrakční linie rozpadají. Tento problém se vyskytl u vzorků EDM (K) Gr - H a EDM (K) Cu - H, proto lze považovat zjištěné hodnoty zbytkových napětí u těchto vzorků pouze za orientační. Výsledky měření zbytkové napjatosti jsou uvedeny v tabulce 4.

Dosažené výsledky korespondují se zjištěnými hodnotami mikrotvrdosti v povrchových vrstvách (viz. obr.5 – 6). Tyto zjištěné hodnoty jsou pravděpodobně důsledkem přerozdělení energie ve výbojovém kanálu, což vede také ke strukturálním změnám na řezné ploše. Této skutečnosti bude věnována pozornost v další etapě výzkumu, kde budou provedeny příčné metalografické výbrusy.

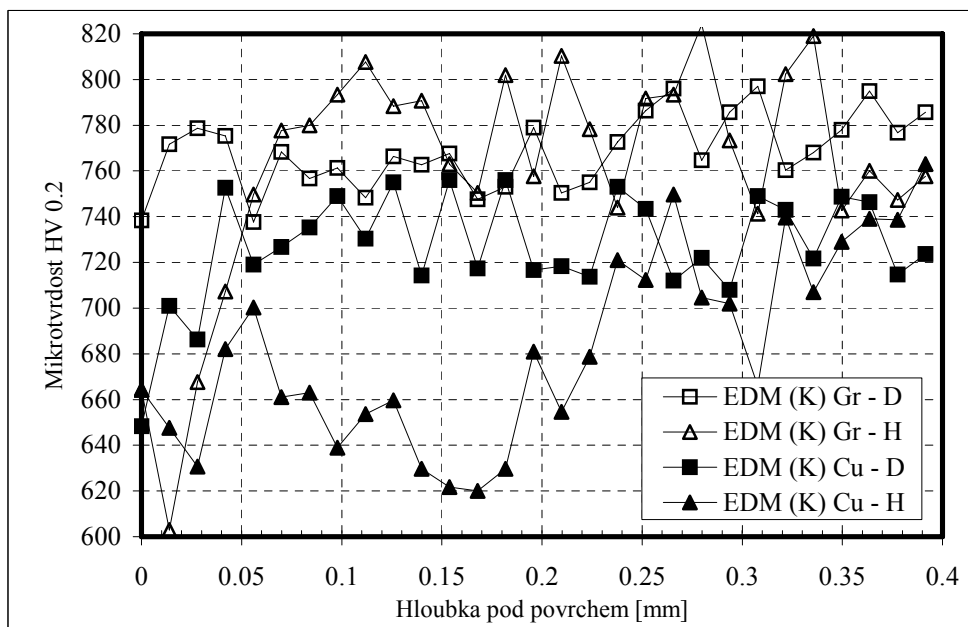
Makroskopická zbytková napětí σ_T a σ_L , střední šířka difrakční linie {221} W stanovená rentgenograficky (střední hodnoty z vrstvy o tloušťce cca 4-5 μm) na fázi α -Fe a hodnoty dosažených drsností povrchů R_a .

Tabulka 4

Vzorek	Metoda $\sin^2\psi$			Hodnoty drsnosti R_a	
	σ_T [MPa]	σ_L [MPa]	\bar{W} , °2 θ	Požad. [μm]	Dosaž. μm]
EDM (K) Gr-D	+387±24	+354±21	5,63	1,8	2,83
EDM (K) Gr-H	-39±89	-12±70	5,44	6,3	5,59
EDM (K) Cu-D	+354±21	+267±14	5,73	1,8	1,51
EDM (K) Cu-H	-172±87	+16±334	5,20	6,3	5,62
EDM (NK) Gr-D	+268±12	+272±19	2,49	1,8	2,94
EDM (NK) Gr-H	-204±67	-197±54	3,12	6,3	5,42
EDM (NK) Cu-D	+269±8	+227±20	2,13	1,8	1,47
EDM (NK) Cu-H	-489±138	-547±137	3,20	6,3	4,89



Obr.5 Průběhy mikrotvrdoostí po obrábění grafitovou a měděnou elektrodou v technologických režimech: dokončování a hrubování (nekalený materiál-základní stav)



Obr.6 Průběhy mikrotvrdoostí po obrábění grafitovou a měděnou elektrodou v technologických režimech: dokončování a hrubování (kalený stav 58 - 60 HRC)

ZÁVĚRY

Na všech analyzovaných řezných plochách opracovaných elektroerozivním obráběním (EDM) s nepřímou polaritou byl rentgenografickou metodou identifikován dvojosý izotropní stav zbytkové makroskopické napjatosti (tabulka 4), tj. $\sigma_L \approx \sigma_T$.

Výsledky získané rentgenografickou difrakcí, potvrzují doposud ne zcela ověřené fyzikální předpoklady přerozdělení energie ve výbojovém kanálu. Záporné hodnoty zbytkových napětí na řezných plochách obrobených technologickým režimem hrubování pomocí grafitové a Cu elektrody jsou v protikladu z obvykle uváděnými výsledky napjatosti při hloubení přímou polaritou (nástroj -/obrobek +), kde zbytková napětí dosahují u EDM hloubení obvykle kladných hodnot. Je to pravděpodobně důsledek převažujícího objemu kladných částic ve výbojovém kanále a tím odlišné přerozdělení energie mezi elektrodami. Hodnoty zbytkových napětí (tabulka 4) korespondují s odlišnými průběhy mikrotvrdosti, než jsou obvyklé při obrábění přímou polaritou.

U vzorků z nekaleného materiálu obrobených technologickým režimem hrubování (vyšší hodnoty energie výboje) je zřejmý nárůst mikrotvrdosti v povrchové vrstvě jak u Cu, tak i u grafitové elektrody. V důsledku rozdílných elektrických a tepelných vlastností elektrod vede grafitová elektroda k nižším hodnotám mikrotvrdosti a k menší hloubce ovlivněné vrstvy, cca 30-50 μm . Hloubka ovlivněné vrstvy u Cu elektrody je cca 50-80 μm .

V oblasti finálního obrábění jsou obě elektrody rovnocenné, tento technologický režim nemá na velikost a průběh mikrotvrdosti téměř žádný vliv. Odchylky naměřených hodnot jsou v rozsahu chyby měření.

U vzorků z kaleného materiálu obrobených hrubováním pravděpodobně dochází v důsledku energie a odvodu tepla ve výbojovém kanálu a výchozím stavu obráběného materiálu k nestandardnímu poklesu mikrotvrdosti v povrchových vrstvách (grafit cca 100 μm , Cu cca 250 μm), což je pravděpodobně způsobeno strukturálními změnami v povrchové vrstvě a odlišnou energetickou bilancí. Této skutečnosti bude věnována pozornost v další etapě výzkumu, kde budou provedeny příčné metalografické výbrusy.

Při finálním obrábění kaleného materiálu nemá grafitová elektroda téměř žádný vliv na průběh mikrotvrdosti, zatímco Cu elektroda vede k nižší hodnotám mikrotvrdosti v povrchové vrstvě o tloušťce 40 μm . To je zřejmě způsobeno strukturálními změnami, které vznikají též v důsledku obrábění nepřímou polaritou (převažuje tok kladných částic uvolňovaných nástrojovou elektrodou).

Tato práce je dílčím výsledkem řešení projektů VZ MSM 6840770021 a GA ČR 101/05/2523.

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] FÜRACHER, I., MACEK, K., STEIDL, J.: *Lexikon technických materiálů*, Odborné nakladatelství technické literatury VERLAG DASHÖFER, (část 4. Nástrojové oceli, díl 4, Legované oceli a díl 6, kap. 2, s.21, Tepelné zpracování)
- [4] KRAUS, I., GANEV, N.: *Technické aplikace difrakční analýzy*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004