



X-ray Diffraction Residual Stress Study of Steel Surfaces after Progressive Methods of Machining

DIFRAKČNÍ A TENZOMETRICKÁ ANALÝZA POVRCHŮ OCELÍ PO NEKONVENČNÍCH METODÁCH OBRÁBĚNÍ

Kamil Kolařík, Nikolaj Ganev

Katedra inženýrství pevných látek FJFI ČVUT v Praze

Keywords:

Residual stress, electro discharge machining (EDM), electro chemical machining (ECM), milling, X-ray diffraction, destructive method

Abstract

The results of a comparative study of macroscopic residual stresses (RS) arising from electro discharge machining (EDM), electro chemical machining (ECM) and milling of steel are compared. While the surface RS were determined by the X-ray diffraction technique, the depth distribution of stresses was evaluated using a destructive method based on continual measurement of sample strain during etching of the analysed area. The results obtained affirmed that both the experimental methods used are complementary and their simultaneous employing is effective when the complex state of RS is required. Since the state of RS obtained on electro discharge machined and electro chemical machined surfaces is centrally symmetrical, milling leads to anisotropic surface field stresses.

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, žárovečné, vysokopevnostní materiály), u kterých je mnohdy jediným možným způsobem progresivní výroby uplatnění nekonvenčních metod obrábění. U těchto metod není obrobiteľnosť materiálu limitovaná mechanickými vlastnosťami (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, tváření 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 patří obrábění vysokými řeznými rychlostmi (HSC – high speed cutting). Uvedené 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 dialektikum) na mikrogeometrii a vlastnosti povrchové vrstvy,
- vliv mechanismu vzniku nového povrchu (poměr efektu plastické deformace a řízeného odtavení) na integritu povrchu,
- strukturální změny v povrchové vrstvě jako důsledek 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.

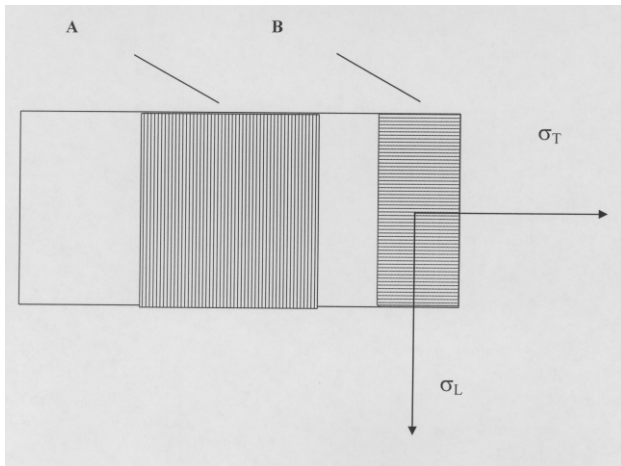
Protože se jakákoliv interakce s materiálem realizuje přes jeho volný povrch, může stav povrchových vrstev součástí ovlivnit rozhodujícím způsobem užitkové vlastnosti celého objemu. Jedním z nejvýznamnějších faktorů, který musí být v této souvislosti uvažován, je distribuce zbytkových napětí doprovázející 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 napětí postupně 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. Narozdíl 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, systema-



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.

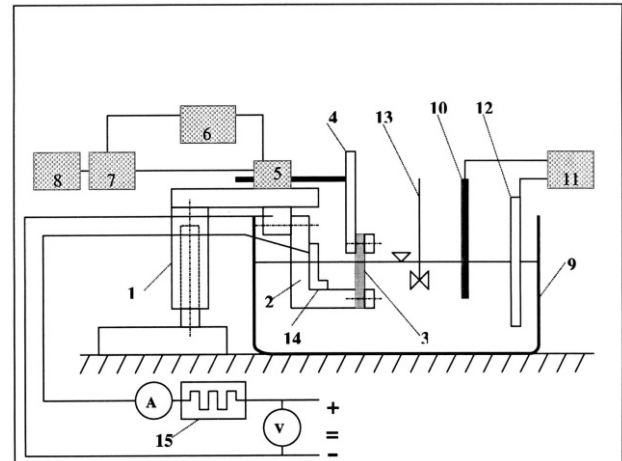
tický výzkum vzniku povrchových napětí pro různé mechanizmy tvorby konečného povrchu postupy EDM, ECM, LBM a HSC, který by zohlednil též různé experimentální metody měření (destruktivní a nedestruktivní), chybí.

V tomto příspěvku jsou porovnávány dvě tenzometrické metody, které patří v současné době k nejrozšířenějším, a jejich praktické využití pro tenzometrickou analýzu povrchů obrobeků nekonvenčními technologiemi EDM, ECM a „klasickou“ strojírenskou technologií frézování.

2. Zkoumané vzorky a použité technologie

Zkušební vzorky (obr.1) byly vyrobeny vzorky z oceli ČSN 19436 (C 2%, Cr 11,5%) v kaleném (K) a nekaleném (NK) stavu, o rozměrech 30 × 15 × 10 mm³. Tenzometrická analýza byla provedena pro dva způsoby nekonvenčního opracování a frézování:

- **Elektroerozivní hloubení** (obrábění na čisto) s grafitovou nebo měděnou elektrodou (označení vzorků nekalených EDM NK Gr, EDM NK Cu, resp. kalených EDM K Gr, EDM K Cu). Tato technologie byla realizována pomocí zařízení AGIE – IMPAKT s automatickou optimalizací pracovních podmínek pro nastavené vstupní parametry odpovídající požadované drsnosti obrobekové plochy.



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

- **Elektrochemické broušení** na stroji WENDT s elektrolytem NaNO₃ a diamantovým kotoučem. Vzorky nesly analogické označení ECM K ve stavu kaleném a ECM NK ve stavu základním.
- **Frézování** (vzorky Fr NK, Fr K) - bylo použito zařízení FV 25 CNC A s destičkou RCHT 1204 MO CB. při rychlosti řezání $v_c = 115$ m/min a otáčkách vřetena $n = 538$ 1/min. Hloubka řezu byla $a_p = 0,2$ mm.

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 [2] spočívá v kontinuálním měření deformace součásti (vzorku) při elektrolytickém odleptávání povrchových vrstev materiálu z vyšetřované plochy. Při odstraňování materiálu dochází k porušování rovnováhy vnitřních sil, které se proje deformací vzorku. Smysl a velikost deformace jsou úměrné rozložení zbytkových napětí v odleptané vrstvě viz. obr. 2.

3.2 Rentgenografická tenzometrická metoda “sin²”

Měření bylo prováděno na θ -goniometru Siemens mens se zářením rentgenky s chromovou anodou. Byla analyzovaná difrakční linie {211} -Fe. Hodnoty mřížkových deformací byly interpretovány napětím za předpokladu dvojsového stavu zbytkové napjatosti z experimentálně stanovených závislostí difrakčního úhlu 2θ (\sin^2). Kde θ je úhel mezi povrchem vzorku a difrakujícími atomovými mřížkovými rovinami. Závislosti 2θ (\sin^2) byly měřeny ve dvou azimutech τ , λ (viz obr.1). K výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $0.5s_2 = 5,76 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹, $s_1 = 25 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹. Experimentální chybu jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou výpočtu zbytkových napětí metodou “sin²”.

Veličina představuje průměrnou integrální šířku difrakční linie $\{211\}$ α -Fe z měření L , T při $\tau = 0$ reprezentuje míru plastické deformace analyzovaných vzorků. Experimentální chyba jejího stanovení nepřevyšuje 0,05 μm [3].

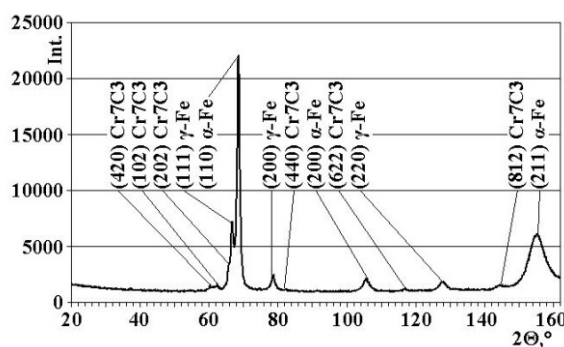
4. Výsledky měření a jejich diskuse

Hloubkové profily zbytkových makroskopických napětí získaných mechanickou destruktivní metodou jsou znázorněny na obr. 3, 4, na nichž jsou rovněž vyneseny hodnoty „povrchových“ rentgenografických měření uvedených v tabulce č. 1.

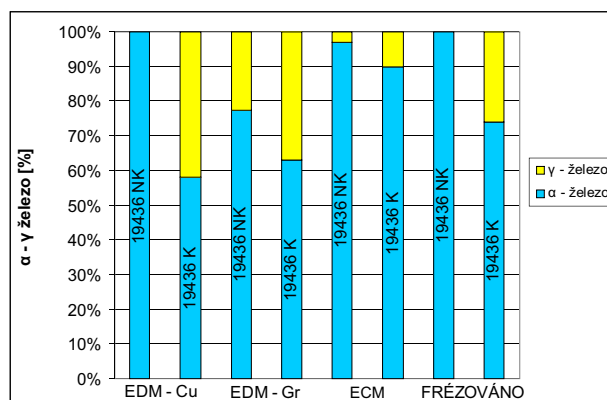
Dále byla u všech zkušebních vzorků provedena rentgenografická fázová difrakční analýza, při které byly na řezných plochách všech zakalených vzorků identifikovány kromě feritu (α -Fe) také austenit (γ -Fe) a minoritní fáze Cr_3C_7 (PDF No 11-550, 5-720, 6-0683) jak je znázorněno na obr. 5a.

Poměr obou identifikovaných krystalografických fází Fe byl odhadnut pomocí bezstandartové metody kvantitativní fázové analýzy navržené J. Fialou [4]. Na obr. 5b jsou prezentovány jednotlivé objemové podíly fází feritu (α -Fe), austenitu (γ -Fe), minoritní fáze Cr_3C_7 nebyla při výpočtu uvažována. Absolutní chyba stanovení jednotlivých fází, daná vlivem velikosti krystalitů, jejich přednostní orientací a dalšími faktory reálné struktury polykrystalického materiálu je 1% - 10% [4].

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 odírání vrstev zjišťuje pouze zbytková napětí I. druhu a podává informaci o průběhu v celém průřezu materiálu, pak metoda rentgenové difrakce nám podává informace o stavu povrchové vrstvy maximálně do hloubky 5 až 10 μm



a)

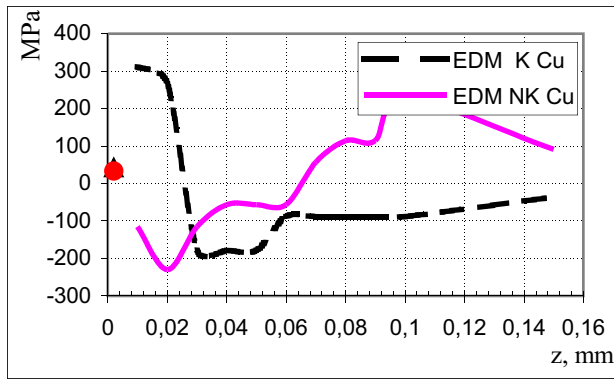


b)

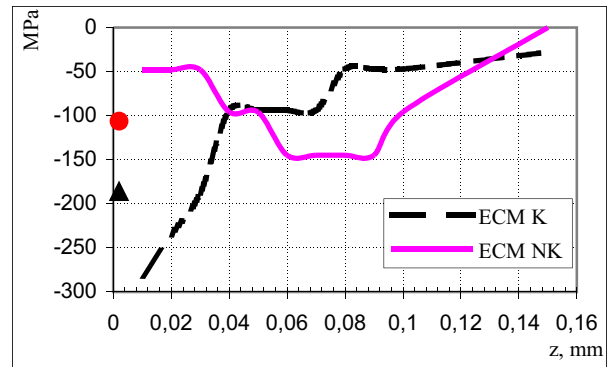
Obr. 3. Difrakční diagram kaleného vzorku s vyznačenými difrakčními liniemi podílu jednotlivých fází (a) a srovnávací diagram fázového složení povrchových vrstev (b).

Tab. 1. Makroskopická zbytková napětí τ , L a střední šířka difrakční linie (211) stanovené rentgenograficky (střední hodnoty z vrstvy o tloušťce cca 5 μm) na fázi α -Fe a hodnoty zbytkových napětí (odpovídající směru τ) zjištěných mechanickou metodou ve hloubce cca 10 μm .

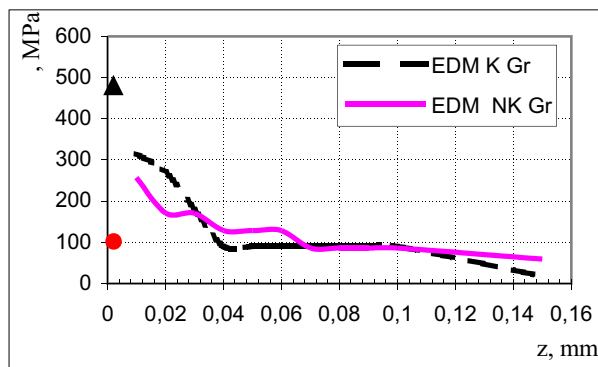
Vzorek	Metoda rtg. difrakce	Mechanická metoda		
		τ , MPa	L , MPa	$\bar{W} \cdot 2$, MPa
EDM NK Cu	+34 ± 9	+28 ± 12	1,89	-115
EDM K Cu	+43 ± 7	+24 ± 10	1,99	+312
EDM NK Gr	+103 ± 9	+79 ± 11	2,15	+257
EDM K Gr	+480 ± 26	+302 ± 14	5,29	+315
ECM NK	-106 ± 7	-91 ± 4	1,61	-48
ECM K	-186 ± 14	-236 ± 17	5,71	-282
Fr NK	-184 ± 4	-70 ± 9	3,17	-668
Fr K	-703 ± 25	-373 ± 19	5,12	-895



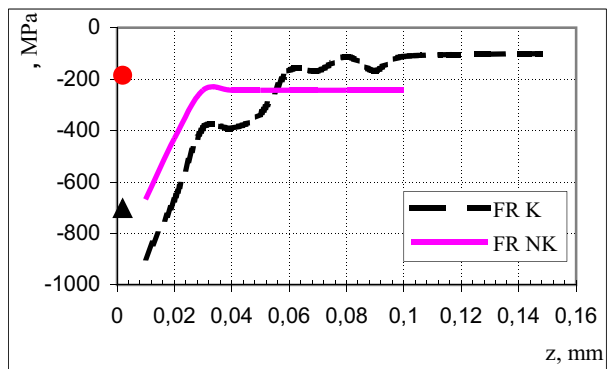
a)



a)



b)



b)

Obr. 4 Průběhy zbytkových napětí v povrchových vrstvách vzorků hloubených elektroerozivně měděnou elektrodou (a) a grafitovou elektrodou (b). Diskrétními hodnotami v levé části obrázků jsou znázorněny výsledky získané rentgenograficky z vrstvy o tloušťce rovné hloubce vnikání použitého záření.

Obr. 5 Průběhy zbytkových napětí v povrchových vrstvách elektrochemicky broušených vzorků (a) a vzorků obrobených frézováním (b). Diskrétními hodnotami v levé části obrázků jsou znázorněny výsledky získané rentgenograficky z vrstvy o tloušťce rovné hloubce vnikání použitého záření.

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 krystality o rozměrech větších než 10 nm, kdy se difrakční linie rozpadají na diskrétní stopy.

5. Závěr

1. Na většině analyzovaných řezných plochách opracovaných elektroerozivním obráběním byl identifikován dvojosý izotropní stav zbytkové makroskopické napjatosti (viz. tab. 1), tj. $\sigma_x = \sigma_y$.

2. Značně vyšší hodnoty tahových napětí, v případě elektroerozivního obrábění grafitovou elektrodou odpovídají vyššímu tepelnému zatížení při tomto obrábění vzorků.

3. V případě elektrochemického broušení jsou všechna naměřená zbytková napětí tlaková. Je to důsledkem převládající mechanické interakce brusného diamantového kotouče s obráběným materiálem.

4. Povrchy frézovaných vzorků vykazují značně anizotropní stav zbytkových tlakových napětí, způsobených charakterem interakce nástroje s materiálem.

Přes některé rozdílné výsledky lze konstatovat, že obě metody poskytují porovnatelné informace o stavu povrchové vrstvy - např. informaci zda je v blízkosti povrchu TAH či TLAK se obě metody shodly ve všech případech kromě vzorku EDM NK Cu. To dává předpoklady pro využití obou metod ve strojírenské praxi, kdy rentgenová metoda by mohla poskytovat informace o stavu povrchu při využití zejména výhody nedestruktivního principu, zatímco metoda destruktivní je jednoznačně výhodná pro posouzení stavu zbytkové napjatosti ve větších hloubkách pod povrchem.

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. Fiala, J: *Kovové materiály*, 5 (1967), 559 – 562.

Tato práce je dílčím výsledkem řešení projektu 106/03/1039 a VZ MSM 6840770021.