

VLIV POVRCHOVÉ VRSTVY NA RYCHLOST KOROZNÍ DEGRADACE

M. Černý, J. Filípek

Došlo: 5. září 2007

Abstract

ČERNÝ, M., FILÍPEK, J.: *Influence of the surface layer on the corrosion degradation rate*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2008, LVI, No. 2, pp. 61–72

This work deals with the problem of cutting conditions effect on a formation of surface layers, which influences the attributes of the final component surface. The effect of cutting the tension in surface layers examination was carried out. The observation of the surface layer tensions in the component machined by sharp and dull cutting edge was compared. The steel ČSN 41 1500 (E 295) was chosen as the tested material. After cutting the components were exposed to the corrosive medium and subsequently their resistance to corrosion was mutually compared. On the basis of this observation was raised a conclusion that the components machined by dull cutting edge show a lower corrosive resistance than the components machined by sharp cutting edge. This fact corresponds with the statement that the measurement of the surface layers tension in these components was provided parallel to the technical literature without reference to the corrosion damage.

residual stress, surface layer, geometry of edge, corrosion

TVORBA POVRCHOVÝCH VRSTEV Z POHLEDU OBRÁBĚNÍ

Mechanika procesu řezání – obrábění je charakterizováno oddělováním určité vrstvy materiálu z obrobku řezáním. Řezání, při kterém se tato nedeformovaná vrstva na obrobku mění v třísku, je procesem plastické deformace. Plastická deformace je ovlivňována druhem a vlastnostmi obráběného materiálu a podmínkami, za kterých proces probíhá, z nichž nejdůležitějšími jsou deformační rychlost a teplota. Výsledným projevem této plastické deformace je oddělení třísky formou lomu (Obr. 1).

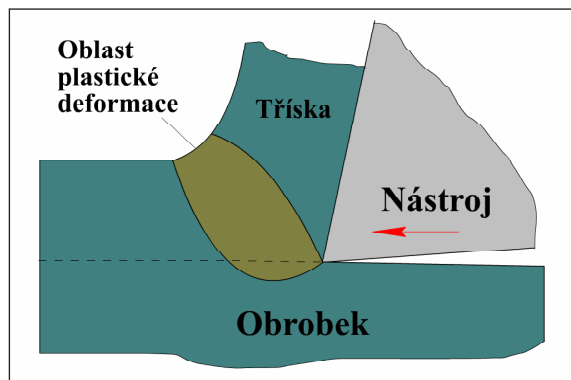
Pod vlivem vnějšího působení sil vznikají uvnitř polykrystalů v technických kovech normální a tečná napětí jak uvnitř zrn, tak i na hranicích. Dosáhnou-li tečná napětí při růstu vnější síly hodnoty kritického napětí τ_k v některé z kluzových rovin zrna vhodné orientovaného k působící síle, dojde uvnitř tohoto zrna k plastickému kluzu, tj. k vnitrokrystalické deformaci. Dislokace, které se přitom pohybují, narazí na hranici zrna. Je-li to hranice s malou odchylkou v orientaci od předchozího zrna, dojde k přestupu vyvolaného kluzu přes tuto hranici. Znamená to tedy, že ve srovnání s monokrystaly má polykrystalická látka větší deformační odpor a proces plastické

deformace je ovlivněn kromě výše uvedeného také hustotou hranic, tj. velikostí zrn.

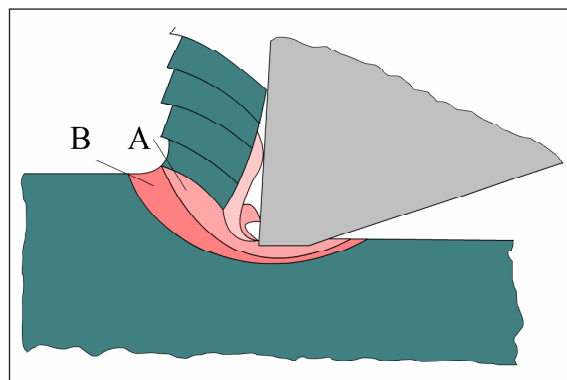
Narůstání působící vnější síly při plastické deformaci vede k porušení soudržnosti deformovaného materiálu a při obrábění probíhá formou lomu. Lom nastává po překročení kritické hodnoty napětí a může proběhnout buď kluzem (tvárný lom) nebo dvojčatením. U tvárných materiálů se v místě koncentrace napětí vytvoří plastické pásmo. U křehkých materiálů je napětí koncentrováno v jednom místě a vzniklá trhlinka se šíří dále (křehký lom). Druh a charakter lomu je tak závislý u kovových materiálů na jejich krystalické stavbě, velikosti zrna a podmínkách deformace.

Termomechanika procesu řezání – tepelné procesy jsou těsně svázány s ostatními fyzikálními jevy charakterizujícími obrábění kovových i nekovových materiálů. Obecně je šíření tepla popsáno dvěma základními rovnicemi, a to rovnicí tepelné bilance, kde je celková tepelná energie součtem tepla ekvivalentního deformační práci odebírané vrstvy (včetně práce vynaložené na pohyb třísky) a tepla odpovídajícího třecí práci na styčných plochách nástroje. Další rovnicí vyjadřující rozložení teploty v pevném tělese (obrobku, nástroji a tříске) v závislosti na po-

loze a čase obrábění je parciální diferenciální rovnice. Matematické formulace při popisu reálného obrábění musíme doplnit o počáteční a okrajové podmínky. Počáteční podmínky popisují počáteční rozložení teplot v tělese a okrajové podmínky popisují přestup tepla na povrchu těles.



1: Oblast plastické deformace



2: Proces řezání z pohledu šíření tepla

Vlastnosti povrchové vrstvy – povrchový film, který je situován přímo pod geometrickým povrchem, tvoří oblast absorbovaných částic plynu, kapaliny nebo tuhých částic. Navíc tato velmi tenká oblast obsahuje film oxidů a vylomené částice krystalové mřížky.

Základní část povrchové vrstvy tvoří plasticky deformovaná oblast obráběného materiálu v důsledku účinku sil z technologického procesu. Tloušťka této oblasti se může měnit od několika setin až po několik desetin milimetru v závislosti na metodě a podmínkách obrábění. V mnoha případech, zvláště po obrábění, je viditelná zřetelně vláknitá struktura stlačené oblasti. Je to výsledek účinku sil tření mezi obráběným materiálem a nástrojem.

Kromě plastické deformace, vytvořené mechanickými silami, může rozložení teplotního pole také ovlivnit mikrostrukturu. V důsledku tepla vytvořeného v technologickém procesu se mohou objevit různé transformace struktury povrchové vrstvy jako je kalení a popouštění, fázové přeměny, změny velikosti zrna apod. Hloubka tepelných účinků obvykle při obrábění dosahuje pouze části stlačené vrstvy. U procesu jako je vyjiskřování, přesahuje tepelně ovlivněná vrstva téměř celou povrchovou vrstvu a může překročit 1 mm.

Povrchová vrstva obráběné součásti a její jakost je charakterizována jejími fyzikálními a geometrickými vlastnostmi obrobeného povrchu (Potácel, 2003).

Geometrické vlastnosti obrobeného povrchu jsou podmiňovány nerovností a geometrickou strukturou povrchu, zahrnující uspořádání stop po nástroji a možné poruchy povrchu jako jsou rýhy, trhliny, vylomení, štěrby.

Geometrické vlastnosti obrobeného povrchu jsou výsledkem geometrické a kinematické reprodukce tvaru špičky nástroje v obráběném materiálu

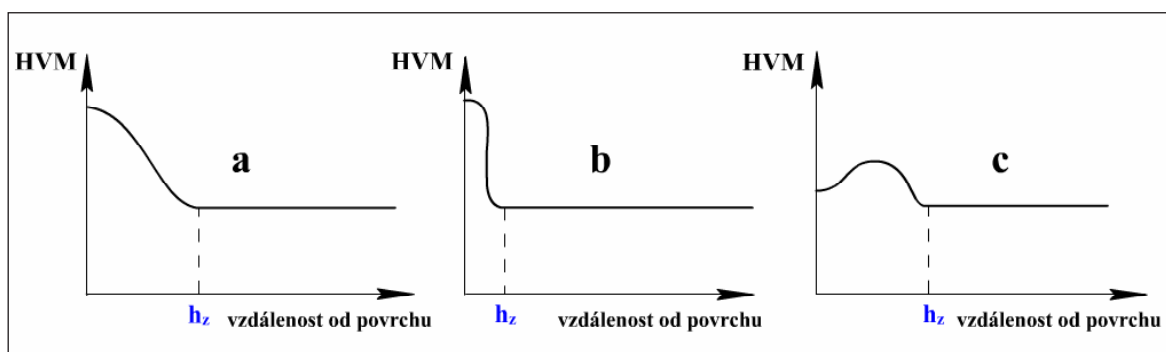
Obecně lze schéma procesu obrábění z pohledu termomechaniky popsat pomocí obr. 2. Tříška se pohybuje po čelní ploše bříty, přitom dochází k zadírání kovu vlivem tření, což je doprovázeno sekundárními deformacemi. Teplo se uvolňuje hlavně v zóně **A**, částečně v zóně **B** (Fiala, Chrást; 1983).

álu (včetně vibrací), vnějšího tření mezi špičkou nástroje a materiálem součásti a tvorby nárustku při obrábění určitých materiálů v jistém rozsahu podmínek obrábění.

Geometrické charakteristiky povrchu patří mezi topografické údaje, kterých dnes existuje celá řada. Z řady faktorů charakterizujících integritu povrchu bylo dříve normalizováno pouze hodnocení drsnosti povrchu (Potácel, 2003).

Příčinou změn vlastností základního materiálu a vznik povrchové vrstvy jsou napětová pole vytvořená řeznými silami, teplotní pole jako výsledek vývinu tepla energií řezného procesu a vnější i vnitřní tření. V důsledku řezného procesu dochází ke změnám mechanických vlastností povrchové plochy, k nimž patří zejména strukturní změny, různé vady, zpevnění, zbytková napětí apod.

Zpevnění primární vrstvy je způsobeno zejména tím, že oblast primárních plastických deformací často zasahuje pod úroveň budoucího povrchu. Další vliv na zpevnění povrchové vrstvy souvisí se skutečností, že reálné ostří není tvořeno přímkou, ale je určitým způsobem zaobleno. V bezprostřední interakci bříty s materiálem obrobku se realizuje negativní úhel čela a budoucí povrch obrobené plochy **nevzniká řezáním, ale tvářením**. Zpevnění povrchové vrstvy obrobené plochy lze kvantifikovat hodnotou mikrotvrlosti. Typické průběhy mikrotvrlosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu jsou znázorněny na obr. 3. Největší mikrotvrdość **HVM** je na povrchu, pak klesá. Hloubka zpevněné vrstvy h_z je relativně velká (Obr. 3a). Na obr. 3b je sice povrchová tvrdost dost vysoká, ale její prudký pokles je spojen s nebezpečím odlupování povrchové vrstvy. Průběh na obr. 3c znázorňuje povrch, u kterého proběhla plastická deformace, přičemž plasticita materiálu byla plně vyčerpána.



3: Charakteristické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě

Další silové působení vyvolalo vznik trhlin na povrchu. Toto se promítá do poklesu tvrdosti, někdy může být tvrdost dokonce nižší než původní tvrdost materiálu (Kocman, Prokop; 2001).

Z řezných podmínek nejvíce ovlivňuje zpevnění řezná rychlost, tloušťka odřezávané vrstvy (resp. posuv), méně šířka odřezávané vrstvy (resp. hloubka řezu). Z geometrie břitu ovlivňuje zpevnění úhel řezu (resp. úhel čela), úhel hřbetu, poloměr ostří, otupení nástroje a poloměr špičky. Zvětšuje-li se řezná rychlost, oblast primární plastické deformace se zmenšuje a natáčí směrem doprava, klesá její vliv na velikost zpevnění povrchu. Proto s rostoucí rychlostí se zmenšuje stupeň zpevnění a hloubka zpevněné vrstvy. Tloušťka odřezávané vrstvy, resp. posuv, významně ovlivňují oblast primární plastické deformace. Se zvětšující se tloušťkou se sice střední šířka oblasti primární plastické deformace zmenšuje, ale se zřetelem na to, že při větší tloušťce odřezávané vrstvy neumožní větší deformovaná vrstva materiálu, aby se deformace materiálu více rozšířila k vnějšímu povrchu třísky. Tyto stísněné deformační poměry se projeví u ostří větším rozšířením oblasti primární plastické deformace. Tím oblast primární plastické deformace u větší tloušťky odřezávané vrstvy zasáhne hlouběji do obráběného materiálu. Stupeň a hloubka zpevnění proto rostou se zvětšující se tloušťkou odřezávané vrstvy. Zvětšuje-li se úhel řezu, rozšiřuje se oblast primární plastické deformace a natáčí se směrem do materiálu obrobku. Tím se zvětšuje stupeň zpevnění a hloubka zpevněné vrstvy. Také při zmenšování úhlu hřbetu dochází ke zvětšování zpevnění a hloubky zpevněné vrstvy. Poloměr ostří ovlivňuje střední hodnotu úhlu řezu. Se zvětšováním poloměru ostří se zvětšuje střední hodnota úhlu řezu, rozšiřuje se oblast primární plastické deformace a natáčí se do obráběného materiálu. Hloubka zpevněné vrstvy a stupeň zpevnění se s rostoucím poloměrem ostří zvětšují. Obdobný vliv má i opotřebení břitu. Zpevnění povrchové vrstvy obrobené plochy má značný vliv na funkční vlastnosti povrchu součásti. Zpevněná povrchová vrstva, která je dobře soudržná se základním materiálem, a která není mechanicky porušena, zvyšuje odolnost proti opotřebení a také únavovou pevnost povrchu (Bumbálek, Ošťádal, Filip, Svoboda; 1985).

Podle doby trvání lze posuzovat napětí *okamžitá* (časová) a *zbytková* (trvalá).

Podle objemu, ve kterém dosahují vnitřní napětí rovnováhy, se rozlišují zbytková napětí:

- **I. druhu** (makroskopická), u kterých se dosáhne rovnováhy v makroobjemech, tj. v relativně rozsáhlé oblasti součásti. Porušením silové, případně momentové rovnováhy (rozříznutí obrobku) dojde ke změně makroskopických rozměrů. Vznikají jako důsledek výrobních operací – např. hrubování nevyžíhaného odlitku odstraním povrchovou vrstvu, stav napjatosti se změní a výrobek se deformuje. Další příčinou je např. kalení, kdy na rozsah těchto napětí má vliv zejména způsob ponořování výrobků do kalící lázně. Stejně jako minimální makronapětí, tak zvyšují toto napětí i nevhodně zvolené tvary kalených předmětů. U tvárných ocelí se toto snižuje postupnou plastickou deformací. Tento proces je označován jako tzv. relaxace napětí.
- **II. druhu** (mikroskopická), která se vyrovnává v oblasti několika zrn či subzrn. Vznikají fázovou transformací nebo deformací kovů, kdy různá zrna či subzrna vykazují rozdílné elastické napěťové stavy. Orientace těchto napětí se neváže ke geometrii výrobku. V celém objemu se napětí II. druhu mohou vzájemně vyrovnat. Někdy jsou tato označována jako homogenní mikroskopická.
- **III. druhu** (submikroskopická), která se vyrovnává v objemu několika atomových vzdáleností, nemají žádný vztah k tvaru výrobku. Tato nehomogenní napětí jsou výsledkem elastické distorze mřížky při rozměrech zlomku nanometru do hodnoty mřížkového parametru. Charakteristickými příklady jsou bodové mřížkové poruchy (vakance, intersticiální či substituční atomy). Také napjatost vyvolaná hranovou dislokací nebo koherentním rozhraním matrice vyloučeného precipitátu způsobuje mikroskopická napětí.

Všechny tyto tři druhy zbytkových napětí se zpravidla vyskytují u reálných výrobků současně a vzájemně se ovlivňují. Např. nárůst mikronapětí může vést až ke vzniku makronapětí. V běžné praxi se rozumí pod pojmem zbytková napětí pouze napětí I. druhu (Mádl, 1989). Přítomnost zbytkového napětí ovlivňuje korozní chování mnoha způsobů.

Dodává kovu energii a zvyšuje tak reaktivitu kovu, podporuje vznik mikročlánků při porušení pasivních vrstev, urychluje rozpad metastabilních fází s následnou elektrochemickou heterogenitou a akceleruje selektivní korozi danou elektrochemickou strukturní nehomogenitou.

MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH NAPĚTÍ V MATERIÁLU

Podle míry zásahu do celistvosti měřeného materiálu se metody měření povrchového napětí dělí na destruktivní (založené na měření deformací vyvolaných odstraněním části objemu napjatého objektu), polodestruktivní (jejichž aplikací dojde ke znehodnocení nadbytečného objemu, záměrně přidávaného při výrobě součástky – poškozený materiál se po měření odstraní) a nedestruktivní, kdy se součástky měřením nepoškodí.

Z nedestruktivních způsobů analýzy zbytkového napětí v povrchových vrstvách polykrystalických látek se nejspolehlivěji osvědčuje rentgenová tenzometrie. Rentgenová difrakční analýza je metoda založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v trojrozměrném prostoru. Rentgenografická měření se provádějí pomocí difraktometru se zářením CrK α rentgenografickou metodou „ $\sin^2\psi$ “, která předpokládá, že stav napětí určený pomocí metod rentgenového záření se považuje za dvouosý, přičemž deformace zůstává trojosou. Tento vztah lze po úpravách vyčíst z rovnic spojujících hlavní deformaci ϵ_i s hlavním napětím σ_i ($i = 1, 2, 3$):

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)]$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)], \quad (1)$$

kde E je Youngův modul pružnosti a ν Poissonova konstanta.

V souladu s metodou deformace $\epsilon_{\gamma\psi}$ pro $\sin^2\psi$ platí:

$$\epsilon_{\gamma\psi} = (\epsilon_1 \cos^2\varphi + \epsilon_2 \sin^2\varphi) \sin^2\psi + \epsilon_3 \cos^2\varphi. \quad (2)$$

Při uplatňování metody $\sin^2\psi$ se předpokládá, že napětí σ_1 a σ_2 působí ve směru rovnoběžném s povrchem a napětí σ_3 působí kolmo na něj. Za předpokladu, že je hloubka použitého záření nepatrná, můžeme σ_3 zanedbat. Po dosazení ϵ_i do rovnice (2) a pokud $\sigma_3 = 0$, pak pro $\sin^2\psi$ platí:

$$\epsilon_{\gamma\psi} = \epsilon_{\psi} = [(1 + \nu)/E] \sigma_{\varphi} \sin^2\psi - (\nu/E)(\sigma_1 + \sigma_2). \quad (3)$$

Deformace ϵ_3 kolmá k povrchu vzorku nemá žádný vliv na σ_{φ} . Proto tato metoda není závislá na přesné znalosti struktury mřížky materiálu ve stavu bez přítomnosti napětí.

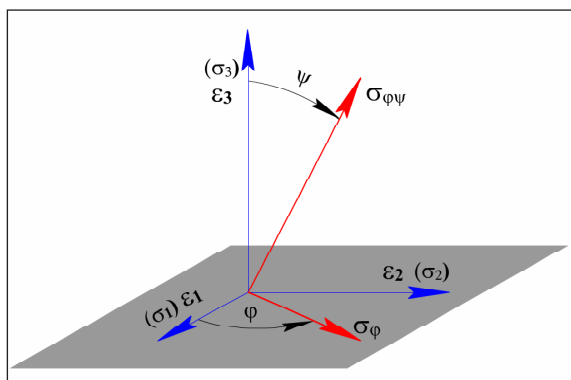
V praxi prováděná měření vnějších napětí v polykrystalických materiálech ukazují, že hodnoty deformací $\epsilon_{\gamma\psi}$ se neukládají přesně na přímku $\epsilon_{\gamma\psi}(\sin^2\psi)$, ale statisticky se umísťují kolem této pomyslné přímky. Odchylky od lineární závislosti jsou vyvolány různými faktory, které nemají žádný vztah k napětí, zároveň ale vyvolávají nejistotu při aproximaci přímky a zvyšují nejistotu měření.

Pokud se velikost napětí v povrchových vrstvách rychle mění směrem od povrchu do hloubky materiálu, nemůžeme již v ozářené vrstvě považovat za platný předpoklad $\sigma_3 = 0$. Profil difrakčních linií pak již nepředstavuje pouze odraz informace o ozářeném povrchu, ale představuje superpozici informací v různých tloušťkách ozářené vrstvy (Obr. 5).

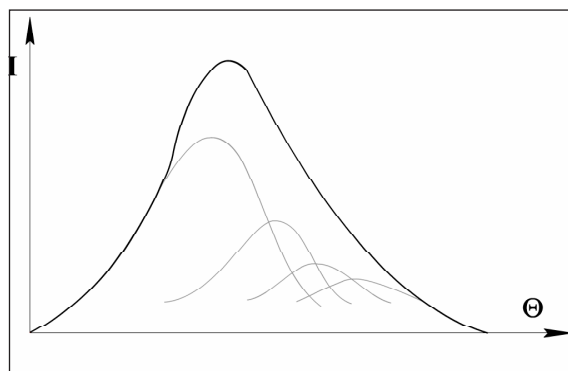
V tomto případě je nutné vzít v úvahu přítomnost σ_3 jako součásti trojosého stavu napětí:

$$\theta \epsilon_{\gamma\psi} / \theta \sin^2\psi = [(1 + \nu)/E](\sigma_{\varphi} - \sigma_3). \quad (4)$$

Znamená to tedy, že pomocí metody $\sin^2\psi$ neměříme pouze povrchovou složku, ale vždy pouze rozdíl $\sigma_{\varphi} - \sigma_3$.



4: Schéma směrů deformací



5: Superpozice rentgenových paprsků na různých hloubkách materiálů

Při klasifikaci většího množství experimentálních údajů bylo zjištěno, že nelineární závislosti $\epsilon_{\gamma\psi}$ ($\sin^2\psi$) lze rozdělit podle společných znaků průběhů křivky na tři skupiny: s parabolickým průběhem, s eliptickým průběhem a zakřiveně eliptickým průběhem. Tyto difrakční linie podávají informace o zbytkovém napětí ve vrstvě, kam proniklo difrakční záření (Kraus, 1982).

HLOUBKA PRŮNIKU ZÁŘENÍ

Při předpokladu, že hodnota intenzity I_0 prvotního svazku se sníží po odrazení v důsledku různých fyzikálních procesů, lze změny intenzity popsat zákonem absorpce:

$I_T = I_0 e^{-\mu l}$, kde l je cesta, kterou prochází paprsek a μ je lineární koeficient pohlcení. I_T znázorňuje přínos do intenzity krystalů mřížky ležících v hloubce T pod povrchem.

Z obr. 6 je zřetelné, že míra hloubky proniknutí T závisí na tom, jakou intenzitu I_T je ještě možné zaregistrovat použitým detektorem, a závisí také na času expozice nebo na citlivosti detektoru.

Při trvalé expozici bude evidován přínos elementárních profilů ležících hlouběji pod povrchem. To ovlivní polohu statického středu celkového profilu difrakční linie. Hodnotu T (do $\psi = 57^\circ$) je možné definovat jako lineární funkci $\sin^2\psi$:

$$T = T_0 - T' \cdot \sin^2\psi, \quad (5)$$

kde T' a T_0 jsou konstanty dané délkou vlny, materiálem, metodou a volenou hodnotou poměru I_0/I_T . Tento poměr znázorňuje faktor rentgenového záření, odraženého systémem rovin (hkl), ležících v hloubce T .

Profil difrakčních linií je sumou elementárních profilů. Maximum profilu I odpovídá odrazení od krystalů mřížky na povrchu. V případě malého gradientu deformace a nepatrné hloubce proniknutí záření se poloha povrchového elementárního profilu prakticky shoduje s maximem celého profilu.

URČENÍ NAPĚTÍ V PŘÍPADĚ NELINEÁRNÍ EXPERIMENTÁLNÍ ZÁVISLOSTI $\epsilon_{\gamma\psi}$ ($\sin^2\psi$)

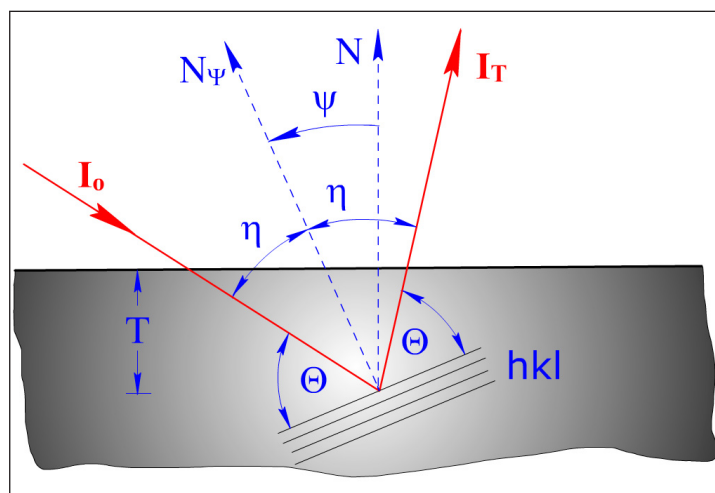
Výpočet podle metody $\sin^2\psi$ vyjadřuje průměrnou hodnotu napětí ve vrstvě s tloušťkou T (T je efektivní hloubka proniknutí záření do materiálu). Pokud se v této vrstvě předpokládá existence rovinné tenze a nepřítomnost gradientu deformace, pak je možné naměřenou závislost $\epsilon_{\gamma\psi}$ ($\sin^2\psi$) aproximovat přímkou. Rozptýlení experimentálních bodů se vysvětluje odchylkou měření a vlivem náhodných příčin posuvu linií, nemajících žádný vztah k napětí.

Pokud je příčinou nelineárnosti gradient deformace, dochází k odchylce roviny hlavního napětí od roviny povrchu systému a napětí pak nejsou totožná. Superpozice těchto jevů závisí na průměrné deformaci $\epsilon_{\gamma\psi}$ ($\sin^2\psi$) a má některou z podob uvedených na obr. 7.

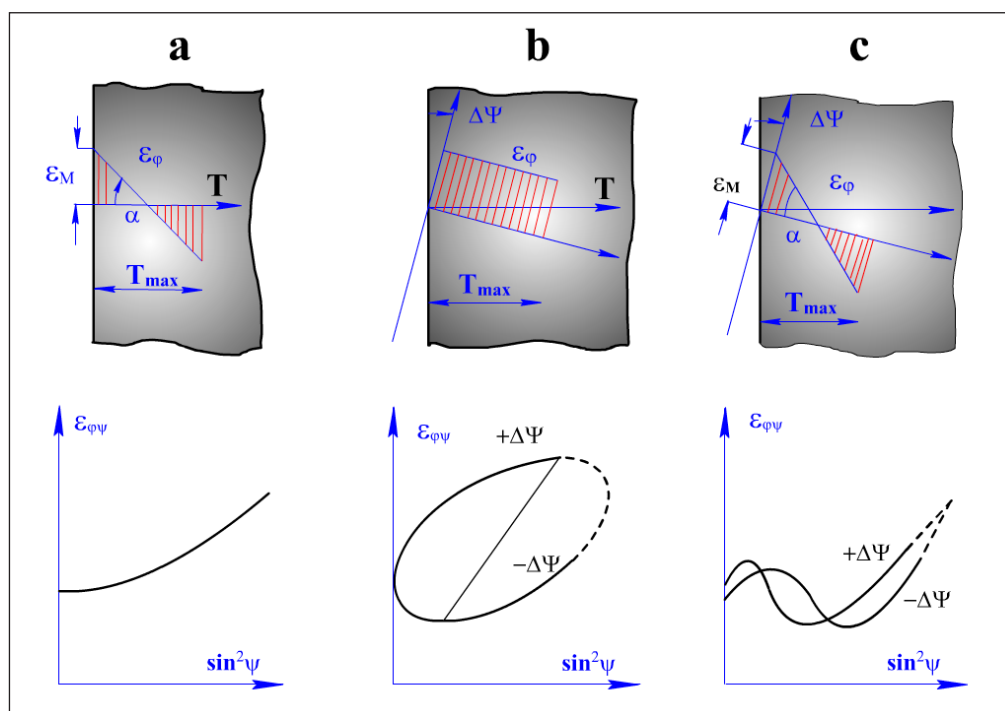
- a – lineární střídavé napětí, působící rovnoběžně s povrchem
- b – stálé napětí, působící odchýleným směrem od povrchu $\Delta\psi$
- c – lineárně proměnné napětí, působící směrem odchylujícím se od povrchu $\Delta\psi$.

KOROZE

Poškození konstrukčních materiálů je důsledek účinků určitých procesů tzv. stresorů na materiál. Korozní poškození představuje obsáhlou skupinu poruch vzniklých chemickým či fyzikálně chemickým působením prostředí na povrch, resp. vybrané objemy materiálu, nejčastěji kovů. Nejčastěji se s korozi setkáváme v podobě koroze atmosférické. Koroze atmosférická je koroze elektrochemickou, způsobenou vlhkým vzduchem. Korodovaný materiál se stýká se vzduchem a má tedy k dispozici přebytek kyslíku. Kontrolním faktorem je vodivost vrstvy elektrolytu, který kondenzoval na povrchu. Rychlost atmosférické koroze závisí hlavně na vlhkosti atmosféry a na její čistotě, resp. na obsahu příměsí rychlost koroze zvyšujících, jako jsou např. sirné slouče-



6: Odrazení rentgenova záření od atomových rovin



7: Různé typy rozložení napětí v povrchové vrstvě

niny, které zvyšují elektrickou vodivost elektrolytu a podporují vznik snadno rozpustných anodických produktů (Fiala, Chrást; 1983). Při provozní aplikaci kovů se jednotlivé korozní děje projevují samostatně, nebo ve vzájemné kombinaci (až synergicky). Podle rozsahu poškození se jedná o tzv. korozi celkovou, která probíhá po celém povrchu vystaveném koroznímu prostředí, a korozi místní – lokalizovanou, která probíhá intenzivněji pouze v některých částech exponovaného povrchu kovu. V některých případech dochází i ke korozi strukturní, kdy nastává rozrušování vnitřní struktury materiálu (Novák, Bystrianský; 2003).

Rychlost celkové koroze, tj. probíhající na celém povrchu kovu srovnatelnou intenzitou, je nejčastěji vyjadřována v jednotkách úbytku tloušťky materiálu za časovou jednotku, např. v milimetrech za rok ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) a může podle typu korozního systému nabývat hodnot v rozmezí několika řádů. Např. rychlost rozpouštění železa (nelegované oceli) v kyselině sírové je $50\text{--}100 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, za atmosférických podmínek může dosahovat rychlost koroze stejného materiálu hodnot od 1 do $50 \mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$.

Při korozi slitin železa s uhlíkem jsou v korozní soustavě tyto fáze: ferit, jehož potenciál je blízký hodnotě potenciálu $\text{Fe}-\text{Fe}^{2+} = -0,44 \text{ V}$, grafit s potenciálem $0,37 \text{ V}$ a také cementit je vzhledem k feritu katodou. Na průběh koroze uhlíkových ocelí mají vliv doprovodné příměsi, tzv. legury (C, Si, Al, Cr, Ni, Mo apod.).

Kinetika korozního procesu není závislá pouze na množství přítomného atmosférického oxidu siřičitého, ale také na množství přítomné kyseliny si-

rové, nahromaděné vlastním korozním pochodem (Hrstka, Míšek; 1973).

Základním parametrem korozní odolnosti je stav povrchu materiálu, k jehož negativní změně může dojít nevhodným ovlivněním fyzikálního a chemického stavu povrchu. Fyzikální stav povrchu je charakterizován především jeho mikrogeometrií, tj. přítomností nečelistvostí povrchu, drsnost, vryp, stopy po broušení, trhliny atp., eventuálně přítomností částic stínících povrch rovnoměrnému přístupu korozního prostředí (štěrbín). Ke snížení korozní odolnosti materiálů může dojít během výroby hutního polotovaru, skladování, manipulace a úpravy polotovaru, stejně tak jako během dílenského zpracování, či během konečné úpravy povrchu (Bystrianský, 2005).

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem předložené práce je určení dopadu kvality obráběcího procesu na korozní vlastnosti součásti, tj. určení souboru vzorků s rozdílnými hodnotami zbytkového napětí v povrchových vrstvách vzniklých následkem obrobení s různě opotřebovaným břittem a posouzení korozní odolnosti (rychlosti koroze) daného souboru vzorků. Nežádoucí tahová zbytková napětí (vedoucí až k vzniku trhlin) zjednodušují expozici materiálu koroznímu prostředí a umožňují korozní napadení.

ZKUŠEBNÍ VZORKY

Pro měření a zkoušení byla vybrána kruhová ocelová tyč $\varnothing 35 \text{ mm}$ z oceli 11 500.0 (dle ČSN), odpovídající evropskému označení E 295. Jedná se

o středněuhlíkovou nelegovanou ocel, převážně používanou pro stavbu konstrukcí a výrobu strojních součástí, které mohou být namáhány staticky a dynamicky a u nichž není vyžadována svařitelnost,

jako jsou např. hřídele, ozubená kola, čepy, kolíky, příruby apod. Základní struktura oceli ČSN 11 500 je tvořena perlitem a feritem. Chemickým rozбором bylo zjištěno následující chemické složení:

prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
%	0,29	0,62	0,30	0,06	0,029	0,10	0,06	0,10

Zkušební vzorky byly obrobena na soustruhu a to dvěma způsoby. První způsob spočíval v obrábění tupým soustružnickým nožem bez jakéhokoli chlazení, bez používání řezných kapalin či jiného zasahování do procesu obrábění. Druhý způsob byl prováděn na identickém soustruhu a za stejných obráběcích podmínek (posuv, stejné uchycení nože, úhly, bez ovlivňování samotného procesu atd.), pouze byl použit ostrý neopotřebovaný nástroj. Deset vzorků obrobena tupým nožem bylo číselně označeno **b** (1–10), skupina deseti vzorků opracovaných ostrým nožem nese značky **a** (1–10).

MĚŘENÍ NAPĚTÍ V POVRCHOVÝCH VRSTVÁCH

Reziduální napětí v obvodových plochách zkušebních vzorků bylo měřeno na přístroji Philips X'pert Pro na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí speciálního softwaru (X'pert Data Organizer Software Suite) a porovnány s referenční databází JCPDS, která je součástí softwarového vybavení. Ve všech vzorcích tak byla realizována harmonická analýza rozšíření difrakčního profilu a byl proveden tzv. výpočet sigma σ metodou $\sin^2\psi$. Konečné výsledky měření povrchového napětí u deseti vzorků opracovaných tupým nožem a deseti vzorků opracovaných ostrým nožem byly pro zpracování této práce zaznamenány v tab. I.

I: Hodnoty zbytkového napětí obrobena součástí

použitý nástroj	označení součásti	pořadové číslo vzorku										střední hodnota	hladina spolehlivosti (95 %)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
		povrchové napětí σ_p [MPa]											
tupý	a	204	244	239	238	242	241	239	236	242	238	236	8,3
ostrý	b	197	118	120	118	126	122	124	118	120	128	129	17,2

Konkrétní měření u vzorků obrobena tupým nožem s největším a nejmenším zbytkovým napětím jsou na obr. 8 a 9.

URÝCHLENÁ KOROZNÍ ZKOUŠKA

Korozní zkoušky dávají představu o chování materiálů a povrchových vrstev v daných prostředích. Nejvhodnější metodou pro zjištění úbytku materiálu vlivem koroze je v případě této práce korozní zkouška v kondenzační komoře dle ČSN EN ISO 10289. Jedná se o laboratorní urychlenou zkoušku, kdy je vzorek vystaven vlivu kondenzující vodní páry, tj. kombinovanému vlivu tepla a vlhkosti ve zkušební komoře. Zkušební komora je hermeticky uzavřená, vyrobená z nekorodujícího materiálu (plexisklo, sklo), je opatřena vytápěním s regulací teploty a zkušební prostor je vyhříván pouze vodou na dně komory, která zaujímá 7–10 % celkového objemu komory. Zkoušený materiál je v komoře uložen tak, aby nedocházelo ke skapávání kondenzované vody na vzorky (Obr. 10).

Vzorky byly přesně zváženy a vystaveny působení vlhkosti (100 %) a tepla (40 °C) v kondenzační komoře. Po 1, 4, 7, 10 a 20 dnech expozice byla z komory vyjmuta vždy dvojice vzorků, z jejichž povrchu byly odstraněny korozní zplodiny ponořením do lázně složené z 500 ml kyseliny chlorovodíkové, 3,5 g hexamethylentetraminu a 500 ml destilované vody.

Úbytek materiálu vlivem koroze Δ byl stanoven podle vztahu:

$$\Delta = m_1 - m_2 + \Delta_s, [g] \quad (6)$$

kde: m_1 – hmotnost vzorku před korozní zkouškou [g]

m_2 – hmotnost vzorku po odstranění korozních zplodin [g]

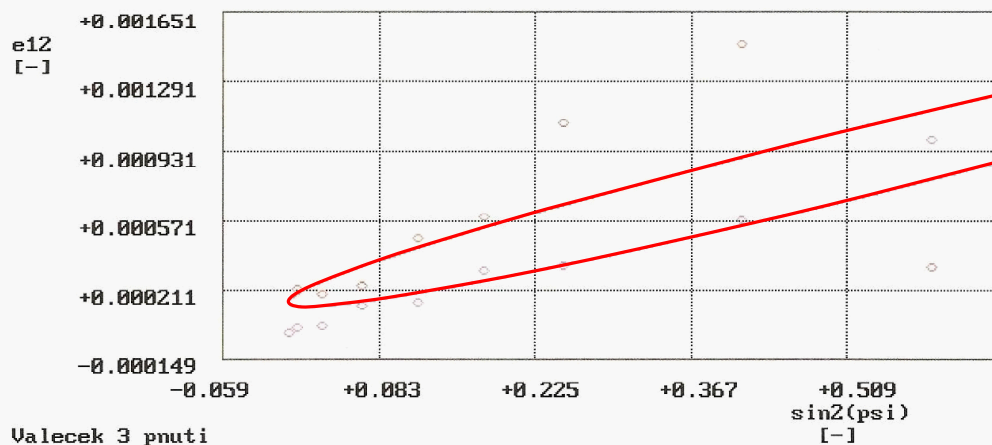
Δ_s – úbytek materiálu při slepém pokusu [g]

Jednotlivá měření hmotnostního úbytku vzorků obrobena tupým i ostrým břitem jsou uvedeny v tab. II.

VÝPOČET $\sigma(\varphi)$ METODOU $\sin^2(\psi)$

ψ	2θ	$d(\psi)$	$\Delta d)/d_0$
-50	123.61558	1.014855	+0.000329
-40	123.38975	1.015930	+0.001487
-30	123.47386	1.015529	+0.001078
-25	123.56863	1.015078	+0.000590
-20	123.59067	1.014973	+0.000479
-15	123.63753	1.014751	+0.000233
-10	123.64569	1.014712	+0.000190
-5	123.64124	1.014733	+0.000215
+0	123.68134	1.014543	0
+5	123.67660	1.014566	+0.000025
+10	123.67519	1.014572	+0.000033
+15	123.65648	1.014661	+0.000133
+20	123.65360	1.014675	+0.000148
+25	123.62359	1.014817	+0.000309
+30	123.61761	1.014845	+0.000341
+40	123.57383	1.015053	+0.000576
+50	123.49598	1.015424	+0.000996

$\sigma(\varphi) = +243.9$ [MPa] Odhad odchylky = 36.9 [MPa]
 Náklon = +14.6 [deg] Odhad odchylky = 0.1 [deg]



Valeček 3 pnutí

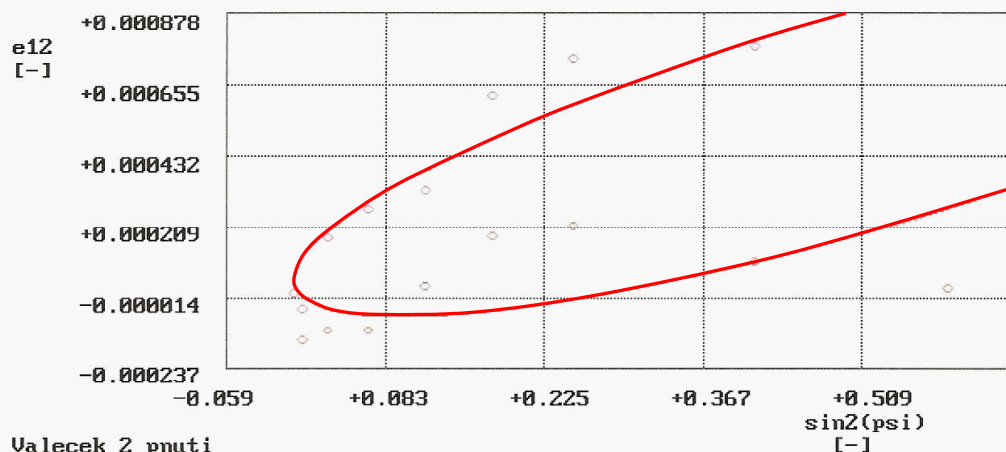
$\sigma(\varphi) = +243.9$ [MPa] Odhad odchylky = 36.9 [MPa]
 Náklon = +14.6 [deg] Odhad odchylky = 0.1 [deg]

8: Maximální hodnota tahového napětí součásti obrobené tupým nožem (vzorek 2a)

VÝPOČET $\sigma(\varphi)$ METODOU $\sin^2(\psi)$

ψ	2θ	$d(\psi)$	$\Delta(d)/d_0$
-50	123.99197	1.013077	+0.000017
-40	123.97581	1.013153	+0.000099
-30	123.95431	1.013254	+0.000211
-25	123.96099	1.013223	+0.000179
-20	123.99088	1.013082	+0.000023
-15	124.01744	1.012957	-0.000116
-10	124.01675	1.012960	-0.000113
-5	124.02258	1.012933	-0.000145
+0	123.99533	1.013061	%0
+5	124.00450	1.013018	-0.000049
+10	123.96257	1.013215	+0.000174
+15	123.94582	1.013294	+0.000263
+20	123.93456	1.013347	+0.000323
+25	123.87807	1.013613	+0.000623
+30	123.85588	1.013718	+0.000741
+40	123.84950	1.013748	+0.000776

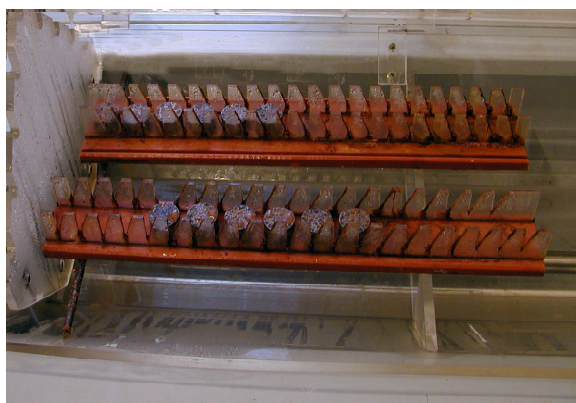
$\sigma(\varphi) = +203.9$ [MPa] Odhad odchyly= 19.4 [MPa]
 Náklon= -36.0 [deg] Odhad odchyly= 0.1 [deg]



9: Minimální hodnota tahového napětí součásti obrobené tupým nožem (vzorek 1a)



a) otevřená komora



b) s uloženými vzorky

10: Kondenzační komora

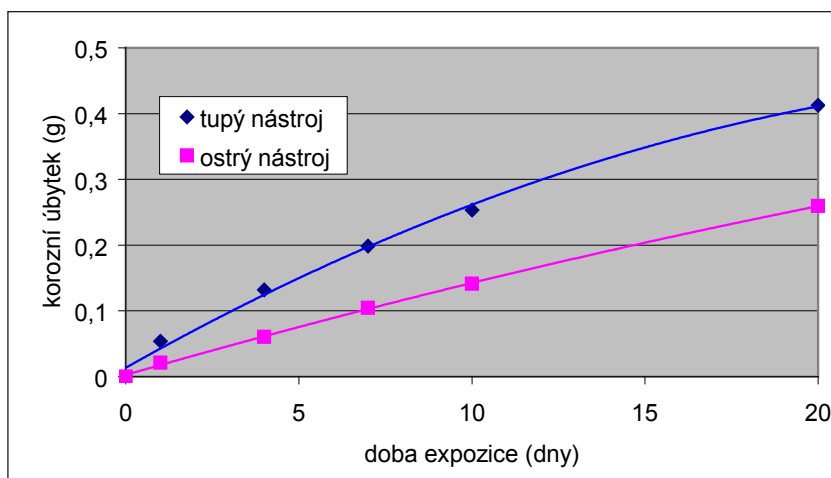
II: Hmotnostní úbytky ocelových vzorků exponovaných v kondenzační komoře [g]

obrobený vzorek		doba expozice [dny]				
		1	4	7	10	20
a	tupým nožem	0,047	0,126	0,201	0,258	0,397
		0,061	0,138	0,196	0,249	0,428
b	ostrým nožem	0,019	0,057	0,103	0,138	0,236
		0,023	0,064	0,106	0,144	0,283

VÝSLEDKY A DISKUSE

Srovnáme-li jednotlivá měření korozních úbytků, je patrné, že korozní úbytky součástí opracovaných tupým nožem jsou kvantitativně větší než korozní úbytky součástí opracovaných nožem ostrým (Obr. 11). Vzhledem k průměrné hodnotě zbytkového napětí ve vzorcích obrobených tupým nožem (240 MPa) a ostrým nožem (120 MPa) je možné, že je hmotnostní úbytek vlivem koroze a tím i korozní odolnost a rychlost koroze závislá mimo jiné na hodnotách tahového napětí v povrchových vrst-

vách součástí. Zvýšená hodnota zbytkového napětí u součástí opracovaných tupým nožem je zřejmě způsobena nerovnoměrným ohřevem součástí v průběhu zpracování a je jednou z veličin, podílejících se na celkové výsledné struktuře povrchu. Ta je jedním z nejdůležitějších kritérií jakosti výrobku, protože právě vlastnosti povrchu a materiál podmiňují životnost a spolehlivost provozu součástí. Tahová napětí prokazatelně snižují únavovou pevnost součástí. Následkem nesprávného technologického opracování tedy dochází k narušení vlastností povrchových vrstev.



11: Akcelerace i postup koroze při různých hladinách zbytkového napětí vneseného do povrchové vrstvy při obrábění

Měření závislosti korozní odolnosti a zbytkového napětí vzniklého vlivem obrábění v povrchových vrstvách nebylo, pokud je známo, publikováno a je tak otázkou, do jaké míry jsou výsledky provedených měření relevantní vzhledem k absenci možnosti porovnání výsledků s jinými autory. Při procesu obrábění tupým břitem bývá důsledkem velmi vysokého tření a vysoké teploty na styčných plochách součásti

a nože nejen zvýšené zbytkové napětí v povrchových vrstvách obrobku, ale také vznik štěrbin a mikrotřlin, které mají negativní dopad na celkovou rychlost koroze. Procesy obrábění by měly být vždy voleny tak, aby byly splněny požadované hodnoty obrobeného povrchu součásti a zachována jeho jakost v maximální míře.

SOUHRN

Na základě vyhodnocených výsledků, které byly získány výše popsány metodami, lze konstatovat sníženou korozní odolnost vzorků, které byly opracovány tupým soustružnickým nožem. Je zřejmé, že tupý soustružnický nůž způsobuje větší nerovnoměrný ohřev zpracovávaného materiálu, trhá povrchové vrstvy v daleko větší míře než nůž ostrý. Tím v materiálu vytváří vyšší tahové povrchové napětí než při obrábění ostrým nožem.

Elastická napětí i deformace kovu mění zřetelně elektroodvový potenciál v rozsahu ve větší míře, než se předpokládalo (Bartoníček a kol.). Vliv stop po pracovním nástroji se odráží v hodnotě potenciálů v těchto často mikroskopických vrubech. V nich se potenciál kovu blíží k méně ušlechtilým hodnotám. Zjištěná zbytková tahová napětí urychlují korozi i porušováním povrchových filmů při relaxaci zmíněného napětí I., II., ale i III. druhu.

Výsledkem měření je fakt, že vzorky obrobené tupým nástrojem vykazují v povrchových vrstvách vyšší zbytková napětí a z důvodu vyšší energetické hladiny tak korodují rychleji než vzorky opracované za stejných podmínek nožem ostrým, takže vliv napětí na kinetiku korozního děje je třeba hledat v ovlivnění frekvenčního faktoru v Arrheniově rovnici pro stanovení korozní rychlosti. Počet aktivních míst je zřejmě v mřížce kovu za napětí podstatně vyšší a korozní napadení je nutné chápat jako rozvoj četných ložisek místního korozního napadení, které akceleruje ze stop po nástroji – vrubů, kterých povrch absorboval napětí s odlišnou úrovní. Vzhledem k této skutečnosti je nutné dbát na podmínky řezného procesu v praxi a v rámci zachování kvality obrobených součástí zajišťovat co nejlepší podmínky pro výrobní proces. Pro detailní popis závislosti kvality řezného procesu a jeho vlivu na vlastnosti povrchové vrstvy by byla nutná realizace velkého množství experimentů nezbytných pro podchycení všech možných vlivů řezného procesu z hlediska vzniku mikrovrubu (frézování, hoblování, broušení, protahování, řezání, apod.) na korozní degradaci v důsledku kumulace napětí a tedy iniciačního místa pro rychlejší přechod iontů kovu do roztoku právě vlivem zvýšení hodnoty frekvenčního faktoru.

SUMMARY

Obtained results verify the fact that corrosion resistance of the samples machined by the blunt turning tool is reduced. It is obvious that the blunt turning tool creates unbalanced heating of the machined material. Comparison of machining with the blunt and sharp turning tool also shows more intensive surface material picking up in case of blunt tool. Blunt tool machining thus produces much higher surface tensile stressing.

Elastic stresses and strains, which are present in the metals, considerably change the electrode potential. This change is more intensive than it was previously supposed (Bartoníček et al.). The marks created by machining tools (which have often the form of micro-notches) influence the value of above mentioned potentials. The metal potential in these locations approaches the value of less-grade metals. Detected residual tensile stresses also increase the corrosion rate by damaging the surface layers. This damage occurs during stress relaxation (stress I, II, and III).

The performed experiments have shown that the samples machined by the blunt tool exhibit higher surface residual stresses. The corrosion rate is increased (in comparison with samples machined by the sharp tool) due to higher energy level. Influence of stresses on the kinetics of corrosion process can be accounted to the influence of frequency factor in Arrhenius equation for determination of corrosion rate. The number of active centers is increased in the stressed metal lattice and the corrosion attack is thus evoked by development of numerous local corrosion attacks. The corrosion originates in the marks (notches) created by the tool, where the stresses of different values have been absorbed. Thus the conditions of the machining technology must be controlled and kept in order to achieve a good results of production process. The detailed description of the machining process quality dependence and its influence on the properties of the surface layer is conditioned by performing of huge amount of experiments. These experiments must be performed in order to register all different influences evoking the creation of micro-notches during machining (milling, planing, grinding, broaching, cutting etc.). They are also required for determination of corrosion degradation as an effect

of stress accumulation. The places of this accumulation are the initiation points for the faster ion transition from metal to solution. The transition is induced by increasing of frequency factor value.

LITERATURA

- BOJKO, M., KOUŘIL, M., 2004: Vplyv stavu povrchu a obsahu chloridov na korózne chovanie korozivzdorných ocelí v betóne, In Sborník Korozie a protikorozi ochrana kovů [online]; dostupné na internetu: <www.vscht.cz/net/aki/konferen/2004/index/aki2004-index.pdf
- BUMBÁLEK, B., OŠŤÁDAL, B., FILIP, M., SVOBODA, E., 1985: Typologie povrchu vyrobených různými metodami obrábění, VÚ 070 Brno
- BYSTRIANSKÝ, J., 2005: Příčiny snížené korozní odolnosti korozivzdorných ocelí a slitin, Korozie 3/2005, Praha
- ČSN EN 10020, Definice a rozdělení ocelí, 2001
- ČSN EN ISO 10289, Metody korozních zkoušek kovových a jiných anorganických povlaků na kovových podkladech – Hodnocení vzorků a výrobků podrobených korozním zkouškám, 2001
- FIALA, F., CHRÁST, V., 1983: Strojírenská technologie II., SPN, Praha
- HRSTKA, J., MÍŠEK, B., 1973: Korozie a povrchová úprava kovů, VUT, Brno
- KOCMAN, K., PROKOP, J., 2001: Technologie obrábění, CERM, Brno, ISBN 80-214-1996-2
- KRAUS, I., 1982: Difrakční metody určení zbytkových napětí v polykrystalických kovových materiálech, acta polytechnica ČVUT, Praha
- LEINVERBER, J., VÁVRA, P., 2003: Strojnické tabulky, ALBRA, Praha, ISBN 80-86490-74-2
- MÁDL, J., 1989: Teorie obrábění, ČVUT, Praha
- MOUKA, E., BUMBÁLEK, B., HLOUŠEK, J., CHLADIL, J., VAČKÁŘ, J., 1980: Teorie obrábění, SNTL, Praha
- NOVÁK, P., BYSTRIANSKÝ, J., 2003: Korozie kovových materiálů, ÚKMKI VŠCHT, Praha
- POTÁCEL, V., 2003: Disertační práce: Technologické aspekty struktury povrchu při dokončovacím obrábění, VUT, Brno
- RACL, J., 1998: Diplomová práce: Vliv tepelného zpracování na pnutí v povrchových vrstvách, AF MZLU, Brno

Adresa

Doc. Ing. Michal Černý, CSc., Doc. Ing. Josef Filípek, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika