

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Odbor technologie obrábění

Ing. Oskar Zemčík

**ZMĚNA VLASTNOSTÍ OBĚŽNÝCH DRAH VALIVÝCH
LOŽISEK PO APLIKACI VÁLEČKOVÁNÍ**

**CHANGE OF PROPERTIES OF ANTIFRICTION BEARING
ORBITS AS A RESULT OF ROLLER BURNISHING
APPLICATION**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Strojírenská technologie

Školitel: Prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.

Oponenti: Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

Doc. Ing. Imrich Lukovics, CSc.

Doc. Dr. Ing. Ivan Kuric

Datum obhajoby: 9. 4. 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

simulace, válečkování, povrchová vrstva, zušlechťená ocel, metoda konečných prvků, drsnost povrchu, napětí, fázové transformace

KEYWORDS

simulation, roller burnishing, surface layer, heat treated steel, finite element analysis, bearing, surface roughness, stress, phase transformations

Práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně.

OBSAH

OBSAH	3
1 ÚVOD	5
2 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY	6
2.1 Výroba kroužků ložiska, stav povrchové vrstvy po broušení	6
2.2 Kontaktní a únavové porušení kroužku ložiska.....	7
2.3 Zbytková napětí v povrchové vrstvě a jejich měření.....	8
2.4 Metody měření zbytkových napětí.....	9
2.5 Vliv válečkování na životnost dynamicky namáhaných součástí	11
3 CÍL PRÁCE A VOLBA METOD ŘEŠENÍ	13
3.1 Volba vzorků a stanovení technologických podmínek opracování jednotlivých vzorků.....	14
3.2 Simulace procesu válečkování s využitím metody konečných prvků.....	15
4. POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ METODY A VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE S VYHODNOCENÍM NOVÝCH POZNATKŮ	18
4.1 Měření drsnosti.....	18
4.2 Měření napětí a určení množství zbytkového austenitu v povrchové vrstvě.....	19
4.3 Měření napětí odvrťovací tenzometrickou metodou.....	21
4.4 Struktura povrchové vrstvy.....	24
4.5 Realizace výsledků v praxi a pro další rozvoj vědního oboru.....	26
5 ZÁVĚR.....	27
6 SUMMARY	29
POUŽITÁ LITERATURA.....	33
SEZNAM PUBLIKACÍ.....	35
CURRICULUM VITAE.....	36

1 ÚVOD

Valivá ložiska jsou součástí velké části strojů a zařízení. Největší podíl najdeme v automobilovém průmyslu, u dopravních strojů, obráběcích strojů, v letecké technice atd.. Vzhledem k rozsáhlosti použití valivých ložisek, hraje otázka zvýšení jejich životnosti značnou úlohu v mnoha oblastech průmyslu. Každé ložisko je vždy součástí často složitějšího montážního celku a jeho případná výměna je velmi pracná a tím i nákladná.

Tato práce si klade za cíl přispět k možnému zvýšení užitečných vlastností valivých ložisek a to především zkoumáním využití válečkování (někdy též označovaného jako statické kuličkování) zušlechťeného materiálu kroužků valivých ložisek.

Pro vlastní testy byly poskytnuty vzorky dvou typů ložisek, a to PLC 46-8-2 a N206 firmou ZKL VUVL, a.s. Brno. Jedná se o válečková ložiska o velikosti vnějšího průměru 90, respektive 62mm určená pro provozní otáčky 8650 ot/min. Jedním z podnětů k této práci bylo dosažení o 50% vyšší životnosti při testu základní dynamické únosnosti, který byl proveden jak u klasicky vyrobených, tak u válečkovaných ložisek, přičemž testování bylo ukončeno, aniž by u válečkovaných ložisek došlo k poškození.

2 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY

2.1 Výroba kroužků ložiska, stav povrchové vrstvy po broušení

Operace používané ke zhotovení kroužku ložiska (resp. jeho oběžné dráhy) lze rozdělit na několik částí. V první části je vytvořen základní tvar kroužku např. soustružením či tvářením, dále následuje tepelné zpracování (kalení a popouštění), po něm pak broušení (tato operace bývá dělena na broušení na hrubo, s případným dalším tepelným zpracováním /umělým stárnutím/, a na broušení na hotovo) a dokončování (např. superfinišování).

Z hlediska ovlivnění kvality oběžné dráhy kroužku ložiska jsou rozhodující především dokončovací operace, v našem případě broušení a superfinišování. Vložená operace umělého stárnutí je používána namísto stárnutí přirozeného, v délce dvou měsíců, jež má za úkol zajistit rozpad zbytkového austenitu a tím i následnou požadovanou rozměrovou stálost kroužku ložiska. Rozhodující operací, která má za následek největší tepelné ovlivnění povrchové vrstvy, je zde ovšem broušení.

Změna vlastností výchozího materiálu povrchové vrstvy při broušení je způsobena mechanickým a zejména tepelným zatěžováním povrchové vrstvy. Měrný řezný odpor při broušení dosahuje velikosti od 9000 do 25000 MPa a teplota v místě styku převyšuje teplotu tavení materiálu. Povrchová vrstva obrobku je po broušení do jisté míry v nestabilním stavu. U zakalených ocelí je nestabilní strukturou martenzit a u nezakalených ocelí způsobuje zpevnění základní struktury snížení její stability. Vlivem snahy nestabilní struktury přejít do stabilnějšího stavu dochází ke strukturním změnám již při poměrně nízkých teplotách (200-400° C).

Na stavu a vlastnostech povrchové vrstvy závisí zejména mez únavy součásti a tím její funkční životnost. Na povrchu součásti je po broušení velký počet různých zdrojů koncentrace napětí (rysky po broušení, trhlínky), je porušena celistvost krystalických zrn a především za provozu součásti jsou v její povrchové vrstvě maximální napětí od vnějších sil při namáhání v krutu nebo ohybu.

2.2 Kontaktní a únavové porušení kroužku ložiska

Kontaktní a únavové porušení má pro životnost valivých ložisek velký význam. Tento údaj nejlépe dokumentuje fakt, že asi 80% ložisek se vyřazuje právě z důvodů kontaktního poškození, ať již valivých drah, nebo i valivých členů. K únavovému jevu v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek dochází vlivem silového, cyklicky se opakujícím styku dvou těles se zakřivenými styčnými plochami. Dochází zde k vysokému tlakovému zatížení, které značně mění v krátkém časovém intervalu, svou velikost. Vlivem skluzu a tření se k tomuto namáhání přidávají tahové a smykové složky, které rovněž přispívají k rozvoji únavového porušení. K vlastnímu opotřebení ložisek dochází ve formě tzv. pittingů na kroužku ložiska

Předpokládané možnosti na vznik únavového poškození na součástech valivých ložisek pittingem lze shrnout do několika bodů:

a) Povrchový původ poruchy

- povrchové mikrotrhliny
- existence velkých, křehkých vměstků
- shluky vměstků
- nízká kvalita materiálu
- nevhodná zbytková napětí
- vysoká drsnost povrchu
- nízká viskozita maziva
- klasická únava materiálu v povrchových vrstvách.

b) Podpovrchový původ poruchy:

- přítomnost koncentrátorů napětí
- nevhodná zbytková napětí
- klasická únava materiálu.

Souhrnně lze říci, že většina únavových poškození u valivých ložisek (za podmínek kontaktního cyklického namáhání) je výsledkem vzájemného působení několika různých druhů poškození, která vznikají a šíří se v různém rozsahu.

2.3 Zbytková napětí v povrchové vrstvě a jejich měření

Pro dosažení dobré funkce a životnosti součásti je tedy potřeba dodržet následující parametry obráběné plochy:

- tolerance rozměru
- tolerance geometrického tvaru
- drsnost povrchu
- ostatní vlastnosti povrchové vrstvy

V našem případě se zaměříme na zbytková napětí v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek.

Bylo prokázáno, že zbytková napětí po broušení více nebo méně, podle druhu materiálu, jeho tepelného zpracování a podle použitých technologických podmínek a způsobů broušení, zvyšují nebo snižují trvanlivost, dynamickou únosnost, pevnost, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení, rozměrovou stálost součástí a rozpad zbytkového austenitu. Z těchto hledisek lze jako příznivější označit zbytková napětí tlaková.

Podle toho, v jak velkém objemu dosahují zbytková napětí rovnováhy, jsou rozdělována na:

- zbytková napětí I. druhu (makroskopická),
- zbytkové napětí II. druhu (mikroskopická),
- zbytková napětí III. druhu (submikroskopická).

Zbytková napětí I. druhu dosahují rovnováhy až v celém makroobjemu zkoumaného vzorku. Vznikají při nestejném tváření, tepelném zpracování, obrábění a atd.. Vyskytují-li se tato napětí v součásti, pak po odebrání vrstvy materiálu z jejího povrchu dojde k porušení rovnováhy zbytkových napětí a součást se deformuje. Na tomto principu je založena většina měřících metod pro jejich zjišťování.

Zbytková napětí II. druhu jsou v rovnováze v mikroskopických objemech materiálu srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalů, takže jejich výslednice

v makroskopické oblasti je nulová. Vznikají při tváření za studena, při tuhnutí, při proměnném zatížení, při změně teploty a podobně.

Zbytková napětí III. druhu jsou v rovnováze v mikroskopických oblastech vzorku, srovnatelných s velikostí elementární buňky. Jsou způsobena poruchami krystalové mřížky, přítomností cizích atomů, vakancí, dislokací atd..

Zbytková napětí II. a III. druhu nezpůsobují změnu tvaru součásti, mají však značný vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu.

Všechny tři druhy zbytkových napětí se vyskytují zpravidla současně, předpokládá se však že největší vliv na kvalitu povrchové vrstvy obrobku budou mít především zbytková napětí I. druhu.

Zbytková napětí po broušení lze zjistit u většiny broušených materiálů. Podle použitých řezných podmínek a také podle způsobu broušení mohou být v povrchových vrstvách broušených součástí zbytková napětí v širokých mezích, od vysokých napětí v tahu až ke značným napětím tlakovým.

Pro podrobnější hodnocení a pro porovnání výsledků měření zbytkových napětí je vhodné sledovat u grafů znázorňujících jejich průběh tyto tři klíčové hodnoty:

- velikost zbytkového napětí co nejbliže povrchu;
- velikost maximálního zbytkového napětí (pokud pod povrchem je) a jeho hloubku;
- hloubku pod povrchem, ve které se zbytkové napětí rovná nule.

Uvedená hlediska jsou rozhodující pro posouzení broušených součástí jak vzhledem k jejich funkčnímu použití, tak také naopak, pro porovnání či stanovení vhodných technologických podmínek a způsobů broušení.

2.4 Metody měření zbytkových napětí

Vývoj v poznání zbytkových napětí byl především závislý na vývoji přesných měřicích technik používaných k jejich zjišťování. Byla vyvinuta celá řada způsobů pro měření zbytkových napětí, avšak všechny jsou poměrně zdlouhavé a náročné,

jak na měřicí techniku, tak i na měřicí zařízení. Používané metody lze v podstatě rozdělit na:

- nepřímé (změny magnetických vlastností, tvrdosti atd.)
- mechanické
- rentgenografické.

V našem případě bylo využito metody mechanické (v případě tenzometrické odvrtávací metody) a rentgenografické. Princip mechanické metody spočívá v záměrném porušení ustavené rovnováhy, kdy zbytkové napětí určíme na základě deformace zkušebního vzorku, která vznikne po postupném odebírání jeho povrchové vrstvy. Velikost této deformace je pak úměrná napětí, které bylo v odebrané vrstvě. Hlavní nevýhodou této metody je, že určuje pouze napětí I. druhu a že velikosti napětí jsou hodnotami průměrnými, po celém objemu odebírané vrstvy. Má-li zbytkové napětí vysoký gradient, vycházejí rozdílné hodnoty podle toho, jak velká tloušťka vrstvy je zvolena. Čím je tento interval menší, tím jsou hodnoty a údaje o průběhu napětí přesnější. Další nevýhodou mechanické metody je její destruktivní charakter měření. Výhodou mechanického způsobu je naopak možnost určování napětí i u materiálů, kde jiná např. rentgenografická metoda selhává a při pečlivém provedení měření je oproti ostatním metodám přesnější a rychlejší.

Rentgenografická metoda pro měření zbytkových napětí využívá difrakce svazku rentgenových paprsků k přesnému určení vzájemných vzdáleností atomových mřížkových rovin a jejich relativních změn.

Metoda určuje napětí pouze v malé oblasti dané velikostí ozářené plochy vzorku a hloubkou průniku rentgenových paprsků do materiálu. Měření se provádí v povrchové vrstvě tloušťky několika setin milimetru. Tuto metodu lze použít pouze pro krystalické látky.

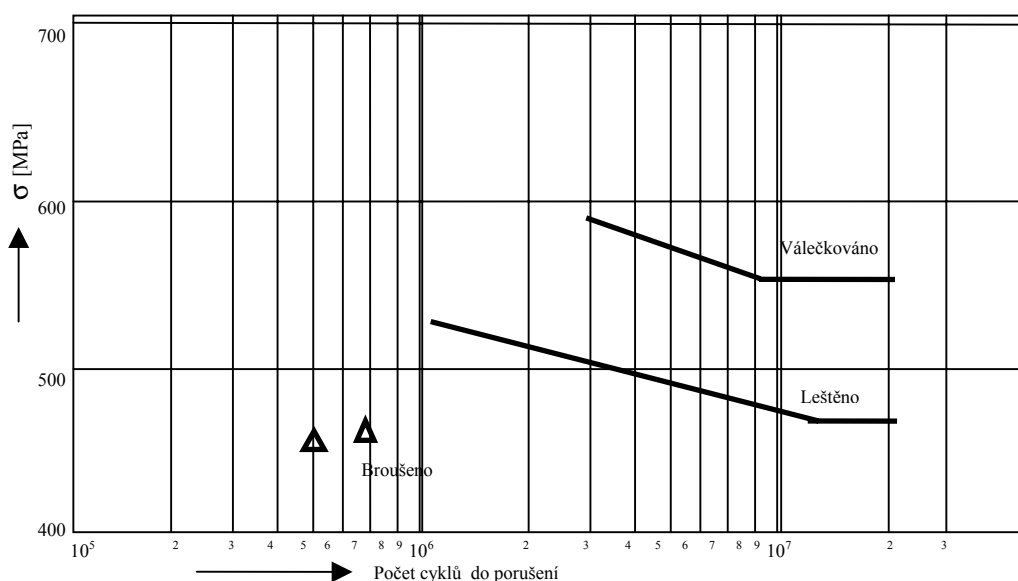
Velikost napětí zjistíme porovnáním mřížkových deformací, určených ze změn difrakčního úhlu rentgenového paprsku, s deformacemi, které se při daném stavu napjatosti dají očekávat podle teorie elasticity.

Při vyhodnocení je rovněž potřeba brát v úvahu, že v měření jsou zastoupena pouze vhodně orientovaná zrna materiálu jednoho typu (nejlépe převládajícího) krystalické mřížky.

2.5 Vliv válečkování na životnost dynamicky namáhaných součástí

Obdobně jako v případě obrušování součástí v bubnech neeliminuje tato metoda celkové zbytkové napětí vyvolané broušením, ale způsobuje tlaková napětí pomocí zplastizování povrchové vrstvy. Tlaková pnutí na povrchu válečkované plochy zbrzdí rozvoj trhlin a eliminují vliv mikrovrubů.

Nárůst odolnosti materiálu proti únavovému porušení je nejlépe patrný na obrázku 2.



Obr.2 Logaritmická závislost Wöhlerovy křivky pro různě povrchově upravené zkušební tyče.[11]

Na uvedeném grafu zřetelně vidíme nárůst schopnosti součástí odolávat dynamickému namáhání za pomoci vytvoření tlakového pnutí v povrchové vrstvě bránícího vzniku zárodku únavového lomu.

Válečkování (někdy též označované jako statické kuličkování) nám umožňuje zvýšení parametrů hned u několika vlastností povrchové vrstvy. Kromě pozitivního ovlivnění pnutí v povrchové vrstvě, dochází rovněž k nezanedbatelnému zlepšení drsnosti povrchu, jeho únosnosti a v neposlední řadě ke zlepšení tvarové přesnosti.

Výsledné parametry válečkování povrchu potom závisí na několika faktorech:

- velikost tlaku na válečkovací nástroj
- výchozí drsnost plochy a tvar mikronerovností
- mechanické vlastnosti válečkování materiálu
- tvar a jakost povrchu válečkovacího nástroje
- pracovní posuv válečkovacího nástroje

3 Cíl práce a volba metod řešení

Cílem práce je zhodnocení změn v povrchové vrstvě zušlechťeného ložiskového materiálu zpracovaného podle technologického postupu využívaného při výrobě valivých ložisek, v kombinaci s válečkováním. To v případě kaleného a nízko popuštěného materiálu působí odlišně oproti klasickému nezušlechťenému materiálu. Značné rozdíly lze očekávat jak v případě drsnosti povrchu a změny tvarové přesnosti, tak, a to především, u deformace a vneseného vnitřního pnutí. Získané poznatky přispějí k vytvoření výrobního postupu kroužku ložiska zaručujícího zvýšení jeho životnosti a tím i předpokládané zvýšení životnosti celého ložiska. Za tímto účelem je vlastní práce rozdělena na několik dílčích úkolů.

První část se zabývá návrhem vzorků a nástrojů použitých při praktických experimentech. Její součástí je i volba potřebných technologických parametrů tak, aby se co nejvíce blížily podmínkám při výrobě testovaného kroužku ložiska a byla zajištěna možnost provedení požadovaných měření.

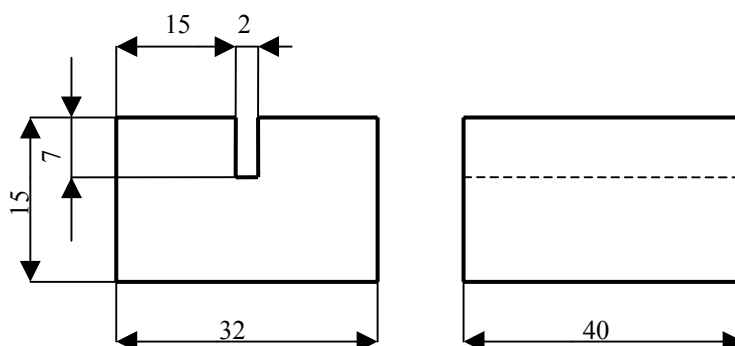
V druhé části byla provedena teoretická analýza procesu válečkování s využitím metody konečných prvků. Tato část nám umožní získat obecnou představu o některých jevech probíhajících při válečkování námi vytvořených vzorků.

V další části je kladen důraz na určení stavu ložiskového materiálu po a před válečkováním, zjištění vlivu válečkování na broušený ložiskový materiál v zušlechťeném stavu, jak s vhodnými, tak případnými nežádoucími vlastnostmi. Kromě struktury povrchové vrstvy a jejích změn byla věnována pozornost především zjišťování stavu napjatosti. Jako doplňkové měření byla rovněž provedena kontrola drsnosti povrchu v jednotlivých částech výrobního (resp. experimentálního) procesu.

Ze zjištěných dat pak doplněním a porovnáním údajů z jednotlivých měření bylo provedeno konečné zhodnocení získaných poznatků.

3.1 Volba vzorků a stanovení technologických podmínek opracování jednotlivých vzorků

Pro experimentální účely bylo potřeba navrhnout dva odlišné tvary vzorků. První z nich představuje segment kroužku ložiska, druhým typem byly vzorky vyrobené z dodaného materiálu 14 109.3, které jsou navrženy s ohledem na plánované experimenty, tj. tak aby umožnily snadné provedení opakovaných měření na co největším počtu testovaných způsobů zpracování vzorku (viz následující obrázek).



Obr. 3 Navržené vzorky pro experimentální měření vnitřního pnutí.

Uvedené vzorky byly vytvořeny z materiálu 14 109.4, který byl zpracován stejným způsobem jako zkoumaná ložiska, tj. zakalen a popuštěn na nízkou teplotu. Austenitizační teplota 840 ± 10 °C, popouštění $160^\circ\text{C}/2\text{h}$. Dosažená tvrdost činí 60 až 63HRC (v našem případě 63).

Vzorky byly vyfrézovány z dodaného polotovaru oceli 14109.3 do odpovídajícího tvaru. Funkční plochy určené ke kuličkování byly v souladu s technologickým postupem kroužku ložiska broušeny na hrubo, uměle vystárnuty a následně broušeny na jemno. Použité řezné podmínky byly voleny rovněž se zřetelem na technologický postup kroužku ložiska.

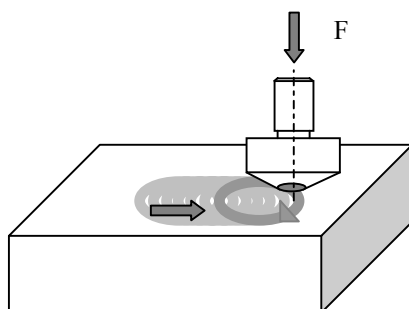
Z hlediska dostupnosti byla k vlastním testům válečkování použita kulička ze slinutého karbidu o průměru 7mm. Vzhledem k potřebě válečkování podélné rovinné plochy, bude válečkovací přípravek využíván na stolní frézce. Pro testy je

potřeba zajistit přitlačení kuličky konstantní nastavitelnou silou v rozsahu od 100 do 2500N. Mazání řezným olejem, pro snížení koeficientu tření mezi kuličkou ze slinutého karbidu a vzorkem z ložiskového materiálu, bude zajištěno externě.

3.2 Simulace procesu válečkování s využitím metody konečných prvků

Pro vlastní výpočet byl použit program ANSYS ve verzi 5.5.1 vyhovující jak svými technickými možnostmi tak dostupností.

Před vlastním navržením zkoumaného modelu je potřeba určit si zjednodušující podmínky. Budeme vycházet ze skutečného modelu použitého při experimentu.



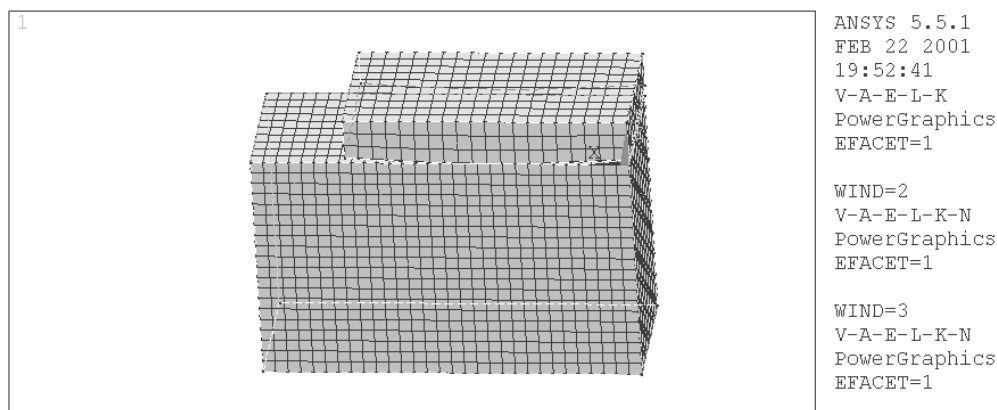
Obr. 4 Model experimentu válečkování kalené ložiskové oceli.

V případě válečkovacího nástroje použijeme jako zjednodušující předpoklad absolutně tuhé těleso. V našem případě tuto skutečnost nahradíme několikanásobně větší tuhostí tělesa tj. použijeme modul pružnosti $E_X=21 \cdot 10^7 \text{MPa}$. Materiál vzorku definujeme jako plastický pomocí závislosti napětí na poměrné deformaci (σ - ϵ). Modul pružnosti pro ocel $E_X=2,1 \cdot 10^5 \text{MPa}$. Mez pevnosti pro použitou kalenou ložiskovou ocel (63HRC) $R_m=2610 \text{MPa}$, mez úměrnosti $R_{p02}=2180 \text{MPa}$.

Během procesu kuličkování bude použito řezného oleje ke snížení koeficientu tření mezi nástrojem a vzorkem. Odpovídající velikost koeficientu tření v tomto případě činí přibližně $\mu=0,05$ (jedná se o označení přejaté z programu Ansys).

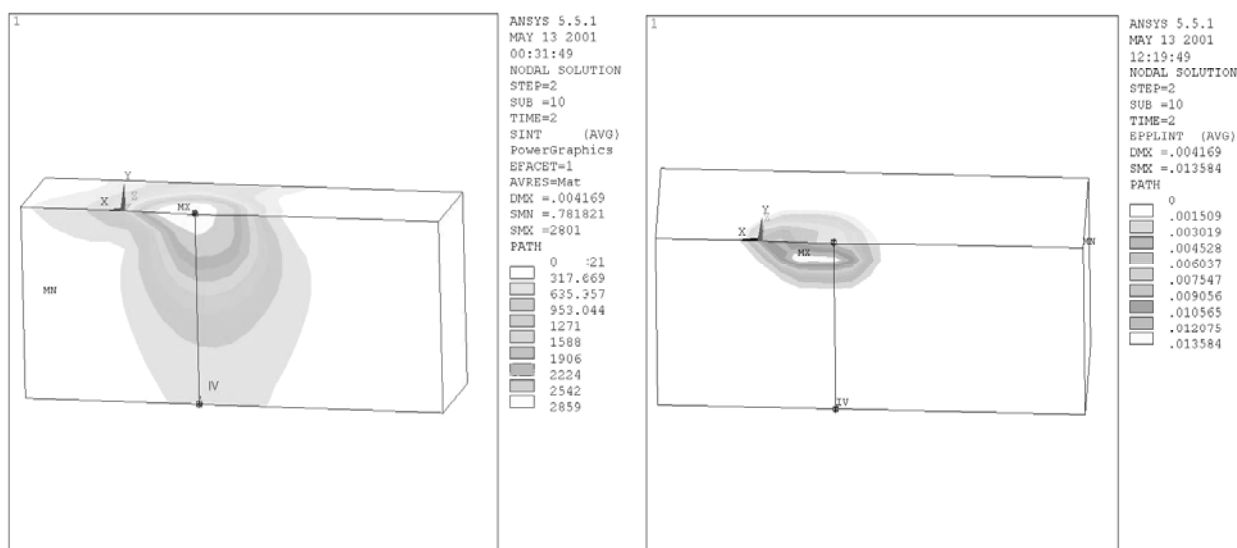
Abychom dosáhli přijatelné doby výpočtu a zároveň zajistili co nejdetailnější výsledky v těsné vzdálenosti pod povrchem použijeme pouze výseče válečkovacího

nástroje a vzorku. V případě válečkovacího nástroje o výšce 0,1 a šířce 0,6mm a o výšce 0,5mm a šířce 0,7mm u vzorku.

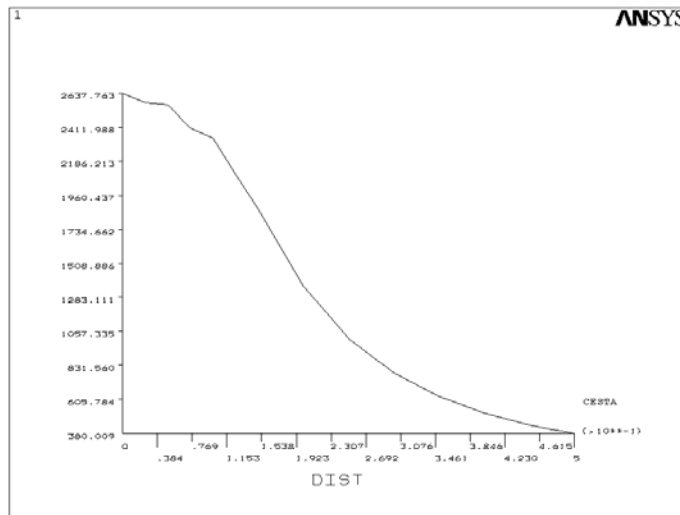


Obr 5 Navržený 3D model experimentu

Výsledkem simulace byly teoretické hodnoty rozložení napětí a deformace, včetně šířky stopy vytlačené nástrojem a hloubky vtlačení nástroje do materiálu, v testovaném vzorku během operace válečkování. Tyto hodnoty přispěly ke stanovení potřebných parametrů experimentálních prací a napomohly k pochopení zkoumaného děje (viz následující obrázky).



Obr. 6 3D simulace válečkování s výrazným vlivem tření redukované napětí SINT (vlevo) intenzita plastického přetvoření EPPLINT (vpravo), hloubka vtlačení 0,004mm, délka dráhy 0,2mm



Obr. 7 Simulace válečkování s výrazným vlivem tření redukované napětí SINT v řezu IV, hloubka vtlačení 0,004mm, délka dráhy 0,2mm

4. POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ METODY A VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE S VYHODNOCENÍM NOVÝCH POZNATKŮ

4.1 Měření drsnosti

Během experimentálních prací byla provedena měření sloužící pro doplnění informací o vlastnostech povrchové vrstvy vzorku. Mezi ně patří i měření drsnosti. Tato charakteristika povrchu má u součástí namáhaných střídavým napětím značný význam. Může zde působit jako vrub a tím přispět k vytvoření únavové trhlinky, jako počátku pittingu v povrchové vrstvě oběžné dráhy kroužku ložiska. Byla provedena měření jak frézovaného tak broušeného na hrubo, na jemno a v závěru válečkovaného povrchu. Jednotlivé vzorky byly zpracovány s rozdílnými řeznými rychlostmi či postupně se otupujícím kotoučem (v případě broušení), a s rozdílnou velikostí přitlačné síly případně velikostí posuvu na otáčku (v případě válečkování). Jako poslední pak bylo provedeno měření na vícenásobně válečkovaných vzorcích.

Po aplikaci válečkování došlo k výraznému zlepšení drsnosti povrchu, kdy rozdíl střední aritmetické drsnosti a maximální výšky nerovností byl i více než šestinásobný (z 1,6 na 0,2Ra). Ze získaných grafů byla rovněž patrná malá závislost výsledné drsnosti na původním stavu. Bylo rovněž patrné zhoršení drsnosti povrchu s rostoucí přitlačnou silou. A to až několikanásobně. Tento výsledek přímo souvisí s hloubkou vtlačení kuličky a velikostí plastické deformace. Zhoršení drsnosti povrchu bylo dobře patrné také v případě zvýšení velikosti posuvu. U většiny testovaných vzorků došlo po opakované aplikaci válečkování k mírnému zlepšení drsnosti povrchu a to především při použití menší přitlačné síly. Srovnáním s předcházejícími měřeními dojdeme k závěru, že efekt je obdobný jako v případě snížení hodnoty posuvu na otáčku a jeho aplikace je vhodná především v případě nižší hodnoty přitlačné síly. Nezanedbatelným faktorem je rovněž zlepšení velikosti nosného podílu profilu povrchové vrstvy.

4.2 Měření napětí a určení množství zbytkového austenitu v povrchové vrstvě

Obě tato měření byla prováděna na stejném rentgenografickém zařízení (Siemens D500) metodou rentgenové tenzometrie. Ke zpracování naměřených údajů sloužil jednoduchý program vytvořený autorem v jazyku Delphi (Graficky a objektově orientovaná verze jazyka Pascal).

Při stanovení procentuálního podílu austenitu tedy Fe_γ bylo dosaženo přesnosti $\pm 1\%$ (z celkového objemu materiálu). Hloubka pronikání rentgenových paprsků, a tím i hloubka měřené povrchové vrstvy činila přibližně $40\mu\text{m}$. Ozařována byla plocha $10 \times 15\text{mm}$.

Měření byla provedena obdobně jako v případě měření drsnosti mezi jednotlivými experimentálními kroky, navíc i na kroužcích testovaných ložisek.

V případě vzorků ložisek bylo naměřeno tlakové napětí v rozsahu 200-400 MPa.

Vlastní měření byla provedena nejprve u broušeného povrchu. Z provedených měření byl jasně patrný nárůst kladných, a tedy nežádoucích tahových, pnutí s rostoucí hodnotou řezné rychlosti. Tento jev může souviset s množstvím vneseného tepla a deformací v oblasti materiálu v místě řezu.

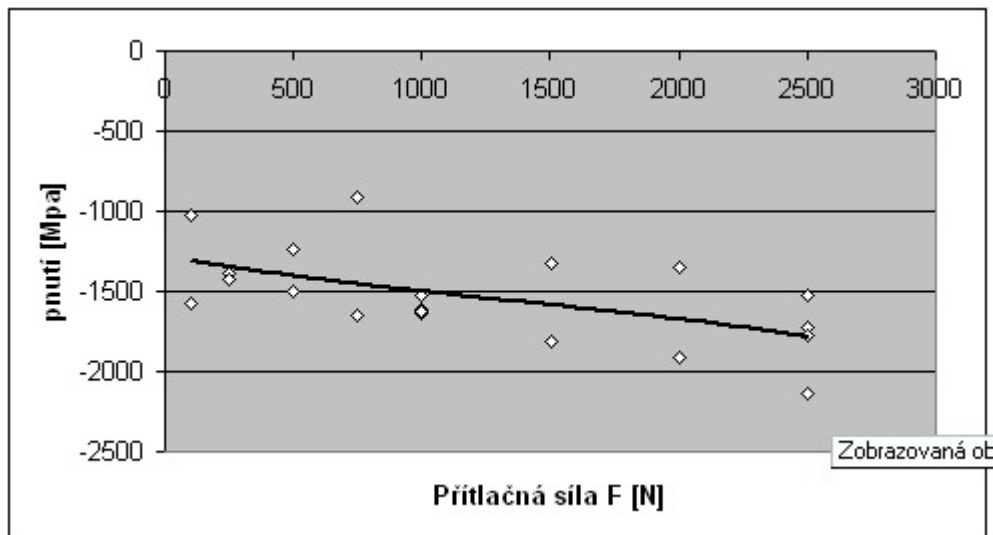
Závislost obsahu zbytkového austenitu na řezné rychlosti, kterou jsme získali s pomocí spektrální analýzy na odpovídajících místech vzorků, koresponduje s měřením vnitřního pnutí tj. byly naměřeny hodnoty množství zbytkového austenitu vyšší u vyšších řezných rychlostí.

V případě válečkovaného povrchu byly mezi zkoumanými závislostmi: závislost vnitřního pnutí a podílu zbytkového austenitu na přítláčné síle, posuvu a vícenásobném válečkování a rovněž závislost mezi velikostí vnitřního pnutí a množstvím zbytkového austenitu v materiálu vzorku.

V případě zkoumání vlivu velikosti posuvu na velikost pnutí a množství zbytkového austenitu se nepodařilo nalézt zřetelnou závislost. S výjimkou jednoho měření, došlo k rozpadu zbytkového austenitu pod hranici měřitelnost použitým

zařízení tj. pod 0,5%. Všechny hodnoty vnitřního pnutí se rovněž pohybují výrazně v oblasti tlakových pnutí.

Dalším zkoumaným vlivem byla závislost stavu povrchové vrstvy na velikosti přitlačné síly válečkovacího nástroje.



Obr. 8 Graf závislosti výsledného vnitřního pnutí na velikosti přitlačné síly

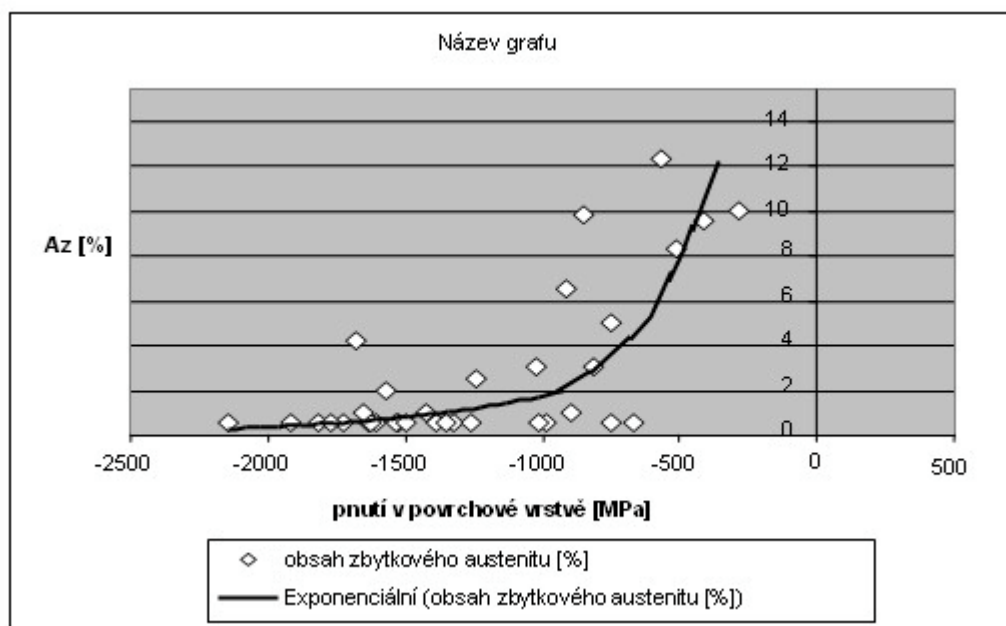
Na rozdíl od předcházejícího experimentu je zde jasně zřetelný nárůst velikosti vnitřního pnutí s rostoucí velikostí přitlačné síly. Naměřené hodnoty mají záporné znaménko a jedná se tedy o tlakové pnutí.

Rozdíl mezi hodnotami dosahovanými při použití menší přitlačné síly (100 až 500N) a hodnotami dosahovanými u nejvyšších použitých hodnot zatížení (2000 až 2500N) však činí jen přibližně 400Mpa. Uvážíme-li, že při vyšších hodnotách přitlačné síly dochází ke znatelné plastické deformaci, která při zátěži větší než 2500N vede k zhoršování tvarových vlastností povrchové vrstvy materiálu, jeví se pro náš případ jako nejvýhodnější použití přitlačné síly v rozsahu 750 až 1000N.

U vlivu opakovaného válečkování, byla provedena měření již pouze pro zatěžující síly 500 a 1000N, které se ukázali po předchozích experimentech jako nejvhodnější. Byl proveden test rovněž na (po tepelném zpracování) třískově neobrobeném povrchu. U většiny případů opakovaného válečkování došlo ke zvýšení tlakového pnutí v povrchové vrstvě. Pouze u posledního měření došlo k opačnému jevu. Tento výsledek je ovšem možno, vzhledem k nepatrnému rozdílu, považovat za nedůležitý,

neboť na rozdíl od předcházejících měření je nárůst menší než vypočtená chyba měření.

Vzhledem k zjištěné korespondenci mezi naměřenými hodnotami napětí a množství zbytkového austenitu byla z naměřených hodnot sestavena závislost mezi těmito veličinami.



Obr. 9 Graf závislosti množství zbytkového austenitu na velikosti vnitřního pnutí v povrchové vrstvě

Výsledná závislost má přibližně exponenciální tvar. Je dobře patrné, že při překročení určité hranice velikosti vnitřního pnutí klesá jeho obsah pod měřitelnou mez.

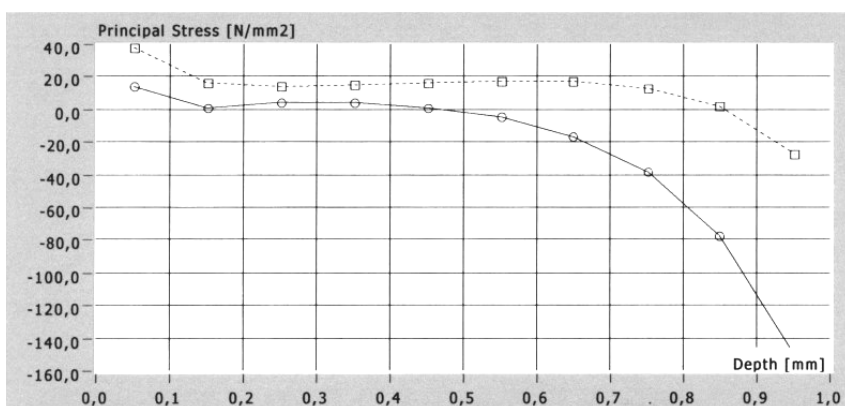
Z této závislosti se nabízí předpoklad přímého vlivu objemové změny doprovázející rozpad zbytkového austenitu v důsledku přetvoření či napětí během operace válečkování.

4.3 Měření napětí odvrťovací tenzometrickou metodou

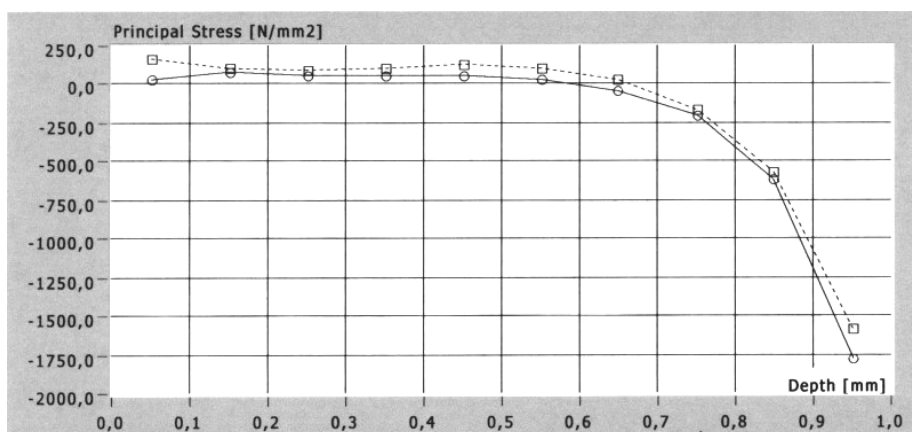
Tato metoda nám umožňuje stanovit průběh napětí I. druhu v závislosti na hloubce od povrchu materiálu a to přibližně do hloubky odpovídající průměru

odvrtávaného otvoru. Při experimentálních pracích bylo použito měřicí zařízení firmy Sint Technology sestávající z mechanicko optické jednotky obsahující vrtací přípravek, elektronické řídicí jednotky, software pro PC a dalšího příslušenství (kompresor, rozvody atd). Průměr vrtáku byl zvolen 1mm, čemuž odpovídá i maximální hloubka měření.

Byla provedena kontrolní měření na vnějším kroužku konvenčně vyrobeného ložiska, na broušeném, válečkovaném vzorku a vzorku s opakovaným válečkováním (viz následující grafické závislosti).

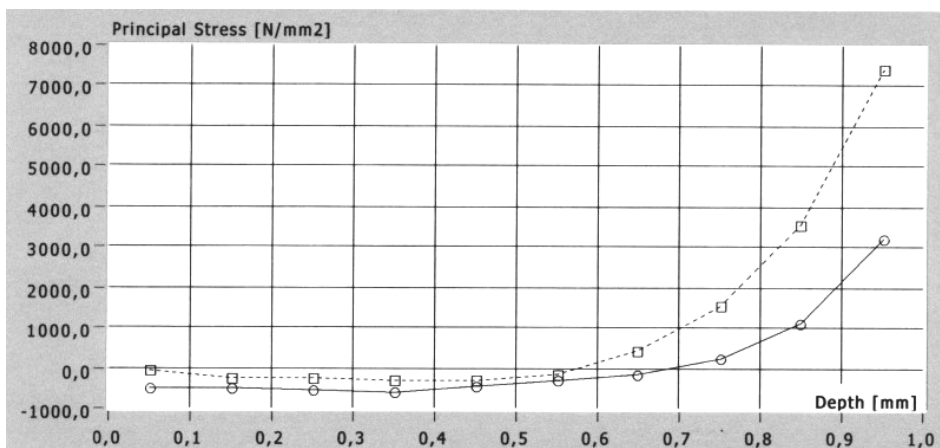


Obr. 10 Velikost hlavních napětí v závislosti na hloubce pod povrchem u vnějšího

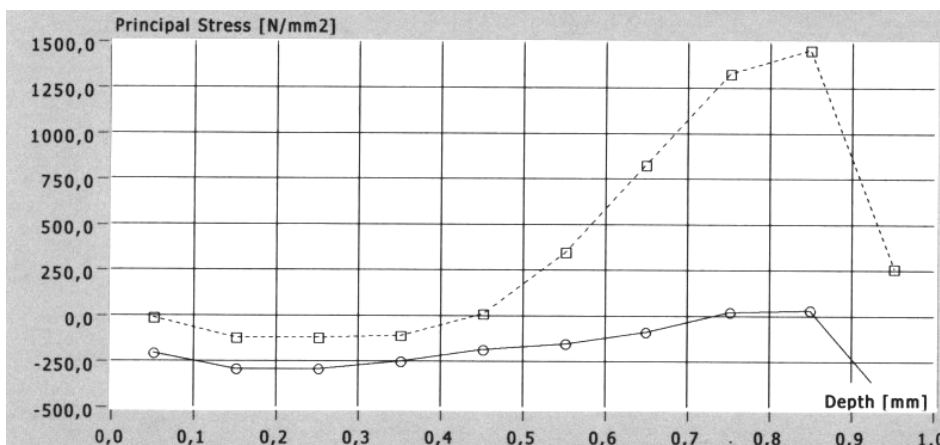


kroužku ložiska PLC 46-8-2

Obr. 11 Velikost hlavních napětí v závislosti na hloubce pod povrchem u vzorku broušeného na jemno (ocel 14109.4 HRC63)



Obr. 12 Velikost hlavních napětí v závislosti na hloubce pod povrchem u válečkováného vzorku (ocel 14109.4 HRC63)



Obr. 13 Velikost hlavních napětí v závislosti na hloubce pod povrchem u opakovaně válečkováného vzorku (ocel 14109.4 HRC63)

Jak je patrné z naměřených hodnot zobrazených v grafech, jsou hodnoty napětí v těsné blízkosti povrchu přibližně poloviční oproti hodnotám získaným s využitím rentgenografické difrakční analýzy. Tento rozdíl lze vysvětlit pomocí principu metody, kdy v případě odvrtávací metody jsou měřena pouze napětí I. druhu (tj. makroskopická).

I v tomto měření byl potvrzen nárůst tlakových pnutí po operaci válečkování a to do hloubky minimálně 0,5mm.

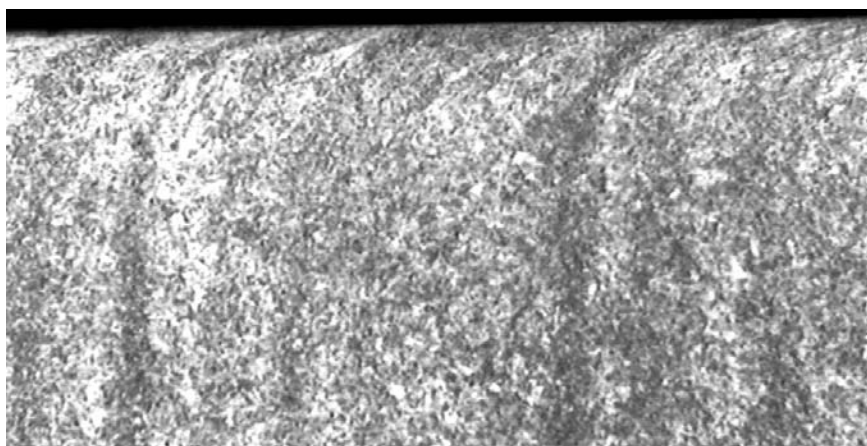
4.4 Struktura povrchové vrstvy

Pro určení strukturního složení povrchové vrstvy byly vzorky nejprve podrobeny rentgenografickému měření obsahu jednotlivých fází a v závěru experimentálních prací byl proveden řez zkoumanou povrchovou vrstvou. Takto upravený vzorek byl zkoumán jak pod světelným, tak pod elektronovým mikroskopem.

K bližšímu vyhodnocení stavu struktury a napětí v povrchové vrstvě bylo naplánováno i měření mikrotvrdomosti povrchové vrstvy. Vzhledem ke struktuře materiálu vzorku, obsahující velké množství jemných karbidických částic, však nebylo možno toto měření zařadit.

Materiálem testovaných ložisek i zkoumaných vzorků byla ložisková ocel 14109.4. Jedná se o ocel s 1% C, 0.4%Mn a 1.5%Cr. Předpokládaná výsledná struktura sestává z velmi jemné struktury martenzitických jehlic mezi rovnoměrně rozprostřenými karbidickými částicemi. Další složkou je pak malé množství zbytkového austenitu nacházející se obvykle v uzavřených oblastech mezi jehličkami martenzitu.

Kromě vlastního vzhledu výsledné struktury, která odpovídala požadovanému stavu, byly provedeny snímky povrchové oblasti jak s využitím světelného tak elektronového mikroskopu.



Obr. 14 Ocel pro valivá ložiska 14109, Nital 1% 150x, kuličkováno přitlačnou silou 2500N

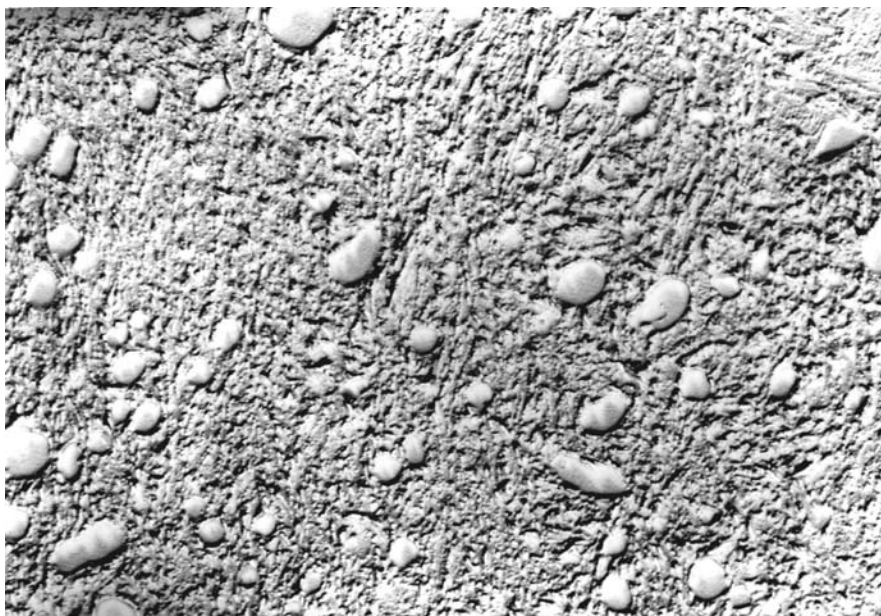
Jak vidíme ze snímku na obrázku 14, došlo v povrchové vrstvě ke značné plastické deformaci, a to především v oblasti těsně pod povrchem. Při použití maximální přítláčné síly 2500N jsou jednotlivé částice materiálu posunuty oproti své původní pozici až o 0.1mm.

Toto zjištění vede k poznatku, že při použitém způsobu válečkování hrály značnou roli rovněž třecí síly. Které pravděpodobně značně přesahovali velikost uvažovanou při teoretickém výpočtu.

Rovněž pokud uvážíme předpokládanou hloubku vtlačení nástroje do materiálu, která by v případě přítláčné síly 2500N měla činit přibližně 0.016mm, lze předpokládat značné odchylky proti zjednodušenému matematickému modelu.

Z těchto snímků však nelze posoudit případnou fázovou změnu materiálu ve válečkované povrchové vrstvě. Pro získání dalších údajů byly proto pořízeny snímky z replik pomocí elektronového mikroskopu.

Na snímcích pořízených elektronovým mikroskopem byla jasně patrná struktura jemného jehlicového martenzitu s oválnými karbidickými částicemi. Velikost karbidických částic dosahuje 1 μ m a velikost jehliček 3 μ m.



Obr. 15 Ocel pro valivá ložiska 14109.4, 7500x, válečkováno přítláčnou silou 2000N, replika v hloubce do 0.01mm pod válečkovaným povrchem

O velikosti plastické deformace vypovídá snímek na obrázku 15, kde byla původní struktura zcela rozrušena a jednotlivé jehličky martenzitu jsou z převážné části jednosměrně orientovány.

4.5 Realizace výsledků v praxi a pro další rozvoj vědního oboru

Praktické využití získaných poznatků se uplatní zejména při výrobě kroužků valivých ložisek, kdy použité postupy lze snadno aplikovat do výrobního procesu, či zařadit jako doplňkovou operaci u již hotových ložisek. Provedené experimenty prokázali významné změny v povrchové vrstvě valivé dráhy kroužku ložiska a to jak z hlediska strukturních vlastností tak velikosti zbytkového pnutí, jež vedou ke zvýšení především odolnosti proti únavovému porušení.

V rámci vědního oboru přispěli získané poznatky především při zkoumání dějů v zakalené oceli během válečkování, tj. plastického ovlivnění povrchové vrstvy obrobku. Doposud získané poznatky se soustředily z velké části na “měkké” nezušlechtěné materiály. Za povšimnutí stojí v první řadě velikost plastických změn v povrchové vrstvě a rozpad zbytkového austenitu, který doprovázejí změny krystalické mřížky, což má za následek vnesení tlakového zbytkového napětí do povrchové vrstvy.

5 ZÁVĚR

V průběhu této práce byly získány cenné poznatky jež lze rozdělit do několika částí podle jednotlivých metod měření či experimentů.

V první fázi byla provedena počítačová simulace s využitím metody konečných prvků, která nám měla umožnit lepší pochopení dějů během procesu válečkování. Srovnáním se skutečnými výsledky pak byl určen model nejvíce se přibližující skutečnosti. Tím v našem případě byl model s výrazným vlivem tření mezi nástrojem a obrobkem. Toto zjištění napomohlo jak k lepšímu pochopení průběhu experimentu, tak poukázalo na možnost dalšího zkoumání především vlivu velikosti tření během válečkování na výsledný stav válečkované povrchové vrstvy.

K lepšímu vyhodnocení stavu povrchové vrstvy po aplikaci válečkovacího procesu přispělo i měření parametrů drsnosti povrchu testovaných vzorků, a to z hlediska určení vhodného rozmezí technologických parametrů procesu válečkování, neboť změna drsnosti povrchu představuje jeden ze základních parametrů operace válečkování.

Hlavní částí vlastní práce pak bylo vyhodnocení napětí v povrchové vrstvě válečkováných vzorků. Bylo provedeno velké množství měření, jak s využitím rentgenografické difrakční analýzy tak s pomocí odvrtávací tenzometrické metody, která umožnila vyhodnocení průběhu napětí vzhledem k hloubce pod povrchem válečkované vrstvy. Všechna měření jednoznačně poukázala na nárůst tlakového pnutí v povrchové vrstvě a to do hloubky minimálně několika desetin milimetru, což má nepochybně kladný vliv na životnost dynamicky zatěžované povrchové vrstvy materiálu. Jako možnost vysvětlení tohoto jevu se ukázal rozpad zbytkového austenitu během procesu válečkování. Jak ukazují vytvořené grafické závislosti, je zde patrná závislost mezi rozpadem (resp. množstvím zbytkového austenitu) a velikostí pnutí v povrchové vrstvě. Obdobná závislost byla zjištěna rovněž u velikost přítláčné síly a množství zbytkového austenitu.

Měření tenzometrickou odvrtávací metodou potvrdilo předcházející údaje a navíc ukázalo závislost napětí na hloubce od povrchu měřeného vzorku. Rozdíly v absolutních hodnotách lze přičíst k principiálním rozdílům použitých měřících

metod, kdy u odvrtávací tenzometrické metody se na výsledných hodnotách podílí, na rozdíl od rentgenové tenzometrie, pouze napětí I. druhu.

V poslední kapitole pak bylo provedeno vyhodnocení struktury materiálu v povrchové vrstvě. Byl proveden výbrus povrchové vrstvy vybraných vzorků a ty byly následně zkoumány pod světelným a elektronovým mikroskopem.

Bylo rovněž provedeno měření mikrotvrdosti, které mělo přinést další informace o složení, resp. průběhu fází v povrchové vrstvě vzorku. Toto měření ovšem bylo ukončeno bez použitelných výsledků, z důvodu velkého množství jemných karbidických částic ve zkoumané struktuře. Ze získaných snímků byla stanovena hloubka proběhlé deformace a je zde i patrná absence ostrůvků austenitu v hloubce do několika desetin milimetru a rozbití původní struktury. Jedním z předpokládaných vlivů vedoucích k takto výrazné deformaci v povrchové vrstvě může být velikost tření, která dosahovala vyšších hodnot, než se předpokládalo.

6 SUMMARY

Antifriction bearings are part of great many machinery and equipment types. Their greatest share will be found in the car industry, transportation equipment, machine tools, aircraft industry etc. Regarding the wide range of antifriction bearing application, the question of extending their service life plays an important role in many industries. Each bearing is always part of an assembly unit which is frequently complicated, and this makes its replacement, if required, very time-consuming and thus costly.

This thesis aims to contribute to extending utility properties of antifriction bearings, first of all through examining utilization of roller burnishing (sometimes also called static ball burnishing) of treated material of antifriction bearings.

Considering the fact that the most frequent cause of antifriction defects appears to be their fatigue failure through „pitting“, attention was focused on the place of origin of this phenomenon, i.e. on the antifriction bearing race orbit. In terms of affecting the quality of orbit of a bearing race it is particularly the finishing operations that play the decisive role, primarily the grinding operation.

Ball burnishing was selected as the way of affecting the surface layer condition despite the fact that it is not widely used with hardened materials; the method was chosen based on the good results achieved in earlier testing of basic dynamic bearing capacity of finished roller bearings.

Further on this thesis deals with the surface layer condition of the roller burnished treated steel of bearings. Its theoretical part describes both the current situation in this field and the information needed in individual areas directly related to the material applied, or to methods of processing and the used or usual methods of evaluation. While there was a descriptive method largely used for the existing condition and theoretical possibilities, the experimental and measurement methods applied to the relevant phenomena involved a detailed description of their theoretical aspect.

An important consideration in favour of the method of roller burnishing (sometimes also called static ball burnishing/shot peening) was availability and

reliability of the needed equipment. In order to have the full picture, there is also specialized commercial equipment included in this study with its final parameters achieved, used for this purpose.

Similarly, in the process of sample selecting it was the measurement method applied (X-ray diffractoscopy) which played the key role, same as the need to ensure easy multiple repeating of measurement.

The process of sample production reflected the actual technological process of the production of antifriction-bearing races, and there were numerous measurements taken on the samples both during the processing of the material surface examined and following its completion.

The methods of measurement were selected correspondingly. The evaluation of roughness and radiographic diffractive analysis represent non-destructive methods and as such enabled repeated measurements during the sample processing. The only disadvantage is a considerable consumption of time during the radiographic measurement. The routing tensometric method, due to its destructive nature, was used after all the other measurements were completed, similarly as the pictures of sections of the surface examined.

The progress of the roller burnishing operation itself was undoubtedly better examined and understood due to the simulation created by the „FEA“ method which, despite its drawbacks following from the necessity to eliminate most of the external impacts, brought out the impact of the friction between the tool and the sample, or the workpiece – and also proved the expected tension and deformation curve.

The complementary roughness measurement indicated first of all the appropriate selection of technological parameters in terms of geometrical surface properties and resulted in narrowing down further testing of other time-consuming measurements. The relationships measured in turn contributed to the correct setting of the machines and tools used.

During the measurements following the radiographic diffractoscopy method there was, apart from the tension/voltage value measured in the surface layer, the volume of individual phases in the studied material determined, specifically the amount of

residual austenite in martensite structure. During these measurements there were several relationships determined both between the applied parameters of the roller burnishing operation, the internal tension reached in the surface layer, and in relation to the amount of residual austenite, which contributed to a better understanding of the phenomena working in the process of roller burnishing.

There was a program created by the author to process the data measured, allowing evaluation of the tension volume using as many as sixteen values of double the angle of X-ray reflection at different inclinations obtained through interpolation of the data measured.

In order to obtain and verify further data there were destructive measurement methods applied to the samples, which enabled determination of the tension curve in relation to the distance of depth from the surface examined (in the case of routing tensometric method), and evaluation of the material structure condition (in the case of microhardness measurement and radiographic microscopy).

For the relationships obtained between the tension and depth underneath the surface the values defined through the radiographic method were confirmed. The difference between the absolute values in the area right beneath the surface can be attributed to the principles of the measurement methods used, where the routing tensometric method only evaluates the tension of type I, as opposed to the radiographic diffraction method where the other tension types are included in the measurement.

The pictures produced by the light microscope proved the correct heat treatment of the material, with the resulting structure of the hardened bearing steel containing, as expected, very fine needles of martensite with evenly spread carbide particles. The next phase involved determining the deformation in the area just beneath the sample surface, equalling several tenths of millimetres under higher adherence pressure applied during the roller burnishing operation.

The pictures taken by the electron microscope contributed to evaluating the surface layer condition as to the amount of austenite contained, showing that the original structure was utterly broken in the area exposed to the greatest plastic

deformation pressure, where the remains of residual austenite had originally been found between the fine martensite needles.

Regarding the facts established, further research into the problems may be recommended based on the findings presented here, relating to the way of determining the impact of individual methods of roller burnishing and comparing the values of the dynamic bearing capacity of the components tested for different parameters of the surface layer condition of roller burnished samples.

The findings described may extend the understanding of the phenomena at work in the process of roller burnishing as applied to the hardened bearing steel, and consequently enhance effectiveness and improve the production quality of the antifriction bearing races; this aspect stands out more clearly in connection with the fact that the cost of roller burnishing operation only represents a cost ranging between one third and one quarter of the cost of other fine finishing operations such as fine grinding, lapping, polishing etc.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HEGEMAN H. *FUNDAMENTALS OF GRINDING SURFACE CONDITIONS OF GROUND MATERIALS*, RIJKSUNIVERSITEIT GRONINGEN 2000
- [2] HÖSCHL , C. *Kontaktní úlohy a lisované spoje*, Dům techniky ČSVTS Praha 1985
- [3] JECH, J. *Tepelné zpracování oceli – metalografická příručka*, SNTL Praha 1983
- [4] KRAUS, I. GANEV, N.. *Difrakční analýza mechanických napětí*, vydavatelství ČVUT Praha 1995
- [5] MÁDL, J. *Teorie obrábění*, ČVUT Praha, 1989
- [6] MASLOV, J. *Teorie broušení kovů*, Polygrafia Praha, 1979
- [7] DAVIS, J. 1.ed *Metals Handbook Vol.16 Machining*, Asm International, 1989 s944
- [8] MAZANEC, K. , HYSPECKÁ, L. *Fyzikálně metalurgické vlastnosti martenzitických ocelí*, Academica Praha ČSAV, 1983
- [9] VAJSKEBR, J., ŠPETA, Z. *Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním*, SNTL , 1984
- [10] VASILKO, K. *Brúsenie kovových materiálů*, Bratislava, 1984
- [11] VASILKO, K. a kol. *Valivé ložiska*, Alfa, 1988
- [12] VOCEL, M. , DUFEK, V. a kolektiv *Tření a opotřebení strojních součástí*, SNTL Praha 1976
- [13] DE GARMO, E. , BLACK, T. , KOHSER, R. *Materials and processes in Manufacturing*, Edit. Horton Marcia, London, Pretice Hall, 1997 s.1259
- [14] *Aplikácia difrakčných metód v praxi*, Sborník, ZSVTS Košice, 1991
- [15] *Technische information FAG TI*, 1997

- [16] *Measurement of residual stresses by the hole-drilling strain gage method*, VISHAY – MEASUREMENT GROUP, TN-503-5, 1993
- [17] TÖNSHOFF, H.K., ARENT, C., BER AMOR, R., *Cutting of Hardened steel*, Annals of the CIRP Vol. 49/2/2000 pp547-566

SEZNAM PUBLIKACÍ

ZEMČÍK, Oskar. Automatizace konstrukce křivkového kotouče s pomocí IBM PC-AT 1996 *Sborník vítězných prací 4. Konference STČ FS VUT Brno 1995*, s. 17-40.

ZEMČÍK, Oskar. Vlastnosti povrchové vrstvy po aplikaci válečkování *Sborník přednášek 1. Mezinárodního kongresu ICPM2001 Ústí nad Labem 2001*, s 263-270. ISBN 80-7044-358-8

ZEMČÍK, Oskar. Simulace stavu povrchové vrstvy válečkovaného zušlechtěného materiálu *Sborník přednášek II. Mezinárodní nástrojařské konference Zlín 2001*, s. 158-167. ISBN 80-7318-008-1

ZEMČÍK, Oskar. Matematický model stavu povrchové vrstvy válečkované zušlechtěné oceli *Sborník přednášek 7. mezinárodní konference Technológia 2001 Bratislava 2001*, s. 226-230. ISBN 80-227-1567-0

Curriculum vitae

- říjen 1999 VUT Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, technický pracovník odboru obrábění
- 1998 - 1999 Masarykova univerzita Brno Filozofická fakulta Psychologický ústav, civilní služba
- 1995 - 1998 VUT Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, interní doktorand odboru obrábění
- 1989 - 1995 VUT Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Diplomová práce na téma: Automatizace výroby křivkových kotoučů soustružnických poloautomatů
- 1985 - 1989 Střední průmyslová škola strojní Brno Kotlářská 9, obor technolog