

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Studium povrchu oceli po tepelně-chemické a
elektrochemické úpravě**

**Study of Surface Steels after Heat-Chemical and
Electrochemical Treatment**

Student:

Robert Pecha

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Robert Pecha**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Studium povrchu oceli po tepelně-chemické a elektrochemické úpravě
Study of Surface Steels after Heat-Chemical and Electrochemical Treatment
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozbor současného stavu povrchové úpravy ocelových částí ložisek.
2. Prostudujte tvorbu vrstvy na ocelovém substrátu pomocí tepelně-chemické a elektrochemické povrchové úpravy.
3. Prostudujte vliv povrchových úprav na změnu vlastností ocelových částí.
4. Navrhněte metodiku experimentálních prací.
5. Proved'te experimentální práce a zpracujte závěrečnou zprávu.

Seznam doporučené odborné literatury:

MOHYLA, M. *Technologie povrchových úprav kovů*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 2006. 3. vydání. 156 s. ISBN 80-248-1217-7.


PODJUKLOVÁ, J. *Speciální technologie povrchových úprav I*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 1994. 1. vydání. 71 s. ISBN 80-7078-235-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

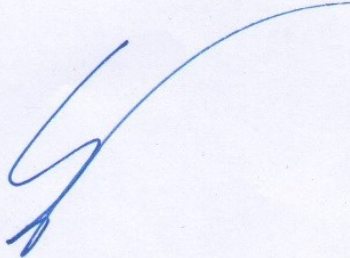
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že

• jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

• beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užit (§ 35 odst. 3).


• souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

• bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

• bylo sjednáno, že užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

• beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Šumperku dne 13.5.2017

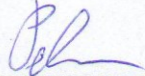

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: ROBERT PECHA

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Šumperku dne13.5.2017.....

..........

podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PECHA, R. *Studium povrchu oceli po tepelně-chemické a elektrochemické úpravě*. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2017, 39 s. Bakalářská práce, vedoucí: Podjuklová, J.

Bakalářská práce se zabývá příčinami neúspěšného zlepšování vlastností povrchu ložiskových klecí a autor se snaží vyvodit příčiny nevyhovujících rozměrů ložiskových klecí po karbonitridaci. Autor se snaží navrhnout alternativní řešení a pomocí experimentálních prací ukázat, že je navrhované řešení vhodné a výhodné jako řešení problému.

Klíčová slova: chemická povrchová úprava, bezproudá povrchová úprava, chemický nikl, karbonitridace, ložisko, ložisková klec

ANNOTATION TO BACHELOR THESIS

PECHA, R. *Study of Surface Steel after Heat-Chemical and Electrochemical Treatment*. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2017, 39 p. Bachelor thesis, heads: Podjuklová, J.

Bachelor thesis deals with causes of unsuccessful improvement of surface properties of bearing cages and the author attempts to deduce the causes of unsatisfactory dimensions of bearing cages after carbonitriding. The author tries to suggest an alternative solution and, using experimental work, to show that the proposed solution is an appropriate and advantageous solution to this problem.

Keywords: chemical surface treatment, electroless surface treatment, chemical nickel, carbonitriding, bearing, bearing cage

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Úvodní popis problému	8
Úlohy ložiskové klece a její vlastnosti.....	9
Karbonitridace v solné lázni.....	10
Teoretická analýza problému a návrh možného řešení	12
Bezprudé niklování.....	14
Metodika experimentálních prací.....	17
Měření zvolených rozměrů ložiskových klecí.....	18
Měření mikro-tvrlosti zkoušeného povrchu ložiskových klecí.....	19
Průběh a výsledky experimentálních prací	21
Ekonomické zhodnocení navrhovaného řešení	32
Závěr.....	34
Použitá literatura	35
Přehled obrázků	37
Přehled tabulek	38
Přehled grafů	39

Seznam použitých zkratek a symbolů

Trietanolamin – viskózní organická sloučenina - vzorec $C_6H_{15}NO_3$

Karbonitridace – proces termochemického difuzního sycení

Dislokace – krystalová čárová porucha

MHv – jednotka používaná při měření mikro-tvrdomosti podle Vickerse

PTFE - polytetrafluoretylen známý jako teflon

NIFLOR – kompozitní povrchová chemická úprava teflon-nikl

Dekapování – odstraňování nežádoucích povlaků z povrchu kovu

Úvodní popis problému

Renomovaný výrobce ložisek v České Republice aplikuje na ložiskové klece, které vyrábí, pro zlepšení vlastností jejich povrchu karbonitridací v solné lázni. Dochází při tom k velkému počtu nevyhovujících výrobků (přibližně 45 %), kdy se rozměry klece po zušlechtění povrchu karbonitridací v solné lázni odchýlí mimo stanovený vyhovující rozsah. Můj cíl je prozkoumat, proč k těmto změnám rozměrů ložiskových klecí dochází, navrhnout vhodnější zušlechtění povrchu ložiskové klece pomocí tepelně-chemické povrchové úpravy (jedna základní a jedna alternativní pro náročnější zákazníky), při níž nebude docházet k nežádoucím změnám rozměrů ložiskové klece. Navrhnout experimentální práce, které podpoří teoretické předpoklady důvodů nežádoucích změn rozměrů i prakticky.

Nejdříve provedu krátký popis použitých zařízení při experimentálních pracích, vypracuji postup těchto experimentálních prací, a po té provedu samotné experimentální práce. Nakonec vyhodnotím jejich výsledky, na základě provedených měření a zhodnotím, zda jsem správně určil hlavní důvod nežádoucí změny rozměrů ložiskové klece, a zda jsem správně navrhl alternativní řešení, které tyto nežádoucí změny sníží pod stanovenou přípustnou mez. Navrženým postupem je třeba prokázat, že se nejen sníží procento vadných klecí, ale že současně takto provedená povrchová úprava výrazně zlepší tvrdost povrchu původního materiálu, a že je vhodnou alternativou k současnému stavu, co se týče tohoto aspektu.

Nutno dodat, že konkrétní popisovaný problém se vyskytuje u lisovaných ložiskových klecí jednořadých kuličkových ložisek menších rozměrů, kdy se klece vyrábějí z plechu z nízkouhlíkové oceli.

Následující teoretické předpoklady se tedy vztahují na tyto konkrétní typy ložisek, a pro experimentální práce bude vybrán jeden model ložiska, který patří do problematické skupiny, a zároveň jsou jeho rozměry neoptimálnější pro provedení navržených experimentálních prací.

Úlohy ložiskové klece a její vlastnosti

Úlohou ložiskové klece v kuličkovém ložisku je udržovat kuličky v rovnoměrných vzdálenostech od sebe, čímž snižuje tření v ložisku. Další úlohou je bránit kuličkám v prokluzu a v případě rozebíratelných ložisek i bránit jejich vypadnutí při montáži ložiska. Klece mohou být buď lisované, a to z ocelového nebo mosazného plechu, nebo masivní, které jsou vyráběny z oceli, mosazi, bronzu nebo lehkých kovů. Lisované klece se používají pro menší až střední ložiska, a jejich výhodou je menší hmotnost. [1]

Změnou rozměrů ložiskové klece se zvětší anebo zmenší vůle kapes pro jednotlivé kuličky, čímž dochází ke zvýšení vibrační anebo zvýšení tření, což může v krajním případě způsobit až prasknutí klece. [2]

Hlavním požadavkem na povrch ložiskové klece je zvýšená tvrdost a s ní spjatá zvýšená kluznost povrchu. Signifikantně zvýšená korozní odolnost není u povrchu ložiskových klecí v tomto případě vyžadována. [1]

V současné době výrobce vyrábí ložiskové klece z ocelového plechu válcovaného za studena dle ČSN EN 10139, při čemž je tento ocelový plech vyroben z nízkouhlíkové nelegované oceli ČSN 11321, která je vhodná k hlubokému tažení za studena, dobře svařitelná a používá se zejména na svařované trubky, výlisky, ložiska nebo galanterie. Obsah uhlíku v oceli je max. 0,110 %, fosforu max. 0,045 % a síry max. 0,045 %. Mez v tahu je min. 280MPa v případě normalizačního žíhání nebo min. 300 MPa bez něj. Mez kluzu je nejméně 180Mpa v případě normalizačního žíhání nebo min. 200 bez něj. Tažnost A_{10} je min. 22 % po normalizačním žíhání nebo min. 10 % v případě, že normalizační žíhání nebylo použito. Tvrdost této oceli je přibližně 95 HV. [16] [17]

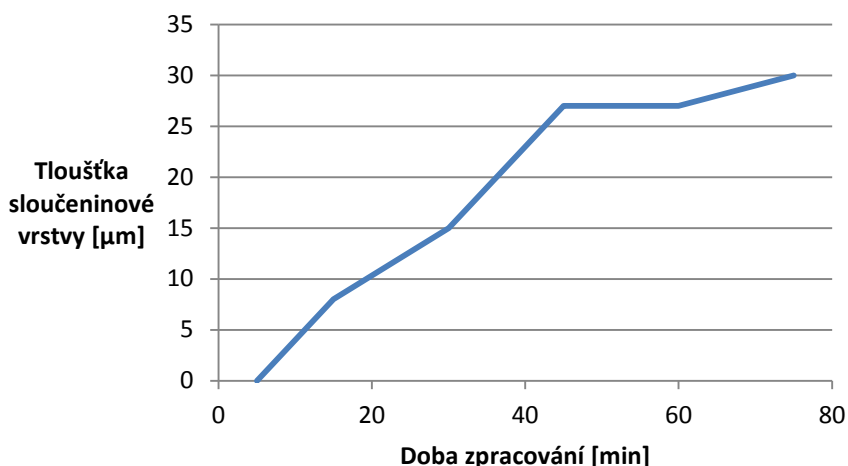
Karbonitridace v solné lázni

S cílem zlepšení vlastností povrchu ložiskových klecí nabízí renomovaný výrobce ložisek možnost karbonitridace ložiskových klecí v solné lázni. V následujících odstavcích budou popsány vlastnosti karbonitridovaného povrchu a později bude popsán i obecný postup při karbonitridaci.

Karbonitridace v solné lázni patří do skupiny chemicko-tepelného zpracování oceli, jehož podstatou je sycení povrchových vrstev výrobku atomy vybraných prvků, což je činěno s cílem dosáhnout rozdílných chemických, fyzikálních nebo mechanických vlastností povrchu výrobku oproti jeho jádru. Sycení povrchu musí být vždy prováděno za zvýšené teploty, aby byla zrychlena difúze vybraného prvku do základního materiálu. Při chemicko-tepelném zpracování se používá plynné, kapalně nebo tuhé prostředí. Pokud je dosaženo optimální teploty, rozkládající se molekuly aktivního prostředí uvolňují prvky v podobě aktivních atomů, které se adsorbují na povrchu oceli, a dále se pohybují difúzním mechanismem směrem koncentračního spádu dovnitř ocelového výrobku. Chemicko-tepelné zpracování se nejčastěji provádí s cílem zvýšit tvrdost povrchu výrobku, čímž se zvýší i odolnost proti opotřebení a zvýší se odolnost proti únavě materiálu, při čemž tato charakteristika platí do určité hloubky od povrchu výrobku a samotné jádro výrobku zůstává netknuto i s původními vlastnostmi základního materiálu. Při karbonitridování je povrch výrobku sycen atomy uhlíku a dusíku, kdy v povrchové vrstvě převládá vliv dusíku. Karbonitridace probíhá při teplotě pod teplotu A_1 a jejím cílem je vytvoření vrstvy karbonitridů. Karbonitridace může probíhat jak v kapalném prostředí, tak i v plynném prostředí. [14]

V tomto případě jsou při současném stavu ložiskové klece karbonitridování v solné lázni, kdy je deklarovaná tvrdost povrchu kolem 700 HV pro nelegovanou nízkouhlíkovou ocel při tloušťce vrstvy 20 mikronů. V následujícím grafu je ukázána závislost tloušťky v mikronech sloučeninové vrstvy na době zpracování v minutách. Výrobce rovněž dokladuje i dobrou otěruvzdornost zejména proti adhezivnímu oděru. [3]

Graf č. 1 – Tloušťka sloučeninové vrstvy v závislosti na době zpracování



Postup při karbonitridaci v solné lázni je následující a jednotlivé jeho operace jsou prováděny v jednotlivých modulech při plně automatizovaném předem naprogramovaném běhu linky. Nejprve je pomocí dvoustupňového stříkacího a ponorného zařízení provedeno předčištění, kdy v prvním stupni je alkalický čisticí roztok a v druhém stupni je čistá voda. Následně je zpracovávaný výrobek předehřát na teplotu mezi 350 °C až 400 °C v cirkulační peci, při čemž se doba předehřevu pohybuje mezi půl hodinou až dvěma hodinami. Protože jsou solné taveniny ve srovnání s jinými médii bohaté na dusík, začíná proces karbonitridace okamžikem ponoření vsázky do taveniny. Po několika minutách lze naměřit vytvořenou sloučeninovou vrstvu. Povrch výrobku reaguje s taveninou, kdy se tvoří uhličitán z alkalického kyanatanu a velmi pomalu se mění složení solné taveniny. Za pomoci kontinuálního přídatku netoxického regenerátoru na bázi organického polymeru se uhličitán recykluje na aktivní kyanatan. Protože nedochází prakticky ke změně objemu taveniny, při nastavení požadovaného složení nevznikají žádné vyčerpané soli. Proces je prováděn bez zvláštní aktivace taveniny. K dosažení co nejmenšího možného počtu póru ve sloučeninové vrstvě musí být udržován obsah železa na nízké úrovni. Následuje ochlazení, k čemuž může být použita oxidační lázeň, vodní lázeň, vzduch, vakuum nebo dusík, při čemž se volba provádí podle složení oceli výrobku a její náchylnosti ke vzniku trhlin. Oxidační chlazení se provádí při teplotě 420 až 430 °C a doba oxidace je mezi 10 a 20 minutami. Výhoda oxidačního chlazení spočívá ve zvýšení korozní odolnosti, což je způsobeno tvorbou magnetitu v pórech a 1 mikron silnou vrstvičkou magnetitu na povrchu výrobku. V tomto případě zpracovávané výrobky získají černou barvu povrchu místo šedé. [3]

Teoretická analýza problému a návrh možného řešení

Při válcování za studena roste počet dislokací. Dislokace se pohybují krystalem, a pokud narazí na jakoukoliv překážku, zastavují se, dokud se vnitřní napětí nezvýší na úroveň, při které by dislokace překážku překonali. Překážkami pro dislokace jsou myšleny substituční a intersticiální atomy prvků a heterogenní částice. Při překonávání překážek se na těchto překážkách dislokace zachycují a zvyšují počet celkových dislokací až 100 krát. Každá dislokace, která se pohybuje krystalem, je tedy zdrojem dalších dislokací. Jedná se o tzv. Frank-Readův zdroj dislokací. Také zrna se protahují ve směru válcování a vytváří se krystalografická textura. [14] [15] [18] [19]

Tyto dislokace jsou v první fázi rekrytalizace zotavovány a dochází i ke snižování deformační energie, což se nazývá jako změna subkultury. Teplota rekrytalizace nízkouhlikové oceli je přibližně 40 % teploty tání, a je v rozmezí 450 – 700 °C, i když přesná teplota není pevně daná, protože závisí nejen na teplotě, ale i na stupni deformace při tváření, při čemž s rostoucím stupněm deformace teplota rekrytalizace klesá. Pod rekrytalizační teplotou probíhá rekrytalizace zrn také, ale v menší míře. Rekrytalizační teplota se dá definovat jako teplota, při které materiál s vysokým stupněm deformace zrekrystalizuje během cca 1 hodiny. Při rekrytalizace nelegovaných nízkouhlikových ocelí po kritických deformacích, jako je válcování za studena, dochází k nadměrnému zvětšování zrn. [14] [15] [18] [19]

Vzhledem k tomu, že při teplotě karbonitridace v solné lázni, tedy v rozsahu 590 °C – 630 °C, může docházet k znovu vytváření zrn a snížení deformační energie, může docházet k smrštění lisovaného plechu v tom směru, ve kterém byl tvářen, což se může projevit změnou jeho délky. Pokud tato situace nastane v případě lisované ložiskové klece, může se úzký pruh plechu, ze kterého je vyrobena, smrstit, čímž se změní rozměry této klece. Týká se to hlavně vnitřního a vnějšího průměru klece, protože jsou to největší rozměry, a každou jejich změnu lze proto snadno změřit. Protože smršťování materiálu není zcela samozřejmě rovnoměrné, mění se i kruhovitost vnitřního a vnějšího průměru ložiskové klece. Samozřejmě se mohou měnit i další rozměry ložiskové klece, čímž jsou myšlena lůžka pro jednotlivé kuličky. Tyto rozměry se však obtížněji měří, a vzhledem k jejich absolutní velikosti nebudou jejich změny tak signifikantní jako změny průměrů a kruhovitosti ložiskové klece. [14] [15] [18] [19]

Jak lze tedy předpokládat, za změnou rozměrů ložiskových klecí při karbonitridování stojí relativně vysoká teplota, která je nezbytná při tomto procesu zušlechťení jejich povrchu. Řešení tedy může být vhodná povrchová úprava, která je prováděna za řádově nižších

teplot, která splňuje požadavky na tvrdost výsledného povrchu, a u které bude mít výrobce ložisek jistotu, že nebude řádově dražší než karbonitridace používaná při současném stavu. Samozřejmě alternativní povrchová úprava musí být použitelná na nelegovanou nízkouhlíkovou ocel, ze které je plech pro výrobu ložiskových klecí válcován a nesmí mít žádnou další výraznou nevýhodu, která by znemožňovala její použití místo karbonitridace. Touto výraznou nevýhodou je myšlen např. velký vliv na životní prostředí, který by znemožňoval provoz linky aplikující navrhovanou povrchovou úpravu do budoucna s ohledem na směrnice EU nebo českou legislativu. Mám určité zkušenosti s chemickým bezproudým niklem, navrhuji právě chemický nikl jako vhodnou alternativu. A protože věřím, že vyřeší popsany problém a splní obdobné nebo náročnější požadavky na tvrdost, provedu experiment, který tyto skutečnosti prakticky prokáže. Protože mám určité zkušenosti i s kompozitní chemickou povrchovou úpravou Nikl-Teflon, tuto úpravu navrhuji jako alternativu k Niklu pro náročné zákazníky. Jedná se o zákazníky, kteří vyžadují u výsledného povlaku, aby měl co největší kluznost a kteří mohou vyšší náklady promítnout do ceny finálního výrobku. Kluznost je vlastnost u ložiskových klecí žádoucí. V dalších částech budou zmíněny ty odlišnosti Nikl-Teflonu od Niklu, které by pomohli v rozhodování potenciálního zákazníka, i když Nikl-Teflon není součástí předeslaného experimentu, neboť parametry při povlakování jsou obdobné. Všechna podstatná pozitiva a negativa Nikl-Teflonu v porovnání s Niklem budou zmíněna na základě podkladů od výrobce směsí.

Bezproude niklování

Při chemickém niklování je Ni katalyticky redukován z roztoku, jehož hlavní složkou jsou ionty Ni, které vznikly dislokací niklových solí a fosforanové ionty redukčního činidla. Redukce niklu probíhá za uvolňování nascentního vodíku při katalytické přeměně dehydrogenací a adicí vody. První atomární vrstva Ni je nanášena velmi pomalou redukcí niklových iontů fosforanu. Následné vrstvy jsou nanášeny vylučováním Ni při autokatalytickém účinku předchozí vrstvy. Druhotnými reakcemi mezi fosforanovými a fosforitanovými ionty nascentním vodíkem a kationty Ni vzniká také fosfid niklu, takže výsledný povlak je tvořen slitinou Ni – P, při čemž je obsah fosforu závislý na kyselosti lázně. [5]

Novinkou v oblasti bezproudeho niklování je tzv. Niflor, kdy je součástí nanášeného povlaku až 25 obj. % PTFE. Obsažený TEFLON zvyšuje otěruvzdornost a kluznost upravovaného povrchu výrobku a dodává mu sytě černou barvu. [6]

Nyní popíši přesněji technologický postup při bezproude m niklování, který je s menšími změnami aplikován i pro Niflor, a podle tohoto technologického postupu bude postupováno i při provádění experimentálních prací. Nutno poznamenat, že linka je plně automatická a jakmile je výrobek navěšen na manipulační závěs, jsou veškeré procesy napříč všemi vanami linky řízeny softwarově dálkově z kanceláře technologa prostřednictvím vizualizovaného abstraktního prostředí.

Nejprve je výrobek ponořen do vany, kde je chemicky odmašťován při teplotě 70-80 °C po dobu 10 minut v alkalickém odmašťovacím přípravku. Následuje oplach v pitné vodě. Po té je v další vaně provedeno anodické odmaštění při 45-60 °C po dobu 3 minut.

Odmašťování je proces, kdy se povrch výrobku zbavuje mastnoty a ulpělých nečistot. Při nedostatečném odmaštění může povlak špatně přiléhat k původnímu materiálu, a i když se to neprojevívá při výstupní kontrole, u zákazníka se bude odlupovat. Anodické odmašťování se používá hlavně při odmašťování materiálů, na jehož mechanické vlastnosti jsou kladeny velké požadavky. Vyvíjející se kyslík mechanicky působí na povrch výrobku a navíc dochází i k částečnému naleptání povrchu, což umožní následně nanášenému kovovému povlaku lepší přilnutí k původnímu materiálu. Nevýhodou je riziko oxidace mastných nečistot, které je po té těžké odstranit. [7]

Po anodickém odmaštění následuje dvoustupňový oplach ponorem ve dvou vanách s pitnou vodou. Následuje moření v 30 % roztoku kyseliny chlorovodíkové, při němž jsou

odstraněny anorganické oxidické sloučeniny. Protože je pro ložiskovou klec použita nízkouhlíkatá ocel, je zde menší riziko přemoření než u vysokouhlíkatých ocelí, protože s rostoucím obsahem uhlíku roste rozpustnost oceli. Moření je prováděno za běžné teploty, pokud by bylo prováděno za zvýšené teploty mořící kapaliny, zvýšila by se i rychlost moření. Zvýšení teploty o 10 °C znamená zrychlení moření na dvoj- trojnásobek původní doby. Při zvýšené teplotě mořícího roztoku ale dochází k zvýšené exhalaci výparů, což zvyšuje nároky na odvětrávání pracovních prostor, proto používáme pokojovou teplotu. U velkokapacitních linek se ale využívají teploty nad 50 °C, kdy i při velmi nízkém obsahu volné kyseliny lze docílit dostatečnou mořící rychlost a dosáhnout 20-30 gramů volné kyseliny v odpadní kyselině. [8]

Následuje dvoustupňový oplach ponorem do van s pitnou vodou. Následuje aktivace povrchu neboli dekapování v 3 % roztoku kyseliny chlorovodíkové za normální teploty po dobu 5 – 15 sekund. Dekapování je používáno pro odstranění tenkých oxidačních vrstev, které mohou vznikat např. při anodickém odmaštění vlivem působení kyslíku. [9]

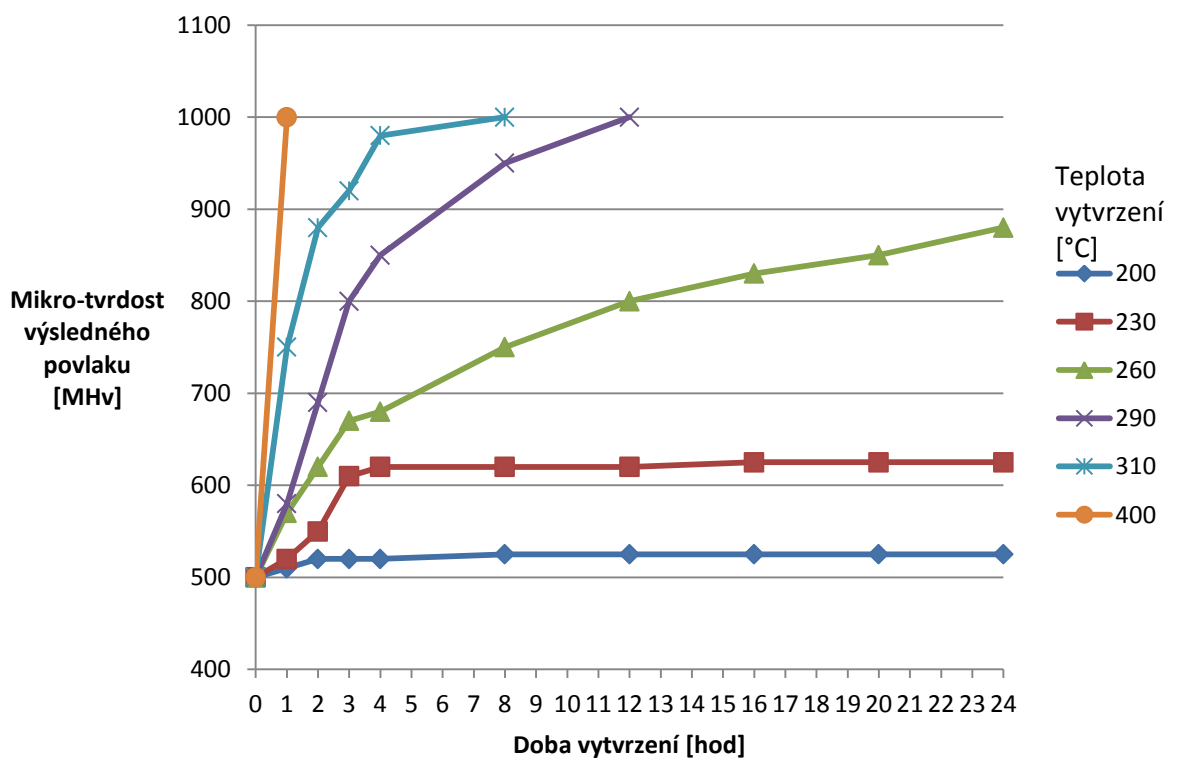
Následuje oplach ponorem do vany s pitnou vodou, a po té ponor do samotné aktivní lázně. V této lázni je namíchán roztok z předpřipravené sytké směsi od společnosti ENOVA. Jsou k dispozici 3 lázně podle obsahu fosforu, při čemž doba ponoru se pohybuje od 10 minut do 5 hodin podle tloušťky nanášeného povlaku. Samostatná lázeň je pro kompozitní povlak Niflor, kdy se zpravidla nanáší středně tlusté povlaky, proto se doba ponoru pohybuje v rozmezí 30 až 70 minut. V aktivních lázních je udržována teplota 86 až 92 °C. V případě Nifloru musí být lázeň nepřetržitě filtrována, neboť by došlo vlivem autokatalytického účinku vylučování Niklu na částice mikro-granulátu PLTE. Je doporučeno, aby se filtr nacházel mimo vanu, aby filtrace dokázala přefiltrovat alespoň desetinásobek objemu vany za hodinu. [10]

Po uplynutí stanovené doby ponoru v aktivní lázni následuje dvoustupňový oplach v pitné vodě a následný oplach ponorem ve vaně s teplou vodou zahřátou na teplotu 15 až 25 °C.

V této chvíli je samotná povrchová úprava hotová a může následovat sušení výrobků a jejich výstupní kontrola. V případě potřeby ale může být provedena pasivace povrchu pomocí organického roztoku na bázi trietonolaminu nebo černění pomocí organického roztoku Finigard kvůli zvýšení korozní odolnosti. Další možností je tepelné vytvrzení teplotou do 400 °C s možným použitím ochranné atmosféry, aby se předešlo oxidační vrstvě na povrchu výrobku.

Mikro-tvrdość výsledného povlaku u chemického bezproudého niklu závisí na procentuálním podílu fosforu v povlaku, při čemž s vyšším obsahem fosforu mikro-tvrdość výrazně klesá. Mikro-tvrdość se při středním obsahu fosforu (6-9 obj. %) ve složení povlaku pohybuje okolo 500MHv, a na rozdíl od karbonitridace zde nehraje roli složení oceli, ze které je výrobek vyroben. Velkého zlepšení mikro-tvrdości lze dosáhnout po tepelném vytvrzení, což ukazuje následující graf, na kterém je zobrazeno několik křivek, kdy každá představuje zahřátí na jinou teplotu. Ve výchozí pozici před jakýmkoliv vytvrzením je pro tento graf uvažována mikro-tvrdość 500MHv. [6] [10]

Graf č. 2 – Závislost mikro-tvrdości výsledného povlaku na době vytvrzení



Dynamický koeficient tření se u Nikl-Teflonu pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,16, ale tvrdość tohoto povlaku je pouze 450 HV po vytvrzení na teplotu 310 °C po dobu dvou hodin. [6] [10]

Metodika experimentálních prací

Experimentální práce mají několik hlavních cílů. Za prvé, mají dokázat, že teploty nad teplotu rekrystalizace použité oceli mají vliv na změnu rozměrů ložiskových klecí. Za druhé, mají dokázat, že navrhovaná alternativní povrchová úprava chemický bezproudý Nikl řeší tento popisovaný problém. Za třetí, mají dokázat, že navrhovaná alternativní povrchová úprava má lepší vlastnosti, které jsou důležité v případě povrchu ložiskové klece, čímž je konkrétně myšlena mikro-tvrdość povrchu.

- Extrakce ložiskové klece z ložisek ZKL6003
- Změření zvolených rozměrů ložiskových klecí na přístroji DEOM VERTEX
- Změření mikro-tvrdości výchozího ocelového substrátu na přístroji Qness Q30M
- Provedení povrchové úpravy Bezproudý chemický nikl nebo zahřání ložiskové klece na stanovenou teplotu po stanovenou dobu
- Opětovné změřením zvolených rozměrů ložiskových klecí na přístroji DEOM VERTEX
- Opětovné změřením mikro-tvrdości po nanesení povrchové úpravy na přístroji Qness Q30M (nutno poznamenat, že se nejedná o vzorek ze stejné ložiskové klece jako při měření mikro-tvrdości výchozího ocelového substrátu, neboť ta byla při odebírání původního vzorku demontována a nebyla použita ani pro některou operaci při zjišťování změny rozměrů)
- Vyhodnocení změny rozměrů a vyhovění požadavkům na mikro tvrdost povrchové úpravy Bezproudý chemický nikl
- Sepsání závěrečné zprávy

Měření zvolených rozměrů ložiskových klecí

Měření proběhlo na přístroji DEOM VERTEX, kde bylo provedeno optické měření zvolených rozměrů ložiskové klece, kdy byl obraz zachycen CCD kamerou. Měření bylo provedeno dle vyjádření metrologa s přesností 1 mikrometr. Obecný princip tohoto měření je popsán v této kapitole.

Optické bezdotykové snímače využívají k měření zachycování elektromagnetického vlnění viditelného spektra, a jsou schopny měřit pouze v rovině, tzn. ve 2D. Pokud má být vytvořen komplexní digitální 3D model měřeného výrobku, je třeba změřit navíc i vzdálenost od měřicího senzoru k povrchu měřeného výrobku, což je prováděno buď laserem, ultrazvukem nebo pomocí interference světla, kdy je použito několik CCD kamer. [11]

Digitalizovaný obraz je vlastně dvourozměrné pole skládající se z pixelů, kde každý pixel představuje měřený bod. Pokud je znám výchozí bod měřeného výrobku v prostoru a jsou správně nastaveny parametry měřicího přístroje, jako např. vzdálenost kamery nad výrobkem, může být tedy každému z pixelů přiřazena relativní souřadnice vzhledem k výchozímu bodu. Rozlišení výsledného obrazu je dáno vzdáleností středů jednotlivých pixelů, a platí, že čím větší má CCD kamera rozlišení, tím přesnější je měření. Klíčové při zpracování digitálního obrazu je odfiltrovat rušivé vlivy při měření (např. nežádoucí odrazy vnějšího osvětlení) tak, aby nebyl narušen celkový obraz. Toho je docíleno odstraněním pixelů, které neodpovídají okolí, což znamená, že rozdíl jejich odstínů je nápadně větší nebo naopak nápadně menší než odstín okolních pixelů. Takové nežádoucí pixely jsou nahrazeny odstínem určeným na základě zprůměrování odstínu okolních pixelů. Důležité pro samotné měření je nalezení barevných přechodů, které představují hrany měřeného výrobku. Princip je podobný jako při digitalizaci ručně psaných dokumentů. Nejlepší je převedení na černobílou barevnou paletu, kdy 0xFF představuje čistě bílou barvu a 0x00 sytě černou barvu. Body přechodů mohou být vyhledávány několika způsoby. Nejjednodušším je stanovení nějakého rozdílu, o který se musí lišit číslo odstínu aktuálně zpracovávaného pixelu od odstínu pixelu zpracovávaného v minulém cyklu. Algoritmus postupně prochází pixely po sloupcích i řádkách. Výsledkem je množina pixelů, které byly vyhodnoceny jako přechodové, a k nim množina přiřazených souřadnic v reálném prostoru. Z těchto souřadnic lze pomocí analytických funkcí určit rovnice křivek a celý obraz uložit jako množinu křivek. Takto vlastně vznikne digitální výkres výrobku, ze kterého mohou být pomocí analytických algoritmů určeny požadované rozměry. Pomocí této metody je obtížné změřit rozměry výrobků bez výrazných přechodů např. vejcovitého tvaru. K změření rozměrů rozmanitých nerovinných ploch je třeba vytvořit digitalizovaný 3D model výrobku, z něhož mohou být určeny rozměry, které nejsou při 2D měření patrné. [11]

Měření mikro-tvrdomosti zkoušeného povrchu ložiskových klecí

Měření proběhlo na automatickém elektronicky řízeném mikro-tvrdoměru podle ČSN EN ISO 6507-1, kdy byla použita zkušební metoda HV0.01 se zatížením 0.1N. Z ložiskové klece byl vyňat plíšek o velikosti 10x5mm tak, aby byla většina jeho povrchu rovinná, protože ložisková klec se skládá z rozmanitých zákrutů zejména kolem lůžka pro kuličky. Vzorek byl zalit do metylmetakrylátové pryskyřice VariDul200, při čemž bylo dbáno na to, aby byla testovaná rovina vzorku kolmá ke sledované ploše metalografického výbrusu. Vzorek byl vybroušen na metalografické brusce, při čemž byly měněny brusné papíry od nejhrubšího s označením P120 po nejjemnější s označením P600. Vzorek musel být dále elektrolyticky vyleštěn a naleptán, k čemuž byl použit přístroj LectroPol 5. Metrolog po vložení zkušebního vzorku, a zadání základních identifikačních údajů, nastaví zkušební metodu, a její parametry. Po té následuje automaticky řízení vtisk tělesa do povrchu, optoelektronické změření jeho otisku, a následné vyhodnocení výsledků měření integrovaným softwarem, po čemž jsou výsledky zobrazeny na spřažený 19 palcový LCD monitor. Při měření vnikne diamantový indentor tvaru pravidelného jehlanu se čtvercovou základnou o výšce 100 mikronů a vrcholovým úhlem 136°, při čemž hloubka vpichu je přibližně 1/7 délky průmětu jeho hran na rovinu vzorku. Povrch je prostřednictvím hrotu jehlanu vystaven zatížení po stanovenou dobu, která se pohybuje od 6 do 30 sekund. Na zkoušené ploše je způsobena plastická deformace ve tvaru indentoru. Proces měření je charakterizován tlakem na ploše vpichu, kdy je velikost tohoto tlaku nazývána jako Vickersova mikro-tvrdomost, zkráceně MHv. Rozměry vpichu, a sice úhlopříčky průmětu otisku jehlanu do sledované roviny metalografického výbrusu po uvolnění indentoru, jsou mikroskopicky měřeny. Výsledná hodnota Vickersovy mikro-tvrdomosti je určena ze vztahu:

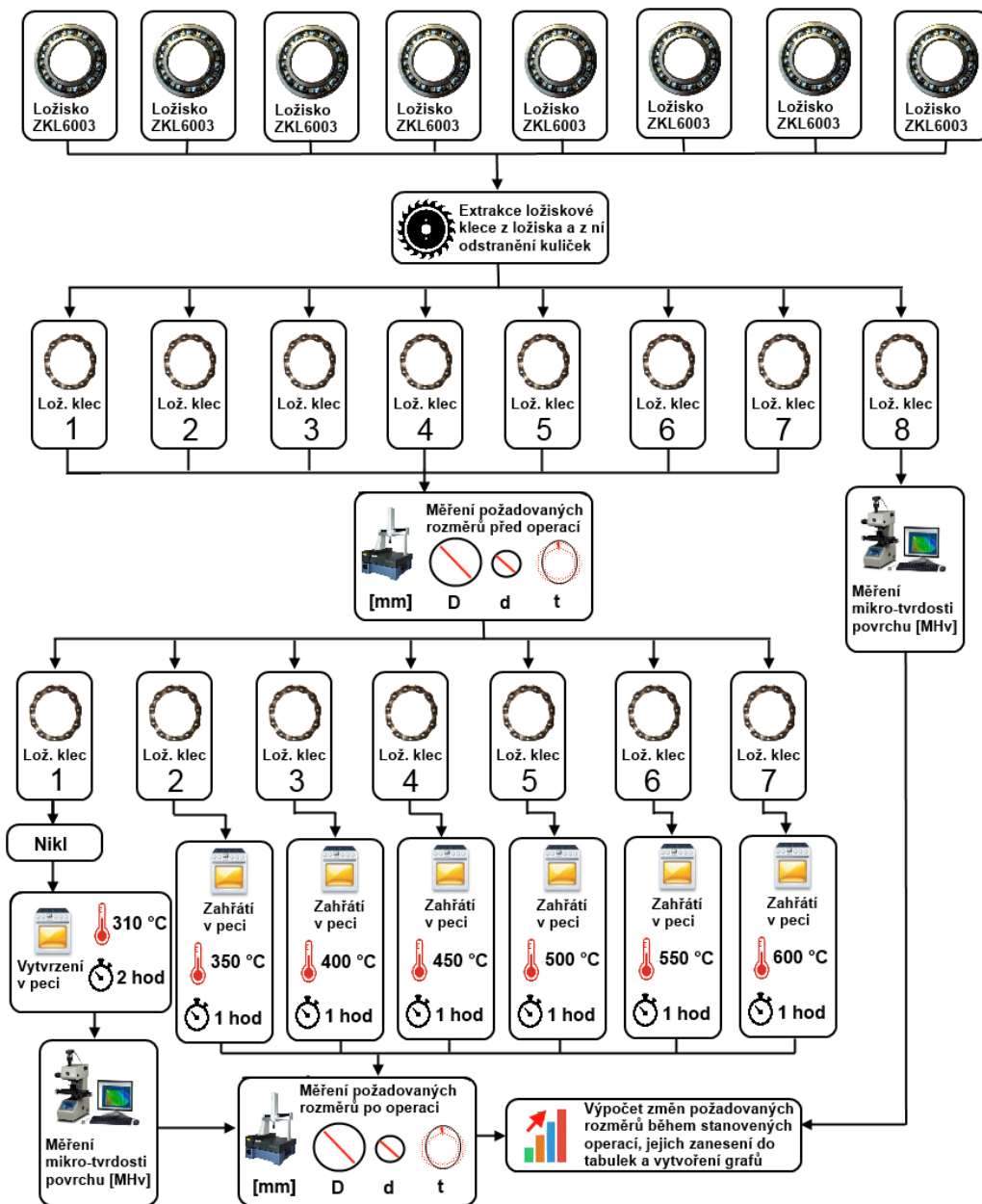
$$MHv = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

kde F je aplikované zatížení v Newtonech, d je průměr délek úhlopříček v milimetrech (rozdíl v jejich délkách může být dán jak nehomogenitou testovaného povrchu co se týče jeho tvrdosti, tak nějakým problémem v měřicím nástroji) a uvedená konstanta přepočítává průměr délek úhlopříček na plochu průmětu vtisku do sledované roviny metalografického výbrusu. Mikro-tvrdomost může být tímto způsobem určena pouze v případě, že je materiál plastický, protože je měřena trvalá deformace způsobená při vniku indentoru do povrchu testovaného vzorku. Například guma by šla tímto způsobem těžko měřit. Jednotky ve výše

uvedeném vztahu vycházejí ze soustavy jednotek SI, není tedy potřeba převádět např. z anglosaských jednotek. [12] [13]

Průběh a výsledky experimentálních prací

V následujícím schématu jsou názorně vyobrazeny kroky při experimentálních pracích pro jednotlivé zkušební vzorky. Zkušebním vzorkem je myšleno jednořadé kuličkové ložisko ZKL6003, jehož vnitřní průměr je 17 mm, vnější průměr je 35 mm, tloušťka je 10 mm a váha je 40 gramů. Celkový počet zkušebních vzorků je 8. Je měřeno 5 druhů parametrů ve 2 časových okamžicích, při čemž mikro-tvrdotost je měřena 3 krát pro potlačení chyby při měření. [4]



Obr. č. 1 - Schéma ukazující průběh experimentálních prací

Prvním krokem je extrakce ložiskové klece, ta byla provedena s ohledem na její co nejmenší poškození, i když je jasné, že při vyjmutí kuliček došlo k určité deformaci. Proto jsou všechny měření prováděna až po vyjmutí ložiskové klece z ložiska a po odstranění jednotlivých kuliček z klece. Na prvním obrázku je ložisko ZKL6003 vcelku a na druhém obrázku je již vyjmutá ložisková klec, ze které byly odstraněny jednotlivé kuličky.



Obr. č. 2 – Jednořadé kuličkové ložisko ZKL6003 před vyjmutím klece



Obr. č. 3 – Ložisková klec vyňatá z ložiska ZKL6003

Po té byly změřeny na přístroji DEOM VERTEX požadované rozměry (vnitřní a vnější průměr, kruhovitost) u zkušebních vzorků č. 1 až č. 7 a u zkušebního vzorku č. 8 byla změřena mikro-tvrдость. Po té byla na zkušební vzorek č. 1 aplikována bezproudá chemická

povrchová úprava Nikl (byl použit středo-fosfor – ENOVA M15 lesklý) a zkušební vzorky č. 2 až č. 7 byly zahřáty na teploty 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500°C, 550°C a 600°C po dobu jedné hodiny. Po niklování byl zkušební vzorek č. 1 ještě vytvrzen při teplotě 310 °C po dobu dvou hodin. Zatímco pro zkušební vzorky č. 2 až č. 4 byla použita vytvrzovací pec nacházející se v galvanovně, pro č. 5 až č. 7 byla použita kalící pec u spřátelené společnosti, neboť kalící pec přítomná v galvanovně je schopna držet stabilní teplotu max. 450 °C.



Obr. č. 4 – Pohled na nýt mezi lůžky pro kuličky u ložiskové klece s právě provedenou povrchovou úpravou chemický nikl



Obr. č. 5 – Pohled na nerovnoměrnosti povrchu ložiskové klece mezi lůžky pro kuličky po zahřátí na 600°C na 1 hodinu

Po provedení stanovených operací na jednotlivých zkušebních vzorcích jsou zkušební vzorky č. 1 až č. 7 opět změřeny na stejném přístroji a u zkušebního vzorku č. 1 je následně provedena zkouška mikro-tvrdomosti podle Vickerse. Postupy jsou nastíněny v předchozích odděleních.

Nejprve je porovnávána mikro-tvrdomost naměřená na povrchu ocelového substrátu a hodnota naměřená po aplikaci povlaku chemického niklu a následném tepelném vytvrzení.

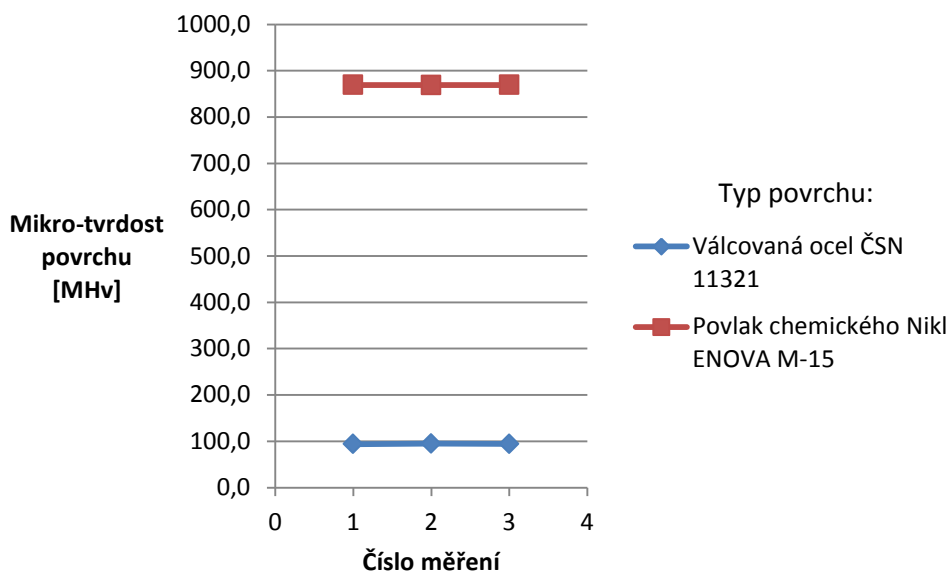
Tabulka č. 1 – Naměřené hodnoty mikro-tvrdomosti oceli a průměr z těchto hodnot

Válcovaná ocel ČSN 11321				
Číslo měření	1	2	3	Průměr
Naměřená hodnota [MHv]	93,9	94,8	94,1	94,27

Tabulka č. 2 – Naměřené hodnoty mikro-tvrdomosti povlaku niklu a průměr z těchto hodnot

Povlak chemického Niklu ENOVA M-15				
Číslo měření	1	2	3	Průměr
Naměřená hodnota [MHv]	869,1	868,9	869,1	869,03

Tabulka č. 3 – Porovnání hodnot mikro-tvrdosti ocelového substrátu a povlaku niklu



Z porovnaných výsledků je patrné, že povlak niklu má několikanásobně vyšší tvrdost než původní ocelový substrát, a že dosahuje podobných hodnot jako karbonitridace v solné lázni.

Dále je třeba ověřit, zda může vystavení ložiskové klece teplotě simulující děj karbonitridace ovlivnit velikost jejích rozměrů a zda u bezproudé povrchové úpravy chemický nikl tento problém nenastane, jak je předpokládáno. V následující tabulce jsou zapsány rozměry naměřené před provedením jednotlivých operací. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech (tisícina milimetru je jeden mikrometr).

Tabulka č. 4 – Hodnoty rozměrů naměřené na jednotlivých zkušebních vzorcích před operacemi

Operace	Před operací				
	Číslo klece	Vnitřní kruh	Vnější kruh	Vnitřní kruhovitost	Vnější kruhovitost
Nikl	1	44,449	52,037	0,584	0,388
350 °C	2	44,416	51,967	0,402	0,487
400 °C	3	44,629	52,136	0,400	0,529
450 °C	4	44,367	52,174	0,356	0,433
500 °C	5	44,342	52,027	0,339	0,324
550 °C	6	44,388	52,012	0,338	0,399
600 °C	7	44,282	52,044	0,401	0,366

V další tabulce jsou zapsány hodnoty stejných rozměrových parametrů naměřené po provedení jednotlivých operací.

Tabulka č. 5 – Hodnoty stejných rozměrových parametrů naměřené na jednotlivých zkušebních vzorcích po operacích

Operace	Po operaci				
	Číslo klece	Vnitřní kruh	Vnější kruh	Vnitřní kruhovitost	Vnější kruhovitost
Nikl	1	44,464	52,022	0,583	0,388
350 °C	2	44,434	51,984	0,369	0,422
400 °C	3	44,654	52,159	0,443	0,513
450 °C	4	44,539	51,986	0,912	1,020
500 °C	5	44,532	51,746	1,032	1,010
550 °C	6	44,207	52,271	1,034	0,978
600 °C	7	44,455	52,347	1,257	1,151

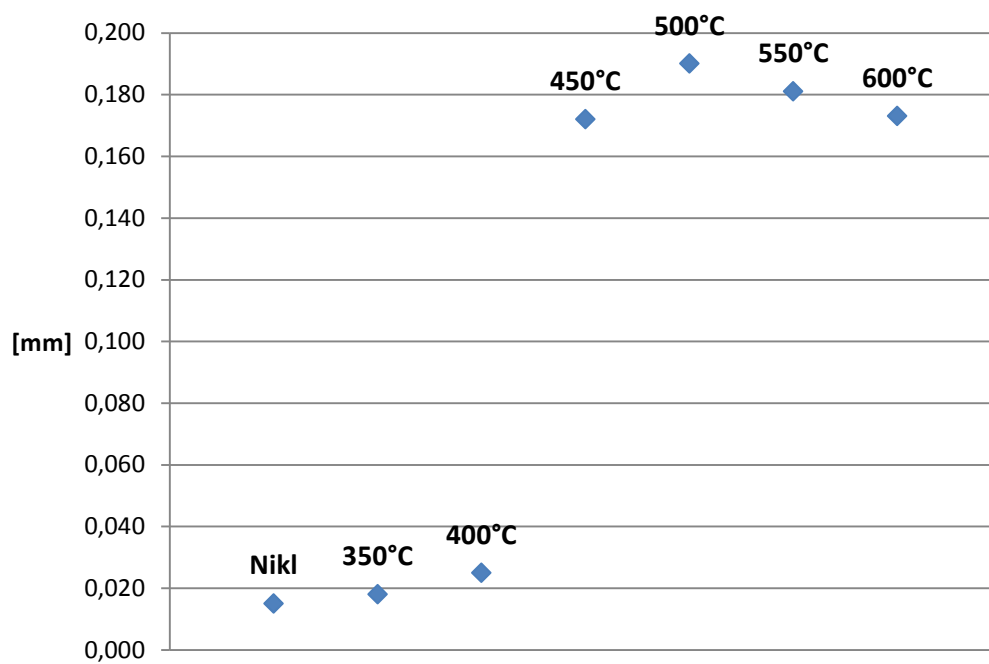
S pomocí programu Excel byly do poslední tabulky spočteny absolutní změny rozměrů, kterými jsou průměry vnitřního a vnějšího kruhu splývajících s hranami ložiskové klece a odchylky těchto ve skutečnosti elips od skutečné kružnice.

Tabulka č. 6 – Změna jednotlivých rozměrů u jednotlivých zkušebních vzorků mezi stavy před a po operacích

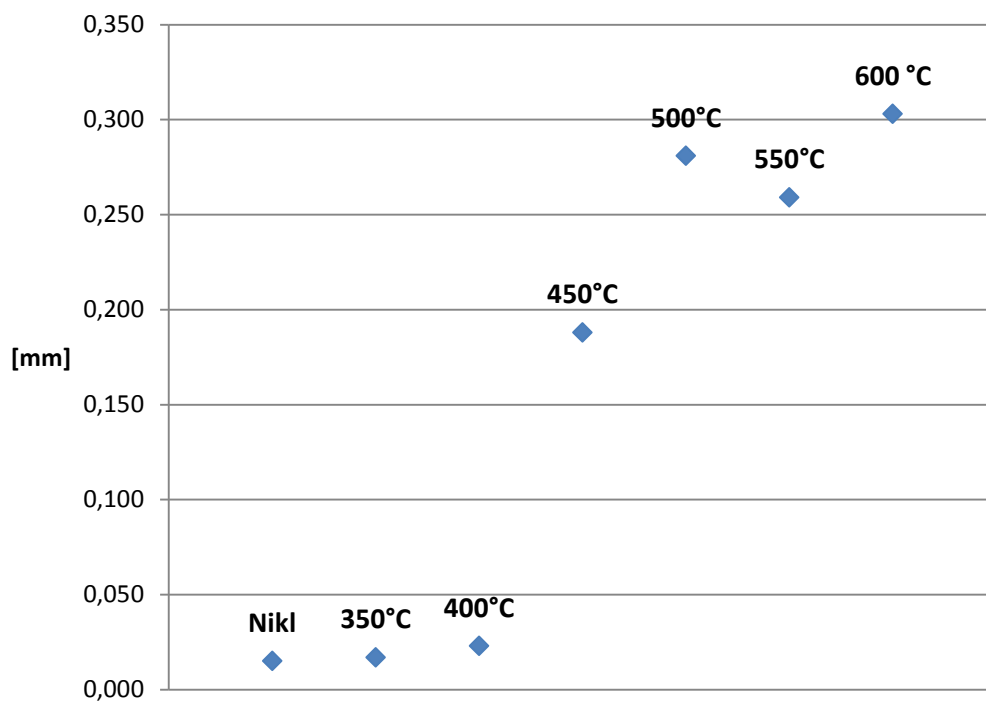
Operace	Změna rozměrů				
	Číslo klece	Průměr vnějšího kruhu	Průměr vnitřního kruhu	Kruhovitost vnitřního kruhu	Kruhovitost vnějšího kruhu
Níkl	1	0,015	0,015	0,001	0,000
350 °C	2	0,018	0,017	0,033	0,065
400 °C	3	0,025	0,023	0,043	0,016
450 °C	4	0,172	0,188	0,556	0,587
500 °C	5	0,190	0,281	0,693	0,686
550 °C	6	0,181	0,259	0,696	0,579
600 °C	7	0,173	0,303	0,856	0,785

Aby byly naměřené změny rozměrů snadněji představitelné a prezentovatelné, jsou hodnoty představující změnu každého z měřených rozměrů vyobrazeny jako body v grafech, kde jsou jednotlivé body označeny zkráceným názvem příslušné operace, která byla v průběhu experimentálních prací se zkušebním vzorkem provedena, a na svislé ose je spočtená změna rozměru v milimetrech (všude je operováno s přesností na tisícinu milimetru tj. mikrometry).

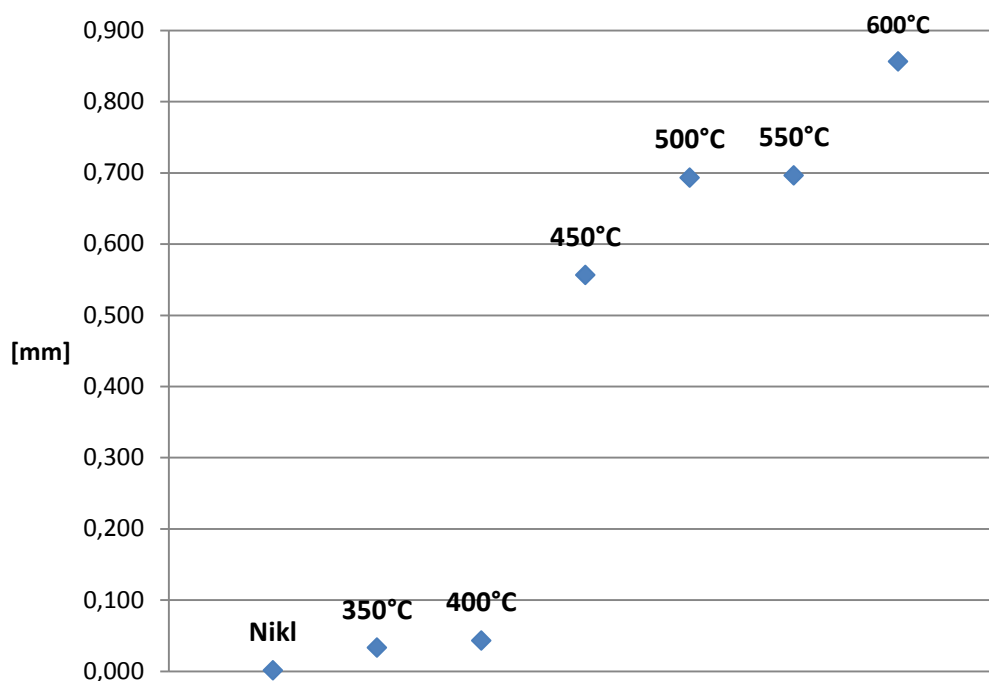
Graf č. 3 – Změna průměru vnitřního kruhu v milimetrech



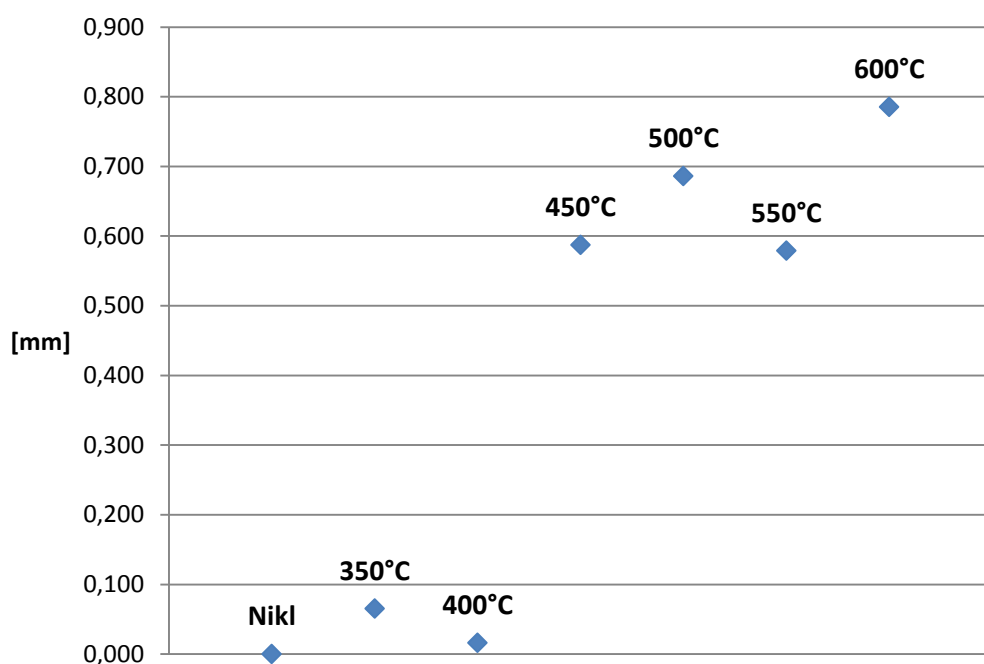
Graf č. 4 – Změna průměru vnějšího kruhu v milimetrech



Graf č. 5 – Změna kruhovitosti vnitřního kruhu



Graf č. 6 – Změna kruhovitosti vnějšího kruhu



Jak je vidět z předchozích grafů (i tabulek), při zahřátí zkušebních vzorků na teplotu 450 °C nebo více po dobu jedné hodiny došlo k výrazné změně všech měřených rozměrů v porovnání se zkušebními vzorky, které nebyly vystaveny tak vysoké teplotě, což platí i pro pokovování chemickým niklem, kde se pracovní teplota pohybuje kolem 90 °C a při tepelném

vytvrzení, které bylo použito, nepřesáhla teplota 310°C. Pokud by byla vyžadována větší mikro-tvrдость povlaku niklu, může být provedeno tepelné vytvrzení po dobu 1 hodiny při 400 °C, což zaručí výslednou mikro-tvrдость 1000 MHv. Ani tato skutečnost by podle výsledků experimentálních prací neměla mít signifikantní vliv na změny rozměrů povlakované ložiskové klece.

Ekonomické zhodnocení navrhovaného řešení

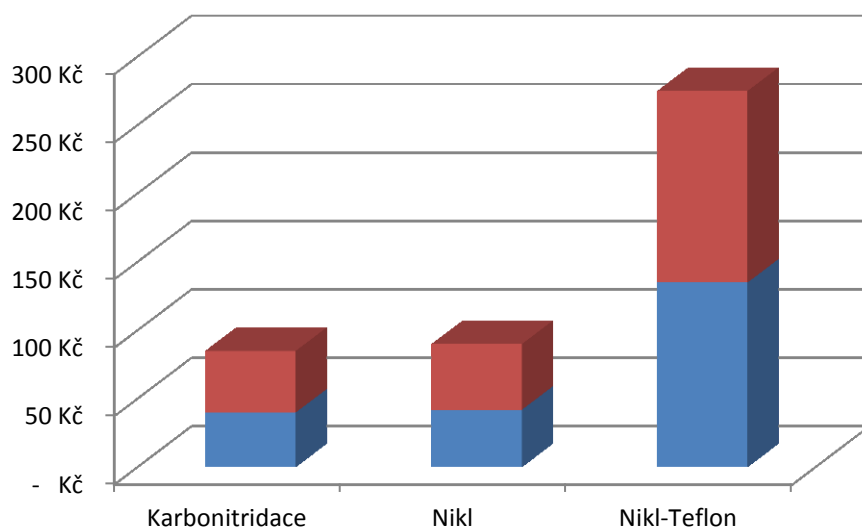
Přestože bylo prokázáno, že navrhovaná alternativa v podobě nahrazení karbonitridace bezproudou chemickou povrchovou úpravou Nikl, odstraní popisované problémy, jejichž důsledkem je velké procento znehodnocených ložiskových klecí, je také třeba seznámit čtenáře této práce s ekonomickým srovnáním současného stavu se stavem, kdy by bylo používáno navrhované řešení. Nutno poznamenat, že až 45% znehodnocených ložiskových klecí představuje pro výrobce ložisek tak velkou finanční ztrátu, že i pokud bychom nenabídli srovnatelnou cenu Niklu, bylo by pro výrobce výhodnější zvolit si Nikl. Ceny povrchových úprav v následujícím grafu byly spočteny pro zákazníka, který bude odebírat velké množství kusů, při čemž konkrétní cena by byla stanovena individuálně po jednání se zákazníkem po sdělení vyrobeného množství ve střednědobém časovém výhledu. Kompozitní chemická povrchová úprava Nikl-Teflon je nabízena pro náročné zákazníky z důvodů, které byly vysvětleny v přechozích částech této práce.

Tabulka č. 7 – Porovnání cenových hladin jednotlivých povrchových úprav

Druh služby	Cena za dm ² (dolní mez)	Cena za dm ² (horní mez)
Karbonitridace	40 Kč	45 Kč
Nikl	42 Kč	48 Kč
Nikl-Teflon	135 Kč	140 Kč

Na následujícím grafu je vyznačena dolní cenová hladina (modře) a horní cenová hladina (červeně) pro jednotlivé povrchové úpravy na jednotku povrchu povlakovaného výrovku. Přesnější určení ceny se provádí na základě konkrétní poptávky a na základě předpokládaného množství, které bude zákazník poptávat.

Graf č. 7 – Porovnání cenových hladin jednotlivých povrchových úprav



Závěr

Výsledky experimentálních prací přesvědčivě prokázaly vliv na výslednou kvalitu ložisek v důsledku vysoké teploty. Z výpočtů provedených na základě výsledků experimentálních prací, rozměry ložiskových klecí, vystavených teplotám, blížícím se pracovní teplotě karbonitridace po dobu, která odpovídá pracovní době karbonitridace ložiskových klecí, používané při současném stavu, se změnil vlivem vnitřního pnutí. Je to z toho důvodu, že byl překročen práh rekrytalizace zrn oceli.

Podrobnější vysvětlení, v němž jsou blíže uvedeny příčiny tohoto stavu, se nachází v teoretickém popisu problematiky.

Experimentálními pracemi bylo dále zjištěno, že při navrhované chemické bezproudové úpravě Nikl nedochází k těmto nežádoucím změnám rozměrů, protože se provozní teplota pohybuje kolem 90°C, resp. 310 °C při tepelném vytvrzení. Zlepšila se zároveň i tvrdost povlakového povrchu ložiskové klece, což je hlavní požadavek na použitou povrchovou úpravu (v porovnání s ocelovým substrátem). To má značnou ekonomickou výhodu pro zákazníka v důsledku vyšší spolehlivosti a dlouhodobější použitelnosti.

Výsledky těchto mých experimentálních prací, s následně provedenou řadou měření prokázaly výrazné ekonomické a především kvalitativní dopady zvolené technologie povrchové úpravy.

Použitá literatura

- [1] *Všeobecné údaje o ložiskách*. [online] Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/7-loziska-vseobecne-udaje> [3.5.2017]
- [2] *Vlastnosti ložiskových klecí*. [online] Dostupné z: <http://www.vibanalysis.co.uk/technical/cage/cage.html> [Archiv - 10.11.2010]
- [3] BOBLET, Joachim. *Základy a aplikace karbonitridace v solné lázni*. Interní materiál. Mannheim, Berlin 2006.
- [4] *Specifikace ložiska ZKL6003*. [online] Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/cat/2013/srbb/6003> [3.5.2017]
- [5] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1217-7.
- [6] OBR, Ladislav. *Nové poznatky v oblasti chemického niklování*. Interní materiál. Atotech CZ, a.s., Jablonec nad Nisou.
- [7] VONDROUŠ, Jiří. *Návrh a konstrukce modelu automatické galvanizační linky*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2008. [online] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8458 [3.5.2017]
- [8] *Moření v kyselině chlorovodíkové*. [online] Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/moreni-v-hcl/> [3.5.2017]
- [9] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-X.
- [10] MERY, Sébastien. *Bezprúdý nikl – ENOVA*, interní prezentace pro odběratele. Červen 2014.
- [11] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [12] *Měření mikro-tvrdomosti s největší přesností*. Reklamní a technický prospekt. [online] Dostupné z: <http://www.imr.saske.sk/documents/1-677-q10prospekt.pdf> [4.5.2017]

- [13] *Stanovení mikro-tvrdotí tenkých ochranných povrchových vrstev. Experimentální metody v tváření.* [online] Dostupné z:
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/projekty/frvs139/T3.pdf> [4.5.2017]
- [14] KOCICH, Radim. *Termomechanické procesy tváření: studijní opora.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3586-0. [online] Dostupné z:
https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/termomechanicke-procesy-tvareni/Kocich_Termomechanicke-procesy-tvareni.pdf [4.5.2017]
- [15] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu].* V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03379-1. [online] Dostupné z:
<https://www.fd.cvut.cz/personal/sodomjar/nauka%20o%20materialu.pdf> [13.5.2017]
- [16] *Ocel k tažení a sváření za studena.* Technická specifikace produktu. [online] Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/profily5-11320.pdf> [13.5.2017]
- [17] *Konverzní tabulka pevnosti v tahu.* [online] Dostupné z:
<http://www.merenitvrlosti.cz/konverzni-tabulka-pevnosti-v-tahu.html> [13.5.2017]
- [18] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Přednášky - Nauka o materiálu 1,* ČVUT, Praha, 2000
- [19] *Technologie tváření kovů.* [online] Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm [13.5.2017]

Přehled obrázků

<i>Obr. č. 1 - Schéma ukazující průběh experimentálních prací</i>	21
<i>Obr. č. 2 – Jednořadé kuličkové ložisko ZKL6003 před vyjmutím klece</i>	22
<i>Obr. č. 3 – Ložisková klec vyňatá z ložiska ZKL6003</i>	22
<i>Obr. č. 4 – Pohled na nýt mezi lůžky pro kuličky u ložiskové klece s právě provedenou povrchovou úpravou chemický nikl</i>	23
<i>Obr. č. 5 – Pohled na nerovnoměrnosti povrchu ložiskové klece mezi lůžky pro kuličky po zahřátí na 600°C na 1 hodinu</i>	23

Přehled tabulek

<i>Tabulka č. 1 – Naměřené hodnoty mikro-tvrdosti oceli a průměr z těchto hodnot.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka č. 2 – Naměřené hodnoty mikro-tvrdosti povlaku niklu a průměr z těchto hodnot</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka č. 3 – Porovnání hodnot mikro-tvrdosti ocelového substrátu a povlaku niklu....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka č. 4 – Hodnoty rozměrů naměřené na jednotlivých zkušebních vzorcích před operacemi</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka č. 5 – Hodnoty stejných rozměrových parametrů naměřené na jednotlivých zkušebních vzorcích po operacích.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka č. 6 – Změna jednotlivých rozměrů u jednotlivých zkušebních vzorků mezi stavy před a po operacích</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka č. 7 – Porovnání cenových hladin jednotlivých povrchových úprav</i>	<i>32</i>

Přehled grafů

<i>Graf č. 1 – Tloušťka sloučeninové vrstvy v závislosti na době zpracování</i>	<i>11</i>
<i>Graf č. 2 – Závislost mikro-tvrdosti výsledného povlaku na době vytvrzení</i>	<i>16</i>
<i>Graf č. 3 – Změna průměru vnitřního kruhu v milimetrech</i>	<i>29</i>
<i>Graf č. 4 – Změna průměru vnějšího kruhu v milimetrech</i>	<i>29</i>
<i>Graf č. 5 – Změna kruhovitosti vnitřního kruhu</i>	<i>30</i>
<i>Graf č. 6 – Změna kruhovitosti vnějšího kruhu</i>	<i>30</i>
<i>Graf č. 7 – Porovnání cenových hladin jednotlivých povrchových úprav</i>	<i>33</i>