

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti využití CHTZ pro zvýšení životnosti řetězu jízdního kola

Autor: **Petr Nováček**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Nováček	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	„Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti využití CHTZ pro zvýšení životnosti řetězu jízdního kola		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	62	TEXTOVÁ ČÁST	44	GRAFICKÁ ČÁST	18
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se zabývá možnostmi využití ochrany povrchu základního materiálu řetězového systému před nepříznivými vlivy pracovního prostředí. Práce si klade za cíl navrhnout a ověřit vhodné chemicko – tepelné zpracování, které zajistí zvýšení životnosti řetězu jízdního kola.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Nitridace, cementace, tribologie, zkouška tahem, korozivzdornost, tvrdost, povlaky, vrstvy, řetěz</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Nováček	Name Petr	
FIELD OF STUDY	„Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Possibilities of Heat Treatment Process to Increase a Bicycle Chain Lifetime		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	62	TEXT PART	44	GRAPHICAL PART	18
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Bachelor thesis deals with different possibilities how to protect the surface of the main chain material against adverse influences of working environment. The aim of this work is to suggest and prove the right method of heat treatment which ensures increasing of bicycle chain lifetime.
KEY WORDS	Nitriding, carburizing, tribology, tensile strength, corrosion resistance, hardness, coating, chain

Poděkování

Touto formou bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli s realizací této bakalářské práce. Poděkování patří především vedoucímu práce panu Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D., panu Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. a panu Ing. Vojtěchu Průchovi za odborné vedení a pomoc při zpracování experimentální části práce.

Obsah

1	Úvod	4
1.1	Hnací řetězy	4
1.2	Válečkový řetěz	5
1.3	Historie válečkových řetězů	6
2	Kovové povlaky a vrstvy	7
2.2	Elektrolýza	7
2.2.1	<i>Niklování</i>	8
2.2.2	<i>Mosazení</i>	9
2.2.3	<i>Chromování</i>	10
2.2.4	<i>Polytetrafluorethylenová vrstva</i>	11
2.2.5	<i>Zinkování</i>	11
2.3	Fyzikální a fyzikálně – chemické povlakování	12
2.4	Shrnutí a závěrečný přehled	15
3	Chemicko - tepelné zpracování	15
3.1	Proces chemicko-tepelného zpracování	16
3.2	Cementování	17
3.3	Nitridování	20
4	Chemické a mechanické opotřebení řetězu jízdního kola	27
4.1	Mechanické namáhání jednotlivých článků	27
4.2	Porušování povrchu	28
5	Experimentální část	29
5.1	Charakteristika zkušebních těles a odběr vzorků	29
5.2	Metalografie	31
5.3	Chemicko- tepelné zpracování	34
5.8	Cementace	39
5.4	Měření mikrotvrdosti	41
5.5	Zkouška tahem	45
5.6	Měření hloubky vrstvy	47
5.7	Test korozivzdornosti	50
5.9	Tribologie	54
6	Diskuze výsledků	57
7	Závěr	59
8	Zdroje	60

Přehled použitých symbolů a zkratek

CHTZ – chemicko – tepelné zpracování
NaCl – chlorid sodný
Na⁺ - kation sodný
Cl⁻ - chlorid
Cu – měď
CuSO₄ – síran měďnatý
Cu²⁺ - kation měďnatý
m – hmotnost vyloučené látky [g]
I – elektrický proud [A]
T – čas [s]
A_e - elektrochemický ekvivalent
M - molární hmotnost kovu [g.mol⁻¹]
n - mocenství kationtu v lázni
F - Faradayova konstanta [C.mol⁻¹]
NiSO₄ – síran nikelnatý
NiCl₂ – chlorid nikelnatý
NH₄Cl - chlorid amonný
CrH₂ – hydrid chromnatý
HV – tvrdost dle Vickerse
HB – tvrdost dle Brinella
PTFE – polytetrafluorethylen
CVD – chemical vapour deposition – chemická depozice z plynné fáze
PVD – physical vapour deposition – fyzikální depozice z plynné fáze
TiN – nitrid titanu
TiC – karbid titanu
TiCl₄ – chlorid titaničitý
CH₄ – methan
C₃H₈ - ethan
HCl – kyselina chlorovodíková
DLC – diamond like carbon
Fe α, Fe γ – alotropické modifikace železa
D₁₀ - součinitel difuzivity [m².s⁻¹]
ΔH_i - aktivační entalpie difuze [kJ.mol⁻¹]
K_c – rovnovážná konstanta
Le – Lewisovo kritérium
a - teplotní vodivost [m².s⁻¹]
D – difuzivita [m².s⁻¹]
A_{c3} – překryštalizační teplota
A₁ – teplota eutektoidní přeměny
BaCO₃ – uhličitan barnatý
Na₂CO₃ – uhličitan sodný
CO₂ – oxid uhličitý
BaO – oxid barnatý
CO – oxid uhelnatý
Me – alkalické kovy
SiO₂ – oxid křemičitý
NaCl – chlorid sodný
KCN – kyanid draselný

Fe₄N – braunit
ČSN – Česká státní norma
EDX - Energy-dispersive X-ray spectroscopy
RTG – rentgenové záření
C₂H₅OH – etanol
C₆H₃N₃O₇ – kyselina pikrová
C₂Cl₄ – tetrachlorethylen
KMM – Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
NH₃ – Amoniak
F – velikost zátěžné síly [N]
D – velikost uhlopříčky [mm]
L – délka [m]
DIN – německé označení norem
ISO – mezinárodní organizace pro normalizaci
C₂Cl₄ – perchlor
Ra – stupeň změny vzhledu
Al₂O₃ – oxid hlinitý
V – úběr [mm³]
W – koeficient opotřebení [mm³*N⁻¹*m⁻¹]

1 Úvod

Člověk je úžasný tvor, má neustálou potřebu objevovat nové věci. Dnešní společnost s vidinou nekonečného růstu prahne po vývoji nových technologií. Jinak tomu samozřejmě není ani u metalurgie, která se zabývá výrobou a zpracováním kovů a jejich slitin. V dávné minulosti, v dobách před našim letopočtem, se člověk poprvé seznamuje s prvními kovy jako měď, zlato, bronz či surové železo. Jeho poznatky a vědomosti ovšem zdaleka nedosahují takové úrovně, s jakou dnes disponuje naše společnost. Od dob železné a bronzové, kdy se z železné rudy tavením získávalo surové železo, se dostáváme k dobám antickým, kde se formují první technologie zpracování kovů. Ve středověku přichází objev šachtových pecí, které jsou obdobou dnešních vysokých pecí, díky kterým se získává železo s větším obsahem uhlíku. Již v těchto dobách se také poprvé objevují první náznaky dalšího tepelného zpracování, kdy se především zbraně, jako meče či různé štíty, zabalují do kožešin či potírají vrstvou tuku a poté se společně zahřívají v pecích na určitou teplotu, tento proces je primitivní obdobou dnešní cementace. Společnost si je vědoma, že s pomocí tohoto zpracování lze zvýšit odolnost a tvrdost povrchové vrstvy. Všechny znalosti a vědomosti se předávají z generace na generaci, s vynalezením knihtisku se i písemně zaznamenávají. Díky této touze neustále objevovat a zdokonalovat se v různých disciplínách, máme dnes možnost využívat nepřehledné množství různých technologií a postupů při výrobě a dalším zpracování kovových výrobků.

Požadavky na výrobu a zpracování kovů a jejich vrstev se neustále zvyšují. Dnešní normy a kontroly kvality kladou velký důraz na jakost a správnou funkčnost výrobků. Aby bylo dosaženo požadovaných kritérií, musí se společně se správnou technologií výroby kovů a jejich slitin zvolit další vhodné zpracování, např. chemicko – tepelné, které zaručí požadovanou funkčnost a provozuschopnost daného produktu.

Řetěz jízdního kola, ačkoliv se tak na první pohled nemusí zdát, tvoří jeden z nejdůležitějších komponentů celého jízdního kola. Zajišťuje totiž přenos mechanické energie potřebné k pohonu samotného kola, zároveň se jedná o jednu z velmi zatěžovaných částí, která se během životního cyklu jízdního kola musí vždy po určité době obměnit za novou, neboť vlivem provozních podmínek dochází k neustálému opotřebovávání a následné degradaci jednotlivých funkčních částí. Cílem této práce je tedy navrhnout vhodné chemicko – tepelné zpracování (dále jen CHTZ), jenž dodá řetězu potřebné vlastnosti, které zpomalí nebo eliminují proces neustálého narušování povrchu jednotlivých funkčních částí, čímž by došlo k zvýšení životnosti a provozuschopnosti celého řetězu.

1.1 Hnací řetězy

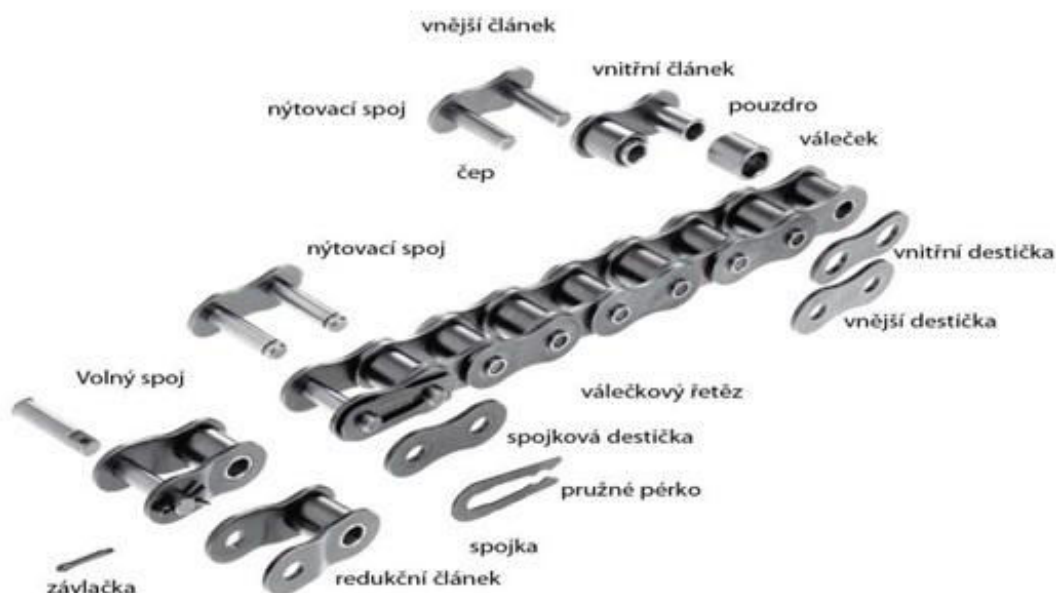
Hnací řetězy a řetězové převody jsou využívány nejčastěji ve strojnictví k přenosu mechanické energie z jednoho místa na druhé, obvykle z hnacího ozubeného kola na hnané ozubené kolo. Kroučící moment se přenáší tvarovým stykem. Tento typ převodu lze v praxi spatřit především u motocyklů a jízdních kol, ale také v široké škále různých strojů sloužících k všemožným účelům, jako například řetězy používané v těžkém průmyslu pro manipulaci s tělesy o hmotnosti několika desítek tun, či mohou být součástí dopravních linek. Všechny řetězy musí být tedy navrhovány tak, aby vydržely vysoké mechanické namáhání a vyznačovaly se dostatečnou životností a odolností vůči rázovému zatížení. Ve srovnání s řemenovými převody hnací řetězy méně namáhají hřídele a ložiska a umožňují přenos kroučícího momentu na kratší vzdálenosti. Mezi nevýhody řetězových převodů patří složitost konstrukce a nutnost dodržení přesné geometrie a tím pádem vyšší cena a náročnější údržba. Mezi základní druhy hnacích řetězů patří řetěz článkový, Ewartův, Gallův, čepový a válečkový. [4]

1.2 Válečkový řetěz

Válečkové řetězy patří mezi nejpoužívanější typ kloubového řetězu obecně, s oblibou se také využívá u řetězů jízdních kol a motocyklů, a to především z důvodu přítomnosti válečku umístěného na jednotlivých pouzdrech (obr. 1a). Díky této funkci části dochází k výraznému snížení opotřebení a zlepšení třecích vlastností. Válečkové řetězy se dále uplatňují v rozmanitých oblastech strojírenství, jsou normalizované a vyrábí se jako řetězy s normální a dlouhou roztečí. Řetěz s normální roztečí je vhodný pro střední a vyšší rychlosti (nad 12 m/s). Řetězy s dlouhou roztečí se používají u zemědělských strojů s nižší obvodovou rychlostí. Válečkové řetězy se používají v různých provedeních, a to jako jednořadé, dvouřadé, či třířadé. Řetězy s vyšším počtem řad se používají k přenosu vyšších kroutících momentů. [5]

Konstrukce řetězu jízdního kola

Řetěz jízdního kola spojuje kazetu na středové ose (převodníky) s kazetou na ose zadního kola (pastorky), dochází k přenosu mechanické energie a umožnění pohybu jízdního celku. Konstrukce řetězů jízdního kola se může mírně odlišovat v závislosti na daném výrobci. Válečkový řetěz (obr. 1a) se skládá ze soustavy vnitřních a vnějších článků. Vnitřní článek řetězu je složen ze dvou vnitřních destiček a dutých pouzder zalisovaných do těchto destiček. Vnější článek tvoří opět dvě destičky, do kterých jsou zalisovány dva čepy o menším průměru než vnitřní průměr pouzder. Vzájemná pohyblivost mezi sousedními destičkami je umožněna díky točnému uložení čepu vnějšího článku v pouzdře vnitřního článku. Na každém pouzdře je přidělán otočný váleček, který slouží k snížení tření při náběhu na řetězové kolo (z tohoto důvodu jsou tyto řetězy vhodné pro vyšší obvodové rychlosti). Počet vnitřních a vnějších článků je stejný, tedy sudý. Pro snadnější montáž se obvykle nahrazuje jeden vnější článek spojkou. V případě lichého počtu článků se používá takzvaný redukční článek, který se ovšem stává nejslabším místem z hlediska pevnosti. Pokud je řetěz prodáván rozpojený, poslední část tvoří spojovací článek s perkem nebo závlačkou. V opačném případě je spoj nýtován.



Obr. 1a: Rozstřel válečkového řetězu [6]

Zpravidla existují čtyři typy řetězů, a to pro kola s jedním převodem, s šesti až osmi převody, s devíti a s deseti převodovými kolečky. V praxi nelze tyto řetězy zaměňovat,

protože například kolo s deseti převody má jiné mezery mezi pastorky než kolo s méně převody. Řetězy se tedy liší svou šířkou. Existují i různá délková provedení. [6]

1.3 Historie válečkových řetězů

První myšlenka válečkového řetězu se zrodila v rukou italského představitele renesance Leonarda da Vinciho. Již v 16. Století naskicoval a navrhl mechanismus s řetězovým převodem. Bohužel tento velkolepý plán nebyl nikdy uskutečněn. Za vynálezce válečkového řetězu je považován britský inženýr Hans Renold, který se zároveň významně podílel na jeho propagaci.

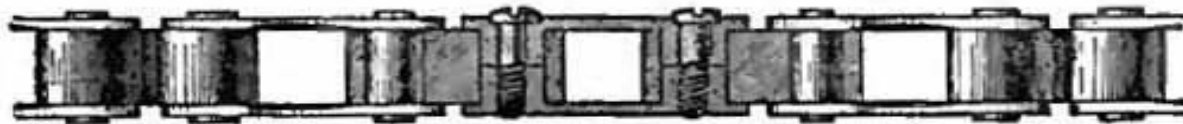
Mezi předchůdce dnes používaných válečkových řetězů patří takzvaný *blokový řetěz* (angl. block chain nebo bar-link chain). Blokový řetěz (obr. 2a) je složen z dvou postranních plechových plátů kuželkového tvaru, jež jsou z obou stran připojeny k další dvojici článků pomocí bloků spojených kolíky. Tyto řetězy jsou velmi jednoduché a v porovnání s dnes používanými řetězy méně efektivní a těžší. [7]

„*Skip-link*“ řetězy (obr. 3a) byly hojně využívány do 50. let minulého století. Vyznačují se střídavě dlouhými a krátkými destičkami. Válečky jsou umístěny na krátké destičce bezprostředně za sebou, následuje mezera s dlouhou destičkou a poté pokračuje další dvojice válečků na krátké destičce. Díky této asymetrické konstrukci mají zuby kola větší rozteč, než je dnes zvykem. Mezi značné výhody této konstrukce patří vyšší efektivita oproti dnešním modelům. [7]

Simpsonův řetěz (obr. 4a), nazývaný též Simpsonův pákový řetěz, v České republice známý pod názvem vahadlový řetěz, pochází z Anglie, kde byl roku 1895 patentován Williamem Spears Simpsonem. Tento řetěz se těšil veliké oblibě, která ale trvala pouze necelé dva roky. Tento model vznikl v důsledku snahy snížit sílu potřebnou ke šlapání. Řetěz tvoří dvě řady trojúhelníků spojených do linek. Vnitřní část dosedá na převodník, zatímco zadní část je připojena k pastorku. Hlavní myšlenka byla přenos síly na zadní ozubené kolečko. Vrcholy z trojúhelníků přenášely sílu ve větší vzdálenosti od osy zadního kola, a tak si Simpson mohl dovolit tvrdit, že jeho řetěz přenáší větší sílu díky pákovému efektu. [8]

Hlavním důvodem, proč se válečkový řetěz stal natolik oblíbeným a využívaným konceptem, je minimalizace frikčních účinků oproti zastaralým modelům, které kompletně postrádaly válečkové vložky, což mělo za následek vznik maximálního opotřebení pastorku a převodníku. Díky válečkovému pouzdru dochází k menšímu opotřebení a je dosaženo větší efektivity přenosu energie.

Obr. 2a: Blokový řetěz [9]





Obr. 3a: Skiplink řetěz [10]



Obr. 4a: Simpsonův řetěz [8]

2 Kovové povlaky a vrstvy¹

Se stále rostoucími požadavky na jakost a životnost různorodých výrobků ve strojírenství se neustále hledají nové způsoby, jak tyto parametry zajistit a tím zvýšit provozuschopnost daného produktu. Řetěz jízdního kola čelí řadě degradujících vlivů, ať už se jedná o mechanické či chemické opotřebení, které jsou dopodrobna popsány v kapitole č. 4. Kovové povlaky a vrstvy mohou za určitých podmínek propůjčit výrobku užité vlastnosti, které zcela nebo úplně zamezí narušování povrchu a tím prodlouží životnost celého produktu. Proto dnes řada výrobců řetězů jízdních kol využívá povlaky a vrstvy k ochraně podkladových materiálů svých výrobků, primárně s cílem snížení opotřebení jednotlivých článků z hlediska abraze, tření a koroze, sekundárně se produkty povlakuji díky svým estetickým vlastnostem.

Pro vznik kovových povlaků a vrstev se dnes používá různých technologií a řada rozmanitých kovů od velmi ušlechtilých až po kovy méně ušlechtilé. Důležitým kritériem pro hodnocení povrchu je jeho tloušťka a poréznost, přičemž za ideální povlak se považuje ten neporézní. Vlastnosti vrstev jsou závislé na základním materiálu a jeho zpracování.

2.2 Elektrolýza [2]

Základní princip výroby kovových povlaků a vrstev popisuje elektrolýza. Přidáním anorganické soli (např. NaCl) do vodného roztoku nastává elektrolytická disociace. Záporné ionty (Cl^-) mají přebytečné elektrony, kladným iontům (Na^+) elektrony schází. Ionty plní funkci nositelů elektronů k příslušným elektrodám. Elektrolytickým roztokem proudí skrz elektrody (anoda, katoda) stejnosměrný proud z vnějšího zdroje. Anoda je tedy elektroda připojená ke kladnému pólu zdroje, je nabitá kladně. Katoda má naopak záporný náboj a je připojena k zápornému pólu zdroje. K anodě putují záporně nabitě látky (Cl^-) a dochází zde k oxidaci (zvyšování oxidačního čísla – odevzdání elektronů). Na druhé straně migrují kladně nabitě látky (Na^+) ke katodě, kde dochází k redukci (příjem elektronů). Výsledkem elektrolýzy jsou látkové změny zapříčiněné výměnou elektronů mezi nabitými ionty v elektrolytu a elektrodami. Z iontů se stávají elektricky nenabitě atomy, které se vylučují na elektrodách.

¹ Následující kapitola bude zaměřena na kovové povlaky a vrstvy používané pouze u řetězů jízdních kol

Galvanické pokovování představuje samotný princip vzniku kovových vrstev na cílových produktech. Rozumíme tím nanesení vrstvy kovu na kovový předmět ponořený v elektrolytu. Anodu tvoří kov, kterým chceme pokrýt předmět (např. Cu). Elektrolyt je tvořen roztokem (CuSO_4), který po disociaci obsahuje kation kovu (Cu^{2+}), ze kterého je vyrobena anoda. Katodu tvoří předmět, který má být pokoven. Po průchodu stejnosměrného proudu probíhá elektrolýza, anoda se rozpouští v roztoku za vzniku měďnatých kationtů, které přechází na katodu, kde probíhá redukce, čímž dojde k vyrovnání oxidačního čísla na nulu a tím se předmět pokrývá vrstvou mědi.

Vztah mezi množstvím kovu vyloučeného a rozpuštěného při průchodu elektrického proudu elektrolytem popisují *Faradayovy zákony*:

1. Faradayův zákon tvrdí, že hmotnost vyloučené látky průchodem elektrického proudu je přímo úměrná velikosti elektrického náboje, který prošel elektrolytem a má tvar:

$$m = A_e \cdot I \cdot \tau \quad (1)$$

m ...množství vyloučené látky [g]

I ...elektrický proud [A]

τ ... čas [s]

A_e ...konstanta úměrnosti (elektrochemický ekvivalent)

2. Faradayův zákon říká, že elektrochemický ekvivalent závisí přímo úměrně na molární hmotnosti látky (množství látek vyloučených na elektrodách jsou v poměru svých ekvivalentů).

$$A = M \cdot n^{-1} \cdot F^{-1} \quad [\text{g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

M ...molární hmotnost kovu [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]

n ...mocnost kationtu v lázni

F ...Faradayova konstanta [$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$]

Složení pokovovacích roztoků je velmi rozmanité, avšak pro všechny roztoky platí stálost lázni, tzn., že nemůže dojít k samovolnému rozpadu složek lázni. Pro stálost roztoku je důležitá jeho hodnota pH, která určuje kyselost nebo zásadovost roztoku. Podle hodnoty pH lze roztoky dělit na alkalické a kyselé, přičemž se stálá hodnota pH udržuje vhodným přidáním kyseliny nebo alkálie (např. kyselina boritá). Složení roztoku musí zaručovat dokonalou rozpustnost anody a nesmí docházet k její pasivaci (tvorba oxidační vrstvy zhoršující rozpustnost).

2.2.1 Niklování

Nikl je stálý kov, má výborné antikorozi vlastnosti a je odolný vůči atmosférickým vlivům. Využívá se především ve spotřebním a strojírenském průmyslu. Na druhou stranu se nikl vyznačuje velkou toxicitou vůči lidské pokožce a jeho praktické využití postupně upadá.

Niklové pokovování patří mezi jeden z nejstarších způsobů galvaniky. Nejčastěji se používá jako konečná povrchová úprava nebo např. jako mezipovlak při chromování. Ocelové a například také hliníkové materiály lze niklovat přímo na základní materiál, zinkové materiály se niklují na mezipovlak mědi. Nikl vzhledem k jeho deficitu nepatří mezi nejlevnější komponenty, a proto je nutné věnovat pozornost jeho úsporám, mezi které patří různá technicko-ekonomická opatření, jako např. vhodná volba lázně, či korektní využití anod. Mezi moderní způsoby galvanického niklování patří tzv. duplexní nebo triplexní povlaky, kde dochází k vylučování dvou nebo tří povlaků s odlišnými mechanickými a

korozními vlastnostmi. První povlak charakterizuje dobrý vyrovnávací účinek, adheze k základnímu materiálu, sloupkovitá struktura a lesklý vzhled. Sekundární povlak s laminární strukturou obsahuje poměrně velké množství síry (přidáním síry se zlepšuje obrobiteľnosť), díky čemuž má vrstva horší antikorozi vlastnosti oproti povlaku primárnímu, čímž se docílí větší odolnosti vůči korozi celého systému za snížení celkové tloušťky povrchu. Podobně je tomu i u triplexních systémů.

Existuje velká řada používaných elektrolytů. V lázních, jejichž hlavní složku tvoří *síran nikelnatý* $NiSO_4$ s přísadou malého množství *chloridu nikelnatého* $NiCl_2$, vznikají povlaky jemnozrnné, matné a s malým vnitřním pnutím. Výhodou těchto lázní je jejich minimální údržba a nízké náklady. V galvanoplastice se používají především lázně *fluoroboritanové a sulfamátové*, které zaručují vysokou vodivost a vylučovací rychlost. Vzhledem k vysokým cenám chemikálií nejsou moc rozšířené. Černé niklové povlaky se používají jako dekorace nebo v optickém průmyslu. Tyto povlaky obsahují mimo niklu např. zinek, síru, siřník nikelnatý aj. Aplikace této metody se využívá především jako dokončovací operace při úpravách povrchu válce spalovacího motoru, kde se používají speciální honovací kameny obsahující tvrdé částičky křemíku.

Povrchovou úpravu niklováním lze spatřit i u různých výrobců řetězů jízdních kol. Mezi takové výrobce patří například firma SRAM, která díky této úpravě propůjčuje svým výrobkům dekorativně – ochranný povlak. Niklují se především vnější články řetězů. Příkladem může být produkt uvedený na následujícím obr. č. 5a. Cena toho řetězu balancuje na hranici 700 Kč.



Obr. 5: Řetěz SRAM s poniklovanými články [11]

Jednotlivé články řetězu mají dobré vzhledové vlastnosti. Dále se povlakovaný systém vyznačuje dobrou korozní odolností při zachování tenké povrchové vrstvy pohybující se na hranici okolo 2 μm .

2.2.2 Mosazení

Mosaz je slitina mědi a zinku zlatavé barvy. Slitinový mosazný povlak se dnes používá především jako dokončovací metoda při výrobě galanterních předmětů, jako mezipovlak se již téměř nevyužívá. Složení lázně má vliv na výsledný poměr mědi a zinku v povrchu a tím i na jeho barvu. Žluté povlaky mají poměr zinku a mědi přibližně 1:3, snadno ztrácí lesk. Bílé povlaky obsahují 80 % zinku a 20 až 30 % mědi, jsou křehké a tvrdé. Tombakové povlaky mají více jak 80 % mědi, jejich povrch je stálý a dobře leštitelný.

Používané lázně jsou především *kyanidové*. Množství volného kyanidu ovlivňuje jakost a složení povlaku. Při velkém množství kyanidu přibývá zinku a klesá katodický výtěžek. Přidáním amonné soli (např. chlorid amonný NH_4Cl) se zabraňuje pasivaci mosazných anod a poté dochází k vylučování obou kovů v konstantním poměru.

Povrchová úprava mosazením zajistí výrobku estetický vzhled díky zlatavě – lesklé barvě. Tloušťka výsledného povrchu se pohybuje v rozmezí od 2 do 5 mikrometrů. Výsledný povrch je odolný vůči korozi a otěru. Příkladem z praxe může být řetěz od firmy CONNEX na obr. č. 6a. Povlakuje se především vnější a vnitřní články řetězu. Cena řetězu od firmy CONNEX se pohybuje v cenové relaci 700 - 800 Kč.



Obr. 6: Řetěz CONNEX s mosazným povlakem [12]

2.2.3 Chromování

Chrom jako prvek patří mezi neušlechtilé kovy. Jeho vysokou korozní odolnost zapříčiňuje vznik pasivační vrstvy. Tvrdost výsledného povlaku je závislá na složení lázně a technologických podmínkách. Vhodnou volbou pracovních podmínek (teplota, proudová hustota) a složení lázně lze získat různé druhy chromových povlaků – lesklé, tvrdé, křehké a mléčné. Podmínku k výrobě lesklého dekorativního povlaku tvoří dokonale lesklý podklad. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí od desetin mikrometru do několika desítek mikrometrů v závislosti na použití daného povrchu. Současně s chromem se na katodě vylučuje také vodík, který v reakci s chromem vytváří nestabilní hydridy (CrH_2 , CrH_3 apod.). Vlivem těchto hybridů je výsledný povrch křehký a tvrdý. Dále způsobuje objemové změny vedoucí k vnitřním pnutím, které mohou v extrémních případech překročit vlastní pevnost kovu v povlaku. Množství vzniklých trhlinek lze omezit použitím speciálních přísad či dodržením přesných pracovních podmínek. V praxi se setkáváme s různými druhy chromování.

Mléčné chromování se vylučuje v katalyzované lázni v podobě šupinek, které se vzájemně překrývají. Tento povlak je charakteristický svou tvrdostí okolo 750 HV a korozní odolností.

Černé chromování je charakteristické svým tmavě černým odstínem. Díky této vlastnosti se používá především ve spotřebním průmyslu, např. v optice. Lázeň je tvořena kyselinou chromovou s přísadou solí organických kyselin a dalších organických látek.

Tvrdé chromování lze spatřit na výrobcích, kde je zapotřebí vysoké tvrdosti, která se pohybuje v rozmezí 800 až 1200 HV. Používá se také v opravárenství při opravách předmětů, které mají toleranci v dolních hranicích rozměrů. Velikost vrstvy se pohybuje od 5 μm , ale vrstvy mohou být až několik mm silné, schopné dalšího opracování. Aktivací povrchu (přepólováním) dojde k zlepšení jeho přilnavosti. Oproti klasickému chromování se tvrdé chromování vyznačuje lepší odolností vůči korozi a otěru, navíc má velmi nízký součinitel tření. Příkladem využití tvrdého chromování může být řetěz na kolo od firmy SRAM (viz. obr. 7a). Jednotlivé vnitřní články a válečky jsou díky chromovému povlaku odolné vůči mechanickému opotřebení. Další výhodou povlakovacího systému je dobrá korozivzdornost a dekorativní vzhled. Řetěz od firmy SRAM lze pořídit za přibližnou cenu 1000 Kč.



Obr. 7a: Řetěz SRAM – tvrdé chromování [13]

2.2.4 Polytetrafluorethylenová vrstva (dále PTFE)

PTFE je fluorovaný polymer patřící do skupiny termoplastů, ačkoliv má některé vlastnosti podobné reaktoplastům. Při pokojové teplotě se jedná o stálou bílou pevnou látku. Tyto polymery mají extrémně nízký koeficient tření, dobrou odolnost vůči korozi a dále se vyznačují chemickou stálostí. Dnes lze PTFE ochranu spatřit především u kuchyňského nádobí.

Firma Taya pocházející z Tchaj – wanu využívá PTFE vrstvu k ochraně svých řetězů. Vlivem povlaku má řetěz dobrou odolnost vůči mechanickému opotřebení. Díky této vrstvě není nutné řetěz pravidelně mazat a lze ho využít v rozličných extrémních podmínkách za jakéhokoliv počasí. Antikorozi ochrana prodlužuje životnost jednotlivých článků. Společně s PTFE ochranou přináší firma na trh i různá barevná provedení článků, která dodají kolu pestrý a unikátní vzhled (viz. obr. 8a). Řetězy od firmy TAYA s teflonovou ochranou se na trhu pohybují v cenových hladinách okolo 500 Kč.



Obr. 8a: Barevné provedení od firmy TAYA [14]

2.2.5 Zinkování

Zinkování se využívá především u ocelových součástek, které jsou vystaveny negativním vlivům atmosféry a vody. Zinkové povlaky se vylučují bez dalších mezivrstev. Zinkování se využívá v průmyslu spotřebním, nábytkářském či automobilovém, kde se s rozvojem bezkyanidových lázní stále více využívá k dekorativním účelům jako náhrada konvenčního niklování, popřípadě chromování. V praxi se uplatňují různé typy elektrolytů, z kterých se vylučují lesklé i matné povlaky.

Kyanidové lázně jsou charakteristické obsahem jedovatých kyanidů, i přes tuto nevýhodu se stále hojně využívají. Zapříčiňuje to jejich dobrá hloubková účinnost, vylučování jemných povlaků bez leskutvorných přísad, levnější vanové zařízení či snadnější regenerace. Menší proudovou hustotu mají lázně bezkyanidové, které oproti kyanidovým lázním disponují větší hloubkovou účinností. Vylučované povlaky jsou matné, a proto se u většiny procesů přidávají různé leskutvorné přísady pro vyloučení lesklých zinkových povlaků. Mezi hlavní přednosti bezkyanidových lázní patří jejich relativní nejedovatost. Nejmodernější způsob vylučování zinkových povlaků probíhá v slabě kyselých lázních, které jsou charakteristické vysokou rychlostí vylučování, tažností povlaku a dobrou hloubkovou účinností. Díky vysokému proudovému výtěžku je možné pokovovat pružiny i výrobky z šedé nebo temperované litiny bez nebezpečí navodíkování. Posledním typem lázní jsou lázně

kyselé, které pracují při vysokých proudových hustotách a proto se často využívají pro zinkovací automaty k pokování pásů a drátů vysokými rychlostmi. Vzniklé povrchy jsou ovšem hrubší a bez přísady leskutvorných přísad matné, tudíž se u běžných výrobků nevyužívají.

Povrchovou úpravu zinkováním lze kromě uvedených průmyslových odvětví spatřit též u řady společností zabývajících se výrobou komponentů a příslušenství jízdních kol. Jedním ze zástupců může být řetěz jízdního kola od firmy SHIMANO uvedený na obr. 9a. Pozinkováním vnějších článků řetězu se docílí především poutavého stříbrolesklého povlaku, který slouží také jako ochrana proti korozi. Tloušťka zinkové vrstvy se pohybuje v rozmezí od 5 do 50 μm . Zinek se pokrývá vrstvou oxidu a uhličitanu železnatého a tím zabraňuje vzniku další koroze. Ochrana povrchu jednotlivých článků trvá jen do doby, než dojde k abrazivnímu opotřebení nebo rozpuštění zinkové vrstvy. Firma SHIMANO nabízí tyto řetězy v cenové relaci okolo 500 - 600 Kč.



Obr. 9a: Pozinkované vnější články řetězu od firmy SHIMANO [18]

2.3 Fyzikální a fyzikálně – chemické povlakování [2]

Mezi další možnosti ochrany základního materiálu řetězu jízdních kol patří fyzikální a fyzikálně chemické povlakování. Tato rozsáhlá skupina povrchových úprav kovového nebo nekovového materiálu vzniká z par kovů a sloučenin, a to buď napařováním, nebo katodovým napařováním. Tyto inovativní metody úprav povrchu přináší lepší produktivitu procesu oproti samotné elektrolýze, zvýšení adheze a zlepšení dalších užitných vlastností v kombinaci s využitím dalších chemických (plazmochemických) reakcí. Nevýhodou je vyšší cena potřebného vybavení a s tím související cena výsledného produktu. Probíhající děje při vzniku povlaku lze rozdělit do tří skupin:

- Odpařování a rozprašování pevného nebo kapalného zdroje atomů a jejich kondenzace na povlakovaném materiálu.
- Chemické reakce atomů, z nichž je alespoň jeden plazmaticky aktivní ve směsi plynů a následná depozice na povlakovaný materiál.
- Přímá interakce plazmy s povrchem povlakovaného materiálu.

Napařování je již dlouhá léta využívaný a známý proces. Základem je přívod tepla z různého zdroje (např. odporový ohřev, obloukový výboj, elektronový svazek) do kovů nebo

slitin, čímž se tuhá nebo kapalná fáze začíná přeměňovat na páry, které poté kondenzují. Procesy probíhající ve vakuu nebo za nízkých tlaků inertních plynů zvyšují rychlost vypařování a potlačují oxidaci. Vlastnosti výsledných povlaků závisí na mnoha faktorech, zejména se jedná o hustotu a energii dopadajících částic, tlak plynu a jeho složení a stupeň vakua. Povrchy vytvořené vakuovým napařováním jsou rovnoměrné, souvislé, malých tloušťek a vysokého lesku. Uplatňují se především v optice, při vytváření dekorativních povlaků nebo v elektrotechnickém průmyslu. Reaktivní napařování označuje proces, kdy namísto přímého odpařování dochází k chemické reakci mezi kovem a plynem za vzniku žádané sloučeniny a její následné kondenzaci.

Reaktivní napařování představuje významný pokrok ve strojírenství a je spojen s výrobou nitridů nebo karbidů přechodových kovů, zejména titanu. Pomocí této metody vznikají nestechiometrické sloučeniny se specifickými vlastnostmi dle způsobu přípravy.

Jedna z metod vytváření tenkých povlaků souborně označovaná jako CVD (chemical vapour deposition) rozšiřuje možnost vytváření povlaků i ze sloučenin. Na rozhraní plynné a pevné fáze probíhají chemické reakce za určitého tlaku a dodávání energie, přitom vznikají kromě těkavých produktů technicky využitelné pevné látky vhodných vlastností. Probíhající reakce mohou být buď homogenní, působící v plynné fázi za vzniku prášků a krystalických aglomerátů, nebo heterogenní, vznikající na povrchu součásti růstem vrstvy nebo sloučeniny.

Povlaky nitridů a karbidů vznikají nukleací a růstem tuhé fáze na podložce. Vlastnosti výsledného povlaku závisí na jeho struktuře a na typu přechodu mezi podložkou a povlakem. Vhodného spojení mezi povlakem a základním materiálem lze docílit vzájemnou rozpustností a vznikem tuhého roztoku nebo tvorbou slitin. Následující rovnice popisují tvorbu povlaků TiC a TiN:



Reakce probíhají v rozmezí tlaků 10^3 až 10^4 Pa a teplot 800 až 1000 °C. Nevýhodou metod CVD jsou vysoké reakční teploty a odvod a likvidace agresivních plynů z pracovního prostoru. Výsledné povlaky jsou homogenní a rovnoměrné.

Mezi další trendy v povlakování patří metoda s označením PVD (Physical Vapour Deposition). Tato metoda funguje na principu ionizace par kovu a rovnoměrném rozložení iontů v prostoru i na povrchu základního materiálu. Konečný povlak je výsledkem řady fyzikálně chemických pochodů dopadajících částic na povrch materiálu. Magnetrony a nízkonapěťové oblouky jsou zařízení, která slouží k převodu povlakového materiálu do plynné fáze.

Tenké povlaky a vrstvy nachází své uplatnění i při výrobě řetězu jízdního kola. Mezi jednoho z výrobců, který využívá povlaky nitridů, patří americká firma KMC. Povlak TiN, jehož tloušťka se pohybuje v rozmezí od 1 do 3 μm , propůjčuje řetězu zlatavou barvu (viz. obr. 10a). Řetěz je dále charakteristický extrémní tvrdostí pohybující se okolo 2300 HV, výrazným snížením frikčních účinků, odolností vůči opotřebení a antikorozními vlastnostmi. Povlakuje se obvykle všechny funkční části řetězu jízdního kola. Tento řetěz od firmy KMC se pohybuje na cenové hladině okolo 1400 Kč.



Obr. 10a: KMC TiN deponovaný řetěz [15]

DLC povlak

Zkratka DLC pochází z anglického názvu „Diamond like carbon“, což v překladu znamená „Diamantu podobné vrstvy“. To představuje označení metastabilního stavu amorfního uhlíku obsahující významný podíl sp^3 vazeb. Tyto vrstvy se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou tvrdostí, chemickou netečností a výbornými tribologickými vlastnostmi. Tvrdost DLC povlaku začíná na hranici 2000 HV, ale může se vyšplhat až do 6000 HV. Tloušťka povlaku se pohybuje v rozmezí od 1 do 4 μm . Třecí součinitel těchto systémů dosahuje široké škály hodnot v závislosti na uspořádání vnitřních vazeb, což zásadně rozšiřuje oblast využití těchto povlaků. Další pozoruhodnou vlastností je vysoká odolnost vůči opotřebení, která se opět pohybuje v široké škále hodnot. Tyto velké rozdíly v parametrech hodnot jsou zapříčiněny rozmanitou strukturou vrstev. Nevýhodou těchto povlaků je nízká odolnost vůči korozi. Díky těmto vlastnostem se využívají v automobilovém průmyslu, medicíně (kloubní náhrady) či mikroelektronice.

Mezi nejpoužívanější metodu nanášení DLC povlaků patří depozice iontovým svazkem. DLC vrstva kondenzuje ze svazku uhlíkových iontů a dopadající ionty zapříčiňují růst vrstev s sp^3 vazbami. Existuje také chemický proces růstu vrstev, známý pod označením CVD. [16]

Mezi firmy využívající technologii DLC povlaků patří například firma KMC. Výrobce u řetězů této série zaručuje extrémně nízkou hmotnost, a to především díky děrovaným vnějším a vnitřním článkům (viz. obr. 11a). DLC povlak zajišťuje řetězu tvrdý povrch, který je odolný především vůči otěru a abrazi. Firma KMC dodává řetězy v různých barevných provedeních. Cena řetězu s DLC technologií atakuje hranici 2000 Kč.



Obr. 11a: KMC řetězy s technologií DLC [17]

2.4 Shrnutí a závěrečný přehled

Tab. 1a: Závěrečné zhodnocení používaných povlaků a vrstev

	Korozní odolnost	Odolnost proti opotřebení	Design	Cena	Tvrдость	Celkem
Zinkování	2	4	2	2	4	14
Niklování	2	3	2	3	3	13
Mosazení	2	4	1	3	4	14
Tvrďe chromování	2	2	2	4	2	12
PTFE	1	3	3	2	5	14
Vrstva TiN	1	1	1	5	1	9
Vrstva DLC	4	1	3	5	1	14

Pozn.: Hodnocení 1 – 5, přičemž 1 nejlepší, 5 nejhorší

V tab. 1a se nachází přehled a vzájemné porovnání a zhodnocení vlastností (korozní odolnost, odolnost proti opotřebení, design, cena, tvrdost) jednotlivých typů povlaků a vrstev používaných u řetězů jízdních kol. Z tabulky vyšla nejlépe varianta tenké vrstvy TiN, a to především díky výborné odolnosti proti korozi a opotřebení, tvrdosti a zlatavému vzhledu. Jedinou nevýhodou u této varianty je vysoká pořizovací cena, která se pohybuje okolo 1400 Kč, a také z pohledu výrobce vysoké náklady na technologii výroby. Na druhém místě skončila povrchová úprava tvrdým chromováním. V porovnání s tenkou vrstvou TiN nedosahuje tvrdé chromování tak vysoké tvrdosti a odolnosti vůči opotřebení. Na druhou stranu tyto vlastnosti plně vyhovují provozním podmínkám řetězu jízdního kola, navíc je řetěz a i výroba jeho povrchu ekonomicky dostupnější. Zarážejících a téměř nejhorších celkových výsledků dosáhla vrstva DLC, což je způsobeno především vysokou pořizovací cenou, která se pohybuje na hranici 2000 Kč. Další nevýhodou DLC povlaku představuje téměř nulová odolnost vůči korozi, která se musí nahrazovat dalším zpracováním. Na druhou stranu disponuje povrch řetězu extrémní tvrdostí a výbornou odolností proti opotřebení. Povrchové úprava zinkováním, mosazením, niklováním a vrstva PTFE dosáhly téměř obdobných výsledků z hlediska porovnávaných vlastností.

3 Chemicko - tepelné zpracování [1]

Další možností ochrany povrchu výrobku před nepříznivými vlivy okolního prostředí snižující životnost a provozuschopnost výrobku představuje chemicko – tepelné zpracování. U žádného z výrobců řetězů jízdních kol nebylo z veřejných zdrojů prokázáno využití metod CHTZ. Cílem CHTZ je především zvýšení tvrdosti povrchu, zvýšení odolnosti proti opotřebení a zvýšení odolnosti vůči cyklickému namáhání při zachování houževnatého jádra. Na rozdíl od kovových povlaků a vrstev dochází při CHTZ k reakci mezi upravovaným výrobkem a okolním prostředím. Obecně můžeme rozlišit tři způsoby výměny hmoty:

- Látka putuje z reakčního prostředí do výrobku (např. nitridace apod.).
- Látka přechází z výrobku do okolního prostředí (např. oduhličování apod.).
- Přenos hmoty probíhá v obou směrech (zpracování v řízených atmosférách).

CHTZ chápeme jako proces, při kterém probíhá změna struktury a vlastností vlivem tepelného zpracování, což má za následek změnu chemického složení daného výrobku. Tyto změny chemického složení mohou probíhat buďto v celém objemu výrobku (objemové chemicko-tepelné zpracování), nebo pouze v jeho povrchové vrstvě (povrchové chemicko-tepelné zpracování), přičemž v praxi se uplatňuje především zpracování povrchové. Díky těmto postupům lze dosáhnout různých mechanických či fyzikálně – chemických vlastností povrchu a jádra. Těchto změn lze docílit především dvěma způsoby:

- Změna chemického složení předmětu s následným tepelným zpracováním (např. cementace apod.)
- Samotná úprava chemického složení bez dalšího tepelného zpracování (např. nitridace apod.)

3.1 Proces chemicko-tepelného zpracování

Obecně lze při CHTZ rozlišit pět základních kroků:

1. Reakce v reakčním prostředí (vznik složky zajišťující přenos difundujícího prvku)
2. Difúze v reakčním prostředí (difundující prvek putuje k povrchu předmětu, odvádí se produkty reakce vzniklé na fázovém rozhraní)
3. Reakce na fázovém rozhraní kov – reakční prostředí
4. Difúze v kovu
5. Reakce v kovu

Tab. 2a: Přehled difúzních charakteristik vybraných prvků ve slitinách železa

Difúzní prostředí	Difundující prvek	D_{io} [$m^2 \cdot s^{-1}$]	ΔH_i [$kJ \cdot mol^{-1}$]	Rozmezí t [$^{\circ}C$]
Fe α	H	$2 \cdot 10^{-7}$	12,1	20 až 900
	C	$2 \cdot 10^{-6}$	84,1	20 až 850
	N	$1,5 \cdot 10^{-6}$	79,9	500 až 600
Fe γ	C	$4 \cdot 10^{-5}$	140	500 až 1100

D_{io} ...součinitel difuzivity [$m^2 \cdot s^{-1}$]

ΔH_i ...aktivační entalpie difuze [$kJ \cdot mol^{-1}$]

Základním mechanismem chemicko-tepelného procesu je disociace. Při disociaci dochází k rozkladu molekul sloučenin za vzniku aktivních atomů. Aktivní přenosová prostředí se mohou vyskytovat ve stavu plynném, kapalném a tuhém, přičemž k přenosu hmoty dochází nejčastěji v prostředí s plynnou fází. Průběh reakce se řídí Guldberr-Waagovým zákonem, pro který platí, že všechny reakce směřují k rovnovážnému stavu a poměr součinu koncentrace látek do reakce vstupujících a vystupujících je konstantní. Vyjadřuje se rovnovážnou konstantou chemické reakce. Například reakce vyjádřena obecně:



pak má rovnovážná konstanta tvar:

$$K_c = \frac{c_Y^y \cdot c_Z^z}{c_A^a \cdot c_B^b} \quad \text{a pro ideální plyny} \quad K_c = \frac{p_Y^y \cdot p_Z^z}{p_A^a \cdot p_B^b} \quad (6)$$

c_A, c_B, c_Y, c_Z – koncentrace daných látek p_A, p_B, p_Y, p_Z – parciální tlaky plynů

Obecně platí, že rychlost chemické reakce roste se zvyšující se koncentrací reagující látky, při přiblížení k rovnovážnému stavu rychlost klesá.

Další charakteristickou veličinou pro chemicko-tepelné zpracování je adsorpce, ke které dochází při zvyšování koncentrace molekul okolního prostředí na povrchu tělesa vlivem nerovnováhy sil. Adsorpce fyzikální (van der Waalsovy síly) vzniká při působení sil mezi tuhým tělesem (absorbentem) a adsorbovanou látkou (absorbátem). Pro chemickou adsorpci jsou typické síly chemické vazby. Adsorpce má velký vliv na stav povrchu, neboť molekuly nejsou adsorbovány celým povrchem, nýbrž pouze jeho aktivními centry. Proces disociace může mít velký vliv na průběh adsorpce, některé produkty disociace mají vyšší adsorbovatelnost než rozkládající se molekuly, tudíž dochází k omezení přístupu k aktivním centrům.

Mechanismus pohlcování aktivních atomů nasycovaným povrchem se označuje jako proces absorpce. Tento proces nebyl doposud zcela objasněn, ukazuje se však, že část atomů vzniklých při disociaci molekul je povrchem absorbována.

Existuje kvantitativně vyjádřený vztah podobnosti mezi přenosem hmoty a tepla označován jako Lewisovo kritérium, které má tvar:

$$Le = \frac{a}{D} \quad \text{a...teplotní vodivost (řádově } 10^{-6} \text{ až } 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (7)$$
$$D \dots \text{difuzivita (řádově } 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

Rozdíl v řádech mezi rychlostí přenosu tepla a hmoty je dán vzdáleností, na kterou se přenos uskutečňuje. Difuze je chápána jako přesun aktivních atomů z povrchu dovnitř materiálu. Výrobky z tuhých kovových materiálů jsou zpravidla charakteristické velkými hodnotami Lewisova kritéria. V technických slitinách označovaných jako mnoho-složkové soustavy probíhá často difúze opačným směrem a dochází ke změnám koncentrace složek v závislosti na poloze, teplotě, času a fázovém složení.

3.2 Cementace

Cementace je jeden z nejpoužívanějších procesů CHTZ. Provádí se v prostředí kapalném, plynném nebo tuhém při teplotách těsně nad A_{c3} . Povrch materiálu, nejčastěji nízkouhlíkové oceli (koncentrace do 0,3% uhlíku), je sycen uhlíkem podeutektoidní nebo nadeutektoidní koncentrace. Díky této metodě získají jednotlivé produkty vysokou tvrdost a především odolnost proti otěru při zachování houževnatého jádra. Vzniklou povrchovou vrstvou dále charakterizuje zvýšení únavové pevnosti. Při ohřátí součásti nad teplotu A_{c3} tvoří strukturu nízkouhlíkové oceli austenit, tedy fáze, v níž se uhlík rozpouští rychleji a ve značném množství. Cílem této metody je nauhličení povrchu s obsahem uhlíku okolo 0,85 % a s hloubkou cementované vrstvy v rozmezí jednoho až dvou milimetrů. Při obsahu uhlíku v povrchové vrstvě vyšší než jedno procento dochází k vylučování nadeutektoidních karbidů, které mohou zapříčinit snížení houževnatosti, a to především v případě, nacházejí – li se na hranicích zrn. Použité cementační prostředí, výše cementační teploty a doba setrvání na této teplotě ovlivňuje rozložení a obsah uhlíku v povrchové vrstvě. Po samotném procesu cementace se přistupuje k tepelnému zpracování.

3.2.1 Cementační prostředí

Jak již bylo řečeno, pro nauhličení povrchové vrstvy uhlíkem lze použít prostředí kapalném, plynném nebo tuhém.

Cementace v prostředí tuhém, označovaném jako sytké prostředí (v prášku), představuje nejstarší způsob této metody. Zpracovávané předměty musí být suché a čisté. Cementační prostředí obsahuje dřevěné uhlí (s přísadou koksu) a aktivátor (7 – 20% BaCO₃ nebo Na₂CO₃). Předměty se uloží do krabic vyrobených z nízkouhlíkových nebo žáruvzdorných plechů, kde se následně zasypou cementačním práškem, a to tak, aby jím byly zcela obklopeny. Poté se krabice zatmelí a uzavře víkem.

Dřevěné uhlí reaguje při cementační teplotě s kyslíkem uzavřeným v krabici za vzniku CO. Tento oxid se při kontaktu s povrchem předmětu rozkládá na oxid uhličitý. Tento proces je popsán následující rovnicí: $\text{CO}_2 + \text{C} \leftrightarrow 2 \text{CO}$. (8)

Přidáním aktivátoru se zvyšuje cementační účinek. Nejdříve se při cementační teplotě rozkládá a poté se opět regeneruje prostřednictvím CO₂:



Teplota cementace se pohybuje mezi 880 – 920 °C, přičemž nižší teploty se nastavují u výrobků o menším průřezu a tloušťce. Za vyšších teplot se zvyšuje rychlost růstu cementační vrstvy, na druhou stranu dochází k nežádoucímu růstu austenitického zrna a snížení množství uhlíku v povrchové vrstvě.

Cementace v tuhém prostředí je časově náročný a málo produktivní proces, a tak se dnes postupně dostává do pozadí a nastupují nové inovativní metody. Mezi značné nevýhody tohoto postupu patří nezbytnost použití velkého množství materiálu, který se společně se zpracovávanými produkty ohřívá na požadovanou teplotu. Tento proces nesplňuje podmínky na stále rostoucí požadavky ve výrobě, jako je automatizace. Není tedy vhodný pro sériovou výrobu, ovšem své uplatnění nachází ve výrobě kusové.

Cementace v kapalném prostředí je využívána především pro drobné a střední výrobky, které nevyžadují silné cementační vrstvy. Kapalně prostředí se skládá především z uhlíčitanů alkalických kovů (Me) a karbidů křemíku. Jejich vzájemná reakce je popsána následujícími rovnicemi:



Dříve se k cementaci v kapalném prostředí využívaly lázně roztavených chloridových solí (např. NaCl, KCl). Kyanidy (NaCN, KCN) plnily funkci nositele aktivního uhlíku. Rychlost procesu nauhličování závisí hlavně na koncentraci kyanidů, která se pohybuje v rozmezí 10 – 70 %. Položená vrstva grafitu na povrch těchto lázní zabraňuje přílišné oxidaci. V porovnání s cementací v tuhém prostředí je cementace v kapalném asi o 30 % rychlejší.

Během cementace je nutné dodržovat přísná pravidla. Kyanidové soli jsou prudce jedovaté, proto je nezbytné s nimi opatrně manipulovat a zajistit bezpečné uskladnění. Zpracovávané předměty, obdobně jako u cementace v sytkém prostředí, musí být suché a kovově čisté.

Nevýhody tohoto procesu jsou nemožnost regulace nauhličujícího potenciálu a špatné pracovní podmínky.

Cementace v plynném prostředí představuje technologicky vyspělý proces, který lze označit za nejproduktivnější ze všech tří typů zpracování. Cementační atmosféra se označuje jako tzv. multikomponentní směs plynů. Mezi hlavní představitele patří: CO, CO₂, C_nH_{2a+2}, H₂O, H₂, N₂.

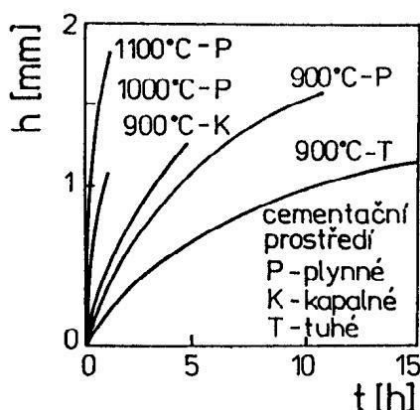
Samotný proces cementování probíhá ve víceúčelových nebo průběžných pecích, které jsou naplněny aktivní atmosférou ještě před vložením vsázky. Přibližné složení pracovní atmosféry je následující: 33% vodík, 31% dusík, 19% oxid uhelnatý, 14% metan, 3% oxid uhličitý.

Cementační teploty se pohybují v intervalu hodnot od 850 do 1150 °C. Míra přiváděného tepla závisí především na typu oceli, složení nauhličujícího prostředí a rozměrech výrobku. Pro uhlíkové oceli jsou typické teploty v rozmezí 900 – 950 °C. Nižších teplot se využívá u ocelí CrNi a drobnějších výrobků. U ocelí odolných vůči hrubnutí austentického zrna teploty přesahují 1000 °C.

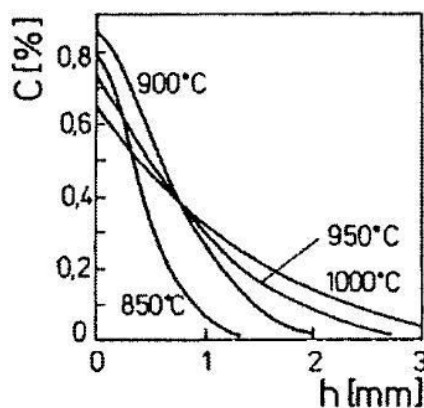
Zvyšováním teploty se celkový proces urychluje (zvětšení difuzivity) a roste hloubka cementační vrstvy, ale při daném průtočném množství atmosféry začíná od určité teploty klesat její nauhličující potenciál (obr. 13a). Při obsahu uhlíku v nauhličené vrstvě vyšším než 0,9 % se vylučuje křehký sekundární cementit ve tvaru síťoví nebo jehlic, který danou vrstvu znehodnocuje. Pro optimální rychlost procesu je vhodné nauhličování rozdělit na dvě části za konstantní teploty:

- Sytící – využití maximálního nauhličujícího potenciálu 1,2% C.
- Difúzní – snížení maximálního nauhličujícího potenciálu na 0,8%, což má za následek snížení koncentrace uhlíku na povrchu součásti. Dále dochází k částečnému oduhličení povrchu difuzí uhlíku směrem do jádra.

Uvedený technologický postup zkracuje dobu cementování, která je závislá na rozdílech sytícího a difúzního potenciálu uhlíku.



Obr. 12a: Časová a teplotní závislost hloubky cementační vrstvy v odlišných prostředích



Obr. 13a: Koncentrační profily uhlíku při různých teplotách (14 l/h)

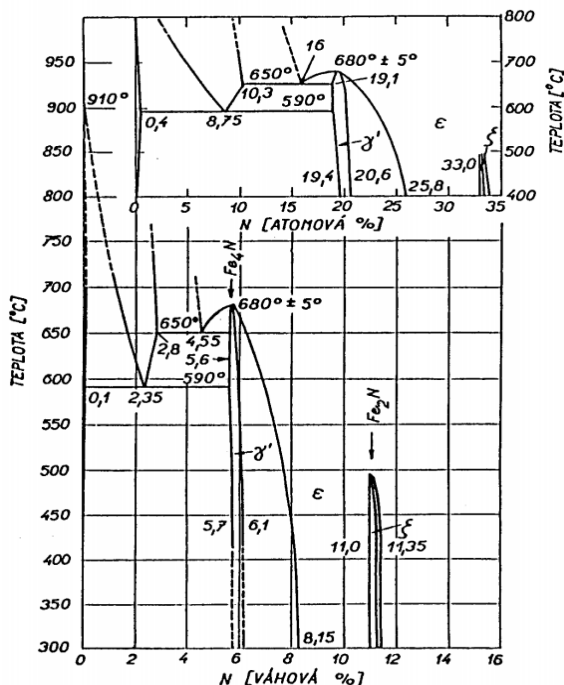
Inovativní metody představují *vakuové cementování* a *cementování v doutnavém výboji*. Použitím první metody lze výrazně zkrátit proces nauhličování. Základem jsou teploty v rozmezí 950 – 1050 °C. Po rozehrání pece na požadovanou teplotu je přiveden čistý uhlovodík (CH₄, C₃H₈). Výrobky je vhodné díky vysoké teplotě ochlazovat dusíkem a poté pro zjemnění austentického zrna kalit v oleji. Mezi nevýhody patří vysoké počáteční investice a nerovnoměrné rozložení cementační vrstvy. Cementování v doutnavém výboji se uskutečňuje za sníženého tlaku metanu. Mezi katodou (výrobek) a anodou je potenciálový rozdíl v rádech kilovoltů, což má za následek vznik plazmatu obklopujícího výrobek. Výhodou této metody je vysoký uhlíkový potenciál zajišťující krátké sytící stádium následované stádiem difúzním. Další pozitivum přináší rovnoměrné rozložení cementační vrstvy.

Ochrana proti cementaci zabraňuje nauhličení některých částí povrchu výrobku, které musí zůstat po zakalení měkké a dobře obrobitelné. Patří sem především otvory, drážky a závity. Nejčastěji se tento problém řeší přidávkem na obrábění, jehož hodnota odpovídá hloubce cementační vrstvy. Pasta Anticarb představuje též vhodnou ochranu proti cementaci. Obsahuje 50% B_2O_3 , 10% polystyrenu a 40% toluenu. V tuhém prostředí se k ochraně používají různé nátěry a pasty vyrobené ze směsi vodního skla, skelného prášku a mastku, popřípadě nanesení jílů a azbestu.

Tepelné zpracování po nauhličení se provádí v důsledku rozdílného obsahu uhlíku na povrchu a v jádře výrobku, které má za následek přítomnost vnitřních pnutí. Volba tepelného zpracování se provádí na základě druhu nauhličujícího prostředí a použitého postupu cementování. Mezi používané postupy patří například kalení z cementační teploty, uhlíkové oceli se kalí do vody, legované do oleje. Tento postup je nejlevnější a častěji se přistupuje ke kalení s přichlazením, kdy se výrobek po ukončení cementace ochladí na teplotu A_{c1} a z této teploty se kalí. Mezi další postupy patří například kalení s podchlazením pod teplotu A_{r1} , které se provádí v moderních kontinuálních cementačních linkách. U namáhaných výrobků se používá tzv. dvojité kalení, v první fázi se zjemní zrna a rozpustí sekundární cementit, druhým kalením vzniká ve vrstvě jemný martenzit.

Závěrečnou operaci po tepelném zpracování představuje vždy popouštění při nízkých teplotách (150 – 220 °C) po dobu jedné až dvou hodin, následkem čehož dojde ke snížení vnitřních pnutí. Takto zpracovaný výrobek má vysokou tvrdost povrchové vrstvy při zachování houževnatého jádra.

3.3 Nitridace



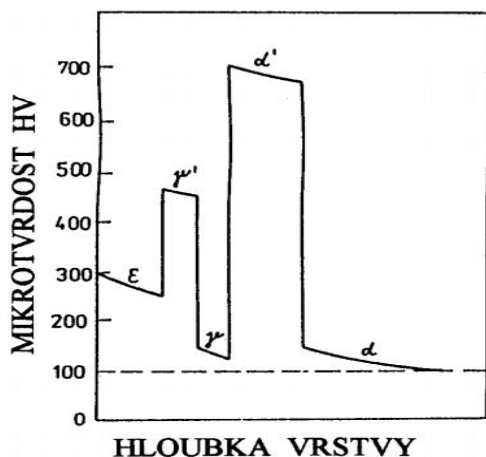
Obr. 14a: Rovnovážný diagram železo – dusík [1]

Proces nitridování představuje sycení povrchu dusíkem ocelového, popřípadě litinového předmětu. Probíhá nejčastěji v kapalném, tuhém nebo plynném prostředí při teplotách nad A_{c1} (v rozsahu 470 až 580 °C). Vlastnosti povrchu se utváří již během sycení dusíkem, na rozdíl od cementování se neprovádí následné tepelné zpracování. Cílem nitridování je vznik vysoce disperzních nitridů slitinových prvků s vysokou afinitou k dusíku (Al, Cr, Ti, W, V) v povrchové vrstvě. Vzniklou vrstvu charakterizuje velká tvrdost, odolnost proti oteru a opotřebení i za vyšších teplot a zvýšení meze únavy.

Strukturu nitridované vrstvy nejlépe vystihuje rovnovážný diagram železo – dusík (obr. 14a). Rovnovážné diagramy soustav železo – dusík a železo – uhlík si jsou v základě podobné. Rozpustnost dusíku ve feritu i austenitu je oproti uhlíku větší. Při teplotě 590 °C (A_1) se

ve feritu rozpouští 0,10 % dusíku a v austenitu 2,35 % dusíku. V obou soustavách probíhá eutektoidní přeměna za vzniku lamelárního eutektoidu, který v soustavě Fe – N tvoří ferit a nitrid Fe_4N nazývaný braunit. Kromě uvedených podobností se zde vyskytují i značné rozdíly, zapříčiněné různými vlastnostmi sloučenin železa s uhlíkem a železa s cementitem. Reakcí uhlíku a železa vzniká jedna sloučenina – cementit, zatímco reakcí mezi železem a dusíkem

vzniká několik sloučenin nitridů železa. Nitridy železa se oproti cementitu vyznačují vyšší metastabilitou.



Obr. 15a: Tvrdost jednotlivých fází Fe – N [1]

čímž je způsobena nižší tvrdost struktury. Tvrdost martenzitických jehlic dusíkového austenitu přesahuje 1000 HV.

Tvrdost jednotlivých fází je patrná z obr. 15a. Přerušovaná čára představuje tvrdost feritu před nitridací. Fáze ε, ξ a α nemají oproti feritu před nitridací vysokou tvrdost. Fáze ε je charakteristická zvýšenou odolností proti opotřebení a vysokou odolností vůči atmosférické korozi, která není závislá na koncentraci dusíku, stává se ovšem křehkou při koncentraci dusíku v rozmezí 10 až 11 %. Fáze ξ je stabilní pod teplotou 500 °C, ale při obvyklých podmínkách nitridace nevzniká.

Legující prvky mají vliv na rozpustnost dusíku ve feritu. S dusíkem mohou tvořit samostatné nitridy, nebo se rozpouštějí ve fázích ε a γ. Legující přechodové prvky (např. W, Mo, Cr, Ti, V) zvyšují rozpustnost dusíku ve feritu. Při nitridaci ocelí nebo litin v syceném povrchu vznikají komplexní nitridy nebo karbonitridy.

Obecně se nitridační vrstva skládá z následujících dvou částí:

- Bílá vrstva, dle starších pramenů lem nitridů, někdy nesprávně označována spojovací vrstvou, představuje povrchovou vrstvu nitridů obsahující fázi γ' či fázi ε nebo směs fází ε + γ. Na metalografickém výbrusu je velmi výrazná a její tloušťka nepřesahuje hodnotu 0,01 mm.
- Difúzní vrstva ležící pod bílou vrstvou obsahuje fáze γ' a α. Obsahuje dusík v tuhém roztoku, dusík sloučený se železem a legovacími prvky tvořící síť nitridů na hranicích zrn nebo vyloučený ve formě nitridů uvnitř zrn. Tvrdost této vrstvy je nižší oproti vrstvě povrchové a klesá směrem k jádru předmětu. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí od setin do desetin milimetru.

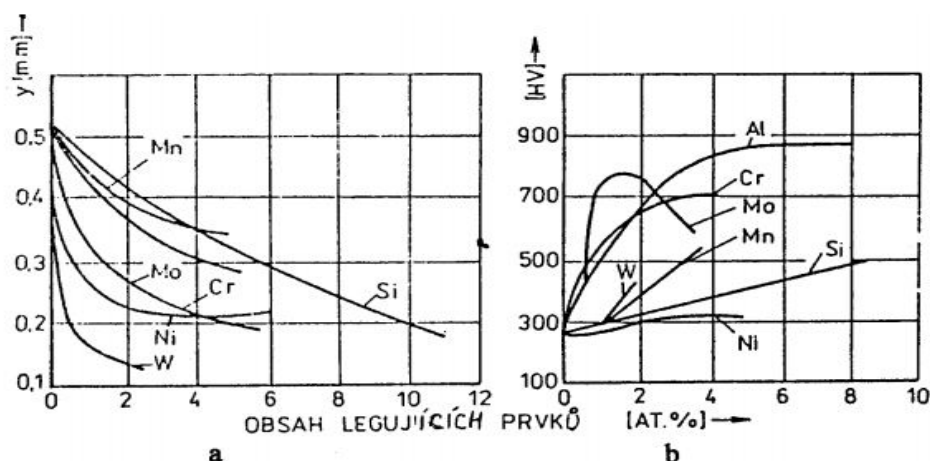
Struktura vylučovaných fází je mimo jiné závislá na druhu oceli a teplotě. Za nižších teplot vznikají u uhlíkových ocelí koherentní GP zóny diskovitěho tvaru o tloušťce jedné nebo více atomových rovin. U legovaných ocelí jsou tyto zóny tvořeny vrstvou substitučně rozpouštěných legur s interestickými atomy dusíku po obou stranách. Za vyšších teplot (nad 540 °C) ztrácí nitridické částice vzájemnou koherenci s tuhým roztokem α. Struktura vrstvy je závislá, mimo teploty nasycování, na způsobu ochlazování z této teploty. Při pomalém ochlazování se rozpadá přesycený ferit a v α fázi vznikají nitridy γ', které mají jehlicovitou strukturu.

Disperzita a rozložení částic mají vliv na zvýšení tvrdosti a pevnosti nitridované vrstvy a jsou závislé na:

- Teplotě nitridace (s rostoucí teplotou klesá disperzita)
- Koncentraci legujících prvků (s rostoucí koncentrací klesá disperzita)
- Afinitě legujících prvků k dusíku (s rostoucí afinitou roste disperzita)
- Vlivu legujících prvků na rozpustnost dusíku v tuhém roztoku (s rostoucí rozpustností roste disperzita).

3.3.1 Nitridační oceli

Při nitridování dusík nejprve reaguje s prvky, které mu jsou nejpříbuznější. U nelegované oceli dusík reaguje nejprve se železem, zatímco u oceli slitinové se slučuje s dalšími legujícími prvky. Obsah dusíku se pohybuje v rozmezí od 0,2 do 0,6 %, a to za předpokladu zachování houževnatého jádra s možností tvrzení povrchu. Při přesycení povrchu dusíkem, nejčastěji u měkkých ocelí, vzniká tlustá povrchová vrstva, která je křehká. U tvrdších ocelí cementit brání difuzi dusíku, čímž se prodlužuje doba dosažení určité hloubky.



Obr. 16a: Vliv legur v železe na tloušťku (a) a tvrdost (b) nitridované vrstvy [1]

Například chrom a hliník má záporný vliv na hloubku vrstvy, zato působí kladně na pohlcování dusíku. Nejvyšší tvrdosti lze dosáhnout přidáním hliníku, který tvoří jemné nitridy, dále se jedná o vanad, molybden, chrom a mangan. Hliník na druhou stranu může způsobovat křehnutí oceli, které lze kompenzovat přidáním molybdenu. Chrom působí kladně na tvrdost vrstvy, přispívá k prokalitelnosti, ocel má větší pevnost a houževnatost jádra po zušlechťování (podobné účinky má i vanad). S přísadou niklu se zvyšuje pevnost a klesá tvrdost za současného růstu houževnatosti.

Před samotnou nitridací se výrobky zušlechťují, čímž se dosáhne optimálních vlastností jádra a tvrzené vrstvy. Popouštěcí teplota při zušlechťování je vždy vyšší než vlastní teplota nitridace, nejvhodnější strukturou pro nitridování je tedy sorbit. Nepřípustné podmínky představuje oduhličený povrch nebo ferit vyloučený na hranicích zrn, kde dochází k snížení jakosti nitridované vrstvy.

K ochraně před nitridací v plynném prostředí se využívá galvanického pocínování. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí od 8 do 12 μm . K ochraně se využívá i různých past, např. Condursal.

Pokud jsou splněny veškeré základní předpoklady (vyšší popouštěcí teplota, popř. žihání na odstranění pnutí před nitridací, rovnoměrný ohřev a ochlazování apod.), mluvíme o bezdeformačním tepelném zpracování. Při nitridování je nutné počítat se zvyšováním

rozměrů, v závislosti na tloušťce vrstvy a době nitridace, v mezích od 0,01 do 0,08 mm. V případě, že je možné tenkou bílou vrstvou odstranit broušením, není nutné před samotným procesem v technologickém postupu upravovat rozměry výrobku. V opačném případě, např. z důvodu vyšší odolnosti proti opotřebení, lepší zabíhavosti či z důvodu korozivzdornosti, je nutné počítat s těmito přídatky.

Následně budou uvedeny dvě normované oceli (dle ČSN EN 10085), které jsou svým složením vhodné k nitridaci. Při dodržení správného technologického postupu je u nich zajištěno dosažení optimálních požadovaných vlastností.

Ocel 31CrMo12 (1.8515)

Jedná se o ocel se středním obsahem uhlíku vhodnou k zušlechťování a nitridaci. V zušlechťeném stavu při dodržení technologických podmínek nitridace je u této oceli zaručena hodnota tvrdosti pohybující se na hranici 800 HV1 (v závislosti na způsobu nitridace se mohou hodnoty lišit). Doporučený rozsah teplot pro nitridaci je od 480 °C do 570 °C.

Tab. 4a: Chemické složení oceli 31CrMo12

Ocel	Chemické složení [%]						
	C	Mn	Si	Cr	S	P	Mo
1.8515	0,28-0,35	0,40-0,70	Max. 0,40	2,80-3,30	Max. 0,04	Max. 0,025	0,36-0,50

Tvrdost oceli ve stavu žíhaném na měkko se pohybuje v rozmezí 200 – 210 HB. Tepelně nezpracovaná ocel dosahuje hodnot pevnosti v tahu R_m v rozmezí 880 - 1200 MPa, mez kluzu R_e dosahuje hodnoty 675 - 835 MPa (v závislosti na rozměru zkušební tyče). Tažnost oceli A je přibližně 12 %.

Ocel 34CrAlNi7-10 (1.8550)

Jedná se o ušlechtilou ocel, která je vhodná k dalšímu CHTZ. Informativní hodnota tvrdosti po nitridaci, jejíž velikost závisí na metodě nitridace a počátečních podmínkách zušlechťování, se uvádí na 950 HV1. Doporučený rozsah teplot pro nitridaci je od 480 °C do 570 °C.

Tab. 5a: Chemické složení oceli 34CrAlNi7-10

Ocel	Chemické složení [%]								
	C	Mn	Si	Cr	S	Al	P	Ni	Mo
1.8550	0,30-0,37	0,40-0,70	Max. 0,40	1,50-1,80	Max. 0,035	0,80-1,20	Max. 0,025	0,85-1,15	0,15-0,25

Tvrdost oceli po žíhaní na měkko dosahuje hodnot 190 - 205 HB. Mez pevnosti R_m se pohybuje v rozmezí hodnot 800 - 1100 MPa. Mez kluzu R_e dosahuje hodnot okolo 600 - 680 MPa. Minimální tažnost A má hodnotu 10 %.

3.3.2 Způsoby nitridování

Nitridace v prášku [22]

Tato metoda je založena na obdobném principu jako cementace v tuhém prostředí (viz. kapitola 3.2.1). Zpracovávané předměty se vkládají do žáruvzdorných krabic společně s nitridačním práškem a aktivátorem, které se zatmelí například atominem nebo použitým aktivátorem a uzavřou víkem. Žáruvzdorná forma se následně vkládá do rozehráté komorové pece na teplotu v rozmezí 500 – 600 °C po dobu od 4 do 24 hodin v závislosti na použité teplotě a požadované tloušťce nitridované vrstvy. Nitridační plyn se uvolňuje při zvýšené teplotě uvnitř žáruvzdorné krabice z nitridačního prášku a přidaného aktivátoru.

Při práškové nitridaci se aktivita procesu řídí pouze procentem přidaného aktivátoru k nitridačnímu prášku. Množství přidaného aktivátoru k nitridačnímu prášku je závislé především na celkovém obsahu nitridotvorných složek ve zpracovávaném typu oceli. Experimentálně bylo zjištěno, že pro oceli:

- S obsahem nitridotvorných složek do 2% je ideální poměr prášku vzhledem k aktivátoru = 1 : (0,15 – 0,10).
- S obsahem od 2 – 5% nitridotvorných složek je ideální poměr prášku vzhledem k aktivátoru = 1 : (0,10 – 0,05).
- S obsahem od 5 – 12% je tento poměr = 1 : (0,05 – 0,01).

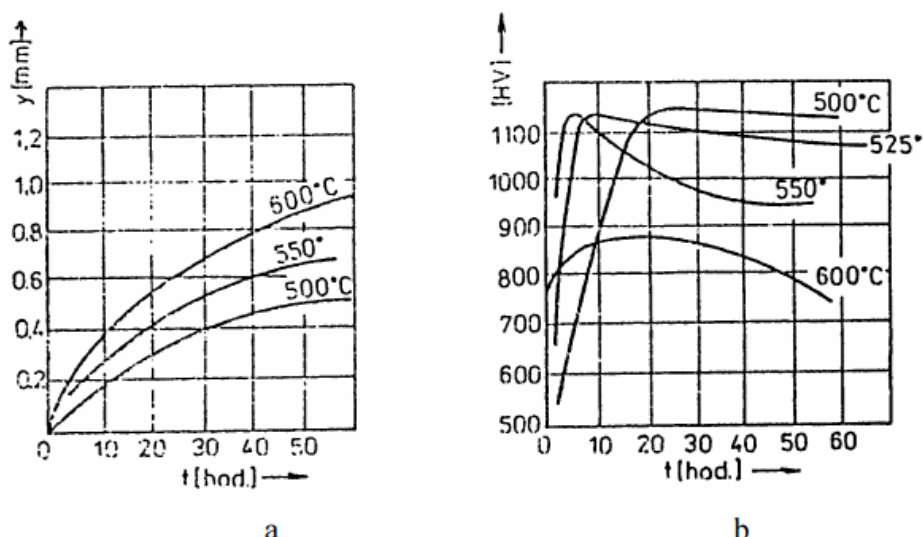
Aby bylo dosaženo optimálních vlastností nitridovaných součástí, je třeba vhodným způsobem zvolit poměr nitridačního prášku a aktivátoru, teplotu a potřebnou dobu samotného procesu nitridace. Nitridační teploty se pohybují v oblasti popouštěcích teplot, proto může docházet k dodatečnému popouštění a následnému snížení pevnosti součástí.

Hlavní výhodou této metody spočívá ve velice malé investiční náročnosti, rychlosti a relativní dostupnosti. K samotnému procesu nitridace postačí pouze komorová pec s rovnoměrným rozložením teplot v pracovním prostoru, nitridační krabice z žáruvzdorného materiálu, nitridační prášek a aktivátor. Tato metoda se využívá především pro kusovou výrobu s proměnlivými požadavky na tvorbu nitridované vrstvy.

Nitridování v plynu

Při nitridování v plynu se téměř výhradně používá plynné prostředí, které tvoří buď technicky čistý čpavek, nebo směs čpavku a dusíku.

Nejčastěji se nitriduje ve čpavkové atmosféře při teplotách od 500 do 570 °C. Samostatný proces se skládá ze dvou částí, a to tepelného a chemického procesu. Teplota procesu se vybírá v závislosti na požadované tloušťce povrchu a tvrdosti nitridované vrstvy (obr. 17a). Při přenosu dusíku mezi plynným prostředím a výrobkem hraje důležitou roli disociace čpavku a molekulárního dusíku. Sycení dusíkem vzrůstá s rostoucím obsahem nerozloženého NH_3 v atmosféře, který společně s H_2 vytváří metastabilní rovnováhu na jedné straně a obsahem dusíku v austenitu na straně druhé. Rychlost disociace NH_3 je ovlivněna teplotou pochodu, rychlostí průtoku atmosféry a katalyckými účinky horkých částí pece a vsázky.



Obr. 17a: Vliv teploty a doby nitridace na tvrdost a tloušťku vrstvy v oceli [1]

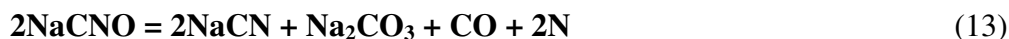
Chemický proces charakterizuje stupeň disociace čpavku v nitridačním prostoru, stupeň disociace roste se zvyšující se teplotou procesu. Stupeň disociace lze také ovlivnit řízením průtoku čpavku nitridačním prostředím. Při nízkém stupni se povrch přesytí dusíkem a vznikne silná nitridační vrstva, vysoký stupeň disociace zabraňuje vzniku vrstvy. Vodík, jeden z produktů disociace, má negativní vliv a částečně zabraňuje adsorpci molekul NH_3 . Nitridační potenciál lze tedy ovlivnit i ředěním atmosféry různými plyny. Přidáním inertních plynů roste nitridační potenciál a vznikají nitridy ϵ a γ . Ředěním čpavku produkty rozpadu klesá hloubka nitridační vrstvy za současného růstu vrstvy difúzní.

Před samotným procesem nitridace se musí výrobky řádně očistit a odmastit, musí být suché a v některých případech se i jemně pískují. Do pece se vkládají tak, aby byl zajištěn vhodný přístup nitridační atmosféry. Plyný prostor se neprodyšně uzavře a nechá se jím proudit čpavek. Pec se poté vytopí na požadovanou teplotu. Doba nitridace se pohybuje v rozmezí od 48 do 72 hodin, a to v závislosti na požadované hloubce vrstvy. Po skončení nitridace se výrobek nechá v peci volně vychladnout za stálého přívodu čpavku, a to až do teploty 200 °C. Z pece se výrobky vyjímají až po úplném vychladnutí.

Nitridační doba se pohybuje v řádu desítek hodin, a proto se stále zvyšují požadavky na její zkrácení. První možností je přidání kyslíku, nebo vodíku a dusíku. V druhém případě, stejně jako u cementace, se proces rozděluje na dvě etapy, a sice difúzní a sytící. Příkladem může být tzv. Floe proces, při kterém první etapa sycení probíhá za teplot okolo 500 °C po dobu 5 až 8 hodin a stupni disociace 15 až 25%. Difúzní etapa probíhá při teplotě 550 °C v rozmezí od 5 až do 42 hodin za stupně disociace 75 až 85%. Další možností urychlení procesu představuje nitridace v ultrazvukovém poli. Použitím ultrazvuku v plynných a kapalných prostředích se proces urychluje 1,2 až 1,5krát. V neposlední řadě se nabízí využití vysokofrekvenčního ohřevu.

Nitridování v solných lázních

Nitridování v solných lázních původně probíhalo v kyanidových lázních (25% NaCN, 75% KCNO) provzdušněných vzduchem. Tuto technologii navrhla společnost fa Degussa nesoucí název Tenifer. V České republice se dle ČSN 65 4121 používá k nitridování sůl s označením NS 350, která obsahuje 25 až 35% kyanidů (NaCN, KCN) a 30% kyanatanů (NaCNO, KCNO). Lázně se buďto samovolně, nebo za působení kyslíku rozkládají a vzniká atomární dusík dle následujících rovnic:



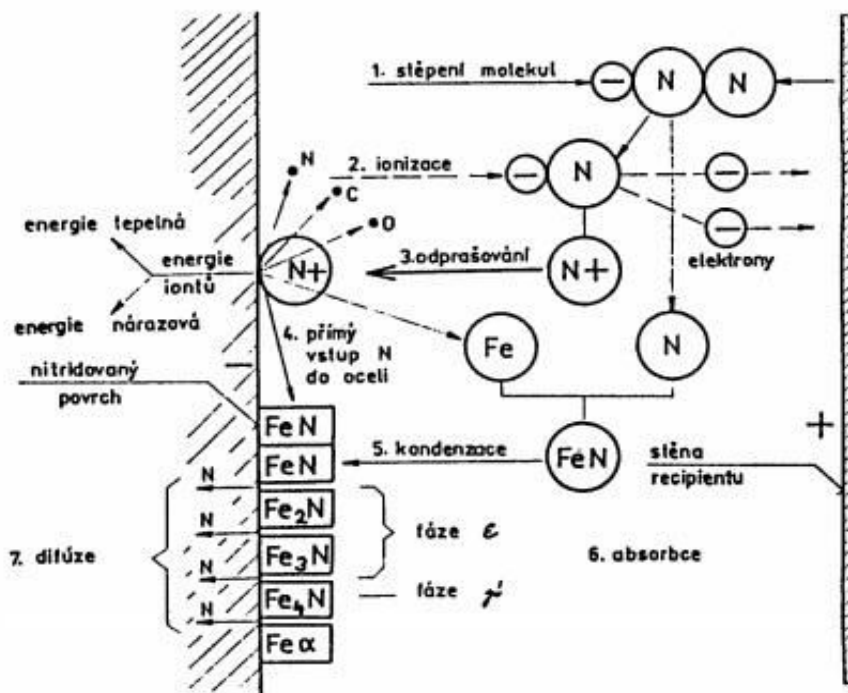
Vlastní nitridace probíhá v rozmezí teplot od 520 do 770 °C po dobu 60 až 120 minut. Oxidace kyanidů na kyanatany je neřízený proces, který zapříčiňuje nestejnorodost dosahovaných výsledků. Tím pádem se musí zajistit neustálý kontakt nové soli se vzduchem, čehož lze dosáhnout probubláváním vzduchem nebo mícháním. Při překročení hranice obsahu kyanatanu v lázni (obvykle nad 45%) dochází k zřetelnému naleptávání povrchu výrobku.

Nejnovější zkušenosti doporučují pro nitridaci v solných lázních použití kelímků vyložených vrstvou titanu. Nejčastěji se nitridují řetězy a řezné nástroje z rychlořezných ocelí nebo z vysokochromových ledeburitických nástrojových ocelí (např. 19 436, 19 437 apod.). Nitridováním se dosáhne zvýšení životnosti výrobku. Hloubka nitridované vrstvy se pohybuje okolo hodnot 30 μm.

Nitridování v solných lázních lze dále použít pro zpracování nelegovaných uhlíkových ocelí a litin. V povrchových vrstvách se utváří nitridy železa, a to v hloubce do několika desetin milimetru, popř. mohou vznikat i tvrdé karbonitridy ϵ a γ , které se nacházejí v hloubce od 10 do 15 μm. Touto úpravou se zvyšuje odolnost proti korozi, proti zadírání, proti opotřebení a dochází i ke zvýšení meze únavy. Tento způsob nitridování se označuje jako „měkké“, protože tvrdost nelegovaných ocelí a litin nedosahuje tak vysokých hodnot jako u ocelí legovaných.

Iontové nitridování

U iontové nitridace se využívá ionizovaného plazmatu, které se skládá z iontů, elektronů a neutrálních částic. Nitridované předměty jsou vloženy do recipientu (vakuová nádoba) a plní funkci katody. Recipient se zapojuje jako anoda a obsahuje zředěnou směs plynů potřebnou k procesu nitridace.



Obr. 18a: Schéma dějů probíhajících při iontové nitridaci [1]

Mezi stěnou recipientu (anoda) a povrchem součásti (katoda) vzniká po zapojení stejnosměrného proudu o napětí 400 až 1000 V elektrické pole. Zde poté dochází k přesunu molekul zředěného plynu a v důsledku jejich nárazů se štěpí a ionizují. Kladné ionty migrují ke katodě, tedy na povrch nitrídaných výrobků.

Kladné ionty dopadající na povrch součásti přeměňují svou kinetickou energii v teplo a součást ohřívají. Dopadající ionty dále vyrazí z povrchu součásti atomy železa a dalších prvků, tento jev se nazývá odprašování a vede k reakci mezi odprašenými atomy a dopadajícími ionty a k následnému vzniku dusíkem bohatých nitridů železa. Kondenzací těchto nitridů vzniká povrchová vrstvička. Kromě železa se odprašují i další prvky, především uhlík, kyslík a dusík. Odprašování oxidů vede k depasivaci povrchu oceli, čímž se zlepšují podmínky nitrídace, naproti tomu odprašování uhlíku má za následek potlačení vzniku karbonitridické sítě po hranicích zrn.

Mezi výhody iontové nitrídace patří především nízká energetická bilance, a to díky velké kinetické energii iontů, které zajišťují kromě neustálé aktivace povrchu oceli odprašováním ohřev na nitrídační teplotu, tudíž není zapotřebí žádný další zdroj tepla. Dalším plusem je rychlejší kinetika růstu vrstvy. Nevýhodou této metody jsou vysoké náklady na vakuové zařízení a další elektronické, řídicí a kontrolní jednotky. Tato metoda není příliš vhodná k nitrídaci hlubokých drážek, složitých tvarů a závitů, kde je nutné využít pomocných anod.

4 Chemické a mechanické opotřebení řetězu jízdního kola

Před samotným výčtem jednotlivých vlivů degradace životnosti řetězu jízdního kola je nutné poznamenat, že bez kvalitní péče o řetěz jízdního kola nelze dosáhnout požadovaných výsledků. Tím je myšleno pravidelné mytí od nečistot a následné nanesení maziva, které se může lišit dle provozních podmínek. Správný postup údržby zlepšuje průběh řazení, ulehčuje chod řetězu a především zvyšuje jeho životnost.

4.1 Mechanické namáhání jednotlivých článků

Destička řetězu

Destička řetězu je obvykle namáhána opakovaným zatížením, které může být doprovázeno rázem. Destička musí tedy splňovat velkou statickou pevnost v tahu, ale musí být také odolná proti dynamickým silám a rázům.

Čep

Čep řetězu je namáhán ohybovým momentem a střížnou silou. Čep tvoří jednu z nejdůležitějších částí řetězu, při uvedení do provozu představuje nosnou část. Proto musí mít čep dostatečnou pevnost v tahu, ohybu a stříhu. Dále musí být odolný vůči mechanickému opotřebení a rázům. Proto jsou čepy tepelně zpracovávány při zachování houževnatého jádra a tvrdého povrchu.

Pouzdro

Pouzdro tvoří společně s čepem nosnou část řetězu. Tato část je namáhána především ohybovým zatížením, velkými rázy a navíc musí splňovat odolnost vůči opotřebení, a deformačním silám.

Váleček

Váleček je opět namáhán rázovým zatížením, neboť při záběru dochází ke kontaktu se zuby řetězového kola. Proto musí být váleček odolný vůči rázovému zatížení, mechanickému opotřebení a tlaku. Dále je potřeba váleček dimenzovat z hlediska únavy.

4.2 Porušování povrchu

Řetěz jízdního kola je v provozu namáhán nejen mechanicky, ale bývá vystaven vzájemné interakci jednotlivých částí a také agresivnímu prostředí. Vlivem těchto faktorů může dojít k jeho porušení, snížení použitelnosti, životnosti a tím i jeho spolehlivosti. Odolnost povrchové vrstvy je určena především jejím typem, složením, tloušťkou, strukturou, způsobem namáhání součásti a povlaku.

4.2.1 Koroze

Prvním a také z hlediska životnosti řetězu nejvýznamnějším faktorem degradace řetězu jízdního kola je koroze. Můžeme ji definovat jako samovolně probíhající proces znehodnocení materiálů chemickými a fyzikálně – chemickými vlivy prostředí. V případě jízdního kola se často jedná o prostředí s vysokou vlhkostí a velkou mírou nečistot. Poškození jednotlivých článků může probíhat rozdílně, např. může docházet nejprve k ztrátě lesku a barvy s postupným přechodem k úplnému rozpadu a porušení celistvosti. Samovolný průběh koroze je způsoben vlivem přechodu systému do neuspořádanějšího stavu s menší entalpií.

Z hlediska korozního prostředí je řetěz vystaven především atmosférické korozi a tzv. korozi ve vodách. Koroze jednotlivých článků se může projevat úbytkem materiálu a tvorbou korozních produktů, změnami materiálu (ztráta pevnosti, tažnosti, vznik mikrotrhlin) nebo korozním poškozením struktury. Atmosférická koroze je jednou z nejrozšířenějších forem koroze. Základní vliv na rychlost děje má stupeň ovlhčení kovového povrchu, dále pak závisí na přítomnosti tuhých nečistot. Intenzitu koroze ve vodách ovlivňují různé chemické látky kyselého i zásaditého charakteru, které jsou rozpuštěny ve vodě. Jedná se o elektrochemický děj, jehož rychlost ovlivňují různé neelektrochemické činitele, jako např. mechanické nečistoty (prach, písek) nebo mikroorganismy.

4.2.2 Opotřebení

Životnost a spolehlivost řetězu jízdního kola je kromě koroze značně ovlivněna také jeho opotřebením, které má za následek ztráty energie a materiálu. Při vzájemném styku a vzájemném pohybu jednotlivých článků řetězu, zpravidla se jedná o styk čep – pouzdro – váleček - pastorek, dochází k opotřebením, které je závislé na mnoha faktorech. Vlivem zvětšujícího se opotřebením se zvětšují rázy ve stykových plochách, což může mít za následek porušení z hlediska únavy. Opotřebení může vést ale i k zmenšování průřezu v nebezpečných místech.

Obecně lze opotřebení charakterizovat jako děj, kdy dochází k odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z povrchu materiálu mechanickými účinky. Opotřebení se často projevuje chvěním, hlukem, rázy a růstem třecích sil. U řetězu jízdního kola dochází k namáhání mikroplastickou deformací způsobenou zatlačováním tvrdých částic (např. písek) do stykových ploch dvou členů, což může mít za následek vznik trhlin.

Významným faktorem vzájemného působení dvou pohybujících se částí je *tření*. U řetězu jízdního kola tvoří tribologický systém čep – pouzdro, pouzdro – váleček, popřípadě váleček – pastorek společně s mazivem, které se vyskytuje mezi stykovými plochami, přičemž za mazivo lze považovat i povlak kovu na jednom z těles třecí soustavy. U řetězu

jízdního kola dochází v jednotlivých stykových plochách k vnějšímu tření kluznému, které se nachází na pomezí tření smíšeného až suchého, kdy je vrstva maziva velmi malá a dochází k přímému kontaktu některých výstupků a mikronerovností třecích ploch.

K adhezivnímu opotřebení dochází, jsou – li při klouzavém pohybu vytrhávány částičky kovu z jednoho povrchu a přenášeny na druhý, popřípadě mohou odpadnout. Adheze vzniká v důsledku působení meziatomových sil, které mají tendenci spojit oba povrchy v jeden celek. U řetězu jízdního kola může docházet při vzájemném kontaktu povrchů k akumulaci tepelné energie a vzniku mikrosvaru. Intenzitu adhezivního opotřebení lze ovlivnit vhodným přidáním maziva mezi stykové plochy.

Dalším typem opotřebení vyskytujícího se u řetězu jízdních kol je abraze. Tento děj je charakterizován oddělováním částic povrchu nerovnostmi druhého povrchu nebo tvrdšími částicemi pohybujícími se mezi třecími plochami. V provozu se do řetězu jízdního kola během jízdy dostávají cizí částice (bahno, písek, rostlinné materiály) v různé velikosti, tvaru, množství a tvrdosti, které mají vliv na velikost opotřebení.

U válečku řetězu jízdního kola dochází v poslední řadě k únavovému opotřebení, které se projevuje v místech opakovaného styku válečku s pastorkem, kde je povrch válečku vystaven působení normálových a smykových sil a tím pádem může docházet k uvolňování částic z povrchu a k porušení geometrie tělesa. V případě kontaktu válečku s ozubeným převodem se jedná o kontaktní únavové porušení, které je charakteristické působením kontaktních tlaků za působení třecí síly.

5 Experimentální část

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo potvrdit nebo vyvrátit hypotézu o vlivu CHTZ zpracování na zvýšení životnosti řetězu jízdního kola. Následující experimentální část byla zaměřena na dosažení potřebných vlastností řetězu jízdního kola, které potlačí nebo eliminují negativní mechanické a chemické vlivy prostředí, v němž řetěz běžně pracuje, čímž by došlo ke zvýšení jeho životnosti a provozuschopnosti v porovnání s jinak nezpracovaným produktem. Jedná se především o vlastnosti jako odolnost proti opotřebení, zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy při zachování houževnatého jádra, odolnost proti cyklickému namáhání, snížení součinitele tření a zvýšení korozivzdornosti. Před samotným začátkem experimentů bylo nutné zajistit vhodné zkušební vzorky, které byly vystaveny souboru zpracování, testování a následnému pozorování společně s porovnáním dosažených výsledků. Před samotným procesem CHTZ bylo zapotřebí zkušební materiál vhodným způsobem analyzovat z hlediska struktury, mechanických vlastností a korozní odolnosti. Poté se přistoupilo k samotnému procesu CHTZ. V závěru práce došlo k srovnání vlastností před a po CHTZ, především z hlediska korozní odolnosti, tvrdosti, mechanické pevnosti a houževnatosti.

Veškeré experimenty prováděné v souvislosti s touto prací byly uskutečněny v rámci Katedry materiálu a strojírenské metalurgie (KMM) s využitím metalografického a experimentálního vybavení, které bude dále charakterizováno v následujících kapitolách.

5.1 Charakteristika zkušebních těles a odběr vzorků [4]

Výběru a přípravě zkušebních těles a vzorků je nutné věnovat patřičnou pozornost, neboť na nich závisí výsledky zkoušky. Vzorek byl zvolen především tak, aby charakterizoval zkoumané vlastnosti materiálu jako celku. Pro odběr vzorků a zkušebních těles platí obecně některé zásady. Technika oddělení vzorku od zkoumaného materiálu může zcela nebo úplně změnit charakter požadovaných výsledků. Nedílnou součástí při odběru vzorků je jejich označování. Laboratorní praxe ukazuje, že při podceňování řádného označování vzorků často

dochází k jejich záměně. Pro zajištění reprodukovatelnosti výsledků zkoušek musí být stanoven postup odběru vzorků.

5.1.1 Charakteristika zkušebních těles

První zkušební těleso představuje hotový výrobek v podobě řetězu jízdního kola od značky SHIMANO s obchodním označením HG50. Jedná se o řetěz střední kategorie, jehož cena se pohybuje na hranici 300 Kč. Tento výrobek se skládá ze 112 článků pospojovaných vnitřními destičkami a jednotlivými čepy, na kterých se dále nachází otočný váleček. Hmotnost řetězu je 335 gramů.

Obr. 1b: Řetěz SHIMANO HG 50 [19]



Druhý vzorek byl odebírán opět z hotového výrobku - řetězu jízdního kola od výrobce cyklistických komponentů SUNRACE. Tento řetěz nese obchodní označení M84. Výrobek obsahuje 116 článků, které drží pohromadě vnitřní destičky a jednotlivé čepy, na kterých je uložen váleček. Výrobce řetězu udává hmotnost 274 g na 110 článků. Tento produkt představuje komponent nižší třídy, cena za kus se pohybuje okolo 150 Kč.



Obr. 2b: Řetěz SUNRACE [20]

Zástupci zkušebních těles (podélné články) byly zkoumány z hlediska chemického složení (viz. Tab. 1b). Množství prvků uhlíku a síry bylo měřeno pomocí CS analyzátoru. Hodnoty ostatních prvků přítomných ve výrobku byly měřeny za využití RTG spektroskopie v elektronové mikropsii metodou EDX.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]
SHIMANO	0,42	0,2	0,64	0,01
SUNRACE	0,31	0,2	0,33	0,003

Tab. 1b: Chemické složení podélných článků řetězu

5.1.2 Odběr vzorků

Odběr vzorků z hotového výrobku (řetězu) pro proces CHTZ a poté následující zjištění fyzikálně - chemických (korozní odolnost) a mechanických vlastností (tvrdost, pevnost v tahu) před a po CHTZ zpracování probíhal následujícím způsobem. Celek řetězu SHIMANO a SUNRACE byl rozdělen na 6 částí za pomoci ruční cyklistické nýtovačky. Každá část zkušebního vzorku byla složena z 18 článků. Z důvodu přesnosti a neomylnosti výsledků experimentu byl zvolen větší počet vzorků. Při odběru vzorků nedošlo k ovlivnění zkoušených vlastností.

Při odběru vzorků pro zkoumání mikrostruktury, měření mikrotvrdomosti a stanovení hloubky vrstvy po CHTZ bylo nutné dbát na techniku odběru vzorku a výběr vhodného místa tak, aby bylo dosaženo věrného vystižení celkové struktury. Technika oddělení vzorku od zkoumaného materiálu může zcela nebo úplně změnit charakter požadovaných výsledků. Při odbírání vzorků bylo nutné především dodržet zásadu, aby nevzniklo tepelné ovlivnění zkoumané oblasti a tím nedošlo k případným fázovým přeměnám. Pro odběr vzorků byl zvolen způsob ručního řezání s přívodem chladicího média – vody. Vzorky byly upnuty do svěráku a poté byl nejprve proveden příčný řez osou čepu, poté byla rozříznuta podélná destička v polovině své délky. Preparované vzorky byly následně zalisovány pryskyřicí za pomoci jednokomorového lisu od firmy Struers s označením Citopress 10. Vzorky byly umístěny do přístroje tak, aby plocha určená k další úpravě a analýze byla v kontaktu se dnem formy (destička byla umístěna podélně a příčně, čep pouze příčně ke dnu formy). Poté byl zahájen proces zapékání při teplotě 180 °C a tlaku 200 bar po dobu 7 minut.

5.2 Metalografie [21]

Optickou metalografii chápeme jako pozorování vzorků za využití patřičné techniky – klasických světelných mikroskopů nebo speciálních metalografických mikroskopů. Metalografický vzorek není obvykle možné studovat bez předchozí úpravy. K zviditelnění struktury je zapotřebí provést sérii kroků, které budou popsány v následující kapitole. Zpravidla se jedná o kroky, jako volba vhodného místa odběru vzorku, jeho preparace, broušení, leštění a případné leptání potřebné k zviditelnění struktury.

5.2.1 Broušení vzorku

Při broušení vzorků se kladl důraz na odstranění nerovností povrchu. Od správně vybroušeného vzorku se požaduje, aby byl jeho povrch rovnoměrně drsný, dokonale rovný, a aby broušením nedošlo ke změně struktury. Při broušení vzniká na povrchu materiálu plasticky zdeformovaná vrstva, označovaná jako Beilbyova vrstva, lze ji omezit intenzivním chlazením za přívodu vhodné chladicí tekutiny či následným leštěním vzorku.



Obr. 3b: Mechanická bruska a leštička Struers Labopol

Broušení vzorku bylo prováděno v laboratoři za pomoci ručních mechanických brusek s označením Struers – Labopol 1 (obr. 3b) s přívodem chladicího média - vody. Zrna brusiva a částice vzorku byly zároveň odplavovány z povrchu brusného kotouče. Brusné disky byly uchycovány na brusné kotouče magneticky. Proces broušení byl zahájen výběrem vhodného brusného kotouče, přičemž se vždy postupovalo od kotoučů s hrubší zrnitostí k jemnějším.

Jako brusivo bylo použito brusných papírů s křemíku křemíku. Brusný disk se umístil na rotující kotouč brusky, následně došlo k přívodu chladicího média. Vzorek byl na brusný kotouč přitlačován adekvátní silou, čímž na povrchu vzorku vznikly pozorovatelné rovnoběžné drážky. Při přechodu na jemnější brusný papír se dobře očištěný vzorek pootočil o 90° a brousil se tak dlouho, dokud nezmizely stopy po předchozím broušení.

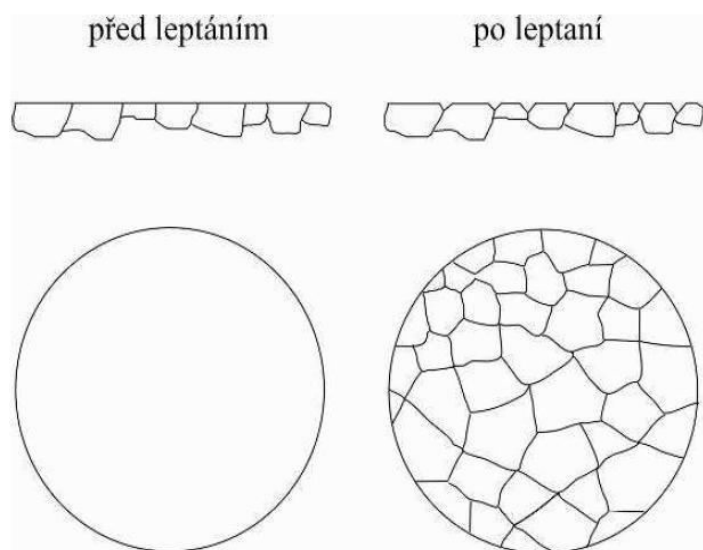
5.2.2 Leštění

Leštění představuje další krok při přípravě kvalitního výbrusu. Hlavní rozdíl mezi mechanickým broušením a leštěním spočívá zejména v tom, že při leštění materiál z povrchu vzorku neubývá. Dochází jen k deformaci vrcholů povrchové drsnosti účinkem leštící pasty, prášku nebo suspenze. Leštěním vznikl na povrchu materiálu kvalitní zrcadlový obraz.

Leštění experimentálních vzorků bylo provedeno v katedrálních laboratořích na mechanických leštičkách značky Strues s označením Labopol 1. Princip leštění je obdobný jako při broušení na mechanických bruskách. Leštící kotouč, který je potažen textilií o různé drsnosti v závislosti na druhu zvolené pasty, se upnul na rotující plochu brusky pomocí magnetu. Pro experimentální vzorky byly použity tvrdá leštící sukna vyrobená z tkaného umělého nebo přírodního hedvábí z důvodu, aby bylo možno zajistit rovnost a ostrost okrajů vzorků. Pro zvolené plátno a zkušební vzorky byly zvoleny výhradně diamantové pasty. Tyto pasty jsou složeny z prostředí obsahující alkohol, olej a vodu, ve kterém jsou rozmístěny diamantové částice o velikosti 1 a 3 μm , přičemž se nejprve leštilo s pastou obsahující větší velikosti částic, tedy 3 μm . Samotný proces leštění byl zahájen přitlakem vzorku na leštící kotouč za přítomnosti diamantové pasty. Se vzorkem se pohybovalo tam a zpět proti směru otáčení kotouče, a to až do doby, dokud se nedosáhlo zrcadlového lesku povrchu. Po samotném procesu leštění se vzorek opláchl ve vodě a etanolu a následně se osušil. K pozorování struktury materiálu bylo nejprve nutné ji vhodným způsobem vyvolat.

5.2.3 Vyvolání struktury

V případě vzorků řetězu jízdního kola bylo zvoleno k vyvolání struktury leptání chemické na hranice zrn. Při chemickém leptání se nechalo na povrch vyleštěného vzorku působit chemické leptadlo. Vzorky byly leptány v 3% Nitalu, který obsahuje 3% roztok kyseliny dusičné (HNO_3) v etanolu ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Dále bylo jako leptadlo použito roztoku



Obr. 4b: Schéma reliéfu před a po leptání na hranice zrn

s označením Vilella – Bain, který obsahuje 10 ml kyseliny chlorovodíkové (HCl), 2 g kyseliny pikrové ($\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$) a 190 ml etanolu. Vlivem působení chemického činidla došlo ke vzniku povrchového reliéfu a ke vzniku chemických reakčních zplodin s jednotlivými strukturními složkami. Tento reliéf vznikl důsledkem rozdílné rozpouštěcí schopnosti jednotlivých součástí struktury. Leptadlo jinak reagovalo na hranicích zrn, jinak reagovaly krystaly různě orientované vzhledem k rovině výbrusu, stejně tak jako odlišné fáze,

důsledkem čehož bylo možné pozorovat strukturu materiálu.

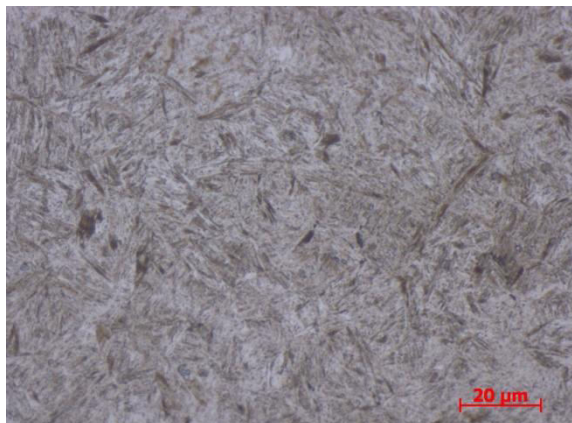
5.2.4 Hodnocení metalografických vzorků

Metalografické vzorky lze hodnotit buď to makroskopicky nebo mikroskopicky v naleptaném nebo nenaleptaném stavu v závislosti na požadovaném výsledku pozorování. Mikroskopické pozorování poskytuje informace o strukturních detailech na úrovni

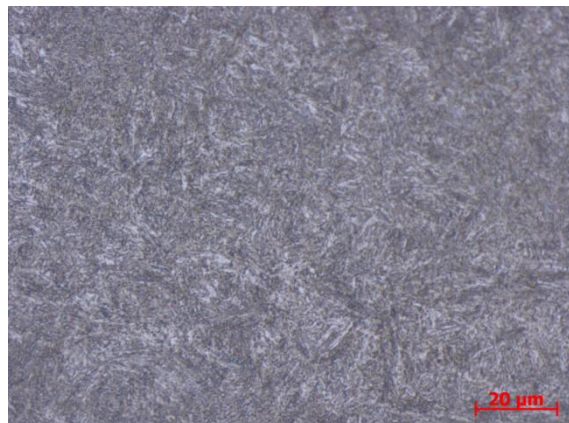
krystalického zrna. K pozorování struktury se využívá mikroskopů (světelných, konfokálních), které pracují s odraženým světlem.

Struktura experimentálních vzorků byla pozorována na optickém mikroskopu Observer Zeiss Z1M. Součástí mikroskopu je špičkový software pro obrazovou analýzu ZEISS AxoVision.

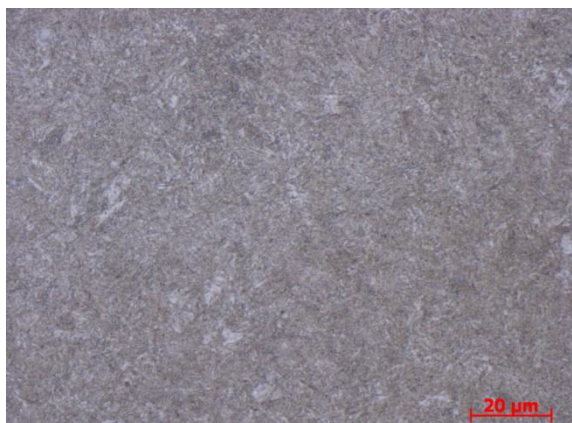
Samotné hodnocení výbrusu v naleptaném i naleptaném stavu bylo prováděno při využití zvětšení objektivu 20x a zvětšení okuláru 10x s výsledným zvětšením 200x. Hodnocení vzorku v nenaleptaném stavu ukázalo přítomnost sulfidických vměstků a oxidů na obou pozorovaných vzorcích. Dále byly vzorky zkoumány pouze v naleptaném stavu, které lze pozorovat na obr. 5b-8b.



Obr. 5b: Naleptaná struktura – čep Shimano při zvětšení 200x, leptáno 3% nitalem



Obr. 6b: Naleptaná struktura – článek Shimano při zvětšení 200x, leptáno 3% nitalem



Obr. 7b: Naleptaná struktura – článek Sunrace při zvětšení 200x, leptáno 3% nitalem



Obr. 8b: Naleptaná struktura – čep Sunrace při zvětšení 200x, leptáno Villela-bain

Vyhodnocení jednotlivých struktur:

- SHIMANO čep – kaleno, martenzitická struktura s dolním bainitem
- SHIMANO článek – zušlechtěná struktura obsahující sorbit – jemně zrnitá směs složená z feritu a cementitu
- SUNRICE článek – zušlechtěná ocel, struktura sorbitická, v porovnání s článkem Shimano jemnozrnější
- SUNRACE čep – kaleno, martenzitická struktura

5.3 Chemicko- tepelné zpracování

Před samotným začátkem chemicko – tepelného zpracování bylo nutné rozhodnout o vhodné metodě CHTZ. Výběr vhodného CHTZ probíhal na základě analýzy pracovního prostředí, kterému je řetěz v provozních podmínkách vystaven. Rozhodujícím faktorem pro výběr vhodného zpracování byla schopnost metody dodat materiálu vlastnosti, které by zvýšily jeho odolnost vůči opotřebení, cyklickému namáhání, tvrdost povrchové vrstvy a odolnost vůči korozi. Těmto stanoveným podmínkám vyhovují z větší části metody nitridace a cementace. Poté bylo přihlíženo k finanční náročnosti a celkové dostupnosti jednotlivých metod zpracování. V rámci katedry jsou obě tyto metody ekonomicky dostupné a relativně snadno proveditelné.

Před samotným procesem nitridace a cementace bylo zapotřebí experimentální vzorky zbavit všech nečistot a nežádoucích okujů, a to v několika krocích za pomoci ultrazvukové čističky. Bez tohoto procesu čištění by nebylo možné zaručit kladný výsledek zpracování. Nejdříve se vzorky praly při teplotě 60 °C po dobu 15 minut v alkalickém, čisticím a odmašťovacím prostředku s označením Syntasol 310. Poté se čisticí vana vypláchla a přistoupilo se k čištění v perchloru (tetrachlorethylen C_2Cl_4) po dobu závislou na znečištění povrchu daného vzorku, pralo se až do absolutní čistoty. Poté se vzorky opláchly v demineralizované vodě a již byly připraveny k samotnému procesu CHTZ.

5.3.1 Nitridace v prášku

Když byly vzorky dokonale očištěny od nežádoucích látek, bylo možné přistoupit k samotné nitridaci v prášku. Pro nitridaci v prášku byly zvoleny vzorky SHIMANO. Zapékací krabice je vyrobena ze žáruvzdorného materiálu. Nejprve se na dno krabice navrstvila přibližně tři centimetry vysoká hladina nitridačního prášku. Dále se přidal aktivátor, a to v poměru 1:10 vzhledem k objemu nitridačního prášku ve formě, který se následně rozložil na již umístěnou vrstvu v krabici (viz. obr. 9b) a zasypal se další vrstvou prášku přibližně do 3/5 objemu krabice. Poté nastal čas pro vložení vzorků SHIMANO složených z 18 článků. Krabice se až po horní okraj doplnila granulátem, dále bylo nutné krabici zatmelit za pomoci atominu (viz. obr. 10b), který se naněs na okraje krabice v tloušťce přibližně půl centimetru. Následně se krabice uzavřela víkem a byla připravena k vložení do komorové pece. Pec se rozehrála na teplotu 500 °C, následně se vložila zapékací forma se vzorky, a to po dobu 600 minut.

Chemické složení nitridačního prášku a aktivátoru výrobce neuvádí, proto byl proveden chemický rozbor na stroji XRF: wavelength dispersive X – ray fluorescence spectrometer Brucker AXS GmbH – S4 EXPLORER (měření bylo zajištěno Ing. Tomášem Křenkem Ph.D.) Výsledné chemické složení je patrné z tab. 2b. Procentuální součet prvků nedosahuje 100%, protože prvky ve stopovém množství byly zanedbány. [23]



Obr. 9b: Vložení růžového aktivátoru do formy [23]



Obr. 10b: Nanesení vrstvy tmelu na okraj formy [23]

Tab. 2b: Chemické složení prášku a aktivátoru [23]

Nitrídační prášek [%]		Aktivátor [%]	
Al	0,524	Al	12,1
C	23,3	C	2,2
O	9,6	O	41,25
Fe	0,348	Fe	0,62
F	0,28	F	0,42
Si	0,71	Si	16,8
S	0,507	K	0,95
Ca	52,96	Na	1,8
		Cr	0,24

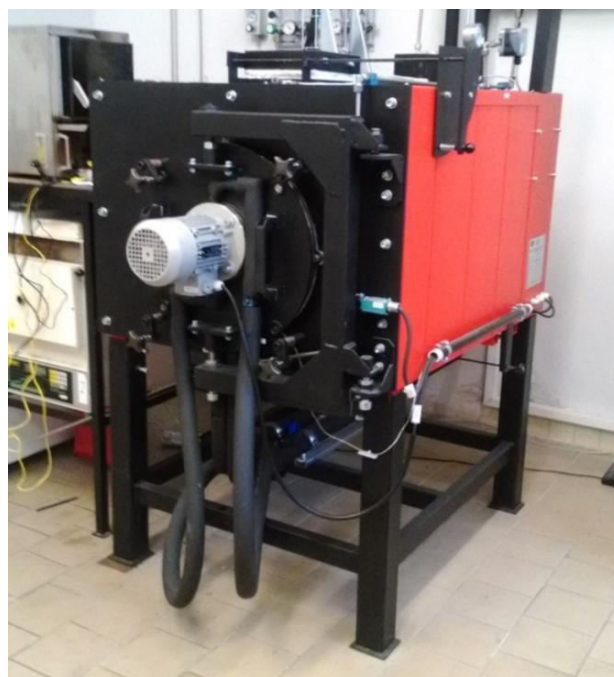
Obr. 11b: Řetěz SHIMANO zleva po nitridaci a před nitridací v prášku



5.3.2 Nitridace v plynu

Nitridace vzorků SUNRACE v plynném prostředí probíhala v rámci KMM v nitridační peci v laboratoři CHTZ (viz. obr. 12b). Charakteristické parametry pecního zařízení jsou uvedeny v tab. 3b. Rám nitridační pece je vyroben z konstrukční oceli, retorta pece je vyrobena z žáruvzdorné oceli. Dveře pece, zavěšené na C závěsu, se otevírají ručně do boku. Uvnitř retorty probíhá nucená cirkulace atmosféry. Izolace je zde zajištěna pomocí keramického vlákna a lehčených izolačních cihel. Topné spirály jsou umístěny na keramických trubkách na bočních stěnách pece a ve dně. Přívod pracovního plynu probíhá za pomoci rozvaděče médií přes zadní stěnu. Vsázka se vkládá ručně. K měření složení nitridační atmosféry slouží vodíková sonda. Solenoidový ventil reguluje průtok plynu nebo kapalin. Pec je dále vybavena nepřímým chlazením a kontrolou přetlaku v retortě, součástí pece je řídicí systém s označením PROTHERM 500, který zaznamenává parametry procesu, které je možno sledovat na displeji. Systém PROTHERM 500 dále reguluje výši teplot, řídí složení nitridační atmosféry a koordinuje pohyby procesních médií.

Obr. 12b: Nitridační pec



Tab. 3b: Charakteristické parametry pecního zařízení

Maximální teplota	650 °C
Maximální hmotnost vsázky	15 kg
Vnitřní objem retorty	30 litrů
Vnější rozměry (Š x V x H)	1600 x 2400 x 1800 mm
Vnitřní rozměry (Š x V x H)	300 x 150 x 400 mm
Topný příkon	13 kW
Napětí	3/PEN 400/230V AC 50 Hz

Jako zdroj plynu k vytvoření potřebné atmosféry byl použit čpavek NH_3 a dusík N_2 , uložený ve vysokotlakých lahvích, které jsou s pecí propojeny za pomoci tlakových hadic. Tento průtok plynů do pece řídí rozvaděč procesních médií uložený ve skříni, která dále obsahuje systém potrubí, ventilů a průtokoměrů. Dusík N_2 slouží k proplachu pece před a po sycení atmosféry čpavkem NH_3 a dále k zajištění potřebné tlakové rovnováhy. Průtok NH_3 do retorty je řízen rozvaděčem médií a do pece proudí z dvou ventilů, které mají odlišné průtoky. Hodnoty průtoku plynů lze pozorovat v tab. 4b.

Tab. 4b: Průtok jednotlivých procesních plynů nitridačního procesu

NH₃ velký	0,2 m ³ /hod	50 kPa
NH₃ malý	0,1 m ³ /hod	50 Kpa
N₂ proces	20 NI/hod	50 kPa
N₂ proplach	1,1 Nm ³ /hod	200 kPa

Po důkladném očištění vzorků byla vsázka vložena ručně do pecního zařízení, poté bylo nutné patřičně zabezpečit dveře pece za pomoci čtyř závitů. Před započítáním samotného procesu bylo zapotřebí nastavit program nitridace, jedná se především o nastavení parametrů jako průtok jednotlivých plynů společně s hodnotami teplot a dobami setrvání na těchto teplotách (viz. tab. 5b). Při teplotě nitridace 500 °C je čpavek nestabilní a dochází k jeho rozkladu dle rovnice (14). Sycení povrchu dusíkem vzrůstá s rostoucím obsahem nerozloženého NH₃ v atmosféře (viz. kapitola 3.3). Průběh zbytkového množství NH₃ v peci a průběh teploty v závislosti na čase je patrný z grafu č. 1 a č. 2.

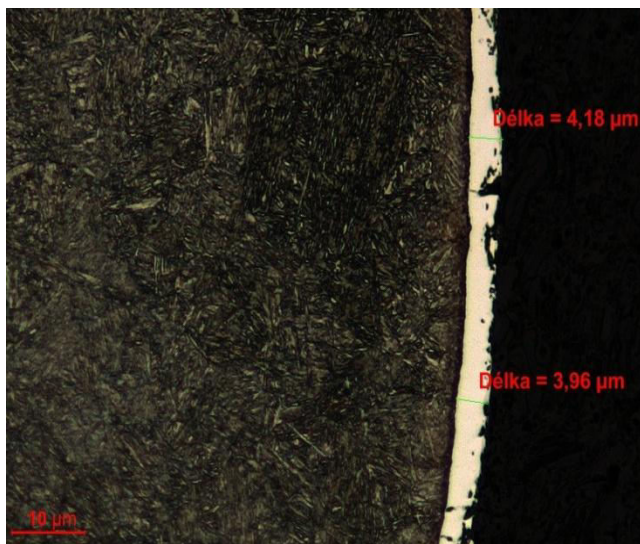


Tab. 5b: Etapy procesu nitridace v řídicím systému

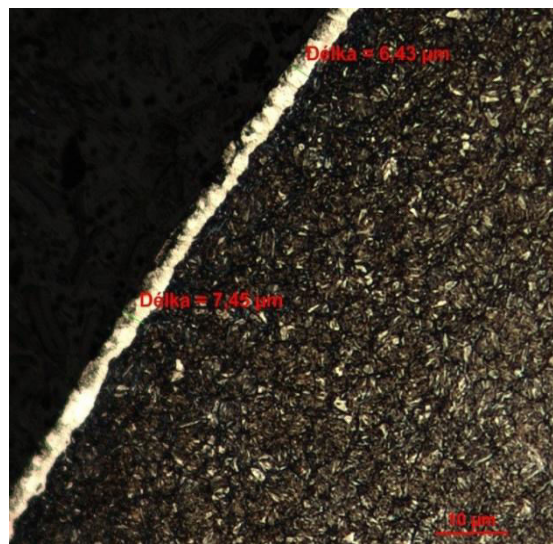
Krok	Proces	Čas	Zadaná teplota [°C]
1	Čekání na vsázku	16:29 – 16:30	20
2	Proplach N ₂	16:30 – 17:05	500
3	Ustanovení rovnováhy N ₂ proces	17:05 – 17:06	500
4	Přívod NH ₃ velký	17:06 – 19:06	500
5	Přívod NH ₃ malý, přívod N ₂ proces	19:06 – 3:06	500
6	Proplach N ₂	3:06-8:27	20
7	Chlazení	8:27 – 9:09	20

Celkový čas nitridace v plynu od doby vložení vzorků a začátku programu do doby vyndání vzorků z pece činil 16 hodin. Z nitridační teploty 500 °C vzorky volně chladnou v peci až do doby, kdy byly vyndány při teplotě atmosféry přibližně 170 °C (viz. graf č. 1). Poté se nechají volně vychladnout při pokojové teplotě.

Na následujících dvou snímcích (obr. 13b, 14b) je patrný metalografický výbrus příčného řezu čepů řetězů SHIMANO a SUNRACE naleptané v 3 % roztoku nitalu. Na obrázcích lze pozorovat přítomnost bílé povrchové vrstvy nitridů, jejíž tloušťka nepřesahuje hodnotu 10 μm . Tato vrstva je velmi křehká, a proto došlo při odběru vzorku k jejímu vytrhávání. Dále je možno pozorovat mikrostrukturu čepu na naleptaném výbrusu, kdy došlo vlivem nitridační teploty k popuštění původního martenzitu a vyloučení cementitu s feritem, přičemž feritické jehlice sledují původní martenzitické desky.



Obr. 13b: SHIMANO čep – bílá vrstva, zvětšeno 100x

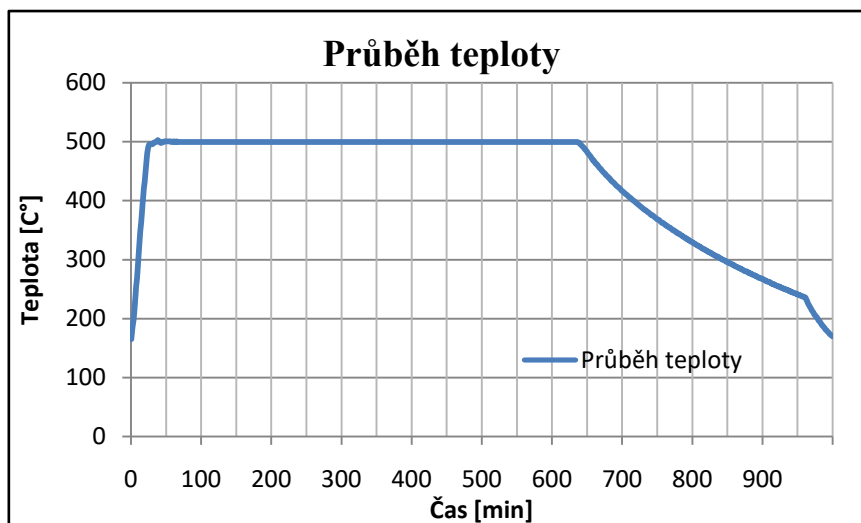


Obr. 14b: SUNRACE čep – bílá vrstva, zvětšeno 100x

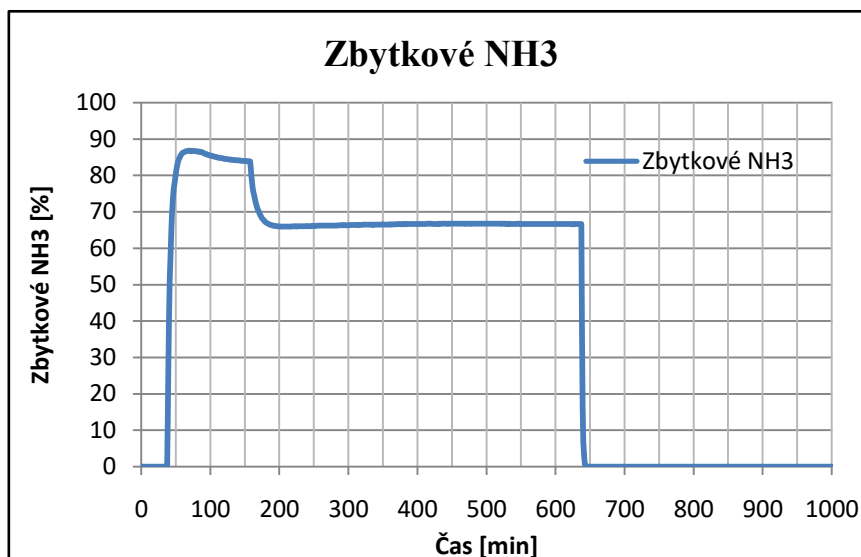
Obr. 15b: Řetěz SUNRACE shora před nitridací a po nitridaci v plynném prostředí



Graf 1: Průběh teploty v peci



Graf 2: Zbytkové NH_3 v pecní atmosféře



5.8 Cementace

Cementace zkušebních těles SHIMANO a SUNRACE probíhala v rámci KMM v laboratoři CHTZ. Nejprve bylo nutné rozhodnout o vhodném cementačním prostředí, přičemž se rozhodovalo o cementaci v tuhém a plynném prostředí. Vzhledem k množství zkušebních těles s přihlédnutím k finanční náročnosti jednotlivých typů zpracování (v plynném prostředí je proces řádově 5x dražší) bylo rozhodnuto o vhodnosti zpracování v sytkém prostředí. Při cementaci v tuhém prostředí se obvykle volí teplota v rozmezí od 880 do 920 °C, přičemž se vzrůstající teplotou a dobou setrvání na této teplotě roste hloubka cementační vrstvy a také obsah uhlíku v této vrstvě (viz. kapitola 3.2). Vzhledem k rozměrům jednotlivých částí řetězů, které se pohybují v řádech milimetrů, a po diskuzi s konzultantem bylo rozhodnuto o výši cementační teploty 880 °C a době setrvání na této teplotě 90 minut.

Nejprve bylo nutné zbavit zkušební tělesa všech nežádoucích nečistot a okují, a to za pomoci ultrazvukové čističky obdobným způsobem jako před nitridací za využití stejných přípravků. Poté již bylo možno přistoupit k přípravě tuhého prostředí, u kterého byl opět proveden rozbor chemického složení metodou fluorescenční spektrometrie analogicky jako u nitridačního prášku (tab. 6b) Vzorky byly vloženy do krabice vyrobené z žáruvzdorného plechu. Nejprve se na dno formy umístila vrstva zásypu, poté se vložily vzorky a následně se zasypaly další vrstvou cementačního prášku tak, aby jím byly rovnoměrně obklopeny (viz. obr. 18b). Poté se již krabice vložila do rozehráté komorové pece na teplotu 880 °C po dobu 90 minut. Po uplynutí této doby se pec automaticky zastavila a vzorky se nechali v peci volně chladnout.



Obr. 18b: Vzorky v zapékací formě

Chemické složení cementačního prášku [%]							
Al	0,11	Cu	0,0048	Mn	0,0475	S	0,021
Ba	0,016	Fe	0,094	Na	0,035	Si	0,244
C	61,1	I	0,21	O	22,2	Sr	0,0068
Ca	0,814	K	1,47	P	0,13	Ti	0,0034
Cr	0,0031	Mg	0,14	Pd	0,015	Zr	0,0576

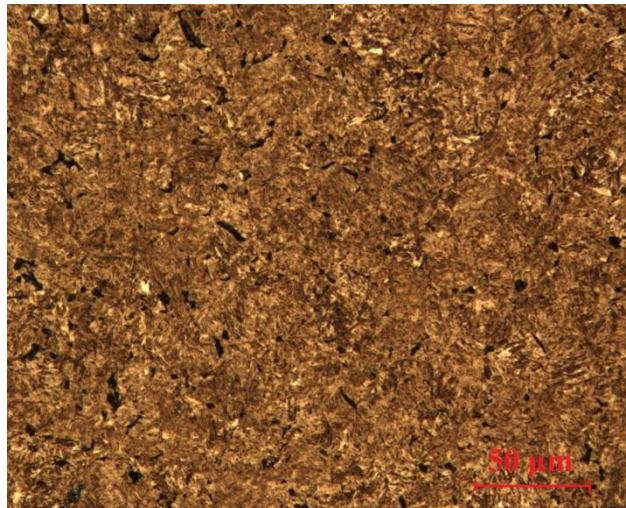
Tab. 6b: Chemické složení cementačního prášku [23]

Aby bylo dosaženo požadovaných vlastností zkušebních vzorků, bylo nutné řetězy po samotném procesu cementace vhodně tepelně zpracovat. K tomuto účelu bylo zvoleno kalení. Po vyjmutí vzorků z žáruvzdorné krabice a následnému zchladnutí došlo k jejich ošetření – aplikaci ochranného nátěru s označením Kalsen 3, který se používá pro ochranu tepelně zpracovaných ocelí jako ochrana proti oduhlčení – okujení. Obsahuje organická rozpouštědla (perchlorethylen, etylalkohol). Po aplikaci nátěru byly vzorky vloženy po dobu 20 minut do rozehráté komorové pece na teplotu 790 °C. Po vyjmutí z pece byly okamžitě zakaleny do vody. Tento způsob kalení uhlíkových ocelí do vody je označován jako martenzitické kalení. Značný rozdíl teplot mezi kaleným předmětem a lázní vedl ke vzniku velkých vnitřních pnutí. Z tohoto důvodu bylo nutné přejít k dalšímu kroku zpracování – popouštění. Vlivem popouštěcích teplot došlo k snížení úrovně vnitřních pnutí, která vznikla při kalení. Popouštění bylo prováděno tzv. za nízkých teplot (150 °C) při postupném ohřevu vzorku rychlostí 4°C/min po dobu výdrže na popouštěcí teplotě 90 minut. Cílem bylo odstranit vnitřní pnutí a zajistit houževnatost jádra při zachování vysoké tvrdosti a odolnosti vůči opotřebení.

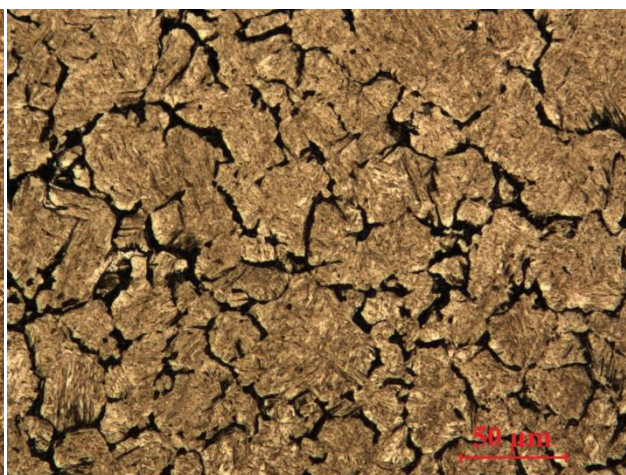
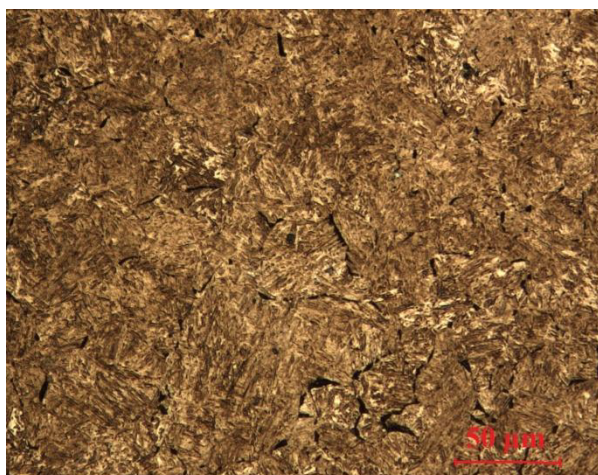
Následně byly vzorky zkoumány z hlediska mikrostrukturního složení v oblasti příčného řezu čepu a článku řetězu SHIMANO a SUNRACE. Po přípravě vzorků a následnému naleptání 3% nitalem byla pozorována struktura na obr. 19b – 22b. U příčného řezu článků obou zástupců byla u okrajové vrstvy pozorována 100% martenzitická struktura. Směrem k jádru došlo poté u článku k vylučování troostitu po hranicích původních austenitických zrn, v menší míře byl pozorován bílý ferit. U příčných řezů čepu řetězu

SHIMANO i SUNRACE byla opět od okraje pozorována martenzitická vrstva s větším podílem troostitu a feritu, podíl troostitu na celkovém objemu vzorku se směrem k jádru zvětšoval.

Obr. 19b: Článek SUNRACE 200x, okraj. vrstva Obr. 20b: Článek SHIMANO 200x, jádro



Obr. 21b: Čep SUNRACE 200x, okrajová vrstva Obr. 22b: Čep SHIMANO 200x, jádro



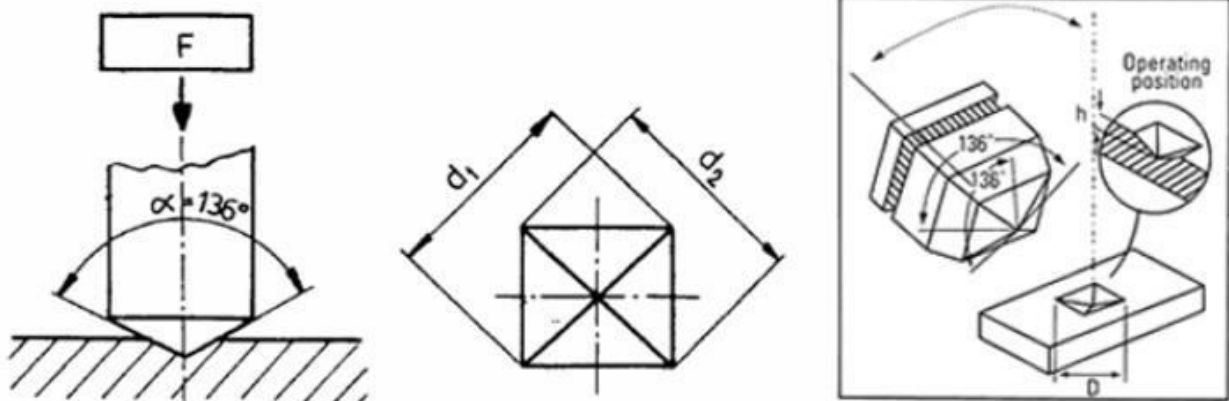
5.4 Měření mikrotvrdomosti

Pojem mikrotvrdomost se používá pro tvrdost při použití zcela malých zatížení, čímž vznikají na zkušebním tělese vtisky mikroskopické velikosti. Velikost vtisku i indentoru se pohybuje v řádech μm (10^{-6} m). Mikrotvrdomost nelze na rozdíl od makrotvrdomosti určovat klasickými tvrdoměry, protože tato metoda vyžaduje několikanásobně větší přesnost při zatěžování i při měření vtisku. K proměření vtisku se nejčastěji používá přesná optika, např. světelný mikroskop. Při zkouškách mikrotvrdomosti se vždy využívají jen vnikací tělíska s diamantovým indentorem. Mezi nejběžnější metody patří metoda Vickersova, Knoppova či Bierkovičova. [24]

Pro měření tvrdosti experimentálních vzorků byla zvolena metoda dle Vickerse. Vickersova metoda poskytuje širokou škálu tvrdostí materiálů, čímž umožňuje jejich vzájemné porovnání. K proměření vtisku byla použita přesná optika v podobě světelného mikroskopu. Vickersova zkouška je definována normou ČSN EN ISO 4516: *Kovové a jiné organické povlaky – Zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse a podle Knoopa*. Dle této normy se

pro označení používá zkratka HV, za kterou dále následuje hodnota zkušební zátěží v kilogramech. Pro měření mikrotvrdości experimentálních vzorků řetězu jízdního kola bylo zvoleno zatížení na základě rozměrů vzorku odpovídající jednomu kilogramu s označením HV1 před a po CHTZ. Zatížení jedním kilogramem odpovídá dle normy ČSN EN ISO 4516 zatížení o velikosti síly $F = 9,807 \text{ N}$. [2]

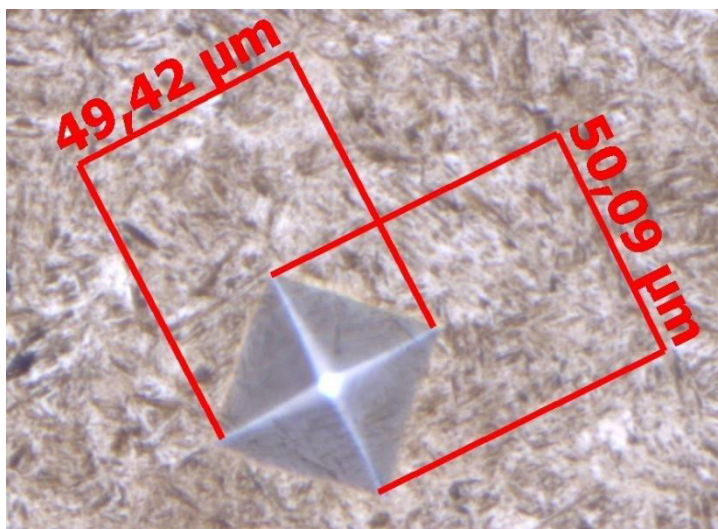
Podstatou Vickersovy metody je použití vnikacího tělesa v podobě pravidelného čtyřbokého jehlanu s čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° , který je vyroben z diamantu.



Obr. 23b: Schéma indentoru dle Vickerse [8]

Zkušební zatížení F působilo v ose indentoru (kolmý směr k vzorku) po předem stanovenou dobu dvanácti sekund. Po odlehčení indentoru zůstal v materiálu vtisk o úhlopříčce D , na základě čehož se určila velikost plochy vtisku. Hodnota tvrdosti dle Vickerse udává poměr mezi zkušebním zatížením a velikostí povrchu vtisku, zjistí se dle normou určeného vztahu (15).

$$HV = 0,102 * \frac{2F \cdot \sin \frac{136}{2}}{D^2} = 0,1891 * \frac{F}{D^2} \quad (15)$$



Obr. 24b: Vtisk indentoru, zvětšení 200x – SHIMANO čep

předem nastavenou dobu. Na každém vzorku (příčný řez čepu, podélná destička) byly provedeny tři vtisky diamantovým indentorem. Poté byly naměřeny velikosti úhlopříček (obr. 24b) za pomoci optického mikroskopu Observer Zeiss Z1M při zvětšení 200x. Z naměřených

Zkouška proběhla v laboratořích KMM na moderním mikrotvrdoměru. Nejprve se nastavila hodnota zkušební zátěží v kilogramech (HV1). Vickersův jehlan je usazen přímo do speciálního otočného nosiče objektivů, který umožňuje pouhým pootočením záměnu objektivu za diamantový indentor. Při vhodném přiblížení, kontrastu a hloubce ostrości byl proveden výběr vhodného místa na metalografickém výbrusu. Poté došlo k záměně objektivu za indentor a provedl se vtisk po

uhlopříček D_1 , D_2 byl stanoven aritmetický průměr a dle vztahu (2) spočtena hodnota tvrdosti dle Vickerse (viz. tab. 7b, 8b, 9b) před a po procesu CHTZ jednotlivých zkušebních vzorků.

Tab. 7b: Tvrdost článků (podélně) a čepů (v příčném řezu) řetězu v původním nezpracovaném stavu

SUNRACE	D_1 [μm]	D_2 [μm]	D [μm]	F [N]	HV 1	HV 1 směrodatná odchylka
čep	48,47	49,16	48,815	9,807	778,3	758 ± 11
	50,68	50,06	50,37	9,807	730,9	
	49,08	49,39	49,235	9,807	765,0	
destička	67,36	64,75	66,055	9,807	425,0	450 ± 9
	62,2	63,02	62,61	9,807	473,1	
	63,66	64,35	64,005	9,807	452,7	
SHIMANO						
čep	49,23	48,92	49,075	9,807	770,0	764 ± 20
	49,42	50,09	49,755	9,807	749,1	
	49,03	48,94	48,985	9,807	772,9	
destička	61,95	61,82	61,885	9,807	484,2	471 ± 19
	62,52	63,86	63,19	9,807	464,4	
	64,08	62,28	63,18	9,807	464,6	

Tab. 8b: Tvrdost článků (podélně) a čepů (v příčném řezu) řetězu po nitridaci

SUNRACE	D_1 [μm]	D_2 [μm]	D [μm]	F [N]	HV 1	HV 1 směrodatná odchylka
čep	63,66	58,8	61,23	9,807	494,7	499 ± 4
	64,35	56,84	60,595	9,807	505,1	
	64,48	57,56	61,02	9,807	498,1	
destička	60,03	60,96	60,495	9,807	506,7	517 ± 8
	58,55	60,72	59,635	9,807	521,5	
	59,1	59,86	59,48	9,807	524,2	
SHIMANO						
čep	64,76	62,56	63,66	9,807	457,6	450 ± 5
	64,52	64,18	64,35	9,807	447,8	
	64,8	64,16	64,48	9,807	446,0	
destička	60,04	60,02	60,03	9,807	514,6	528 ± 11
	58,34	58,76	58,55	9,807	541,0	
	59,06	59,14	59,1	9,807	530,9	

Tab. 9b: Tvrdość článků (podélně) a čepů (v příčném řezu) řetězu po cementaci

SUNRACE	D ₁ [μm]	D ₂ [μm]	D [μm]	F [N]	HV 1	HV 1 směrodatná odchylka
čep	47,13	49,8	48,465	9,807	789,5	760 ± 21
	49,12	50,32	49,72	9,807	750,2	
	50,85	49,3	50,075	9,807	739,6	
destička	45,56	47,2	46,38	9,807	862,1	862 ± 10
	44,98	47,13	46,055	9,807	874,3	
	45,18	48,19	46,685	9,807	850,9	
SHIMANO						
čep	48,59	51,6	50,095	9,807	739,0	761 ± 18
	50,51	48,3	49,405	9,807	759,8	
	49,12	48,15	48,635	9,807	784,0	
destička	45,95	46,2	46,075	9,807	873,6	849 ± 20
	47,84	47,09	47,465	9,807	823,2	
	46,19	47,23	46,71	9,807	850,0	

Tvrdość původních nezpracovaných vzorků byla ovlivněna martenzitickou strukturou čepu, díky které byla naměřena tvrdość čepu přesahující 700 HV1 u obou vzorků. U podélných článků řetězu byla poté naměřena tvrdość podstatně nižší, a to především vlivem popuštěné sorbitické struktury, hodnoty se pohybovaly okolo 450 HV1.

U vzorků vystavených procesu CHTZ metodou nitridace došlo vlivem nitridačních teplot k popuštění martenzitické struktury čepů obou zástupců při následném vyloučení feritu a cementitu, což zapříčinilo pokles tvrdości. U podélných článků řetězu obou zástupců došlo k nárůstu tvrdości povrchové vrstvy o několik desítek jednotek. Nepříliš výrazné zvýšení tvrdości lze vysvětlit absencí dalších legujících prvků v oceli, jedná se především o chrom, hliník nebo molybden, které tvoří s dusíkem jemné nitridy o tvrdości dosahující hodnot 900 HV1 (viz. kapitola 3.3).

Vystavením vzorků cementačnímu prostředí došlo k nasycení jednotlivých článků a čepů řetězu uhlíkem. Po následném zakalení byla v okrajové vrstvě obou článků řetězu pozorována téměř stoprocentní martenzitická struktura, díky čemuž došlo k výraznému zvýšení tvrdości povrchové vrstvy přesahující hodnoty 800 HV1. U čepů obou zkušebních vzorků byla struktura převážně martenzitická, s rostoucí vzdáleností od povrchu poté s přítomností feritu a troostitu. Vzhledem k tomuto strukturnímu složení byla naměřena tvrdość čepu přesahující 750 HV1.

5.5 Zkouška tahem [5]

Zkouška tahem patří k nejzákladnějším a nejdůležitějším metodám zjišťování mechanických vlastností a charakteristik. Je předepsána normou s označením ČSN EN ISO 6892 – 1.

Zkouška tahem probíhala v rámci KMM na hydraulickém univerzálním tahovém stroji. Zkouška byla prováděna na vzorcích řetězů SHIMANO a SUNRACE před a po procesu CHTZ, přičemž u každého charakteristického vzorku byly provedeny dvě zkoušky. Zkušební tělesa byla složena z 18 článků navzájem pospojovaných jednotlivými čepy. Tyto zkušební vzorky byly upnuty do čelistí zkušebního stroje tak, aby podélná osa vzorku ležela v ose čelistí stroje. Během zatěžování zkušebních těles rychlostí 10 mm/min plynule rostoucí silou se vzorek deformoval, až při určitém tahovém zatížení došlo k lomu. Při zkoušce se automaticky zaznamenávala velikost zatěžující síly v závislosti na celkovém prodloužení vzorku, který se z délky L_0 prodlouží na konečnou délku L_u ($L_u - L_0 = \Delta L$). Závislost $F - \Delta L$ zobrazuje pracovní diagram (viz. obr. 25b – 27b). Důležité parametry z hlediska povahy experimentu jsou zaznamenány v tab. č. 10b.

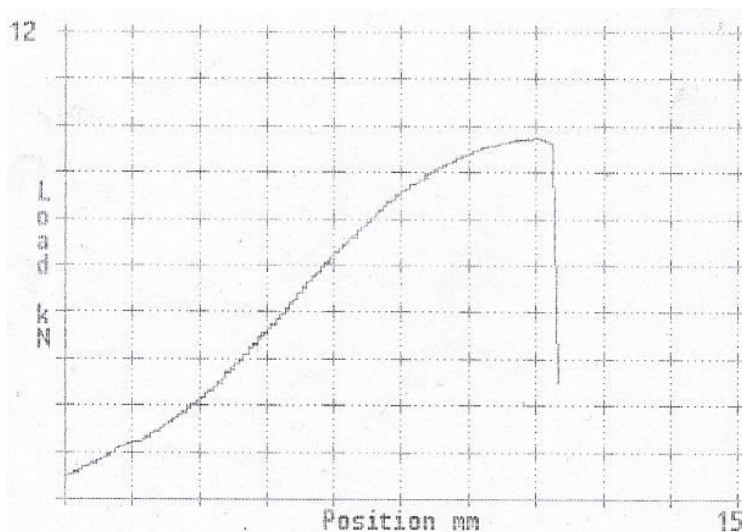
Tab. 10b: Charakteristické parametry při zkoušce tahem

	Číslo vzorku	F [kN]	ΔL [mm]
SHIMANO	1. vzorek	9,27	12,3
	2. vzorek	9,3	11,1
SUNRACE	1. vzorek	10,02	14,3
	2. vzorek	9,94	12,6
SHIMANO nitridace	1. vzorek	6,76	12,6
	2. vzorek	6,76	13,2
SUNRACE nitridace	1. vzorek	6,98	11,3
	2. vzorek	7,01	11,8
SHIMANO cementace	1. vzorek	3,07	1,9
	2. vzorek	2,77	1,6
SUNRACE cementace	1. vzorek	2,61	1,2
	2. vzorek	2,45	1,5

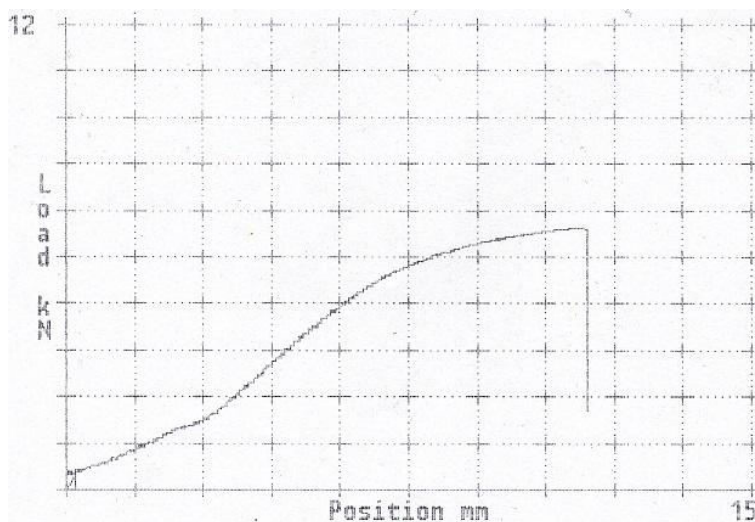
U původních nezpracovaných vzorků řetězů SHIMANO a SUNRACE byla naměřena hodnota maximální zatěžující síly přesahující vždy hodnoty 9 kN. U nitridovaných řetězů bylo možné pozorovat snížení pevnosti v tahu, a to vlivem vystavení funkčních částí řetězu nitridačním teplotám a následnému popuštění, z původních hodnot na hodnoty pohybující se na hranici 7 kN. U vzorků, které byly vystaveny cementačnímu prostředí, došlo k porušení již při velmi nízkém zatížení pohybujícího se na hranici 3 kN. Tento význačný pokles pevnosti v tahu lze připsat zkřehnutí řetězu a ztrátě houževnatosti (viz. Kapitola 5.6.2).

Při zkoušce tahem se deformace soustřeďovala na všech vzorcích vždy do jednoho místa, a to do oblastí podélného článku řetězu, kde došlo k lomu (viz. obr. 28b, 29b). V oblasti čepu nebyly pozorovány výraznější deformace. Článek řetězu lze tedy označit za kritické místo celého systému z hlediska tahového napětí.

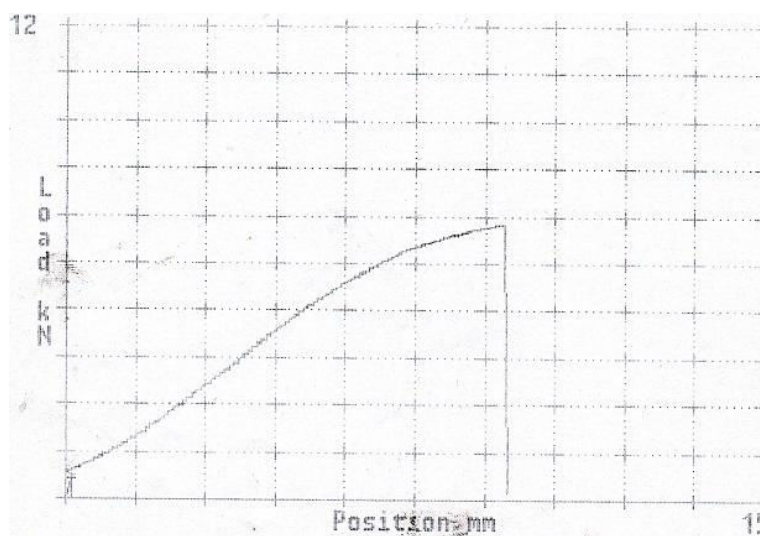
Obr. 25b: Pracovní diagram – SHIMANO HG50



Obr. 26b: Pracovní diagram – SHIMANO HG50 po nitridaci



Obr. 27b: Pracovní diagram – SUNRACE po nitridaci



Obr. 28b: Řetěz SHIMANO po nitridaci, deformace v oblasti vnějšího článku



Obr. 29b: Řetěz SUNRACE po nitridaci, deformace v oblasti vnějšího článku



5.6 Měření hloubky vrstvy

5.6.1 Měření hloubky nitridační vrstvy

Hloubka nitridační vrstvy měřená na vzorcích SHIMANO a SUNRACE po nitridaci byla uskutečněna na základě normy s označením DIN 50190 – 3. Tato norma definuje použití zatížení odpovídající dle Vickersovy metody tvrdosti HV1. Po neúspěšném měření při zatížení 1 kg bylo toto zatížení změněno na hodnotu odpovídající 100 g, tedy HV0,1. Za hloubku nitridační vrstvy se považuje taková vzdálenost od povrchu součásti k místu, kde je naměřená tvrdost o 50 HV 0,1 vyšší, než je tvrdost jádra vzorku. [25]

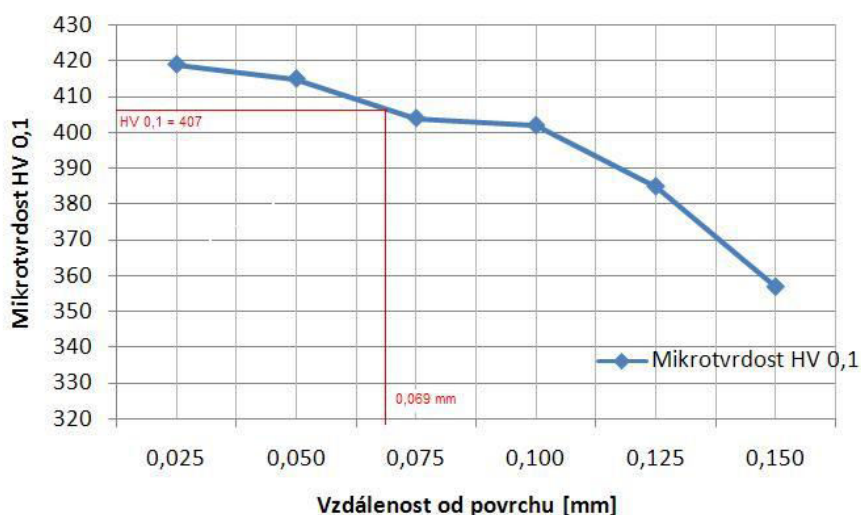
Mikrotvrdot vrstvy odpovídající zatížení HV0,1 byla měřena na vyleštěném metalografickém výbrusu příčného řezu podélného článku řetězu SHIMANO a SUNRACE po nitridaci. Od vnější hrany článku byly prováděny vtisky s krokem 0,025 mm za pomoci mikrotvrdoměru. Hodnocení hloubky nitridační vrstvy proběhlo tak, že byla sestavena křivka mikrotvrdoti vrstvy v závislosti na vzdálenosti od povrchu součásti (viz. graf 3, 4). Poté se k tvrdosti jádra článků přičetla hodnota 50 a vytvořila se vodorovná přímka přímo v grafu. V místě průsečíku křivek se spustila kolmice k horizontální ose a odečtla se hloubka nitridační vrstvy.

Tab. 11b: Mikrotvrdost HV 0,1 na vzorcích SHIMANO a SUNRACE s krokem 0,025 od hrany

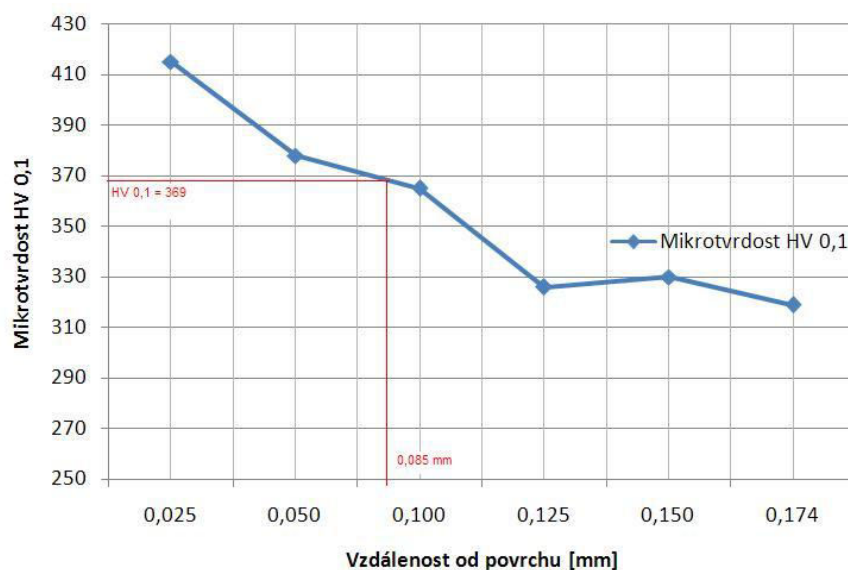
HV 0,1 SHIMANO	Vzdálenost [mm]
419	0,025
415	0,050
404	0,075
402	0,100
385	0,125
357	0,150
357+50	0,069

HV 0,1 SUNRACE	Vzdálenost [mm]
415	0,025
378	0,050
365	0,075
326	0,100
330	0,125
319	0,150
319+50	0,085

Graf 3: Hloubka nitridované vrstvy u řetězu SHIMANO

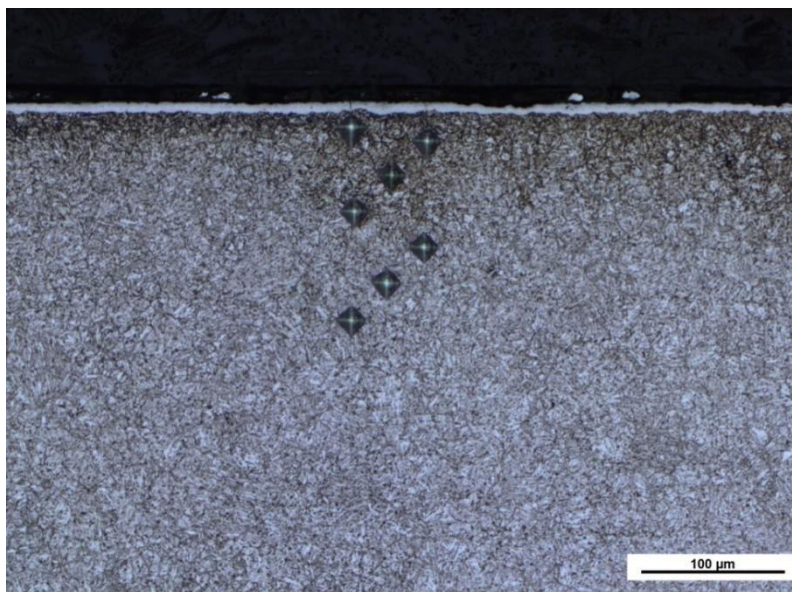


Graf 4: Hloubka nitridované vrstvy u řetězu SUNRACE



Z grafu č. 3 a 4 je patrné, že hloubka nitridační vrstvy u řetězu SHIMANO dosáhla hodnoty 0,069 mm a u řetězu SUNRACE hloubky 0,085 mm. Hloubka bílé vrstvy u řetězu SHIMANO činí v průměru 4,07 μm a u řetězu SUNRACE 6,94 μm (viz. obr. 13b, 14b). Na obrázcích č. 30b a 31b je patrné, jak probíhalo měření mikrotvrdomosti a jak byly provedeny jednotlivé vtisky s důrazem na to, aby nedošlo k jejich vzájemnému ovlivnění. Dále je patrná mikrostruktura vrstvy po procesu nitridace naleptaná 3% nitalem, kde tmavší část struktury v oblasti vtisků po indentoru vykazuje přítomnost nitridů.

Obr. 30b :Provedení vtisků na výbrusu SHIMANO, zvětšení 200x, leptáno 3% nitalem



Obr. 31b:Provedení vtisků na výbrusu SUNRACE. zvětšení 200x, leptáno 3% nitalem



5.6.2 Měření hloubky vrstvy po cementaci

Stanovení hloubky cementační vrstvy probíhalo na základě normy s označením ČSN EN ISO 2639. Tato norma definuje hloubku vrstvy jako kolmou vzdálenost od povrchu vzorku směrem k jádru, kde je naměřena tvrdost 550 HV1. Měření gradientu tvrdosti bylo provedeno na vyleštěném metalografickém výbrusu příčného řezu článků řetězů SHIMANO a SUNRACE po cementaci. Tvrdost HV1 byla měřena od povrchu článku směrem k jádru vzorku s krokem 0,1 mm obdobným způsobem jako při měření hloubky nitridační vrstvy. Výsledné hodnoty tvrdosti HV1 lze pozorovat v tab. 12b.

Tab. 12b: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti HV 1 po cementaci s krokem 0,01 mm od hrany

Krok [mm]	SHIMANO HV1	SUNRACE HV1
0,05	861	873
0,15	849	871
0,25	851	859
0,35	837	841
0,45	819	815
0,55	791	798
0,65	763	783
0,75	760	781
0,85	749	769
0,95	731	758
1,05	729	761

Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 nedosáhly ani u jednoho ze vzorků limitní hodnoty 550 HV1. Vzhledem k výsledku měření a vzhledem k šířce jednotlivých článků odpovídající v průměru hodnotě 2 mm lze předpokládat výskyt cementované vrstvy v celém průřezu jednotlivých článků. Následkem toho byl u článků řetězu pozorován výrazný pokles houževnatosti a nárůst křehkosti, kdy u zkoušky tahem došlo k výraznému poklesu pevnosti a následnému lomu již při malých zatíženích.

5.7 Test korozivzdornosti

Test korozivzdornosti probíhal v korozních laboratořích v rámci KMM. K tomuto účelu byla využita cyklický korozní komora Q-FOG – CCT 600, která umožňuje vystavení zkušebních vzorků odlišným korozním prostředím (solná mlha, 100% vlhkost apod.). K stanovení podmínek experimentu, zkušebních podmínek a vyhodnocení testu bylo přihlíženo k normě dle ČSN EN ISO 10289 a ČSN EN ISO 9227. K testu experimentálních těles bylo využito funkce solné mlhy, kdy docházelo k rozprašování jemné mlhy korozivního roztoku do pracovního prostoru komory (viz. obr. 33b). Za pomoci topného tělesa se v komoře udržuje požadovaná konstantní teplota. Parametry testu a charakteristika korozní komory jsou patrné z tab. 13b.

Koncentrace sol. roztoku	5 ± 1%	Objem komory	511 l
Hodnota pH roztoku	6,5 – 7,2	Délka	109 cm
Teplota v komoře	35 ± 2°C	Šířka	66 cm
Spád roztoku	1,5 ml/hod	Výška	74 cm
Doba testu	24 h		

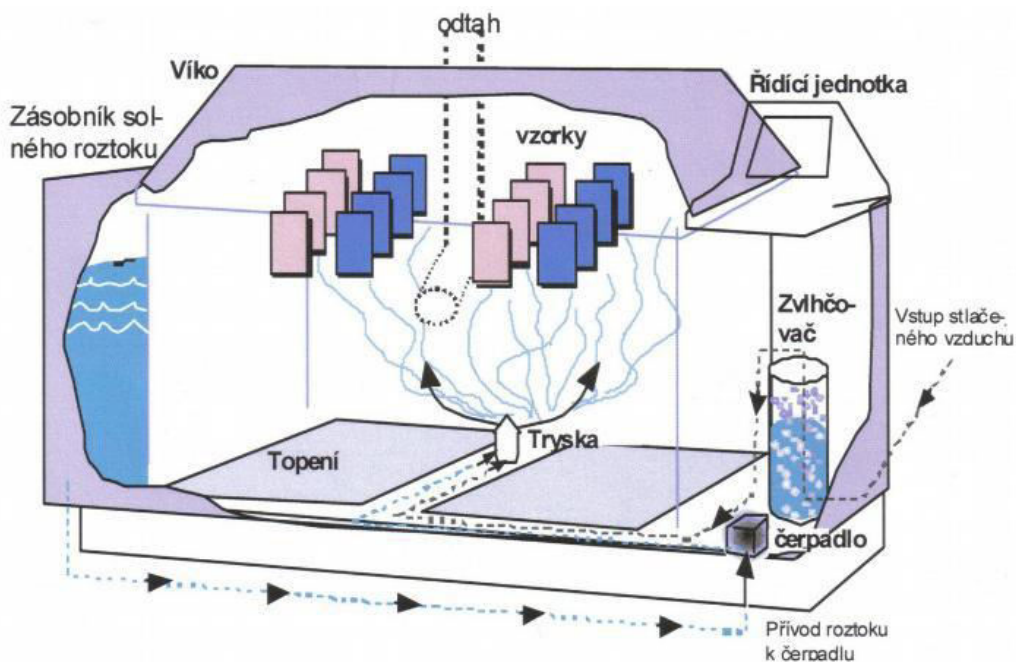
Tab. 13b: Parametry testu a charakteristika korozní komory

Bezprostředně před zkouškou byly referenční vzorky důkladně očištěny za pomoci ultrazvukové čističky v roztoku perchloru (C_2Cl_4) a následně v demineralizované vodě tak, aby se čištěním odstranily všechny nežádoucí stopy, které mohou mít vliv na výsledky zkoušek (nečistoty, olej, nebo jiné cizí látky). Poté byly vzorky uspořádány do zkušební komory (viz. obr. 35b) tak, aby nepřišly do styku s povrchem komory a aby zkoušené povrchy byly vystaveny volnému proudění mlhy. Již po prvních hodinách začátku experimentu se vlivem působení solného roztoku objevily první korozní produkty na všech zkušebních vzorcích, na základě čehož byla stanovena doba testu na 24 hodin. Po uplynutí této doby byly vzorky vyjmuty z komory a následně byly odstraněny zbytky solného roztoku vodou. Poté již bylo možno přistoupit k samotnému vyhodnocení stavu vzorků.

Plocha vad A (%)	Stupeň R_p nebo R_A
Bez vad	10
$0 < A \leq 0,1$	9
$0,1 < A \leq 0,25$	8
$0,25 < A \leq 0,5$	7
$0,5 < A \leq 1,0$	6
$1,0 < A \leq 2,5$	5
$2,5 < A \leq 5,0$	4
$5,0 < A \leq 10$	3
$10 < A \leq 25$	2
$25 < A \leq 50$	1
$50 < A$	0

Obr. 32b: Stanovení stupně změny vzhledu

Celkové vyhodnocení experimentu probíhalo na základě stanovení stupně změny vzhledu R_A vlivem znehodnocení vzorků způsobeného korozním prostředím. Stanovení stupně změny vzhledu bylo uskutečněno na základě subjektivního vizuálního posouzení míry znehodnocení, za kterou se považuje velikost plochy korozních vad na daném zkušebním tělese (viz. obr. 32b) vzhledem k celkové ploše vzorku. Vzorky byly umístěny k pozorování do prostředí s rovnoměrným osvětlením tak, aby byly všechny vady dobře viditelné. Následně byly vzorky rozmístěny sestupně na základě míry korozního napadení. Na vzorcích byly pozorovány především korozní zplodiny, které se hromadily v oblasti čepu, kde nemohla kapalina volně proudit a hromadila se v těchto místech. Po stanovení stupně změny vzhledu R_A u jednotlivých zkušebních těles (viz. tab. 14b) bylo jasně patrné, že vzorky opatřené nitridační vrstvou dosáhli lepších výsledků oproti vzorkům nezpracovaným. U cementovaných vzorků nebylo pozorováno výrazné zlepšení odolnosti vůči korozi.



Obr. 33b: Schéma funkce cyklické korozní komory

Tab. 14b: Stanovení stupně vzhledu u jednotlivých vzorků

Přehled vzorků	Stupeň změny vzhledu Ra
SUNRACE nitridace v plynu (4)	4 (2,5 – 5%)
SHIMANO nitridace v prášku (2)	3 (5 – 10%)
SUNRACE nezpracovaný (3)	2 (10 – 25%)
SHIMANO nezpracovaný (1)	2 (10 – 25%)
SUNRACE cementace (6)	2 (10 – 25%)
SHIMANO cementace (5)	2 (10 – 25%)

Obr. 34b: Korozní produkty - nitridace



Obr. 35b: Vzorčky v korozní komoře



Obr. 36b: Korozní produkty - cementace



5.9 Tribologie [26]

Tribologie se jako obor zabývá procesy tření a opotřebení. K zjišťování tribologických vlastností na zkušebních vzorcích SHIMANO a SUNRACE v surovém stavu a po CHTZ byla využita metoda „Pin on Disc“. Tato metoda využívá speciálně navržené zařízení (obr. 37b), mezi jehož nejdůležitější části patří vodorovné rameno, ve kterém je uchycen přípravek, do něhož se vkládá „PIN“ tělíčko. Na rameno lze vkládat různá zatížení. Zkušební vzorky jsou uchyceny na otočném stole, který je propojen s řídicím systémem, kde se nastavují parametry zkoušky.

Obr. 37b: Zařízení pro měření tribologických vlastností



Vzorek v podobě podélného článku řetězu byl nejprve pevně uchycen na otočném stole. Poté se od určité vzdálenosti středu vzorku nastavil poloměr otáčení přípravku s „PIN“ tělíčkem a zvolila se velikost zatěžující síly na rameni. Dále bylo nutné nastavit rychlost otáček, počet cyklů otáčení a dobu testu. V důsledku tření „PIN“ tělíčka v podobě kuličky, vyrobené z oxidu hlinitého (Al_2O_3), a vzorku dochází k vzniku stopy po opotřebení (viz. obr. 39b). Míra tohoto opotřebení je závislá především na velikosti zatěžující síly, geometrii „PIN“ tělíčka, rychlosti otáček, počtu cyklů a teplotě povrchu vzorku. Parametry zkoušky lze sledovat v tab. 15b.

Velikost zatížení F [N]	Rychlost [ot/min]	Počet cyklů	Doba testu [s]	Poloměr kuličky [mm]	Poloměr otáčení [mm]	Teplota [°C]
10	308	5000	974	3	2,7	20

Tab. 15b: Parametry tribologického testu

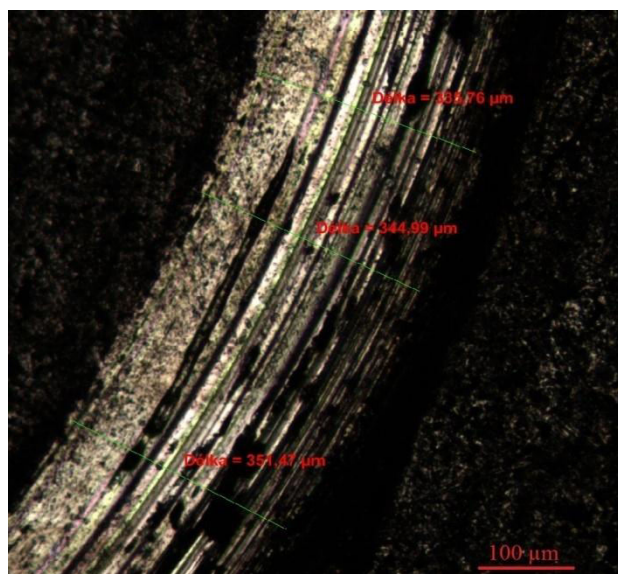
Vyhodnocení tribologických vlastností probíhalo na základě normy s označením ASTM G99. Na každém zástupci zkušební vzorku byly vytvořeny vždy dvě stopy. Poté byla na světelném mikroskopu Observer Zeiss Z1M měřena jejich šířka ve čtyřech lokalitách v intervalu 90° na opsané kružnici (obr. 39b), v každé lokalitě byla provedena tři měření šířky stopy (viz. obr. 38b). Cílem tohoto měření bylo zjištění míry úběru „V“ (16) materiálu a následné vyhodnocení velikosti koeficientu opotřebení „W“ (17) a vzájemné porovnání výsledků a zhodnocení vlivu CHTZ na míru opotřebení daného materiálu.

Tab. 16b: Naměřené a vypočtené hodnoty při tribologickém měření

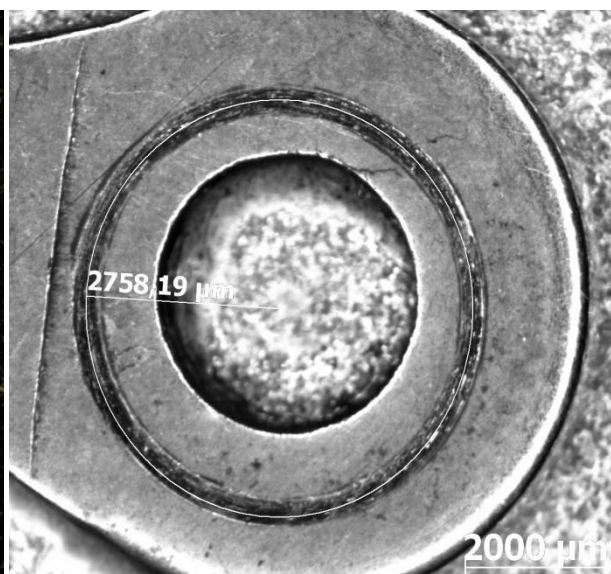
Vzorek	Stopa/číslo měření	Šířka naměřené stopy [μm]			Průměr lokality [μm]	Šířka stopy průměr [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
SHIMANO	1/1	392,89	399,96	389,68	394,18	420,563	415 ± 31
	1/2	405,73	411,17	418,10	411,67		
	1/3	386,45	381,21	405,45	391,04		
	1/4	470,75	489,58	495,79	485,37		
	2/1	440,33	431,91	441,84	438,03	410,373	
	2/2	395,36	403,71	421,71	406,93		
	2/3	389,20	374,76	385,33	383,10		
	2/4	402,55	409,99	427,79	413,44		
SUNRACE	1/1	362,58	382,16	355,89	366,88	377,434	401 ± 34
	1/2	361,17	367,85	355,06	361,36		
	1/3	399,08	412,71	390,08	400,62		
	1/4	371,62	374,49	396,52	380,88		
	2/1	423,93	420,29	427,03	423,75	426,117	
	2/2	491,54	474,27	447,02	470,94		
	2/3	425,18	419,47	429,58	424,74		
	2/4	389,06	389,77	376,26	385,03		
SHIMANO-nitridace	1/1	289,06	297,27	302,15	296,16	265,779	245 ± 26
	1/2	239,22	258,16	270,31	255,90		
	1/3	260,42	240,05	258,49	252,99		
	1/4	270,80	253,70	249,72	258,07		
	2/1	214,80	215,60	220,70	217,03	224,96	
	2/2	238,90	223,52	214,50	225,64		
	2/3	239,12	254,13	241,80	245,02		
	2/4	215,40	211,25	209,80	212,15		
SUNRACE-nitridace	1/1	207,81	211,98	213,28	211,02	214,822	208 ± 11
	1/2	210,96	202,68	198,32	203,99		
	1/3	213,26	222,85	209,27	215,13		
	1/4	210,39	239,44	237,62	229,15		
	2/1	202,15	186,89	186,45	191,83	201,259	
	2/2	198,14	203,25	191,43	197,61		

	2/3	199,04	219,06	205,70	207,93			
	2/4	207,80	201,50	213,70	207,67			
SHIMANO-cementace	1/1	199,51	204,42	190,05	197,99	199,026	205 ± 9	
	1/2	191,68	222,90	203,25	205,94			
	1/3	174,59	196,17	186,70	185,82			
	1/4	204,70	205,18	209,16	206,35			
	2/1	217,98	203,60	209,85	210,48			
	2/2	211,38	199,60	207,80	206,26			
	2/3	219,88	222,35	217,40	219,88	210,493		
	2/4	201,50	206,58	207,99	205,36			
SUNRACE-cementace	1/1	195,41	201,85	206,30	201,19			204,192
	1/2	218,70	211,89	204,35	211,65			
	1/3	185,60	197,16	203,87	195,54			
	1/4	205,79	211,35	207,88	208,34			
	2/1	205,70	216,39	201,36	207,82	205,833		
	2/2	216,70	201,60	203,98	207,43			
	2/3	204,89	209,78	211,30	208,66			
	2/4	196,50	193,25	208,55	199,43			

Obr. 38b: Měření šířky stopy v daném kvadrantu



Obr. 39b: Stopa po opotřebení a její poloměr



$$V = \frac{\pi * \text{poloměr otáčení} * (\text{šířka stopy})^3}{6 * \text{poloměr kuličky}} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (16)$$

$$W = \frac{V}{\text{celková dráha} * F} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} * \text{m}} \right] \quad (17)$$

Vzorek	Poloměr otáčení [mm]	Šířka stopy [mm]	Poloměr kuličky [mm]	Úběr [mm ³]	Celková dráha [m]	Zatížení F [N]	Koeficient opotřebení [mm ³ *10 ⁶ /Nm]
SHIMANO	2,7	0,415	3	0,0338	42,471	10	79,572
SUNRACE	2,7	0,402	3	0,0306	42,471	10	71,978
SHIMANO-nitridace	2,7	0,245	3	0,0070	42,471	10	16,391
SUNRACE-nitridace	2,7	0,208	3	0,0042	42,471	10	9,991
SHIMANO-cementace	2,7	0,205	3	0,0040	42,471	10	9,525
SUNRACE-cementace	2,7	0,205	3	0,0041	42,471	10	9,574

Tab. 17b: Koeficient opotřebení na základě uvedených parametrů

Výstupní hodnotou tribologického experimentu byla vypočítaná hodnota koeficientu opotřebení. U původních nezpracovaných vzorků byla naměřena šířka stopy přesahující hodnotu 0,4 mm. U vzorků po nitridaci a cementaci byla naměřena šířka stopy dosahující téměř poloviční hodnoty šířky stopy nezpracovaných vzorků. Z výsledku experimentu je jasně parný pozitivní vliv CHTZ na míru opotřebení daného povrchu.

6 Diskuze výsledků

První teoretická část této práce představuje rešerši o dané problematice tématu práce. Úvodní část shrnuje obecné poznatky o řetězových převodech, možnostech využití a konstrukčním řešení společně s pohledem do historie předchůdců dnes používaných válečkových řetězů. Poté se přistupuje k analýze současně nabízených řetězů jízdních kol na trhu s ohledem na povrchové úpravy, jimiž jsou řetězy opatřeny. Z této kapitoly vyplývá, že první, cenově dostupnější skupinu, tvořily v zásadě kovové povlaky a vrstvy vyráběné z větší části metodou galvanického pokovování. Další možnost ochrany povrchu základního materiálu řetězu představuje skupina fyzikálně – chemického povlakování, která je charakteristická relativní složitostí výroby, např. metodami CVD a PVD, a s tím souvisejícími náklady na výsledný produkt. V závěru této kapitoly byly srovnávány jednotlivé možnosti ochrany povrchu řetězových převodů jízdních kol z hlediska korozivzdornosti, odolnosti proti opotřebení, finanční dostupnosti, tvrdosti povrchové vrstvy a estetických vlastností. Jako nejlepší varianta s ohledem na uvedené vlastnosti vyšla vrstva TiN a následně povlak tvrdého chromování, který je cenově dostupnější. Před samotným výčtem jednotlivých možností využití CHTZ práce popisuje základní děje, reakce a zákonitosti, jako například mechanismy disociace, difuze, adsorpce, na základě nichž se samotný proces CHTZ uskutečňuje. Poté se

již přistupuje k teoretickému popisu jednotlivých metod a možností využití CHTZ. Závěr teoretické části práce je věnován charakteristice negativních vlivů pracovního prostředí, v němž se řetěz běžně vyskytuje. Jedná se především o chemické a mechanické vlivy – koroze, abraze, adheze a různé stavy napjatosti, tyto vlivy nepříznivě ovlivňují životnost a snižují provozuschopnost řetězového systému.

Cílem experimentální části práce bylo navrhnout vhodné CHTZ, které dodá řetězu jízdního kola potřebné vlastnosti, jež potlačí, nebo eliminují negativní vlivy pracovního prostředí řetězu jízdního kola, čímž by došlo k zvýšení životnosti a trvanlivosti řetězového systému. V zásadě se jednalo o vlastnosti jako zvýšení odolnosti vůči korozi a opotřebením, zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy a zvýšení odolnosti vůči cyklickému namáhání, to vše při zachování houževnatého jádra. K experimentální části byly vybrány dva hotové produkty nesoucí obchodní označení SHIMANO HG 50 a SUNRACE M 84. Nejprve bylo nutné tyto řetězy zpracovat do podoby zkušebních těles a vzorků, na kterých byly dále prováděny série pokusů a pozorování. V prvním stádiu experimentu byly vzorky analyzovány z hlediska mikrostruktury a chemického složení. V dalším kroku bylo nutné rozhodnout o vhodném CHTZ, které by zaručilo splnění předem stanovených cílů experimentu. Z hlediska stanovených podmínek a s ohledem na finanční náročnost a relativní dostupnost jednotlivých metod bylo rozhodnuto o vystavení vzorků tuhému cementačnímu prostředí a nitridaci v plynné a tuhé atmosféře. Po samotném procesu CHTZ bylo možno přistoupit k jednotlivým zkušebním metodám a porovnávání vzorků s nezpracovanými produkty s ohledem na předem definované vlastnosti.

U původních nezpracovaných vzorků SHIMANO a SUNRACE, ačkoliv se jedná o řetězy různých cenových kategorií, bylo pozorováno téměř identické složení z hlediska přítomnosti jednotlivých prvků a mikrostrukturních částí. Čepy obou vzorků vykazovaly martenzitickou kalenou strukturu, čemuž odpovídala naměřená tvrdost přesahující 750 HV1. Jemnozrnná sorbitická struktura byla zjištěna u obou podélných článků jednotlivých zástupců, kde byla naměřena tvrdost na hranici 450 HV1. Při zkoušce tahem byla zjišťována především hodnota maximální zatěžující síly, která u řetězu SUNRACE dosahovala hodnot 10 kN a u vzorků SHIMANO v původním stavu poté hodnot přesahujících 9 kN. Po samotném CHTZ metodou nitridace v plynné atmosféře (SUNRACE) a v tuhém prostředí (SHIMANO) a metodou cementace v prostředí sypkém (SUNRACE, SHIMANO) byly vzorky testovány a porovnány s vzorky nezpracovanými. U nitridovaných řetězů byla naměřena nižší hodnota maximální zatěžující síly oproti nezpracovanému kusu. Tento pokles lze připsat vystavení jednotlivých funkčních částí nitridačním teplotám, čímž došlo k popuštění a následnému vyloučení cementitu s feritem u čepů řetězu, následkem čehož byla naměřena tvrdost nepřesahující hodnotu 500 HV1. Tvrdost povrchové vrstvy podélných článků vzrostla v porovnání s původními produkty o několik desítek jednotek. Dále byla měřena hloubka cementační a nitridační vrstvy normovanou metodou. U nitridovaných vzorků byla naměřena hloubka vrstvy na příčném řezu článku SHIMANO 0,069 mm a u vzorku SUNRACE poté 0,085 mm. U podélných článků řetězů po cementaci byla zjištěna přítomnost cementační vrstvy v celém průřezu článku. Tento jev zapříčinil výrazné zkřehnutí a snížení houževnatosti, čemuž odpovídala u zkoušky tahem naměřená hodnota maximální zatěžující síly přibližně 3 kN. Zušlechťování řetězu po cementaci mělo za následek vznik martenzitických struktur společně s vyloučeným troostitem v celém průřezu čepu i článku. Této struktuře odpovídala vysoká naměřená tvrdost článku i čepu kolísající na hranici 800 HV1. Z hlediska tribologických vlastností došlo k výraznému zlepšení odolnosti vůči opotřebením u všech vzorků vystavených CHTZ. Šířka stopy po vnikacím tělísku se zmenšila téměř o polovinu u cementovaných i nitridovaných vzorků. Vzorky po cementaci a po nitridaci v plynu vykazovaly téměř konstantní výsledky s hodnotou koeficientu opotřebením pohybujícího se na

hranici $9 \text{ mm}^3 \cdot 10^6 / \text{Nm}$. U vzorků nitridovaných v prášku byla naměřena hodnota přibližně $16 \text{ mm}^3 \cdot 10^6 / \text{Nm}$ a u nezpracovaných vzorků poté hodnota koeficientu přesahující $70 \text{ mm}^3 \cdot 10^6 / \text{Nm}$. V poslední části experimentu byl zjišťován vliv CHTZ na korozní odolnost daného povrchu. Vzorky byly vystaveny působení solné mlhy v cyklické korozní komoře a následně vyhodnocovány na základě subjektivního vizuálního stanovení stupně změny vzhledu Ra, který definuje procentuální množství výskytu korozních produktů. U nezpracovaných vzorků a u vzorků po cementaci byl stanoven stupeň Ra 2, který odpovídá množství korozních produktů v intervalu od 10 do 25 %. U řetězu nitridovaného v plynu byl určen stupeň změny vzhledu Ra 4 (2,5 – 5%) a řetězu vystavenému tuhému nitridačnímu prostředí byl přiřazen stupeň Ra 3 (5 – 10%).

7 Závěr

Experimentální část této práce jednoznačně prokázala vliv CHTZ na zvýšení životnosti řetězu jízdního kola. Cílem experimentálního programu bylo dodat řetězu potřebné vlastnosti s využitím CHTZ, které eliminují nepříznivý dopad negativních vlivů pracovního prostředí na chod a provozuschopnost řetězového systému. Vlivem nitridace v tuhém i sytkém prostředí bylo pozorováno výrazné zvýšení korozní odolnosti a odolnosti vůči opotřebení. Nárůst tvrdosti povrchové vrstvy po nitridaci se pohyboval v řádech desítek jednotek HV1, tento ne příliš význačný přírůstek tvrdosti lze vysvětlit absencí potřebných legur v základním materiálu řetězu, jako například chrom, molybden, nikl nebo hliník. Vlivem nitridačních teplot a následného popouštění došlo k poklesu pevnosti v tahu. Tento pokles pevnosti v tahu nebyl z hlediska provozu natolik výrazný, neboť se řetězy vyrábějí značně naddimenzované. Metoda cementace splnila požadovaná kritéria na zvýšení odolnosti proti opotřebení a tvrdosti povrchové vrstvy, z hlediska korozivzdornosti nedošlo k výraznému zlepšení. Vzhledem k rozměrům jednotlivých článků řetězů je metoda cementace nevhodná, neboť i přes výrazně zkrácenou dobu procesu došlo k proniknutí cementační vrstvy do jádra článků, následkem čehož vykazovaly jednotlivé funkční části vysokou křehkost a téměř nulovou houževnatost. Z tohoto důvodu jsou poté řetězy v praxi téměř nepoužitelné.

Na základě výsledků experimentální části práce byl prokázán vliv nitridace jako vhodné ochrany vůči nepříznivým vlivům pracovního prostředí s cílem zvýšení životnosti řetězového systému. Nitridace v plynném prostředí dosahovala v porovnání s nitridací v tuhém prostředí lepších výsledků především z hlediska korozivzdornosti a odolnosti proti opotřebení. Z ekonomického hlediska a s přihlédnutím na množství zpracovávaných kusů lze nitridaci v plynném prostředí doporučit spíše pro velkosériovou výrobu, zatímco nitridace v prostředí tuhém se jeví jako vhodnější při výrobě malého počtu kusů. Pro dosažení optimálních vlastností výsledného povrchu je výhodné zvolit jako výchozí materiál normovanou nitridační ocel, která je svým složením vhodná k nitridaci a je u ní při dodržení správného technologického postupu zajištěno dosažení požadovaných vlastností.

8 Zdroje

- [1] KRAUS, Václav. Tepelné zpracování a slinování. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [2] KRAUS, Václav. Povrchy a jejich úpravy. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [3] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. Řada hutnické literatury.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [4] Řetěz. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98et%C4%9Bz>
- [5] Roller chain. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Roller_chain
- [6] Konstrukce řetězu. In: Contra [online]. Praha: CONTRA Praha s.r.o., c2008-2015 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: http://www.contra.cz/cz/retezovy_prevod/konstrukce_valeckoveho_retezu.html
- [7] Bicycle chain. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle_chain
- [8] Simpson chain. In: Štěrbá bike [online]. Praha: BI(CZ)YCLE COLLECTION, c2011-2012 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.sterba-bike.cz/item/simpson-lever-chain>
- [9] Bar-link chain. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bar-link_chain
- [10] Skip-link chain. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Skip-link_chain
- [11] PC-1130 Chain. In: SRAM [online]. Chicago, Illinois U.S.A.: SRAM LLC, c2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <https://www.sram.com/sram/mountain/products/pc-1130-chain>
- [12] Connex 9sG. In: Connex chain [online]. Hagen: Connex, c2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.connexchain.com/en/product/connex-9sg.html>
- [13] XX1 HARD CHROME CHAIN. In: SRAM [online]. Chicago, Illinois U.S.A.: SRAM LLC, c2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <https://www.sram.com/sram/mountain/products/xx1-hard-chrome-chain>
- [14] TAYA Chain. In: TAYA global [online]. Taiwan: Taya chain co., c2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://tayaglobal.imb2b.com/news/index.php?itemid=383>
- [15] X11SL Ti Nitride. In: KMC chain [online]. La Verne, CA 91750US: Kibo Software, Inc, c2000-2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://kmcchain.us/chain/x11sl-ti-nitride/>

- [16] Použití DLC povlaků. In: MM spektrum [online]. Praha: AG TOP TIP, c2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu.html>
- [17] X11 SL DLC. In: KMC chain [online]. La Verne, CA 91750US: Kibo Software, Inc, c2000-2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://kmcchain.us/chain/x11sl-dlcorange/>
- [18] SHIMANO XT CN - HG95. In: *JensonUSA* [online]. Utah: JensonUSA, c2016 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://www.jensonusa.com/Shimano-XT-CN-HG95-10-Speed-MTB-Chain>
- [19] SHIMANO HG 50. In: *Chain reaction cycles* [online]. Toronto: © Chain Reaction Cycles, 2011 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.chainreactioncycles.com/shimano-altus-hg50-6-7-8-speed-chain/rp-prod42377>
- [20] Řetěz SunRace M84. In: *Global sport* [online]. Pardubice: Global - Sport CZ, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.global-sport.cz/retez-sunrace-m84-8k-116cl-sedy>
- [21] *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. Olomouc, 2007 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [22] Nitridační a boridovací prášky. In: *AZ Prokal* [online]. Brno: SUTU, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://azprokal.cz/cs/prehled-sortimentu/chemicke-pripravky/nitridacni-a-boridovaci-prasky/>
- [23] *Nitridace konstrukčních a nástrojových ocelí* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2017-05-25]. Bakalářská práce. ZČU FST. Vedoucí práce Ing. Jiří Hájek, Ph.D.
- [24] *Zkoušky tvrdosti* [online]. Plzeň, 2010 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf. ZČU FST.
- [25] *NITRIDACE KONSTRUKČNÍCH OCELÍ* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [https://www.old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2016/_sbornik/PapersPdf/Bc/PEKOVIC_MICHAL_BC.pdf](https://www.old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2016/_sbornik/PapersPdf/Bc/PEKOVIC_MICHAL_BC.pdf). ZČU FST.
- [26] KRÍŽ, Antonín. *Tribologická analýza PIN-ON-DISC* [online]. ZČU v Plzni, 2004 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf. FST ZČU.